



## **PROGRAMA EQ-ANP**

**Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria  
do Petróleo e Gás Natural**



**Integração refino-petroquímica:  
Identificação de oportunidades para  
conservação e uso racional da água**

**João Pedro Calciscov Belmonte**

## **Projeto de Final de Curso**

**Orientadores**

**Prof. Eduardo Mach Queiroz, D.Sc.**

**Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.**

**Janeiro de 2015**

# INTEGRAÇÃO REFINO-PETROQUÍMICA: IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES PARA A CONSERVAÇÃO E USO RACIONAL DA ÁGUA

*João Pedro Calciscov Belmonte*

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente do Programa Escola de Química/Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria de Petróleo e Gás Natural, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenharia Química com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural – Tratamento de Resíduos e Meio Ambiente.

Aprovado por:

---

Carlos Augusto G. Perlingeiro, Ph.D.

---

Lidia Yokoyama, D.Sc.

---

Reinaldo Coelho Mirre, D. Sc.

Orientado por:

---

Eduardo Mach Queiroz, D.Sc.

---

Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D. Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Janeiro de 2015



Belmonte, João Pedro Calciscov.

Integração Refino-Petroquímica: identificação de oportunidades para conservação e uso racional da água / João Pedro Calciscov Belmonte. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2014.

vii, 105 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2014.

Orientadores: Eduardo Mach Queiroz e Fernando Luiz Pellegrini Pessoa.

1. Água. 2. Integração refino-petroquímica. 3. DFA. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Eduardo Mach Queiroz e Fernando Luiz Pellegrini Pessoa I. Título.

## AGRADECIMENTOS

Ao apoio financeiro da **Agência Nacional do Petróleo** – ANP – e da **Financiadora de Estudos e Projetos** – FINEP – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT, em particular ao **PRH 13**, da Escola de Química - Processamento, Gestão e Meio Ambiente na Indústria do Petróleo e Gás Natural.

Aos meus orientadores Eduardo Mach Queiroz e Fernando Luiz Pellegrini Pessoa pelo compartilhamento de conhecimentos e experiências, possibilitando a execução deste projeto.

A Reinaldo Coelho Mirre pela disponibilidade e paciência em todas as horas nas quais enfrentei algum obstáculo na realização deste trabalho. Sem o auxílio de Reinaldo e as discussões que tivemos acerca dos problemas enfrentados, o projeto não teria sido desenvolvido da maneira que foi. Portanto, dedico meu mais sincero agradecimento a este colega.

Aos professores da Escola de Química e a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para minha formação não só como engenheiro químico, mas como um cidadão também.

Aos meus pais por sempre terem feito de tudo para que eu tivesse a melhor educação possível. Sem eles, não teria atingido nem metade das minhas conquistas. Meus queridos pais, muito obrigado!

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico com ênfase na área de Petróleo e Gás Natural – Tratamento de Resíduos e Meio Ambiente.

## **INTEGRAÇÃO REFINO-PETROQUÍMICA: IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES PARA A CONSERVAÇÃO E USO RACIONAL DA ÁGUA**

João Pedro Calciscov Belmonte  
Janeiro, 2015

Orientadores: Prof. Eduardo Mach Queiroz, D.Sc.  
Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

O presente trabalho, a partir da aplicação da ferramenta Diagrama de Fontes de Água (DFA), buscou a redução do consumo de água e, conseqüentemente, menor geração de efluente, por meio da análise da viabilidade de reuso ou de regeneração com reuso deste recurso entre plantas de refino e petroquímica. A ferramenta foi aplicada a um estudo de caso composto por uma planta petroquímica e uma planta de refino apresentadas na literatura. Diversos cenários que apresentavam níveis cada vez maiores de integração foram gerados e os resultados obtidos foram comparados tanto com as configurações originais das plantas, quanto com os demais cenários. Todos os cenários propostos apresentaram reduções do consumo de água primária quando comparados com o consumo das plantas separadamente, atingindo-se reduções, no caso mais promissor, de até 74% aproximadamente. Além disso, o estudo apontou que conforme o nível de integração entra as plantas ia aumentando, os benefícios ambientais e econômicos também cresciam, ratificando a vantagem da integração.

Abstract of a Final Project presented to Escola de Química/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Engenheiro Químico with emphasis on Petroleum and Natural Gas – Environment and Waste Treatment.

## **INTEGRAÇÃO REFINO-PETROQUÍMICA: IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES PARA A CONSERVAÇÃO E USO RACIONAL DA ÁGUA**

João Pedro Calciscov Belmonte  
Janeiro, 2015

Supervisors: Prof. Eduardo Mach Queiroz, D.Sc.  
Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

This paper, through the application of the Water Source Diagram (WSD) tool, aimed at reducing the consumption of water and, consequently, the effluent generation, by analyzing the feasibility of reuse or regeneration with reuse of this resource between refining and petrochemical plants. The tool was applied to a case study consisting of a petrochemical and a refining plant presented in the literature. Several scenarios that presented increasing levels of integration were generated and the results were compared with both the original settings of the plants, as with the other scenarios. All proposed scenarios showed reductions of raw water consumption when compared to the consumption of the plants separately, reaching reductions, in the most promising case, up to approximately 74%. In addition, the study indicated that, as the level of integration among the plants was increasing, environmental and economical benefits also grew, confirming the advantage of integration.

# ÍNDICE

<b>Capítulo 1 – Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 – A Questão da Água.....	1
1.2 – Integração Refino-Petroquímica.....	5
1.3 – Motivação.....	8
1.4 – Objetivo.....	8
<b>Capítulo 2 – Diagrama de Fontes de Água.....</b>	<b>9</b>
2.1 – Aspectos Introdutórios.....	9
2.2 – Aspectos Teóricos.....	15
2.3 – Problema Exemplo.....	18
<b>Capítulo 3 – Estudo de Caso, Resultados e Discussão.....</b>	<b>31</b>
3.1 – Refinaria.....	31
3.2 – Petroquímica.....	36
3.3 – Cenários.....	38
3.3.1 – Cenário 1.....	41
3.3.2 – Cenário 2.....	46
3.3.3 – Cenário 3.....	48
3.3.4 – Cenário 4.....	48
3.3.5 – Cenário 5.....	52
3.3.6 – Cenário 6.....	56
3.4 – Análise Econômica.....	65
<b>Capítulo 4 – Conclusões.....</b>	<b>71</b>
<b>Capítulo 5 – Sugestões.....</b>	<b>73</b>
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>75</b>
<b>Apêndices.....</b>	<b>81</b>
A1 – Tutorial MINEA.....	81
A2 – DFA’s Finais.....	99





**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE  
JANEIRO CENTRO DE TECNOLOGIA  
ESCOLA DE QUÍMICA**



Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para conclusão do curso de Engenharia de Química.

**INTEGRAÇÃO REFINO-PETROQUÍMICA: IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES PARA A  
CONSERVAÇÃO E USO RACIONAL DA ÁGUA**

João Pedro Calciscov Belmonte (jpbelmonte@poli.ufrj.br)

Janeiro, 2015

Orientador Responsável: Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D. Sc.

Outros Orientadores: Prof. Eduardo Mach Queiroz, D.Sc.

O presente trabalho, a partir da aplicação da ferramenta Diagrama de Fontes de Água (DFA), buscou a redução do consumo de água e, conseqüentemente, menor geração de efluente, por meio da análise da viabilidade de reuso ou de regeneração com reuso deste recurso entre plantas de refino e petroquímica. A ferramenta foi aplicada a um estudo de caso composto por uma planta petroquímica e uma planta de refino apresentadas na literatura. Diversos cenários que apresentavam níveis cada vez maiores de integração foram gerados e os resultados obtidos foram comparados tanto com as configurações originais das plantas, quanto com os demais cenários. Todos os cenários propostos apresentaram reduções do consumo de água primária quando comparados com o consumo das plantas separadamente, atingindo-se reduções, no caso mais promissor, de até 74% aproximadamente. Além disso, o estudo apontou que conforme o nível de integração entra as plantas ia aumentando, os benefícios ambientais e econômicos também cresciam, ratificando a vantagem da integração.

# Capítulo 1

## Introdução

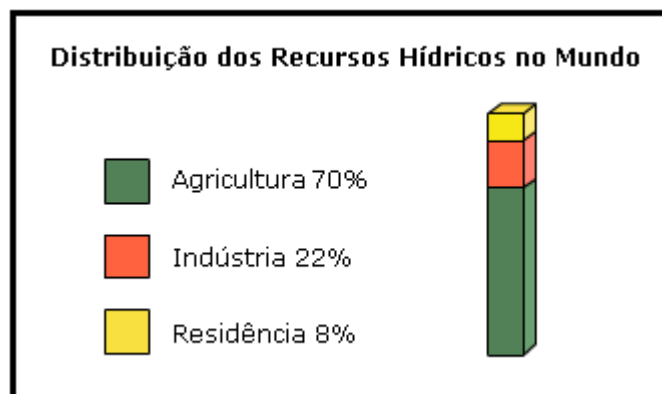
### 1.1 A Questão da Água

O homem, desde os primórdios da revolução industrial no século XVIII, tem vivenciado transformações cada vez mais intensas e corriqueiras. Neste cenário, os recursos naturais vêm sendo amplamente utilizados em prol da satisfação das necessidades humanas. O uso intenso destes recursos sem um planejamento sistêmico tem provocado modificações irreparáveis nos sistemas naturais e gerado grandes impactos ambientais. A negligência do ser humano em relação ao meio ambiente acarretou diversos danos ao meio ambiente, como a contaminação de solos e corpos hídricos, a deterioração de vegetações, a degradação progressiva da atmosfera terrestre e a escassez de recursos naturais (Scarlati, 2013). Dentre os problemas citados, a questão da contaminação dos corpos hídricos e a consequente diminuição da disponibilidade de água doce apresenta grande destaque no cenário mundial.

Em tempos passados, acreditava-se que os recursos hídricos eram fonte inesgotável, tamanha eram suas ofertas. Baseado nesta ideia, a água era utilizada de forma indiscriminada, sem nenhum controle, uma vez que o crescimento industrial e econômico justificavam as agressões ao meio ambiente. Neste contexto, indústrias emitiam, sem qualquer tratamento prévio, quantidades expressivas de rejeitos tóxicos provenientes de seus processos produtivos diretamente nas águas fluviais.

O avanço do capitalismo, trazendo consigo a ampliação das escalas produtivas e o surgimento de novas indústrias, e o crescimento exponencial da população global, aumentando a necessidade de se produzir alimentos, proporcionaram extremo acréscimo à demanda de água, uma vez que a indústria e a agropecuária são os setores da economia que mais fazem uso deste recurso natural, como pode ser visto na figura 1.1. Desta forma, o crescimento da população, aliado ao desenvolvimento industrial e tecnológico,

colocou em xeque a disponibilidade de água com qualidade para o ser humano.



**Figura 1.1** - Distribuição do consumo de água por setores no mundo  
**Fonte:** DAE, Departamento de Água e Esgoto de São Caetano do Sul

No final do século XX, as instituições sociais começaram a absorver os novos valores ambientalistas e, desta forma, as ações de redução dos impactos ambientais se tornaram práticas institucionalizadas. A questão da escassez da água doce se tornou uma problemática expressiva no mundo e, diante desta situação, diversas medidas passaram a ser tomadas, tanto por organizações governamentais, quanto por iniciativas privadas, a fim de contorná-la, ou, ao menos, amenizá-la. A preocupação com o meio ambiente e a conscientização de que era perfeitamente possível aliar desenvolvimento econômico e social com preservação ambiental despertou a sociedade para um estado embrionário de sustentabilidade.

De acordo com Marques (2008), essa nova era “verde”, baseada na preocupação com o desenvolvimento sustentável, levou ao surgimento de normas ambientais como a resolução nº. 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Esta norma dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Além disso, estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes nos corpos receptores, definindo condições limites para lançamento de efluentes nos corpos d’água. Atualmente, a legislação em vigor e as penalidades decorrentes do seu não cumprimento fazem com que o setor industrial desenvolva técnicas de monitoramento de seus efluentes. Durante muito tempo, a preocupação em caracterizar os efluentes gerados e em avaliar os danos ambientais causados pelo seu despejo não existiram.

Apesar de o desenvolvimento sustentável não conseguir acompanhar os passos largos do desenvolvimento econômico-industrial, uma semente do pensamento verde foi plantada na consciência da sociedade global.

A partir da criação da Lei Federal nº 9.433/1997, a água passou a ser considerada um “bem de domínio público, recurso natural limitado, dotado de valor econômico”. Plano de recursos hídricos, outorga de direito de usos das águas, cobrança pela sua utilização, bem como pelo despejo de efluentes em rios são alguns dos aspectos abordados pela lei. Além disso, em julho de 2000, com o intuito de gerenciar o plano nacional de recursos hídricos, criou-se a Agência Nacional de Águas (ANA). Dessa forma, atualmente no Brasil, além da cobrança que já era feita pelo tratamento e distribuição da água, cobra-se também pela sua captação, utilização e pela disposição de rejeitos despejados nos corpos hídricos.

A questão da contaminação dos corpos hídricos e o consequente comprometimento da disponibilidade de água doce apresenta grande notoriedade nos dias atuais. No Brasil, por conta da preocupação acerca desta problemática, a captação de água passou a ser cobrada como forma de instigar seu uso racional e reuso e também de gerar fundos para financiar os programas do plano de recursos hídricos nas bacias hidrográficas. Na Europa, a cobrança pelo uso de recursos hídricos já é feita há, pelo menos, 30 anos. A criação de leis que obrigam as indústrias a avaliar os impactos gerados por suas atividades sobre a região e populações residentes nas adjacências, bem como a pagar pela descarga tóxica proveniente de seus processos produtivos fizeram com que a poluição representasse uma preocupação dentro do cenário industrial (Marques, 2008).

Segundo Mirre (2007), informações fornecidas no “Relatório Mundial de Desenvolvimento de Água”, divulgado em março de 2006, às vésperas do 4º Fórum Mundial de Água realizado no México, relatam que 20% da população mundial, algo em torno de 1,1 bilhão de pessoas, não tem acesso à água potável e que cerca de 40%, o equivalente a 2,6 bilhões, não se beneficiam de saneamento básico. A ineficiência de ações políticas, as alterações ambientais e a escassez de recursos são apontadas como principais responsáveis por

estes números chocantes. Face ao problema, a gestão dos recursos hídricos vem assumindo papel de destaque no cenário atual, estimulando a criação de estratégias que buscam a preservação, o reuso e a utilização racional do recurso água, contrapondo a ideia errônea de infinita disponibilidade de épocas passadas. O Brasil vem dando os primeiros passos na longa caminhada pela valoração dos recursos hídricos. Por meio de imposições legislativas que compelem o seu uso racional, uma política de gerenciamento mais efetiva no que tange ao controle da qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos no país passou a ser realizada.

A degradação da qualidade do ambiente, em geral, e da água, em particular, devido, principalmente, ao lançamento de esgotos não tratados nos rios que atravessam as cidades, atinge níveis nunca imaginados no Brasil e no mundo. A ONU estima que mais da metade dos rios do mundo está poluída pelos despejos dos esgotos domésticos, efluentes industriais e agrotóxicos. Estima, ainda, que nove de cada dez litros de esgoto nos países de terceiro mundo são lançados nos rios sem nenhum tratamento prévio (Rebouças, 2003). Diante desta questão do mau gerenciamento dos recursos hídricos, aliado à sua demanda exorbitante, atualmente, o que se observa é a sua escassez. Em muitos países, a água não está disponível para toda a população; ela se tornou um recurso valioso e, por conta deste fato, uma série de estratégias têm sido realizadas visando-se o seu gerenciamento apropriado. É neste contexto que as técnicas de reuso e conservação da mesma surgem como importante ferramenta para a minimização da sua utilização, assim como da emissão de efluentes.

## 1.2 Integração Refino-Petroquímica

A indústria do refino e a petroquímica são pilares de suma importância que compõem o parque industrial de um país. Ambas desempenham papéis relevantes na produção de *commodities* e geração de energia, tendo, desta forma, destaque na atividade industrial mundial (Bestetti, 2009).

As semelhanças existentes entre as atividades realizadas por estas indústrias implica que haja oportunidades sinérgicas a serem aproveitadas caso sejam adotadas estratégias de atuação em conjunto e que podem oferecer ganhos a ambos os setores (Bestetti, 2009).

Em uma indústria naturalmente integrada como a petrolífera, a estrutura e o comportamento de cada um dos setores são influentes nos demais (Tavares, 2005). Para a indústria petroquímica e seu elo a montante na cadeia petrolífera, o refino, não é diferente. Este é diretamente impactado por aquela, de forma que está sempre em desenvolvimento, a fim de acompanhar as novas tendências e demandas da indústria petroquímica que está em alta por conta do desenvolvimento das potências asiáticas.

A coordenação dos diferentes componentes dessas atividades resulta numa integração entre elas que pode traduzir-se em aumento de competitividade e no resultado global de suas operações (Aznalin, Akhmetov, Balyanov, 2009). Diante do potencial proveniente da integração dessas indústrias, atualmente, observa-se uma tendência de alinhamento de suas operações, impulsionado por seu potencial sinérgico, de forma a se aproveitar este potencial.

De acordo com o relatório “Benefits of Refinery/Petrochemical Integration”, divulgado em setembro de 2007 pela Nexant Chem Systems, a integração entre operações de refinarias e petroquímicas tem provado ser uma solução viável e mutuamente benéfica, agregando valor aos seus produtos finais sem comprometer suas atividades. O desenvolvimento da indústria demonstra, na prática, a crescente importância da integração, uma vez que o alinhamento das atividades do refino e da petroquímica é característica fundamental de várias das maiores plantas de etileno em desenvolvimento. A

coordenação de suas atividades aumenta a competitividade de seus produtos, além de ser pré-requisito para qualquer nova instalação baseada em nafta e matérias-primas mais pesadas. As oportunidades de ganho são observadas desde o aproveitamento de matérias-primas e produtos, passando pela racionalização da estrutura do escoamento destas correntes até a atuação empresarial conjunta.

Segundo Bestetti(2009), os principais benefícios apresentados pela integração refino-petroquímica são as listadas abaixo:

- a) Garantia de fornecimento de matérias-primas com qualidade adequada à atividade petroquímica;
- b) Agregação de valor a subprodutos do refino e da petroquímica;
- c) Aproveitamento dos petroquímicos básicos gerados na refinaria;
- d) Aproveitamento das correntes de hidrogênio geradas na petroquímica nos processos de hidrotreamento da refinaria;
- e) Utilização conjunta e complementar de recursos energéticos, bem como de utilidades e da infraestrutura existentes, além de serviços auxiliares;
- f) Melhor aproveitamento da capacidade produtiva da refinaria em períodos afetados pela sazonalidade da demanda do mercado de combustíveis.

Em consentimento com os benefícios citados por Bestetti (2009), o relatório divulgado pela Nexant afirma que a integração entre estas indústrias garante fornecimento de matéria-prima à indústria petroquímica e possibilita suplantar a questão da sazonalidade que envolve a demanda do mercado de combustíveis. Além disso, ainda em concordância com Bestetti (2009), o relatório aponta o fato da indústria do refino ser grande geradora de utilidades, viabilizando compartilhamento com a indústria petroquímica e justificando as suas proximidades físicas no geral. Outro ponto importante citado é a agregação de valor aos produtos das indústrias: correntes de subproduto de baixo valor agregado de uma instalação são aproveitados como insumo na outra e vice-versa.

Em 2005, o BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento) emitiu um relatório intitulado “Indústria Petroquímica Brasileira: Situação Atual e Perspectivas”, onde um estudo acerca do panorama nacional da indústria

petroquímica foi realizado. Segundo o relatório, a competitividade deste setor, sobretudo das empresas de primeira geração (responsáveis pela produção de petroquímicos básicos, a partir da transformação por processos químicos de correntes petrolíferas como nafta, gás natural, etano, etc.), é fortemente dependente da disponibilidade de matérias-primas. Além disso, o relatório prevê a manutenção dos preços da nafta num patamar mais alto, em consequência de um crescimento do preço relativo da nafta em relação ao preço do petróleo, ainda que haja uma redução do preço do mesmo no futuro. Portanto, a integração refino petroquímica é tida como solução definitiva para a questão da disponibilidade de matéria-prima de qualidade com preço competitivo para a indústria petroquímica brasileira. Neste contexto surgiu a ideia de se construir novos complexos integrados, desde o refino até a segunda geração, que utilizem o petróleo nacional (pesado) como matéria-prima. Ainda que em fase de especulação, foi o início da era dos complexos integrados, trazendo consigo a ideia da criação do COMPERJ (Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro).

Embora os benefícios sejam evidentes e seja considerada uma forte estratégia de atuação no segmento, a integração refino-petroquímica não tem sido implementada de forma intensa. Os esforços na direção de consolidar esta ideia na cultura empresarial do ramo petroleiro são relativamente recentes. Segundo Bestetti (2009), os motivos que explicam o porquê desta ideia não estar sendo aplicada em pleno vapor são os listados abaixo:

- a) Foco dos refinadores no mercado de combustíveis, o que demanda grandes volumes de produto;
- b) Diferentes abordagens na valoração de produtos e subprodutos do refino e da petroquímica;
- c) Foco na rentabilidade da empresa ao invés da operação (refino/petroquímica) – falta de visão de integração da cadeia;
- d) Visões distintas do mercado futuro;
- e) Visões empresariais distintas e questões de confiança mútua.



A transparência na discussão de custos, vantagens, fragilidades, assim como estratégias individuais e conjuntas, sem que a integração acarrete no desfavorecimento do negócio de umas das partes envolvidas é o principal exercício a ser praticado na luta da consolidação desta ideia na cultura empresarial do ramo do petróleo.

### **1.3 Motivação**

A questão dos recursos hídricos vem apresentando importante notoriedade no cenário atual. Além disso, os benefícios alcançados a partir da integração refino-petroquímica têm motivado pesquisas nesta direção. Muitos estudos que visam à minimização do consumo de água e geração de efluentes em plantas separadas de refinarias e petroquímicas já foram realizados. Portanto, diante da nova tendência de integração, impulsionado por seu potencial sinérgico, surgiu a ideia de aliar a importante problemática da escassez dos recursos hídricos a esta nova perspectiva de alinhamento das atividades das indústrias estudadas.

Além da questão técnica, este projeto é motivado pelo desejo/dever de ser humano em preservar a água, um dos nossos bens mais preciosos e fundamental para a vida na Terra, permitindo que gerações futuras desfrutem de um planeta ecologicamente correto.

### **1.4 Objetivo**

Diante do potencial proveniente da integração dessas indústrias, alinhado a importância do melhor gerenciamento dos recursos hídricos nos dias atuais, este trabalho visa propor o gerenciamento de água em uma estrutura integrada de refino-petroquímica. Dessa forma, o objetivo do trabalho é, a partir da aplicação da ferramenta Diagrama de Fontes de Água (DFA), reduzir o consumo de água e, conseqüentemente, a geração de efluentes, por meio da análise da viabilidade de reuso ou de regeneração com reuso deste recurso entre plantas de refino e petroquímica.

## **Capítulo 2**

### **Diagrama de Fontes de Água – DFA**

O segundo capítulo deste trabalho tem por objetivo familiarizar o leitor com a ferramenta empregada na busca pela diminuição do consumo de água na estrutura integrada refino-petroquímica, isto é, a metodologia DFA. Uma vez que o estudo de caso realizado no terceiro capítulo se trata de um problema uni-contaminante, esta breve introdução acerca desta ferramenta irá se ater a esta limitação. A fim de melhor ilustrar o procedimento que se deve realizar ao se recorrer à ferramenta em questão, a resolução de um problema exemplo de redução do consumo de água por meio da metodologia DFA será comentada.

#### **2.1 Aspectos Introdutórios**

O Diagrama de Fontes de Água consiste em um procedimento algorítmico heurístico caracterizado pelo mecanismo tipo fonte-sumidouro. A ferramenta é capaz de fornecer, simultaneamente, o consumo mínimo de água primária e a rede de transferência de massa correspondente; sua grande vantagem está na sua eficiência e na simplicidade dos cálculos envolvidos, que podem ser realizados manualmente. A ferramenta aqui apresentada surgiu como uma evolução dos trabalhos de Castro e al. (1999) e Wang e Smith (1994a). Baseado nestes trabalhos, Gomes (2002) propôs o Diagrama de Fontes de Água - DFA (Water Source Diagram - WSD). Em seu trabalho, a autora (Gomes, 2002) considerou a presença de um e de múltiplos contaminantes e contemplou, ainda, situações com múltiplas fontes de água, operações com perda de água, regeneração com reuso e regeneração com reciclo.

Dando continuidade aos estudos que envolvem a aplicação do DFA, Delgado (2003) estendeu a metodologia apresentada por Gomes (2002) para situações de regeneração diferenciada, isto é, regeneração específica de um determinado contaminante, em sistemas com múltiplos contaminantes aplicadas a quatro casos industriais. Além disso, algumas restrições como operações com perda ou ganho de vazão, operações com vazão fixa e

múltiplas fontes externas de água foram consideradas. Por meio da aplicação do procedimento, a autora obteve os fluxogramas com redução da vazão para o tratamento de efluentes e consumo de água.

Um ano depois, Stelling (2004) complementou a metodologia DFA por meio da incorporação da variável temperatura à mesma. Dessa forma, além da transferência de massa, o trabalho do autor levou em consideração a troca térmica entre as correntes tratadas. Objetivando o menor custo operacional do sistema, Stelling (2004), a partir da ferramenta DFA, propôs uma rede integrada mássica e energeticamente.

Em 2007, uma série de trabalhos envolvendo a ferramenta DFA foi compartilhada com a comunidade científica. Mirre (2007) aplicou o método na definição da meta de consumo mínimo de água de processo para o caso de uma refinaria de petróleo. Em seu trabalho, diversos cenários propostos por meio de reuso e/ou reciclo de correntes foram gerados, incluindo os processos regenerativos. Além disso, o autor avaliou a importância e a influência de uma estação de tratamento de efluentes como restauradora da qualidade não somente do efluente final, como também das correntes intermediárias de processo. As alternativas apresentadas por Mirre (2007) se mostraram bastante promissoras, levando a configurações de reaproveitamento de correntes com cerca de 20% de redução nos custos totais.

Immich *et al.* (2007) demonstraram a eficiência do DFA em processos batelada. O método, originalmente concebido para processos contínuos em regime permanente, foi adaptado pelos autores para processos em que a variável tempo deve ser levada em consideração, uma vez que o regime é não permanente. A similaridade dos resultados obtidos no estudo de caso de uma planta de defensivos agrícolas com os apresentados pela literatura evidenciou a força da ferramenta DFA em virtude da sua simplicidade de aplicação.

Ainda no mesmo ano, Santos (2007), atendendo à sugestão proveniente do trabalho de Gomes (2002) para inclusão de procedimento automático que permitisse agilizar os cálculos envolvidos na aplicação da metodologia DFA, desenvolveu um programa computacional em base Microsoft Excel® chamado MINEA (Minimização de Efluentes Aquosos).

No ano seguinte, Marques (2008) aplicou o DFA em estudos de caso de quatro tipos de indústrias: papel e celulose, alimentos (sucos cítricos), têxtil e petroquímica. Em seu trabalho, a autora analisou as opções de máximo reuso, de regeneração com reuso e de regeneração com reciclo e, em todos os casos, as reduções de consumo de água primária e de custos foram significativas.

Melo (2008), diante do significativo impacto ambiental causado pela indústria têxtil em virtude do seu considerável potencial poluidor, buscou reduzir o volume de efluentes por meio do reuso direto ou de processos de purificação sem alterar a qualidade do produto final. Baseada em dados de quatro indústrias catarinenses do ramo, a autora desenvolveu uma metodologia baseada na ferramenta DFA, que visava à redução do consumo de água industrial, por meio de uma estratégia de reuso dos efluentes provenientes da lavanderia têxtil. O modelo proposto para a simulação do lavador contínuo mostrou-se eficaz na racionalização de água de processos. Para visualização dos resultados das simulações, implementou-se um programa em ambiente MatLab.

Na literatura, pode-se encontrar uma série de estudos que objetivam a minimização do consumo de recursos hídricos, bem como da geração de efluentes baseados em técnicas de programação matemática, principalmente quando se tratam de sistemas multi-componentes. Devido à grande complexidade do problema, caracterizado pela natureza combinatorial do mesmo, por vezes, a implementação matemática destes problemas requer um esforço muito grande. As metodologias baseadas na análise pinch e em regras heurísticas, apesar de não garantirem a obtenção do ponto ótimo, quando associadas com um desenvolvimento de regras evolutivas, caminham em direção a este ponto. Apesar da não garantia do ótimo, a proximidade obtida de forma muito menos complicada é vista com bons olhos e a facilidade de aplicação, bem como a simplicidade dos cálculos envolvidos nestas metodologias são características que constituem uma vantagem frente à programação matemática.

A ferramenta DFA apresenta grande eficácia na orientação e na tomada de decisões relacionadas à busca por estratégias de gerenciamento dos recursos hídricos que se traduzam na minimização do consumo do mesmo em processos reais, por meio do reuso com, ou sem, processos regenerativos. Entretanto, apesar da ferramenta não garantir um ótimo global, suas respostas podem ser utilizadas como ponto de partida para soluções mais elaboradas.

Levando em consideração esta ideia, Xavier (2009) constatou que a associação do DFA com programas de otimização se trata de uma boa estratégia na busca por pontos de mínimo custo e de soluções refinadas. O autor aplicou a ferramenta DFA em três estudos de caso com o intuito de minimizar a geração de efluentes, bem como o custo total da rede. Para aprimorar os resultados obtidos por meio da metodologia DFA, Xavier (2009) utilizou estes resultados como “chute inicial” para um algoritmo de programação não linear implementado no software GAMS, levando a soluções mais elaboradas.

Souza *et al.* (2009), em estudo no qual se aplicou o DFA com intuito de se otimizar a rede de águas de processos de refino de petróleo, reportaram os resultados obtidos por Xavier (2009). Os autores aplicaram a ferramenta em um estudo de caso multi-contaminantes onde se considerou casos de máximo reuso, tratamento centralizado (“*end-of-pipe*”) e regeneração diferenciada. As vazões e os custos obtidos como resultados pelos autores foram comparados com os dados extraídos do exemplo estudado.

Ainda em 2009, Kumaraprasad e Muthukumar acoplaram o método DFA a modelos de rede/sistemas de distribuição de efluentes, gerando um novo procedimento denominado WAMEN (*Water Allocation and Mass Exchange Network*), que reúne as características de ambas ferramentas. O modelo proposto pelos autores é composto por redes de distribuição e tratamento de água e de transferência de massa. O objetivo da proposta, assim como o do DFA, é reduzir custos e melhor gerenciar os recursos hídricos. Para consolidar a ferramenta, os autores aplicaram o WAMEN em alguns exemplo multi-contaminantes da literatura e obtiveram reduções do consumo de água limpa acima de 70%.

Em 2010, Karthick *et al.* fizeram uso do procedimento WAMEN proposto por Kumaraprasad e Muthukumar (2009) com o intuito de sintetizar redes de transferência de massa e de distribuição de efluentes para melhor gerenciar os recursos hídricos. Os autores decomporam o problema da síntese da rede em duas etapas principais: (1) síntese de uma proposta de rede inicial com ferramentas gráficas simples e representação da mesma no espaço de estados; (2) considerando a representação de espaço de estados como um ponto de partida, otimização da rede por meio de um problema de programação não linear inteira mista, MINLP. A metodologia proposta foi utilizada para geração de uma rede de águas residuais em conjunto com uma rede de transferência de massa para um processo de refinaria de petróleo, a fim de demonstrar o poder da ferramenta.

Ainda em 2010, diante do potencial poluidor considerável, com elevada carga orgânica, cor acentuada e compostos químicos tóxicos que têm um significativo impacto sobre o meio ambiente, Ulson de Souza *et al.* buscaram reduzir o volume de efluentes gerados da indústria têxtil através da reutilização direta ou por meio de processos de purificação sem afetar a qualidade do produto final. Para isto, os autores fizeram uso de metodologia baseada na ferramenta DFA e aplicaram-na em um estudo de caso, obtendo redução de 64% do volume de efluente gerado em relação ao cenário original. Este trabalho é derivado do estudo de Melo (2008).

No ano de 2011, Calixto apresentou o conceito macro-estrutural *Total Site*. Em processos que envolvem grandes números de operações e contaminantes, a estratégia de deslocamento de intervalo de concentrações por meio de relações de transferência de massa em função de contaminantes e operações referência pode não ser eficaz e acabar violando os limites de concentração de entrada e saída de uma determinada operação. Com o intuito de solucionar este problema, o autor apresentou uma nova abordagem que consiste na divisão do problema, ou superestrutura, em subestruturas compostas por um determinado conjunto de operações. Cada subestrutura tem seu contaminante e sua operação referência selecionados e, em seguida, o DFA é aplicado em cada sub-bloco do problema. Ao final da aplicação da

ferramenta em todas as partes que integram o mesmo, o resultado é migrado para a superestrutura.

Recentemente, Gomes *et al.* (2013) publicaram um artigo acerca da metodologia DFA para processos que envolvem multi-contaminantes. O trabalho apresenta uma extensão da ferramenta DFA a processos que envolvem múltiplos contaminantes. A metodologia apresentada sintetiza redes de transferência de massa com foco na reutilização de água, objetivando a minimização do consumo deste recurso. A ferramenta foi aplicada a diferentes exemplos encontrados na literatura e os resultados obtidos foram confrontados, ratificando a boa performance do DFA na busca por estratégias que consistam na minimização do consumo de água.

Este tópico do capítulo segundo do presente trabalho teve por objetivo apresentar um breve histórico da ferramenta utilizada pelo mesmo na busca pela minimização do consumo de água primária na estrutura integrada refino-petroquímica em estudo de caso apresentado no capítulo seguinte. Apesar de não terem sido compilados todos os estudos que envolvem a metodologia DFA, trabalhos importantes que contribuíram para divulgação e consolidação da ferramenta foram apresentados.

## 2.2 Aspectos Teóricos

A metodologia DFA segue um conjunto de regras heurísticas cujo objetivo é atender a transferência de massa de todas as operações consumidoras de água envolvidas no problema em cada intervalo de concentração definido. A ideia é que esta carga mássica seja transferida, preferencialmente, com a reutilização de efluentes provenientes de outras operações. Seguindo-se esta conduta, reduz-se o consumo de água limpa e a geração de efluentes por parte da indústria estudada.

No algoritmo DFA, os equipamentos em que se dão as operações consumidoras de água no problema em questão são tratados como equipamentos de transferência de massa. Nestas operações, a água é considerada o agente extrator responsável pela remoção dos contaminantes presentes nas correntes de processo. A figura 2.1, ilustra a situação que acabou de ser descrita.

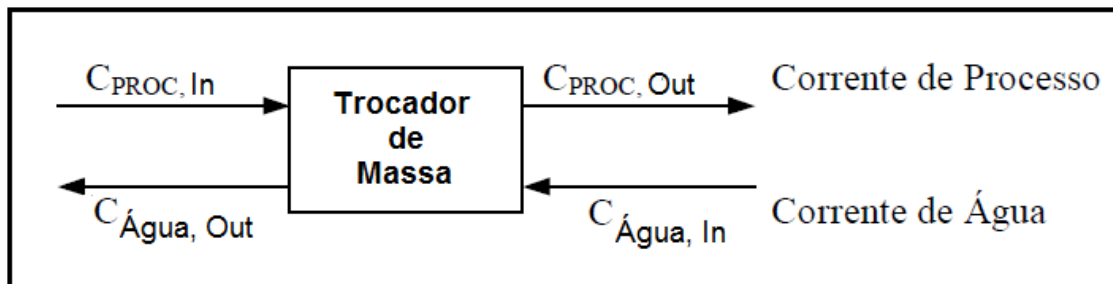


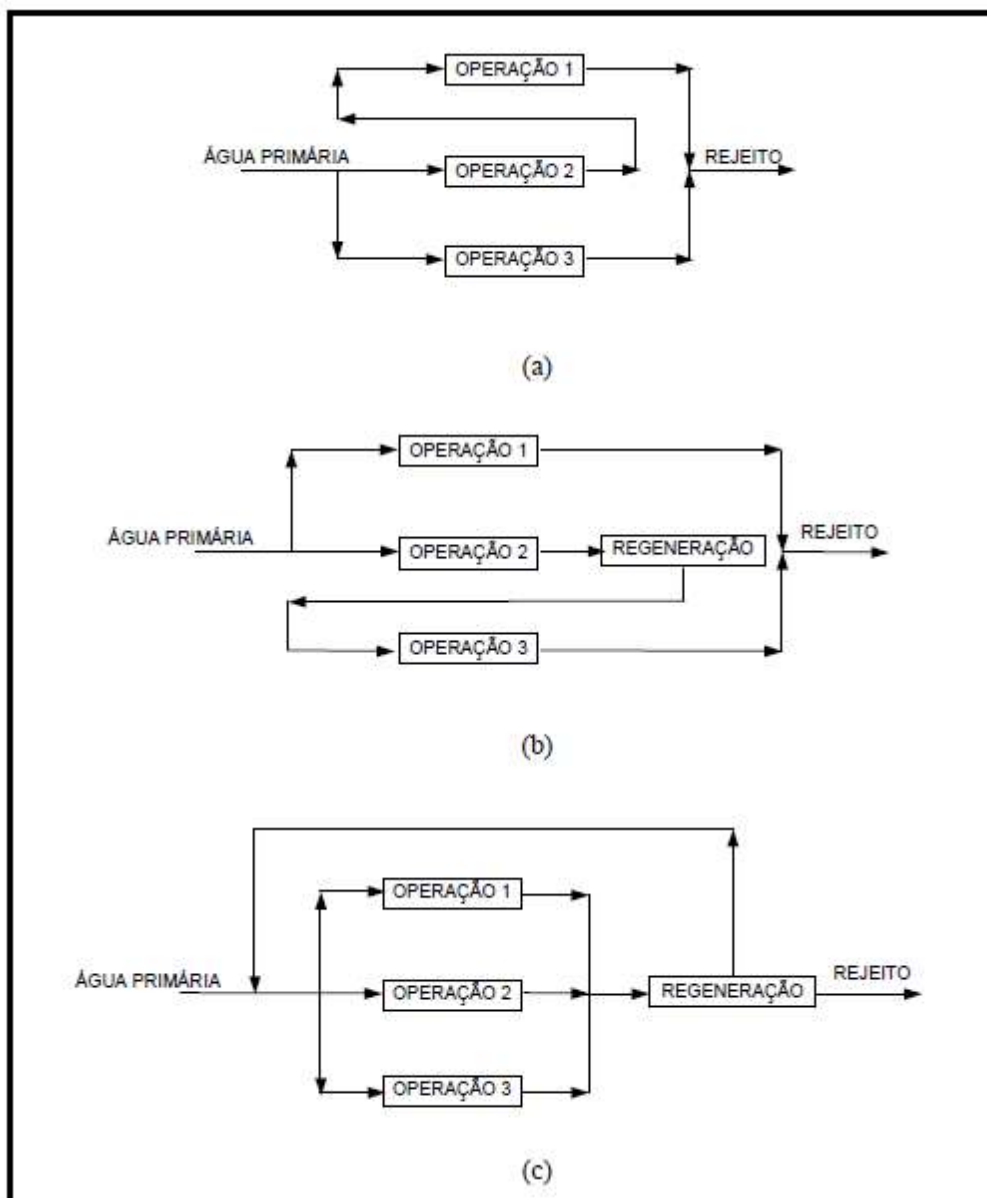
Figura 2.1 - Equipamento de Transferência de Massa

Neste fenômeno de transferência de massa, o agente extrator, água, entra com uma determinada carga de contaminantes e deixa o equipamento com carga maior em virtude da remoção dos contaminantes presentes na corrente de processo.

O objetivo é garantir a remoção dos contaminantes presentes nas correntes de processo com o menor consumo de água primária possível e gerando-se menores quantidades de efluentes. A fim de se atender a este objetivo, sem que se façam grandes mudanças na estrutura do processo, três soluções se mostram viáveis: o reuso, a regeneração com reuso e a regeneração com reciclo.



- Reuso: o efluente de uma operação, desde que dentro de níveis aceitáveis de concentração de contaminantes, é reutilizado em outra sem nenhuma espécie de tratamento prévio (figura 2.2.a);
- Regeneração com reuso: o efluente de uma ou mais operações são submetidos a uma etapa de tratamento de forma a viabilizar o reuso nas demais operações (figura 2.2.b);
- Regeneração com reciclo: o efluente de uma determinada operação é submetido a tratamento para remoção de contaminantes, possibilitando a sua reutilização em outras operações e também na própria operação (figura 2.2.c).



**Figura 2.2** - Minimização do consumo de água primária via (a) reuso; (b) regeneração com reuso; (c) regeneração com reciclo (Gomes, 2002)

É importante ter consciência da diferença entre a regeneração com reuso e a regeneração com reciclo em casos em que mais de um contaminante é considerado. O reciclo pode causar o acúmulo de contaminantes indesejáveis não removidos na etapa de regeneração, o que não ocorre no caso de reuso.

No algoritmo DFA, a taxa de transferência de massa dos contaminantes é considerada constante e obedece a uma lei de transferência de massa nas operações. A carga transferida entre as correntes ( $\Delta M$ ) pode ser determinada através do balanço de massa em relação ao contaminante, conforme a equação 2.1:

$$\Delta M(\text{g/h}) = f(\text{t/h}) \cdot [C_{\text{out}}(\text{ppm}) - C_{\text{in}}(\text{ppm})]$$

Equação 2.1

Onde  $\Delta M$  é a carga mássica transferida,  $f$  é a vazão de água utilizada e  $\Delta C$ , isto é, a diferença entre  $C_{\text{out}}$  e  $C_{\text{in}}$  é a variação da concentração da água utilizada.

Considerando-se um  $\Delta M$  constante, pode-se concluir, ao se analisar a equação 2.1, que a maximização do  $\Delta C$  leva a mínima vazão de água necessária para garantir a transferência de massa da operação. Desta forma, ao se trabalhar com a maior concentração de saída permitida, isto é,  $C_{\text{out,lim}}$ , garante-se uma maior diferença de concentrações, diminuindo o consumo de água. Estas concentrações limites são definidas por fatores como: solubilidade máxima do contaminante, limite de corrosão, limite de deposição, entre outros. Além disso, é importante notar também que quanto mais livre de contaminantes estiver a corrente de água que alimenta o equipamento, maior será o  $\Delta C$ . Entretanto, como discutido, a ideia é minimizar o consumo de água primária e a geração de efluentes. Sendo assim, torna-se extremamente interessante se trabalhar com a corrente de água mais “suja” que pode alimentar a operação, pois desta forma, garante-se que não se está consumindo água primária e nem se gerando mais efluentes. A concentração limite de entrada das operações,  $C_{\text{in,lim}}$ , é o que rege o reuso do efluente de determinada operação nas demais. Portanto, o algoritmo DFA busca trabalhar com os limites de concentração de entrada e saída das operações que consomem água.

A fim de proporcionar um maior entendimento acerca da metodologia DFA, um exemplo retirado do trabalho de Scarlati (2013), analisado sob a ótica do máximo reuso, será resolvido passo a passo. O estudo de caso apresentado no capítulo terceiro deste trabalho consiste num problema de máximo reuso com restrições de vazão fixa, múltiplas fontes e de vazão variável. Desta forma, ao longo da resolução do problema proposto, comentários acerca das restrições citadas serão realizados, com exceção da última que é detalhada no capítulo terceiro.

Uma vez que este trabalho não tem por objetivo desenvolver a expertise do leitor em relação à ferramenta utilizada pelo mesmo, não serão apresentados problemas sob as óticas de regeneração com reuso e regeneração com reciclo, bem como problemas que envolvam multi-contaminantes. Para maiores detalhes acerca do procedimento DFA, pode-se consultar o trabalho de Gomes et al. (2007), onde cada restrição (vazão fixa, múltiplas fontes de água, ganhos e perdas de vazão) é demonstrada separadamente para o caso de um contaminante. No caso de múltiplos contaminantes, pode-se checar o trabalho de Gomes et al. (2013).

### 2.3 Problema Exemplo

A tabela 2.1 reúne informações de dados limites das operações consumidoras de água no problema exemplo tratado.

**Tabela 2.1** - Dados limites das operações consumidoras de água (Scarlati, 2013)

<b>Operação</b>	<b>Massa de contaminante (kg/h)</b>	<b><math>C_{IN, max}</math> (ppm)</b>	<b><math>C_{OUT, max}</math> (ppm)</b>	<b>Vazão limite (t/h)</b>
1	6	0	150	40
2	14	100	800	20
3	24	700	1000	80

Antes de se dar início a resolução do problema por meio da metodologia DFA, a apresentação de alguns dados extras é imprescindível para o entendimento por completo do mesmo. Trata-se de um problema uni-contaminante, com uma única fonte externa de água a zero ppm e cujo consumo de água primária pela rede original é de 81,5 t/h, como pode ser visto na figura 2.3.

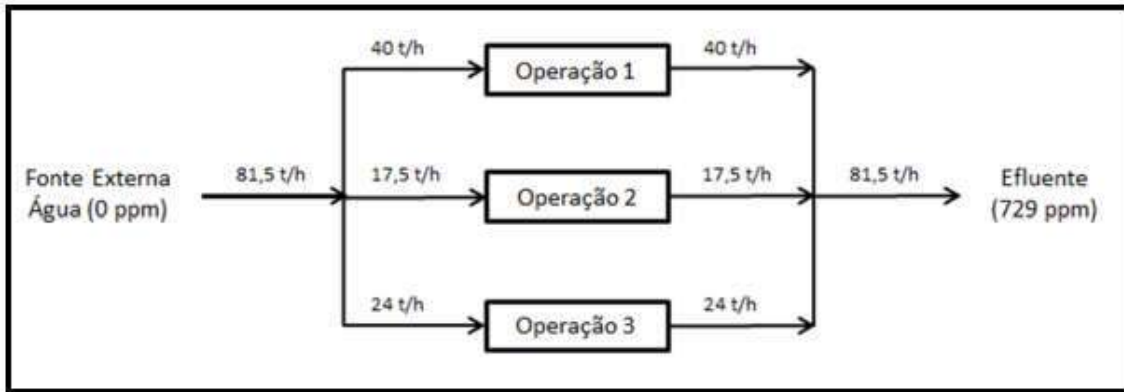


Figura 2.3 - Rede de transferência de massa original (Scarlati, 2013)

### Resolução

**Etapa 1:** construção do DFA e seus intervalos de concentração.

Os intervalos de concentração que devem constar no DFA são determinados pelas concentrações de entrada e saída das operações consumidoras de água. Além disso, as concentrações de fonte externas de água disponíveis na planta também devem ser consideradas na construção do diagrama. Graficamente, os intervalos são definidos pelas concentrações, que são representadas por linhas verticais, como pode ser visto na figura 2.4.

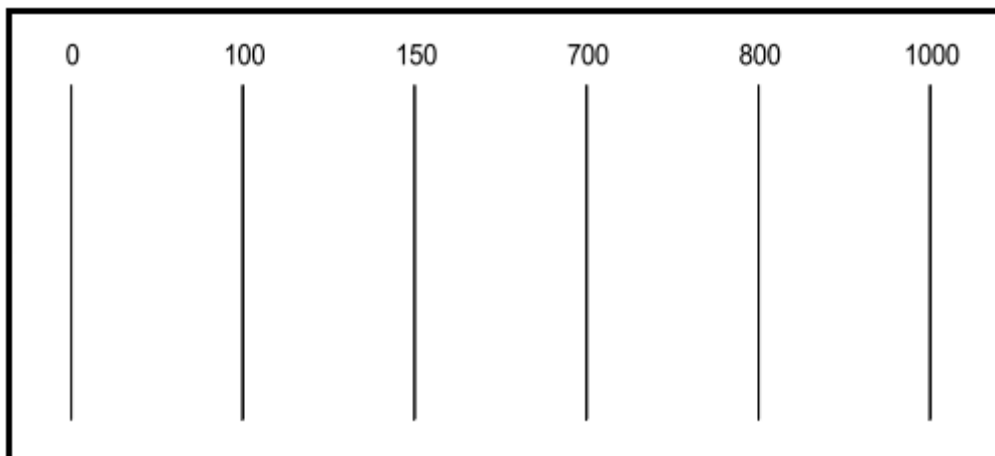


Figura 2.4 - Representação inicial do DFA

Caso o problema apresentasse a restrição de múltiplas fontes de água, como outra fonte externa a 25 ppm por exemplo, na representação inicial do DFA deveria constar mais uma linha vertical referente a esta concentração entre as linha 0 e 100.

## Etapa 2: identificação das operações no DFA

As operações são representadas por setas transversais às linhas de concentração. A seta de uma determinada operação se origina em seu valor de concentração de entrada e termina em seu valor de concentração de saída. A fim de facilitar o reconhecimento da operação, cada seta é identificada com o número da operação que ela representa.

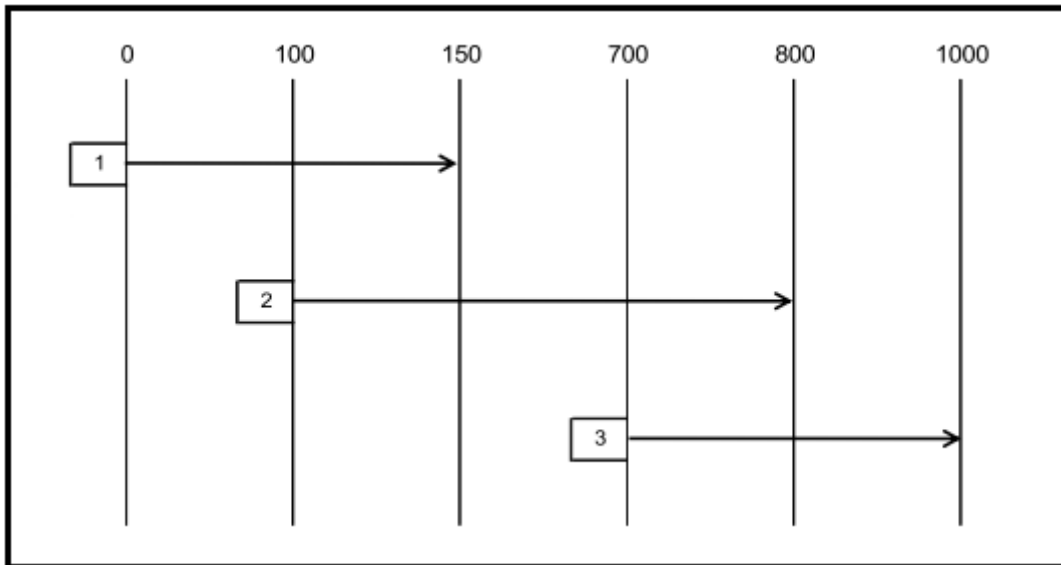


Figura 2.5 - Identificação das operações no DFA

Recomenda-se, a fim de se facilitar a utilização do método, que as operações sejam alocadas em ordem crescente de concentração de entrada. Dessa forma, caso a operação 3, por exemplo, apresentasse concentração de entrada igual a 75 ppm, a linha que representa 700 ppm não existiria, uma linha representando aquela concentração deveria constar no diagrama e a operação 3 seria alocada entre as operações 1 e 2.

## Etapa 3: determinação da quantidade de massa transferida por intervalo

O procedimento para se determinar a quantidade de massa transferida por intervalo será exibido apenas para a operação 1. Para as demais operações, o cálculo a ser feito é, rigorosamente, o mesmo, levando-se em consideração os respectivos dados referentes a cada uma delas.

Para se determinar esta quantidade, deve-se recorrer aos dados limites contidos na tabela de oportunidades (tabela 2.1) e à equação do balanço de

massa (equação 2.1). Uma vez determinados o valor das massas trocadas por intervalo, os mesmos são representados no DFA, expressos em Kg/h, em cima das setas da operação e no canto direito do intervalo, como pode ser visto na figura 2.6.

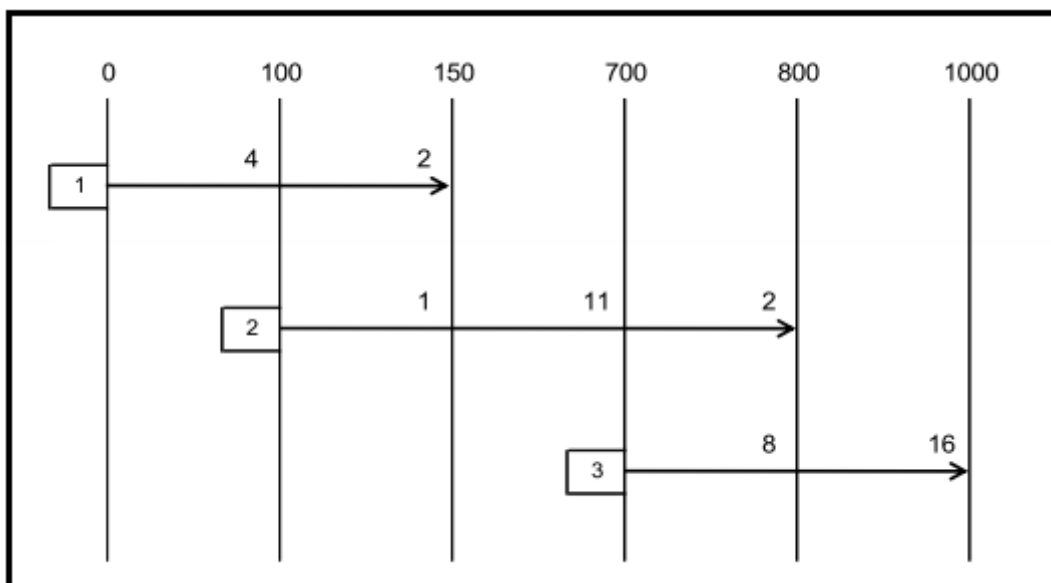
- Operação 1 – Intervalo de 0 a 100 ppm:

$$\Delta m = \frac{40 \cdot (100 - 0)}{1000} = 4 \text{ kg / h}$$

- Operação 1 – Intervalo de 100 a 150 ppm:

$$\Delta m = \frac{40 \cdot (150 - 100)}{1000} = 2 \text{ kg / h}$$

É interessante estar atento ao fato de que a soma das massas trocadas por intervalo deve ser igual à massa total transferida na operação. Dessa forma, caso o somatório seja diferente do valor exibido na tabela de oportunidades, certamente alguma parte do procedimento foi realizada de maneira equivocada, ou o dado de massa total transferida contido na tabela de oportunidades está errado.



**Figura 2.6** - Representação da quantidade de massa transferida por intervalo

#### **Etapa 4:** determinação do consumo de fontes de água

Uma vez definidos os intervalos de concentração, alocadas as operações e determinadas as quantidades de massa trocadas por intervalo, o diagrama se encontra preparado para ser utilizado como ferramenta de alocação de fontes de água. Nesta etapa, algumas regras que direcionam a tomada de decisão de quais fontes de água alocar para cada intervalo de uma dada operação devem ser seguidas.

- Regra 1: a prioridade de uma fonte interna é sempre alimentar o intervalo seguinte da mesma operação;
- Regra 2: somente usar fonte externa quando não houver fonte interna disponível;
- Regra 3: priorizar o uso da fonte de água com maior concentração de contaminantes;
- Regra 4: para uma dada operação, a fonte utilizada em certo intervalo deve assimilar a quantidade de massa a ser transferida neste intervalo.

As fontes de água de cada intervalo devem ser alocadas de acordo com as regras supracitadas e a vazão que alimenta cada um deles é determinada por meio do quociente entre a massa a ser transferida,  $\Delta M$ , e o  $\Delta C$  (diferença entre as concentrações de saída do intervalo e da qualidade da água que o alimenta), equação 2.2.

$$f(t/h) = \frac{1000 \cdot \Delta m(\text{kg/h})}{(C_{out}(\text{ppm}) - C_{in}(\text{ppm}))}$$

**Equação 2.2**

O procedimento a ser realizado será apresentado em forma sequencial e ilustrado nas figuras 2.7 a 2.13. Nas imagens apresentadas, as fontes alocadas para cada intervalo são identificadas por  $f_e$  (fonte externa), ou por  $R_n$  (reuso  $n$ ), onde  $n$  varia de 1 a 3. Além disso, os valores de vazão determinados para absorver a massa a ser transferida em um determinado intervalo são representados acima das setas no canto esquerdo do respectivo intervalo.

- Operação 1 – Intervalo de 0 a 100 ppm:

Para este intervalo, a única fonte de água disponível é a fonte externa. A vazão de água a 0ppm requerida para garantir a transferência de 4 kg/h de contaminante é determinada pela equação 2.2, conforme mostrado abaixo:

$$f(t/h) = \frac{1000 \cdot 4}{(100 - 0)} = 40 \text{ t/h}$$

- Operação 1 – Intervalo de 100 a 150 ppm:

Para o segundo intervalo da operação 1, as fontes disponíveis são as 40 t/h a 100 ppm provenientes do intervalo primeiro e a fonte externa. Seguindo-se a recomendação da regra 1, tem-se que a prioridade é a utilização da fonte interna. O cálculo da vazão necessária desta fonte é apresentado abaixo:

$$f(t/h) = \frac{1000 \cdot 2}{(150 - 100)} = 40 \text{ t/h}$$

Após determinadas as fontes de água da primeira operação, o DFA parcial para o problema proposto ficou com a cara apresentada na figura 2.7

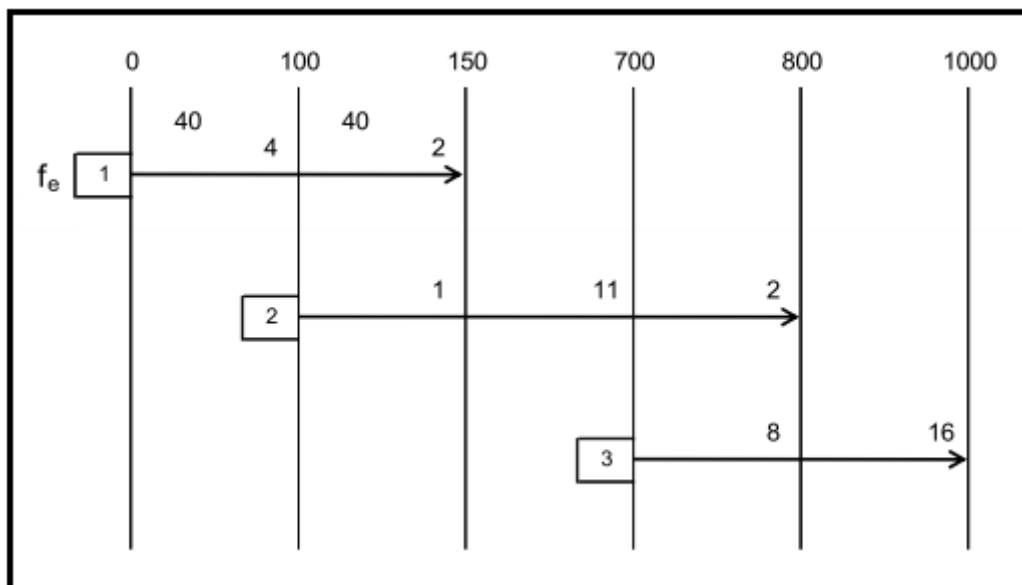


Figura 2.7 - DFA parcial (operação 1)



- Operação 2 – Intervalo de 100 a 150 ppm:

Analisando-se o DFA parcial, figura 2.7, percebe-se que as fontes de água disponíveis são a externa e a interna proveniente da operação 1 (40 t/h a 150 ppm). Entretanto, apenas a externa pode alimentar o intervalo em questão, uma vez que este requer concentração de entrada de até 100 ppm e a fonte interna disponível tem qualidade pior do que esta (150 ppm). A quantidade de água necessária para garantir a absorção de toda massa do intervalo é determinada a seguir.

$$f(t/h) = \frac{1000 \cdot 1}{(150 - 0)} = 6,67 \text{ t/h}$$

Alocando-se esta fonte de água para o intervalo em questão, o DFA apresenta o aspecto exibido na figura 2.8.

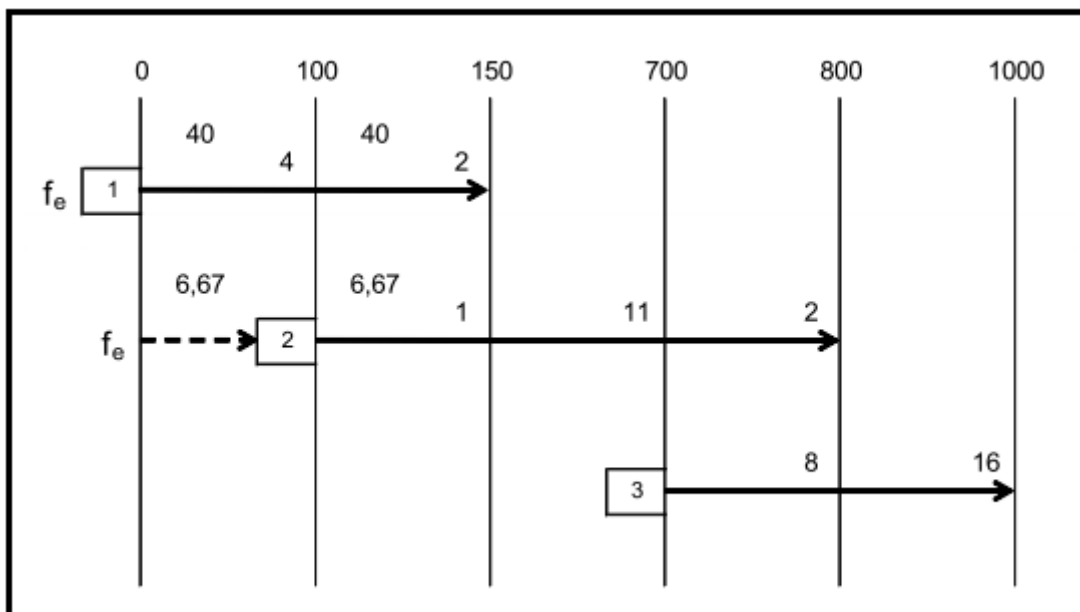


Figura 2.8 - DFA parcial (operação 2 – intervalo de 100 a 150 ppm)

- Operação 2 – Intervalo de 150 a 700 ppm:

Fontes disponíveis: 6,67 t/h a 150 ppm provenientes da própria operação, 40 t/h a 150 ppm provindas da operação 1 e fonte externa. Mais uma vez, seguindo-se a recomendação da regra 1, a prioridade é utilizar as 6,67 t/h provenientes da própria operação.

O cálculo da vazão requisitada desta fonte é apresentado a seguir:

$$f(t/h) = \frac{1000 \cdot 11}{(700 - 150)} = 20 \text{ t/h}$$

As 6,67 t/h não são suficientes para garantir a transferência de massa do intervalo estudado. Dessa forma, o efluente da operação 1 será parcialmente reutilizado (discriminado como R1 na figura) neste intervalo da operação 2 para que se obtenha a vazão requisitada pelo mesmo e o DFA parcial é exibido na figura 2.9. Caso a operação 1 não fosse capaz de complementar a vazão requisitada pelo segundo intervalo da operação 2, dever-se-ia recorrer à fonte externa de forma a garantir que toda carga de contaminante fosse removida.

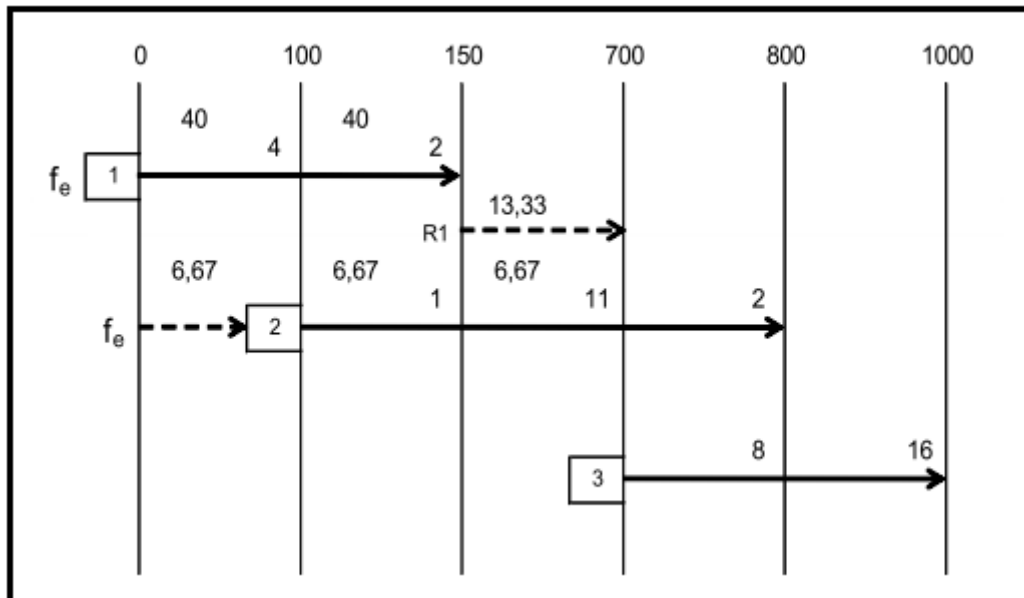
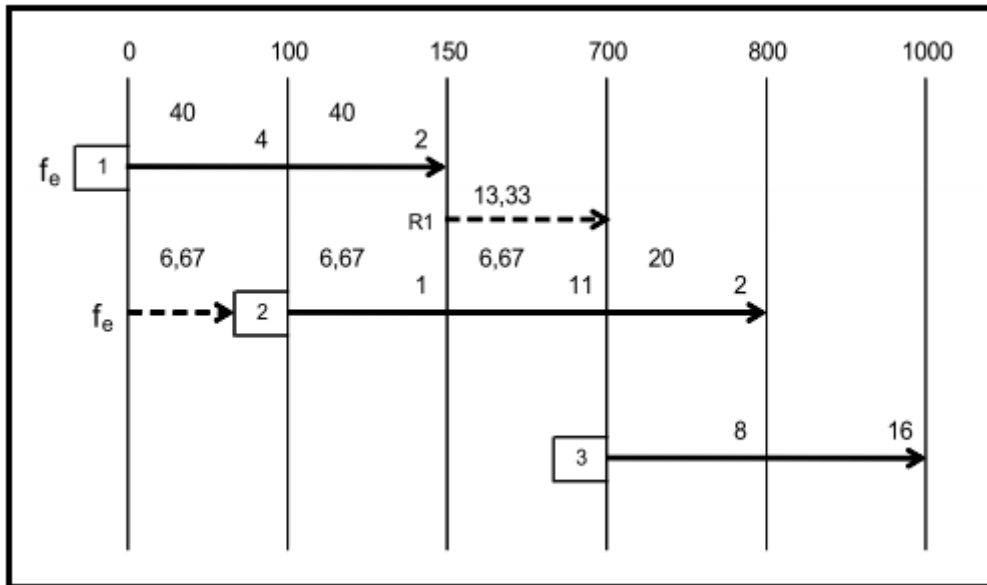


Figura 2.9 - DFA parcial (operação 2 – intervalo de 150 a 700ppm)

- Operação 2 – Intervalo de 700 a 800 ppm:

O último intervalo da operação 2 tem como fontes as 20 t/h a 700 ppm provenientes da própria operação, as 26,67 t/h a 150 ppm remanescentes da operação 1 e a fonte externa. Seguindo-se a regra 1, a prioridade de utilização é das 20 t/h provindas da própria operação. A vazão necessária é calculada e o DFA parcial incluindo as operações 1 e 2 é exibido na figura 2.10.

$$f(t/h) = \frac{1000 \cdot 2}{(800 - 700)} = 20 \text{ t/h}$$



**Figura 2.10** - DFA parcial (operações 1 e 2)

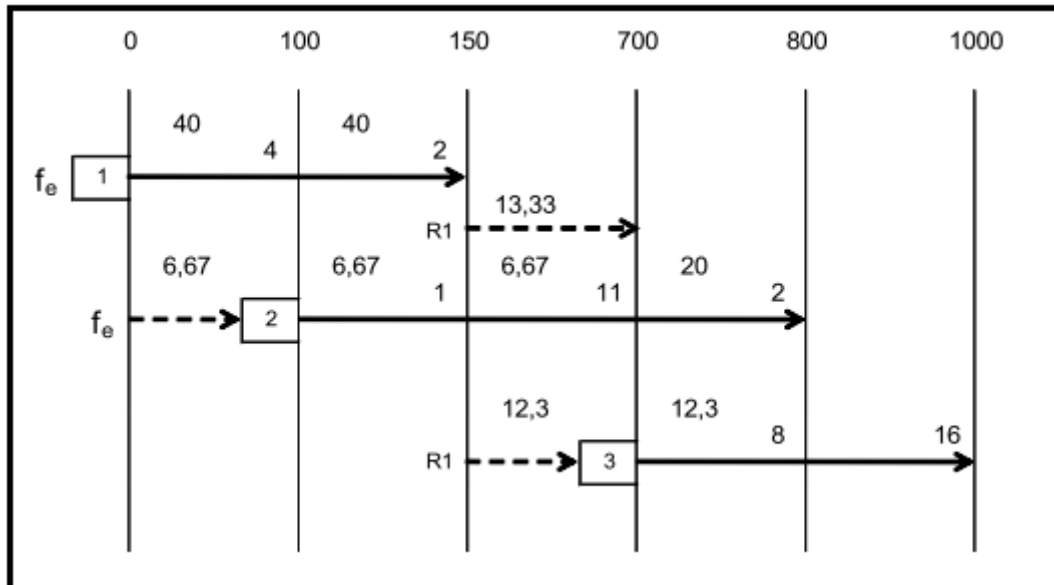
- Operação 3 – Intervalo de 700 a 800 ppm:

As fontes de água disponíveis para o primeiro intervalo da operação 3 são as 26,67 t/h a 150 ppm remanescentes da operação 1, as 20 t/h a 800 ppm provenientes da operação 2 e a fonte externa. Seguindo-se a recomendação da regra 2, tem-se que as fontes internas são prioridades. Uma vez que o intervalo estudado requer uma fonte de água com concentração até 700 ppm, embora o efluente da operação 2 seja menos nobre que o efluente remanescente de 1, ele não pode alimentar a operação 3 neste intervalo, como sugere a regra terceira. Dessa forma, a prioridade de utilização neste caso é do efluente 1 e a vazão necessária é calculada a seguir.

$$f(t/h) = \frac{1000 \cdot 8}{(800 - 150)} = 12,3 t/h$$

A vazão do efluente remanescente da operação 1 demandada pelo intervalo estudado foi menor do que a disponibilidade. Sendo assim, a necessidade de se recorrer à fonte externa para garantir a remoção completa da carga de contaminantes não existiu.

O resultado parcial do DFA até o presente momento é apresentado na figura 2.11.



**Figura 2.11-** DFA parcial (operação 3 – intervalo de 700a 800 ppm)

- Operação 3 – Intervalo de 800 a 1000 ppm:

Fontes disponíveis: 12,3 t/h a 800 ppm provenientes da própria operação, 14,37 t/h a 150 ppm remanescentes da operação 1, 20 t/h a 800 ppm provenientes da operação 2 e fonte externa. Seguindo-se a recomendação da regra 1, tem-se que a fonte proveniente da própria operação é de uso prioritário.

$$f(t/h) = \frac{1000 \cdot 16}{(1000 - 800)} = 80 t/h$$

Das 80 t/h a 800 ppm requisitadas pelo intervalo em estudo, tem-se que apenas 32,3 t/h (12,3 t/h provenientes da própria operação 3 e as 20 t/h provenientes da operação 2) estão disponíveis, o que representa 40,375% do total. Uma vez que a lei de transferência de massa que rege o problema é linear, tem-se que apenas 40,375% da massa total foi removida. Dessa forma, ainda é necessário que se removam 9,54 kg/h de contaminantes. Seguindo-se a recomendação da regra 2, a utilização do efluente remanescente da operação 1 é prioridade neste caso e o cálculo da vazão necessária para remover a massa restante é exibido a seguir.

$$f(t/h) = \frac{1000 \cdot 9,54}{(1000 - 150)} = 11,2 t/h$$

Alocando-se estas fontes de água no intervalo em questão, chega-se ao DFA final exibido na figura 2.12. A partir da interpretação do DFA final, pode-se realizar a quinta e última etapa do procedimento, que é a construção da rede de transferência de massa.

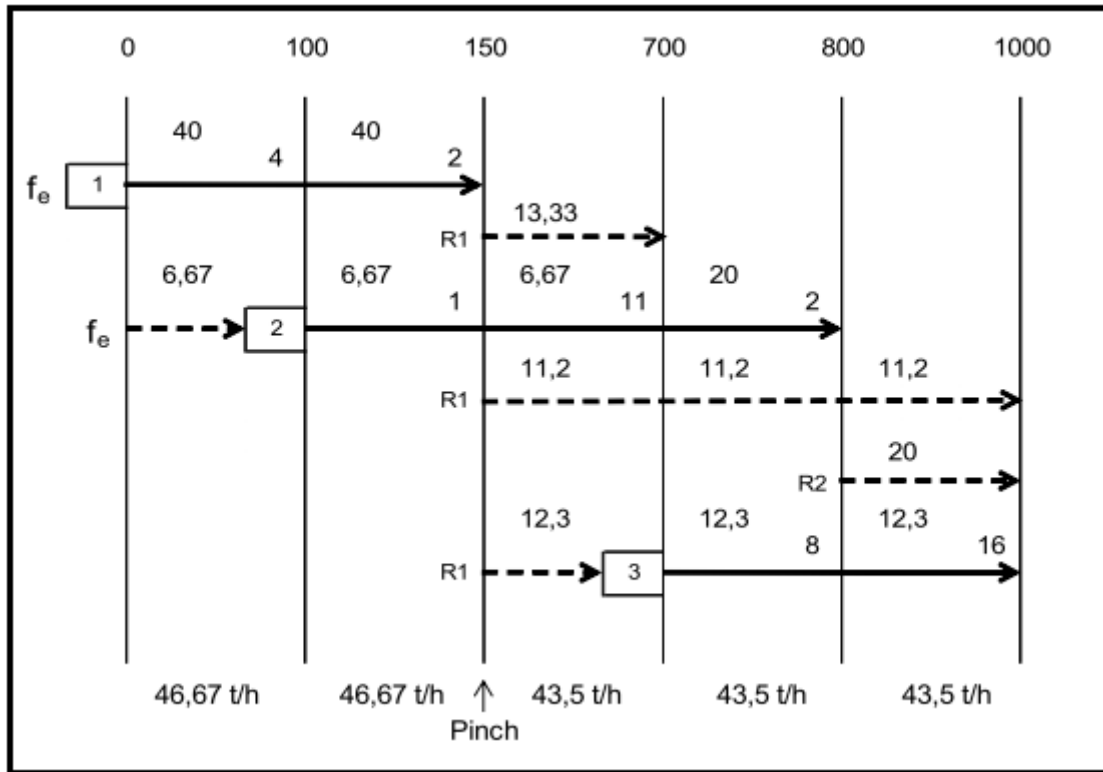


Figura 2.12 - DFA final

Ao longo da resolução, nenhuma oportunidade para comentar a restrição de vazão fixa surgiu. Portanto, uma pequena hipótese será feita em cima do problema tratado, a fim de ilustrar este tipo de restrição. Supondo-se que a operação 2 fosse uma operação que necessitasse uma vazão fixa dada pela vazão limite apresentada na tabela de oportunidades (20 t/h) e que a operação 1 apresentasse uma concentração de saída igual a 800 ppm, o reuso do efluente desta operação naquela não seria possível. Dessa forma, a operação 2 teria de consumir água proveniente da fonte externa, que por ser de qualidade mais nobre do que 100 ppm, removeria a carga de contaminantes com vazão inferior a 20 t/h, como pode ser visto no cálculo apresentado abaixo.

$$f(t/h) = \frac{1000 \cdot 14}{(800 - 0)} = 17,5 \text{ t/h}$$

De forma a se obter as 20 t/h a 100 ppm, faz-se um reciclo local de 2,5 t/h. Fazendo-se o balanço de massa no misturador que precede a entrada da operação 2, pode-se perceber que esta estratégia faz com que a vazão requisitada na concentração demandada seja conseguida. A mistura de 2,5 t/h de uma corrente com concentração 800 ppm com uma 17,5 t/h de uma corrente livre de contaminantes gera uma corrente de 20 t/h com concentração igual a 100 ppm.

Pode-se observar na figura 2.12 a sinalização da concentração pinch. O ponto pinch é determinado pela concentração na qual o somatório das vazões envolvidas em um determinado intervalo de concentração diminui quando comparado com o intervalo seguinte. No caso, pode-se perceber que a soma das vazões apresenta uma queda de 3,17 t/h quando se passa do intervalo 100 – 150 ppm para o intervalo 150 – 700 ppm.

Em projetos que envolvem a melhoria da gestão dos recursos hídricos, a etapa de determinação das concentrações de contaminantes é, sem dúvidas, a mais onerosa. A concentração pinch é caracterizada somente pelas operações que se dão anteriormente a ela e por aquelas que a cruzam. Dessa forma, o ponto pinch é essencial para se determinar as correntes que necessitam que suas concentrações máxima de entrada e saída sejam analisadas com maior precisão por exercerem influência na sua caracterização. Portanto, as concentrações de entrada e saída de operações que se iniciam depois da concentração pinch, como a 3 da figura 2.12, por exemplo, não necessitam ser analisadas com tanta acurácia, podendo serem utilizados métodos mais simples e baratos para tal.

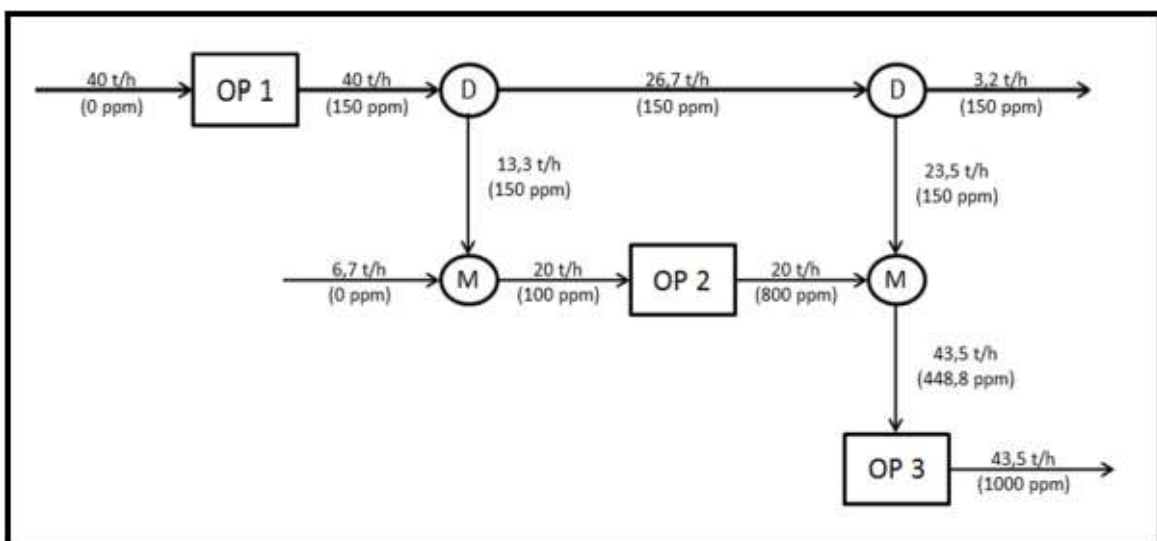
O consumo de água primária da rede de transferência de massa é dado pelo somatório das vazões do intervalo finalizado pela concentração pinch. No caso da figura 2.12, o intervalo em questão é 100 – 150 ppm. A otimização de qualquer operação que se inicie após o ponto pinch não irá alterar o consumo de água primária da rede. Dessa forma, a concentração pinch também tem a importante função de orientar quais operações valem a pena ter seu consumo de água otimizado. Um extrator, por exemplo, apresenta um mínimo consumo de água necessário para remover a carga de contaminantes requerida. Caso a

água que alimenta o equipamento apresente concentração superior ao ponto pinch, não é interessante investir num projeto que busque diminuir o consumo de água por este equipamento, pois o consumo de água primária da rede como um todo não será alterado.

Para finalizar, em projetos em que se estuda a possibilidade de regeneração com reciclo, a concentração pinch determina a máxima concentração do efluente do regenerador. Uma vez que apenas as modificações realizadas abaixo do pinch alteram o consumo de água primária da rede, é necessário que o efluente do regenerador apresente concentração inferior à concentração pinch, de forma a justificar a etapa de regeneração.

**Etapa 5:** representação da Rede de Transferência de Massa (RTM)

A interpretação do DFA final permite a construção da rede de transferência de massa e o resultado é exibido na figura 2.13. Nesta etapa, é importante ter em mente que operações com mais de uma fonte de água e que sejam distintas, necessariamente apresentam um misturador de correntes que precede sua entrada, sendo necessário realizar o balanço de massa no misturador para averiguar uma possível violação da concentração de entrada da mesma. De maneira análoga, as operações cujos efluentes são reusados em mais de uma operação apresentam, necessariamente, um divisor de correntes em sua saída.



**Figura 2.13** - Rede de Transferência de Massa

# Capítulo 3

## Estudo de Caso, Resultados e Discussão

Neste capítulo, relata-se a possibilidade de reuso do efluente final de uma refinaria nas operações consumidoras de água em uma petroquímica. Este estudo será realizado por meio da aplicação do algoritmo Diagrama de Fontes de Água (DFA) apresentado no capítulo 2 deste trabalho e os resultados obtidos serão discutidos.

### 3.1 Refinaria

Os dados da refinaria utilizada como base para o estudo de caso foram retirados da literatura. Originalmente, Huang *et al.* (1999) os utilizaram na concepção de um problema *retrofit* de uma refinaria. Posteriormente, os dados apresentados no estudo citado foram adequados por Ullmer *et al.* (2005) para a síntese de processos regenerativos. As informações adaptadas utilizadas no problema aqui tratado são provenientes do último trabalho mencionado.

Neste estudo, apenas um contaminante (Orgânicos) é considerado nas correntes aquosas. Além disso, a água primária disponibilizada para as operações que necessitam deste recurso na refinaria é captada e tratada em uma estação de tratamento de água (ETA), apresentando dois níveis distintos de qualidade: fresca e purificada. Esta é utilizada em quatro operações dentro da refinaria: dessalgação, lavagem de amônia, destilação e caldeira. Aquela, por sua vez, é utilizada na lavagem de H<sub>2</sub>S com soda, como água de resfriamento e para consumo geral.

As correntes aquosas de uma refinaria apresentam uma série de contaminantes. Entretanto, para fins de aplicação da metodologia DFA neste estudo de caso, a simplificação do problema se mostrou necessária, uma vez que os contaminantes da refinaria e petroquímica utilizadas precisavam ser os mesmos. A operação de lavagem de H<sub>2</sub>S com soda, por exemplo, tem por objetivo a purificação final de gás liquefeito de petróleo (GLP). Para isto, uma solução aquosa de soda, preparada com água fresca, é utilizada na extração



de enxofre do GLP, contaminando-a com esse composto e com soda. Entretanto, pelo motivo imediatamente citado, apenas os orgânicos são considerados neste trabalho. É importante deixar claro que a simplificação realizada não invalida os resultados atingidos, mas, para uma eventual aplicação na indústria, a coleta de uma gama superior de dados é fundamental.

As tabelas 3.1 e 3.2 apresentam, respectivamente, os dados de processo das unidades consumidoras de água na refinaria e os dados de qualidade das fontes de água primária.

**Tabela 3.1** - Dados de processo das unidades consumidoras de água na refinaria (adaptado de Ullmeret *et al.*, 2005)

Operação	$\Delta M$ (g/h)	Vazão Operacional (t/h)	Perdas de Vazão (t/h)	[Entrada Máxima] (ppm)	[Saída Máxima] (ppm)
Dessalgação	480.000	75	0	100	6.500
Lavagem de Amônia	81.750	15	0	50	6.500
Destilação	104.481	19	0	1	6.500
Caldeira	0	21	18	1	50
Lavagem com Soda	1.200	3	0	50	500
Uso Geral	52.500	7,5	0	50	7.050
Torre de Resfriamento	0	625	405	220	220

A refinaria utilizada como base apresenta uma unidade *stripper* responsável pela remoção de H<sub>2</sub>S e de hidrocarbonetos leves das correntes efluentes dos processos. Para o contaminante em questão, a eficiência de remoção (ER) do mesmo, segundo dados de Huang et al. (1999), é de 25% em relação a sua concentração de entrada na unidade, que pode ser calculada pelo balanço de massa no misturador dos afluentes do *stripper*. De posse desta concentração e, sabendo-se a ER da unidade, é possível calcular a concentração do efluente resultante através da equação 3.1.

$$ER = \frac{C_e - C_s}{C_e}$$

**Equação 3.1**

Onde C<sub>s</sub> é a concentração do efluente da unidade e C<sub>e</sub> é a concentração do afluente.

**Tabela 3.2** - Fontes de água da refinaria (Huang *et al.*, 1999)

Fonte	[Orgânicos] (ppm)	Vazão Máxima (t/h)
Fresca (AF)	15	∞
Purificada (AP)	1	∞
Dreno de Óleo Cru (TQ)	45	15

Os valores infinitos indicados para a vazão de água fresca e purificada indicam que estas utilidades estão disponíveis na quantidade que for necessária. Entretanto, é importante notar que a utilização das mesmas está atrelada a um custo de captação e tratamento que será discutido mais a frente neste trabalho. Portanto, apesar de serem fontes “inesgotáveis”, há de se buscar o mínimo consumo para que se possam diminuir os custos inerentes à maior captação de água e também à maior geração de efluentes, o que demanda maior verba para tratamento, além de impactar menos o meio ambiente.

Mirre (2007), de forma análoga, utilizou a refinaria proposta por Huang *et al.* (1999) como base para seu estudo de recuperação e reuso de água na indústria petroleira. Com base no fluxograma de processos hídricos apresentado por este autor e seus colaboradores, por meio dos valores de carga mássica transferida ( $\Delta M$ ) apresentados por Ullmer *et al.* (2005) e tendo conhecimento da qualidade da água que alimenta cada operação, Mirre (2007) realizou o balanço de contaminantes em cada operação e em cada ponto de mistura e divisão de correntes da refinaria em questão. Além disso, este autor incorporou uma ETDI com reais características de uma estação de tratamento de uma refinaria para a avaliação das possibilidades de recuperação das correntes de processo da planta, viabilizando o reciclo e o reuso, de forma a reduzir a captação e o descarte de água.

A figura 3.1 apresenta um esquema de blocos da sequência de tratamentos realizados na ETDI. A eficiência de remoção do contaminante em questão em cada etapa do tratamento é apresentada na tabela 3.3



**Figura 3.1** - Esquema da sequência de processos de tratamento de efluentes (Mirre, 2007)

Os efluentes advindos dos diferentes processos são centralizados para tratamento na ETDI. Primeiramente, o efluente centralizado é submetido a um separador API. Em seguida, é destinado a um flotador a ar dissolvido. Antes de seguir para a última etapa, o efluente da segunda etapa de tratamento passa por um tratamento biológico de lodos ativados. Para finalizar, o efluente é submetido a um tratamento com carvão ativado.

**Tabela 3.3** - Dados de eficiência de remoção dos processos da ETDI (Mirre, 2007)

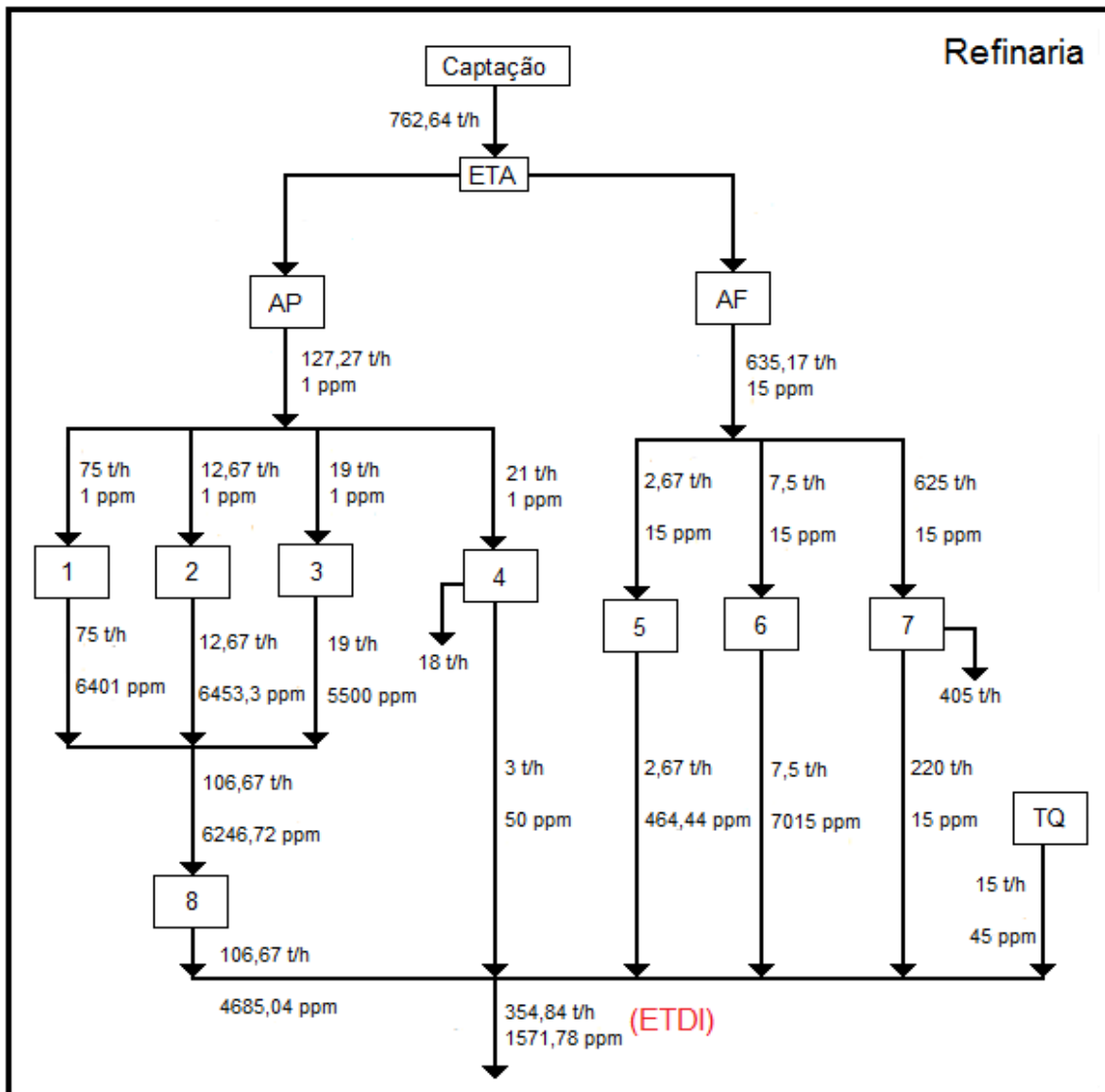
<b>Operação</b>	<b>Eficiência de Remoção</b>	<b>Vazão Máxima (t/h)</b>
Separador API	0,55	400
Flotador a Ar Dissolvido	0	400
Lodo Ativado	0,8	400
Carvão Ativado	0,6	400

O problema proposto neste trabalho se baseia em dois estudos de caso e, para que o mesmo pudesse ser realizado, algumas simplificações se mostraram necessárias. Isto explica o porquê da existência de uma etapa do tratamento com eficiência de remoção zero para o contaminante em questão. O que ocorre é que o flotador a ar dissolvido é um processo destinado à remoção de outros contaminantes considerados no estudo de Mirre (2007). Optou-se manter a operação por se tratar de um esquema típico da sequência de tratamento de efluentes de uma refinaria.

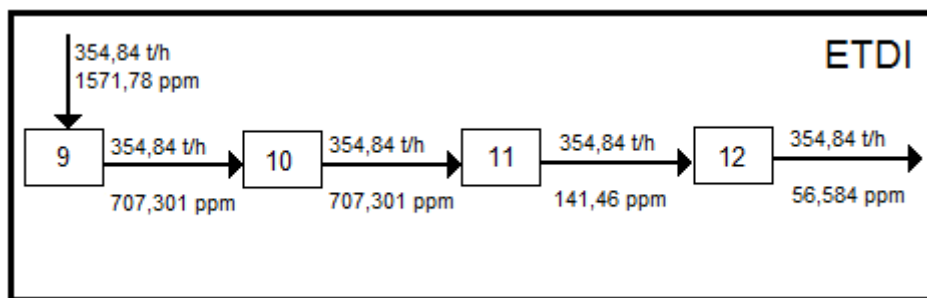
A figura 3.2 apresenta o fluxograma hídrico base da refinaria adaptado de Mirre (2007) e que será utilizado como base para o presente trabalho. Para simplificar o fluxograma, as operações foram numeradas e as correspondências entre as mesmas e os números adotados são exibidas na tabela 3.4 apresentada anteriormente ao fluxograma. As siglas ETA, AP, AF e TQ que aparecem na figura 3.2 significam, respectivamente, Estação de Tratamento de Água, Água Pura, Água Fresca e Dreno de Óleo Cru (água proveniente da etapa de drenagem do óleo a ser processado).

**Tabela 3.4** - Correspondência entre operações e números adotados

Operação	Número
Dessalgação	1
Lavagem de Amônia	2
Torre de Destilação	3
Caldeira	4
Lavagem de H <sub>2</sub> S	5
Uso Geral	6
Torre de Resfriamento	7
Stripper	8
Separador API	9
Flotador a Ar Dissolvido	10
Lodo Ativado	11
Carvão Ativado	12



**Figura 3.2** - Fluxograma hídrico base da refinaria (adaptado de Mirre, 2007) - Continua



**Figura 3.2** - Fluxograma hídrico base da refinaria (adaptado de Mirre, 2007)

### 3.2 Petroquímica

A fim de se viabilizar o estudo da possibilidade de reuso de água entre plantas de refino e petroquímica, utilizaram-se os dados de uma planta apresentada por Mann e Liu (1999). Os autores, procurando demonstrar a eficiência da tecnologia Pinch, aplicaram esta metodologia com o objetivo de minimizar a geração de efluentes aquosos, assim como o consumo de água em uma das onze plantas de um complexo petroquímico localizado no Taiwan. A planta apresentada é produtora de estireno e das resinas ABS e SAN (terpolímero de acrilonitrila-butadieno-estireno e copolímero de estireno-acrilonitrila respectivamente). Para operar, consome, diariamente, cerca de 5430 toneladas de água destinadas a três tipos de aplicação: água de processo, utilidades e uso geral.

Mann e Liu (1999) utilizaram sólidos suspensos (SS) como contaminante referência em seu trabalho. A consideração da presença de outros contaminantes somente foi feita ao final da aplicação do método como restrição ao reuso de correntes. Os dados apresentados pelos autores para o contaminante referência, SS, serão utilizados como se fossem referentes ao contaminante considerado na refinaria apresentada, ou seja, orgânicos. Esta adaptação, consequência da falta de dados, visa possibilitar a realização do estudo proposto e, de forma alguma, compromete os resultados obtidos. Entretanto, mais uma vez é válido destacar que, para uma eventual aplicação na indústria, a coleta de uma gama superior de dados se mostra fundamental, a fim de se ter maior representatividade do cenário real.

Dentre as operações consumidoras de água na planta petroquímica, escolheram-se cinco delas para se estudar a possibilidade de reuso de correntes aquosas. As operações selecionadas, das 5430 toneladas

consumidas diariamente, consomem em torno de 3037 t/d e são listadas a seguir:

- Filtração e secagem dos filtros;
- Torre de resfriamento A;
- Torre de resfriamento B;
- Lavagem de Gases;
- Lavagem de Equipamentos.

A tabela 3.5 apresenta as vazões operacionais das correntes aquosas que alimentam e que deixam cada operação, bem como as concentrações de entrada e saída das mesmas. Além disso, a tabela também apresenta a carga mássica ( $\Delta M$ ) transferida em cada uma delas.

**Tabela 3.5** - Dados operacionais da planta petroquímica (adaptado de Mann e Liu, 1999)

<b>Operação</b>	<b><math>\Delta M</math> (g/h)</b>	<b>Vazão de Entrada Operacional (t/h)</b>	<b>Vazão de Saída Operacional (t/h)</b>	<b>[Entrada] (ppm)</b>	<b>[Saída] (ppm)</b>
Filtração	47.505	15	26,25	0	3.167
Torre de Resfriamento A	720,67	50	7,83	0	92
Torre de Resfriamento B	946,13	57,25	10,88	0	87
Lavador de Gases	4.950	2,5	2,5	0	2.070
Lavagem de Equipamentos	52,5	1,75	1,75	0	30

É importante notar que os dados apresentados na tabela estão em uma base horária. Portanto, multiplicando-se o somatório das vazões de entrada das operações por 24, atinge-se o consumo diário de 3037 toneladas de água.

Tendo em vista que o objetivo do estudo é reduzir o consumo de água, bem como a geração de efluentes da planta petroquímica, mediante utilização de água provinda da planta de refino, é pertinente que se trabalhe com as concentrações máximas de entrada e saída permitidas para cada operação que compõe o sistema hídrico da petroquímica, no intuito de se buscar o máximo reuso dos efluentes da refinaria. A partir dos dados de concentração máxima de entrada e saída e da carga mássica transferida, é possível determinar, por meio da equação 2.1, a vazão mínima de água de cada operação com qualidade igual a sua máxima concentração de entrada capaz de garantir a

transferência de massa requisitada. A tabela 3.6, análoga à 3.5, apresenta os dados limites de vazão de cada operação da planta petroquímica.

**Tabela 3.6** - Dados limites da planta petroquímica (adaptado de Mann e Liu, 1999)

<b>Operação</b>	<b><math>\Delta M</math> (g/h)</b>	<b>Vazão de Entrada Limite (t/h)</b>	<b>Vazão de Saída Limite (t/h)</b>	<b>[Entrada]Máx (ppm)</b>	<b>[Saída] Máx (ppm)</b>
Filtração	47.505	15	26,25	60	3.227
Torre de Resfriamento A	720,67	50	7,83	64	156
Torre de Resfriamento B	946,13	57,25	10,88	21	108
Lavador de Gases	4.950	2,5	2,5	90	2.070
Lavagem de Equipamentos	52,5	1,75	1,75	0	30

Apesar das concentrações de entrada e saída de cada operação terem sido alteradas para seus valores limite, com exceção da última que já operava em condição extrema, os  $\Delta C$ 's se mantiveram constante. Consequentemente, as vazões operacionais apresentadas na tabela 3.5 coincidiram com as vazões limites apresentadas na tabela 3.6. Entretanto, nas condições originais, a planta demanda a mesma quantidade de água em níveis mais nobres (puros).

### 3.3 Cenários

O presente trabalho visa avaliar as possibilidades de reuso do efluente da refinaria de Huang *et al.* (1999) como afluente da petroquímica de Mann e Liu (1999) por meio da ferramenta Diagrama de Fontes de Água, de forma a aliar a questão ambiental às novas tendências de integração entre as indústrias abordadas.

A ideia é a criação de seis cenários para posterior análise de viabilidade técnico-econômica. Dos seis cenários propostos, cinco deles tratam as indústrias como dois grandes blocos consumidores de água, onde o efluente do primeiro grande bloco, o refino, é tratado como afluente do segundo grande bloco, a petroquímica. Neste tratamento, a diferença entre os cenários está na qualidade da água fornecida pela refinaria à petroquímica. O primeiro cenário estuda o reuso do efluente sem tratamento, isto é, sem passar pela ETDI. O segundo cenário leva em consideração apenas o fornecimento de água com qualidade obtida após a passagem pelo separador API. O terceiro cenário é

responsável pelo estudo do caso em que o efluente é tratado em um flotor de ar dissolvido após ter passado pelo separador API. O quarto cenário leva em conta o tratamento biológico e o quinto, além das demais etapas, inclui o tratamento com carvão ativado também.

O sexto cenário trata as duas indústrias como um só bloco. Nesta abordagem, a estação de tratamento de água (ETA) da refinaria providencia água para ambas as indústrias e se avalia a possibilidade de reuso deste recurso entre as suas operações diretamente. Ao final do processo, os efluentes de todas as operações são centralizados e tratados na ETDI. As figuras 3.3 e 3.4 ilustram, respectivamente, as abordagens realizadas na geração dos cenários.

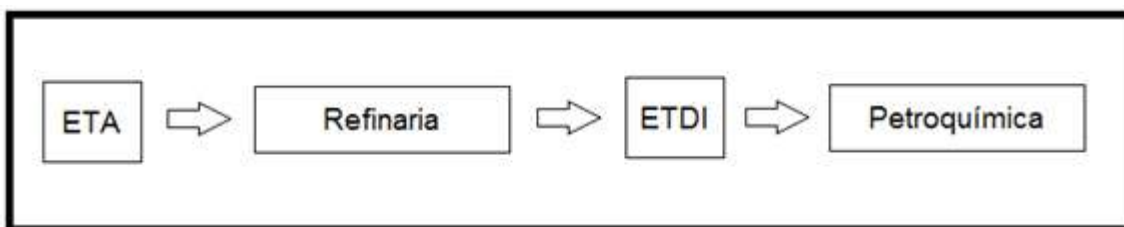


Figura 3.3 - Abordagem dos cenários 1 - 5

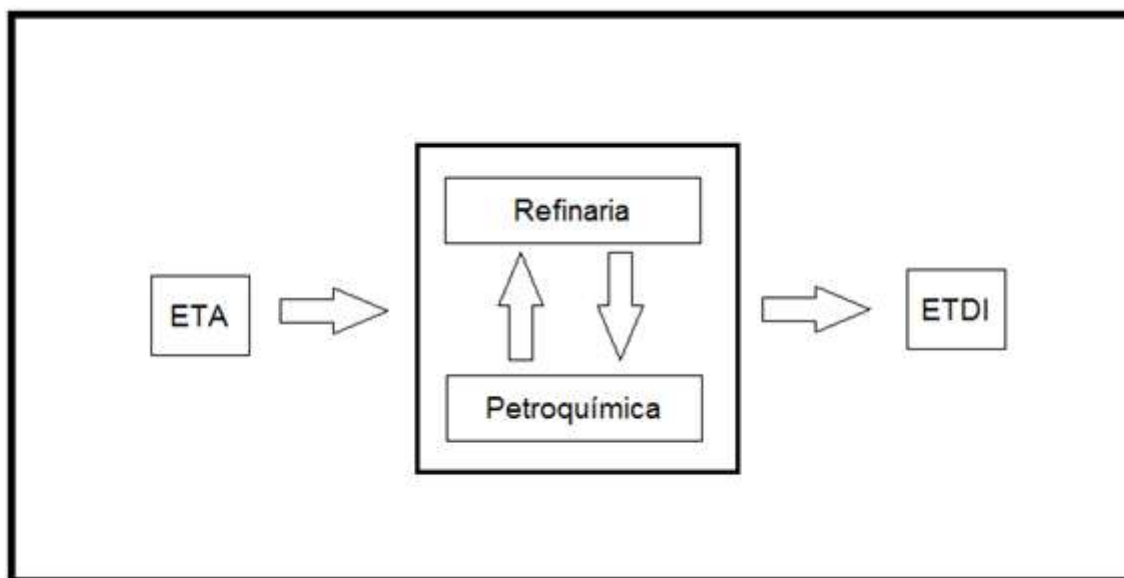


Figura 3.4 - Abordagem do cenário 6

Os DFA's apresentados foram gerados com auxílio do software MINEA, desenvolvido em base Microsoft Excel® no DEQ/EQ/UFRJ. O programa tem implementado o algoritmo DFA e atende à sugestão proveniente do trabalho de



Gomes (2002) para inclusão de procedimento automático que permitisse agilizar os cálculos envolvidos na aplicação da metodologia.

O software requer como informações as vazões e as concentrações de entrada e saída de cada operação, que são os dados imprescindíveis para a resolução do algoritmo DFA. Uma vez fornecidas estas informações, o programa calcula as cargas mássicas transferidas e gera o diagrama de fontes, cuja interpretação fica sob a responsabilidade do usuário, assim como a geração da rede de transferência de massa (RTM). O apêndice 1 apresenta um pequeno tutorial do software, onde é possível se familiarizar com as interfaces e os recursos oferecidos pelo mesmo.

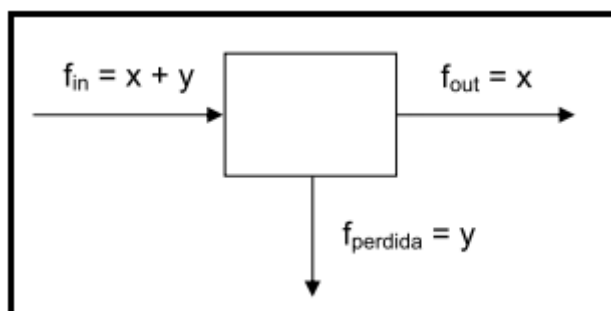
Observando-se a tabela 3.6, pode-se notar que o estudo de caso em questão apresenta três operações com vazão variável. Antes da utilização do software para a execução da metodologia DFA, é válido dar uma breve explicação acerca do procedimento realizado nos casos em que há operação com vazão de entrada diferente da vazão de saída por conta de perdas ou ganhos ao longo do processo. O entendimento do procedimento realizado nestas circunstâncias é de suma importância para compreensão do estudo realizado.

### **Operações com Vazão Variável**

- Perda de Vazão

Operações que apresentam perda de vazão são abertas em duas novas operações. A primeira nova operação apresenta vazão fixa igual ao valor da vazão de saída da operação original e concentrações de entrada e saída idênticas à mesma. Esta primeira nova operação criada tem por objetivo garantir a transferência de massa da operação original. A segunda nova operação, com vazão dada pela diferença entre as vazões de entrada e saída da operação original, é responsável por representar a perda que ocorre na mesma. Sua concentração de entrada deve ser a mesma da operação original, mas sua concentração de saída deve ser a maior possível, a fim de se garantir que não haverá reutilização da mesma nas demais operações.

Este procedimento adotado é apenas um artifício para execução da metodologia DFA. Na hora de se gerar a RTM, as concentrações das correntes de saída da operação que apresenta perda são as mesmas da operação original. A figura 3.5 ilustra o procedimento adotado em operações com perda de vazão na hora da construção da RTM.



**Figura 3.5** - Representação esquemática de operação com perda de vazão

- Ganho de Vazão

Operações que apresentam ganho de vazão, de forma análoga ao caso anterior, são divididas em duas novas operações. A primeira nova operação apresenta vazão idêntica à vazão de entrada da operação original e valores de concentração de entrada e saída iguais a da mesma. Esta operação é responsável pela garantia da transferência de massa da operação original. A segunda nova operação é tratada como uma nova fonte de água disponível para o processo. A vazão desta nova fonte é dada pela diferença entre as vazões de entrada e saída da operação original e sua concentração deve ser igual à concentração de saída da mesma.

### 3.3.1 Cenário 1

O primeiro cenário tratado neste estudo de caso está inserido no primeiro tipo de abordagem mencionada. Neste cenário, a indústria petroquímica, além da sua fonte de água a 0 ppm disponível na quantidade que for necessária para o seu funcionamento, dispõe do efluente não tratado da refinaria. A tabela 3.7 apresenta as fontes de água disponíveis para a planta petroquímica neste primeiro cenário proposto.

**Tabela 3.7** - Fontes de água para o cenário 1

<b>Fonte</b>	<b>[Orgânicos] (ppm)</b>	<b>Vazão Máxima (t/h)</b>
Pura	0	∞
Efluente Não Tratado da Refinaria	1571,78	354,84

Em uma análise que vale para todos os cenários propostos, existe um custo atrelado à utilização de água pura. Portanto, apesar das fontes de água nobre serem tratadas como inesgotáveis neste trabalho, é extremamente importante buscar o mínimo consumo deste recurso, tanto por questões financeiras, quanto por questões ambientais.

Levando-se em consideração o procedimento adotado nos casos em que há operações com vazão variável, a tabela 3.8 apresenta os dados da tabela 3.6 rearranjados de acordo com o artifício apresentado, possibilitando a execução da metodologia DFA. As operações 6 e 7 representam, respectivamente, as perdas de vazão provenientes das operações 2 e 3.

**Tabela 3.8** - Dados limites rearranjados da planta petroquímica

<b>Operação</b>	<b>Nº</b>	<b><math>\Delta M</math> (g/h)</b>	<b>Vazão de Entrada Limite (t/h)</b>	<b>Vazão de Saída Limite (t/h)</b>	<b>[Entrada] Máx (ppm)</b>	<b>[Saída] Máx (ppm)</b>
Filtração	1	47.505	15	15	60	3.227
Torre de Resfriamento A	2	720,67	7,83	7,83	64	156
Torre de Resfriamento B	3	946,13	10,88	10,88	21	108
Lavador de Gases	4	4.950	2,5	2,5	90	2.070
Lavagem de Equipamentos	5	52,5	1,75	1,75	0	30
Torre de Resfriamento A (Perda)	6	-	42,17	42,17	64	3.227
Torre de Resfriamento B (Perda)	7	-	46,37	46,37	21	3.227

A partir da tabela de oportunidades 3.8, tendo-se conhecimento das fontes de água disponíveis na tabela 3.7, construiu-se o DFA considerando-se, primeiramente, apenas as vazões fixas. A figura 3.6 apresenta o resultado do DFA preliminar, gerado com auxílio do software MINEA, para o primeiro cenário.

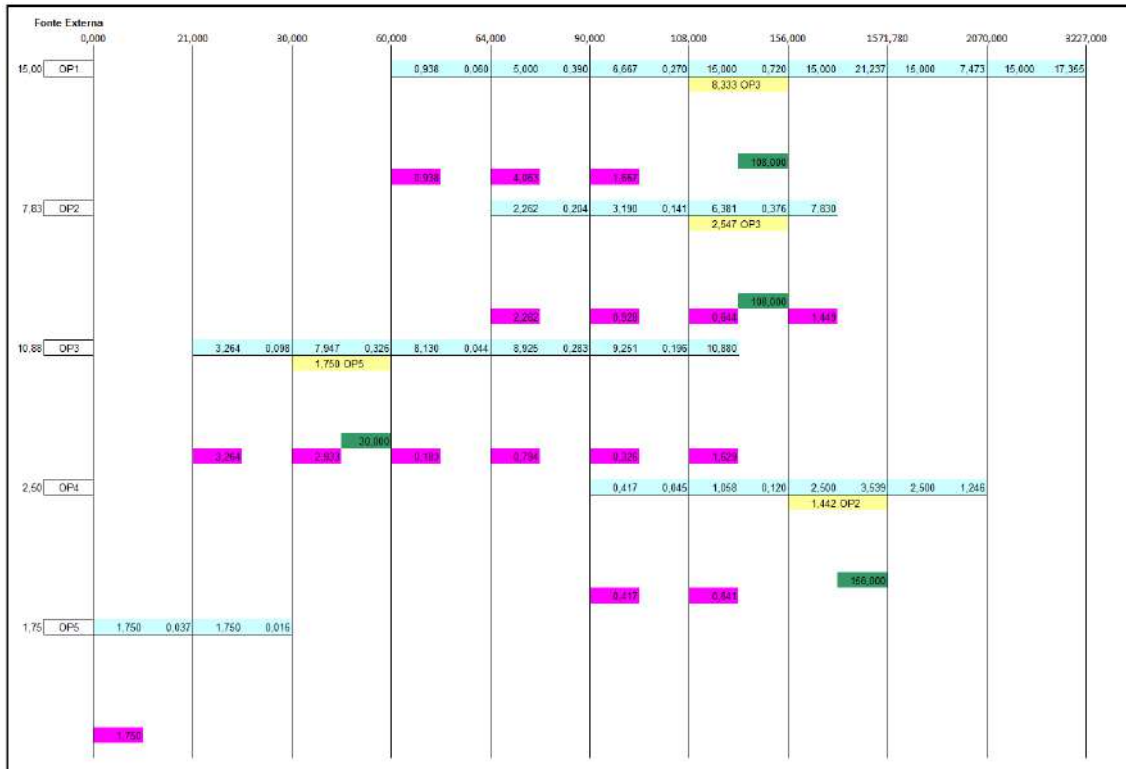


Figura3.6 - DFA preliminar para o cenário 1

Para obtenção do DFA final, diminuiu-se o reuso da operação 3 na operação 2, uma vez que o resultado gerado pelo software para o DFA preliminar está extrapolando a vazão disponível para reuso da operação 3. Observando-se a figura, percebe-se que o efluente desta operação é totalmente reutilizado nas operações 1 e 2. Entretanto, há um reciclo local de 1,629 t/h ao final desta operação, de forma a garantir sua vazão limite fixa. Portanto, a vazão efetiva disponível para reuso é de 9,251 t/h, das quais 8,333 t/h alimentam a operação 1. Desta forma, apenas 0,918 t/h pode ser reutilizada na operação 2. Reutilizando-se esta quantidade de água da operação 3 na operação 2 no intervalo de 108 ppm a 156 ppm, a quantidade de água pura necessária para garantir a transferência de massa do intervalo deixa de ser 0,644 t/h e passa a ser 1,146 t/h. Além disso, a vazão de reciclo local da operação 2 passa a ser 2,576 t/h, ao invés de ser 1,449 t/h.

A inclusão das operações que representam as perdas de vazão é feita por meio um balanço de massa entre as correntes efluentes disponíveis na planta. Após a realização das modificações no DFA preliminar, verificou-se que os efluentes disponíveis para reuso nas operações 6 e 7 eram os provenientes das operações 1, 2, e 4. A tabela 3.9 apresenta as vazões e qualidades destas correntes disponíveis para reuso.

**Tabela 3.9** - Características das correntes disponíveis para reuso (Caso 1)

Operação	Vazão (t/h)	[Orgânicos] (ppm)
1	26,25	3.227
2	3,812	156
4	2,5	2.070

A operação 6, por exemplo, necessita de uma vazão de 42,17 t/h com concentração igual a 64 ppm. Dentre as correntes disponíveis para reuso, optou-se pelo efluente 1, pois, além de ser uma corrente mais suja, para atender a concentração de entrada e a vazão da operação 6, necessita de quantidade similar de água pura para diluição a requisitada pelo efluente 4. O cálculo da vazão necessária do efluente e de água pura é exibido a seguir:

$$\begin{cases} Y + X = 42,17; \\ Y \cdot 0 + X \cdot 3227 = 42,17 \cdot 64; \end{cases}$$

onde X é a vazão do efluente 1 e Y a vazão de água a 0 ppm.

$$X = 0,84 \text{ t/h e } Y = 41,33 \text{ t/h}$$

Fazendo-se o mesmo procedimento para o efluente 4, encontrou-se uma vazão de 40,87 t/h de água limpa e 1,3 t/h deste efluente. Já para o efluente 2, o balanço de massa resultou numa vazão de 17,3 t/h. Entretanto, apenas 3,812 t/h estão disponíveis para reuso. Desta forma, pelos motivos expostos, optou-se pelo reuso do efluente 1.

No caso da operação 7, que necessita de 46,37 t/h de água a 21 ppm, o balanço de massa foi feito por meio do reuso do efluente 2 em sua totalidade,

do reuso de parte do efluente 4 e da utilização de água pura. O procedimento realizado para determinação das vazões necessárias de cada corrente é análogo ao feito acima e o resultado pode ser verificado na rede de transferência de massa proposta (figura 3.7).

Realizadas as modificações mencionadas no DFA preliminar e tendo-se atendido às demandas das operações que representam as perdas de vazão, pôde-se construir a RTM para o primeiro cenário proposto. O resultado é exibido na figura 3.7, onde as operações assinaladas em vermelho são aquelas que apresentam vazão variável e as vazões em vermelho são aquelas perdidas nas operações. O DFA final, sem a inclusão das operações que representam perda, pode ser visto no apêndice 2 deste trabalho.

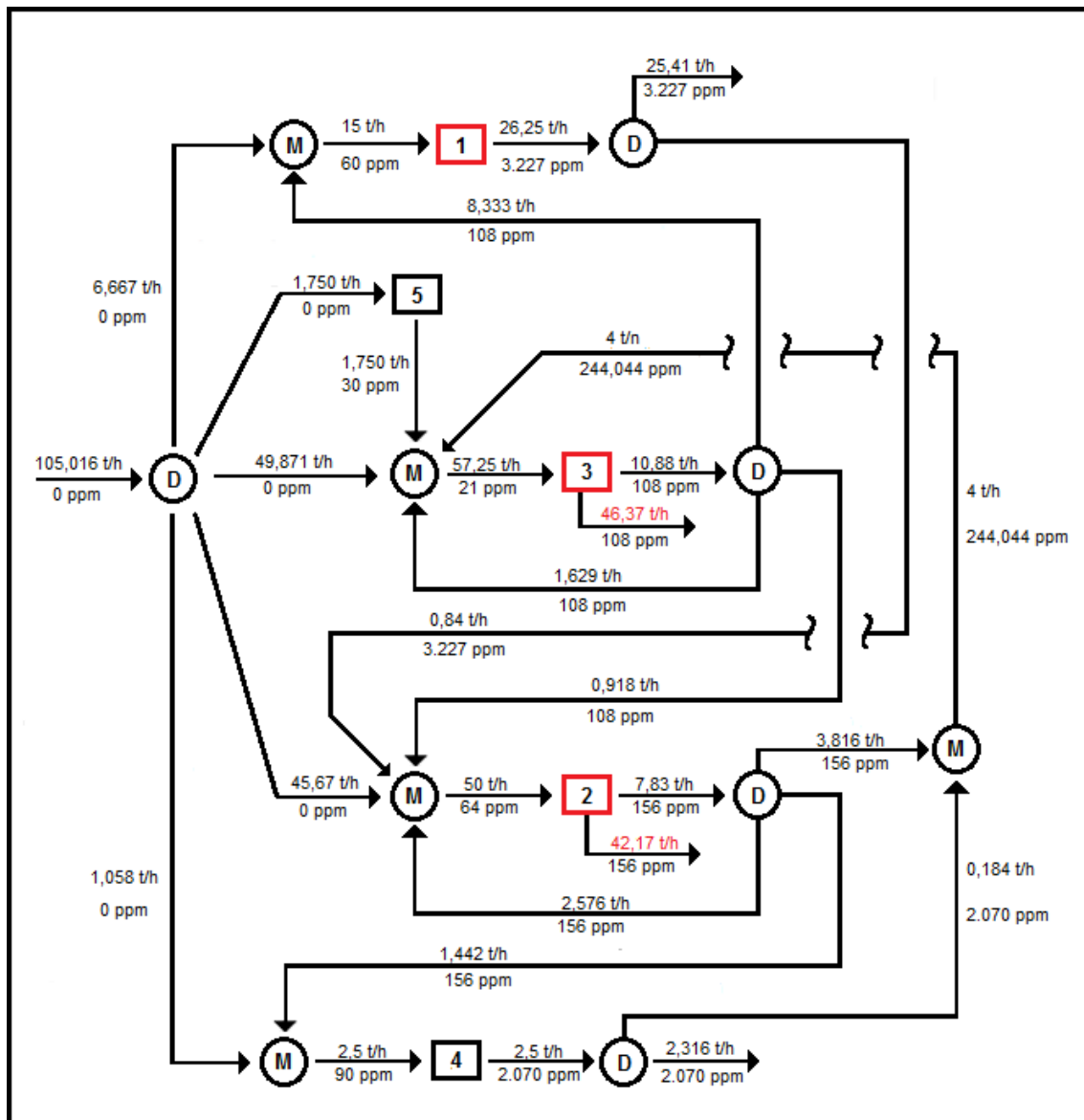


Figura 3.7 - Rede de transferência de massa para o cenário 1

A união das operações 6 (42,17 t/h – 64 ppm) e 2 a vazão fixa (7,83 t/h – 64 ppm) gera a operação 2 original com vazão variável. Das 7,83 t/h de água da operação 2 a vazão fixa, 4,336 t/h são puras, ou seja, água a zero ppm. Da mesma forma, 41,33 t/h das 42,17 t/h de água utilizada na operação 6 são puras. Sendo assim, a captação de água a zero ppm por parte da operação original é de 45,67 t/h, como pode ser visto na figura 3.4. O mesmo raciocínio explica o balanço hídrico da operação 3.

Analisando-se a RTM gerada a partir do DFA, percebe-se que não houve reuso do efluente não tratado da refinaria na planta petroquímica. A qualidade deste efluente não permitiu que esta reutilização ocorresse. Entretanto, mesmo sem tirar proveito desta corrente, a captação de água pura pela petroquímica foi reduzida de 3037 t/d para 2520,4 t/d, o que representa uma redução de aproximadamente 17%. Além disso, a geração de efluentes na planta petroquímica foi reduzida de 1181,04 t/d para 665,424 t/d, ou seja, uma queda de 43,7%. Uma vez que este cenário não leva em consideração o tratamento do efluente da refinaria, permitindo posterior reuso na planta petroquímica, trata-se do cenário mais básico de todos os propostos. Embora seja o cenário mais básico, o resultado obtido foi satisfatório, confirmando a eficácia da ferramenta DFA.

### 3.3.2 Cenário 2

Assim como o primeiro cenário estudado, o segundo se enquadra na primeira abordagem tratada. Para o segundo caso, a indústria petroquímica dispõe do efluente tratado proveniente do primeiro processo de tratamento da ETDI, separador API, e de sua fonte de água a 0 ppm. A tabela 3.10 apresenta a vazão e a qualidade das fontes de água disponíveis para uso na planta petroquímica neste segundo cenário estudado.

**Tabela 3.10** - Fontes de água para o cenário 2

Fonte	[Orgânicos] (ppm)	Vazão Máxima (t/h)
Pura	0	∞
Efluente Tratado em Separador API	707,301	354,84

A tabela de oportunidades para o segundo caso, bem como para os demais cenários propostos, é a mesma utilizada no primeiro estudo realizado. Desta forma, ela não será apresentada novamente, mas é válido especificar que todos os DFA's apresentados foram construídos com base nas informações das fontes de água para cada cenário e nas informações contidas na tabela de oportunidades 3.8. A figura 3.8 apresenta o resultado do DFA preliminar, gerado com auxílio do software MINEA, para o segundo caso proposto.

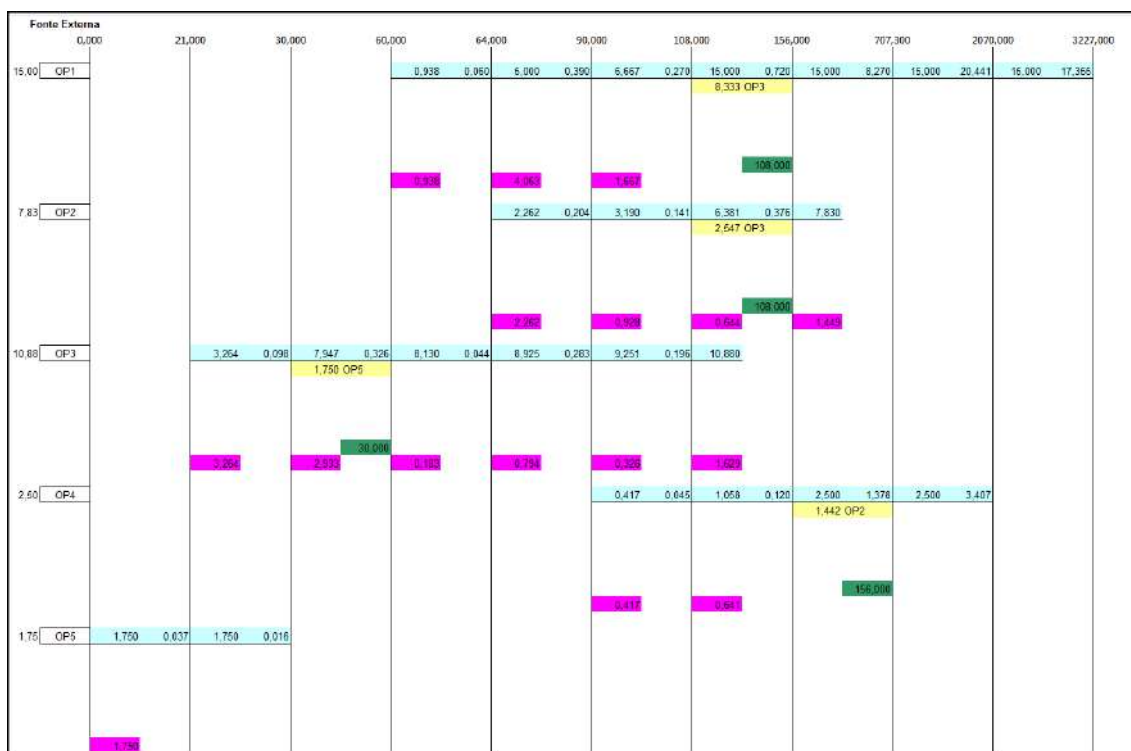


Figura 3.8 - DFA preliminar para o cenário 2

Analisando-se comparativamente as figuras 3.6 e 3.8, percebe-se que os DFA's preliminares gerados pelo software para os casos 1 e 2 são idênticos, a não ser pelos intervalos de concentração. Na figura 3.8, ao invés de 1571,780, que é a qualidade do efluente centralizado não tratado da refinaria, consta no diagrama de fontes a qualidade do efluente tratado pela primeira etapa de tratamento (707,301), separador API. O resultado fornecido pelo programa não está equivocado. De fato, a qualidade da água regenerada por este tratamento não se mostra uma fonte propícia ao reuso na planta petroquímica. Conseqüentemente, levando-se em consideração que no primeiro caso o efluente não tratado também não apresentou oportunidade de reuso, as redes de transferência de massa para os casos são iguais.



Os DFA's preliminares para os cenários 1 e 2, por serem idênticos, a não ser pelos intervalos de concentração, apresentaram o mesmo erro da vazão disponível para reuso da operação 3. Para obtenção do DFA final para o segundo caso, as mesmas modificações feitas no primeiro preliminar obtido foram realizadas. Desta forma, como já foi dito, as RTM's obtidas são as mesmas e o segundo cenário, apesar de não fazer reuso do efluente da refinaria, apresentou redução de 17% na captação de água limpa e de 43,7% na geração de efluentes. Por ser, exatamente, a mesma RTM do cenário 1, a RTM do cenário 2 não será exibida. O DFA final, sem a inclusão das operações que representam perda, pode ser visto no apêndice 2 deste trabalho.

### 3.3.3 Cenário 3

O flotor a ar dissolvido é um processo destinado à remoção de outros contaminantes considerados no estudo de Mirre (2007). Apesar de apresentar eficiência de remoção zero para o contaminante em questão no presente trabalho, optou-se manter a operação por se tratar de um esquema típico da sequência de tratamento de efluentes de uma refinaria. Dessa forma, a realização do cenário 3 não é necessária, uma vez que o resultado deve ser igual ao cenário 2, haja visto que ambos apresentam tabelas de oportunidades e qualidades, bem como vazões de fontes de água idênticas.

### 3.3.4 Cenário 4

Dando prosseguimento aos casos que se enquadram na primeira abordagem, o cenário 4 estuda a reutilização do efluente da refinaria na petroquímica após tratamento biológico de lodos ativados. A tabela 3.11 contém dados da vazão e da qualidade das fontes de água disponíveis para utilização pela planta petroquímica neste cenário.

**Tabela 3.11** - Fontes de água para o cenário 4

<b>Fonte</b>	<b>[Orgânicos] (ppm)</b>	<b>Vazão Máxima (t/h)</b>
Pura	0	∞
Tratamento de Lodos Ativados	141,46	354,84

A partir dos dados contidos nas tabelas 3.11 e 3.8, gerou-se, com auxílio do software MINEA, o DFA preliminar para o quarto cenário proposto. O resultado é exibido na figura 3.9.

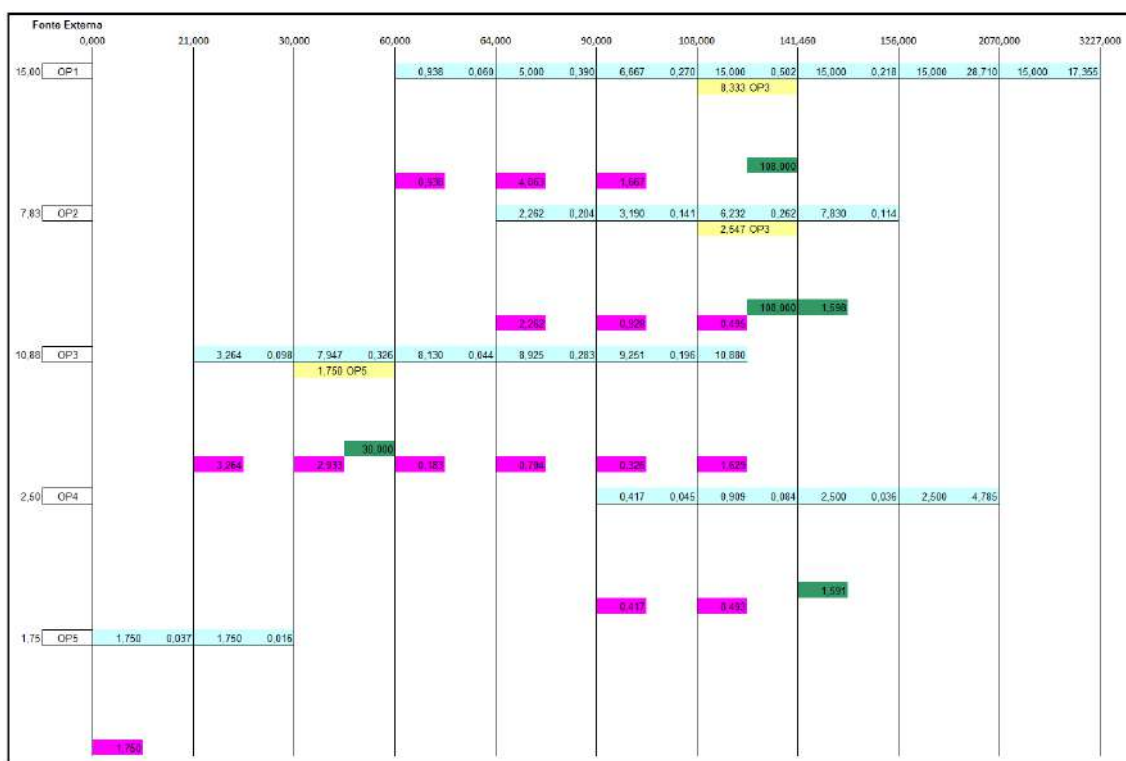


Figura 3.9 - DFA preliminar para o cenário 4

Assim como nos casos 1, 2 e 3, no DFA preliminar gerado pelo software para o quarto cenário, a vazão da operação 3 disponível para reuso está sendo extrapolada. Da mesma maneira que aconteceram nos demais casos, o efluente desta operação é totalmente reutilizado nas operações 1 e 2. Entretanto, para garantir a vazão limite fixa da operação 3, há um reciclo local de 1,63 t/h ao final da mesma. Dessa forma, a vazão efetiva disponível para reuso é de 9,250 t/h, das quais 8,333 t/h alimentam a operação 1. Conseqüentemente, apenas 0,917 t/h pode ser reutilizada na operação 2. A reutilização desta quantidade de água da operação 3 na operação 2 no intervalo de 108 ppm a 141,46 ppm faz com que a quantidade de água pura necessária para garantir a transferência de massa do intervalo deixo de ser 0,495 t/h, como exibido no DFA preliminar, e passe a ser 0,880 t/h.

Diferentemente do observado nos casos anteriores, neste cenário, a vazão fixa da operação 2 conseguiu ser atendida pelo reuso 2,839 t/h de água efluente da refinaria, não necessitando de reciclo local nesta operação.

Observando-se o DFA preliminar, percebe-se que o resultado gerado pelo MINEA reusou apenas 1,598 t/h de água efluente da refinaria para atender a vazão fixa da operação em questão. Este valor não está correto, uma vez que se trata de um erro propagado da reutilização 2,547 t/h de água proveniente da operação 3 na 2. Portanto, trata-se de mais uma modificação realizada para obtenção do DFA final. Além da reutilização dessas 2,839 t/h de efluente da refinaria na operação 2, neste cenário também se observa o reuso de 1,590 t/h desse mesmo efluente na operação 4. Desta forma, há um aproveitamento de 4,429 t/h de efluente tratado da refinaria, reduzindo a captação de água limpa por parte da petroquímica, bem como o descarte de efluentes da outra indústria. O DFA final, sem a inclusão das operações que representam perda, pode ser visto no apêndice 2 deste trabalho.

De maneira análoga aos demais casos, a inclusão das operações que representam perda de vazão é feita por meio de um balanço de massa entre as correntes disponíveis no complexo integrado, de forma a se atender a vazão e a qualidade requisitadas por cada uma delas. A análise do DFA final permite identificar os efluentes provenientes das operações 1, 2 e 4 como disponíveis para reuso. Além disso, há o efluente tratado da refinaria disponível para reuso também. Das 354,84 t/h que podem ser reutilizadas, apenas 4,429 t/h foram consumidas. A tabela 3.12 apresenta as características destas correntes.

**Tabela 3.12** - Características das correntes disponíveis para reuso (Caso 4)

<b>Operação</b>	<b>Vazão (t/h)</b>	<b>[Orgânicos] (ppm)</b>
1	26,25	3.227
2	7,83	156
4	2,5	2.070
Efluente Tratado da Refinaria	350,41	141,46

O objetivo do trabalho é tentar reduzir a captação de água limpa ao máximo, bem como a geração/descarte de efluentes. Desta forma, o reuso do efluente proveniente da refinaria para atender os requisitos das operações que representam perdas, ainda que seja necessário tratar uma maior vazão de efluente, será realizado, buscando-se reduzir o consumo de água limpa por parte da petroquímica, bem como o descarte de efluentes pela refinaria.

Para se atender a concentração de entrada e a vazão requisitada pela operação 7, utilizou-se parte do efluente da operação 2 e água pura. Para determinação das vazões necessárias de cada corrente, o mesmo procedimento realizado no primeiro caso foi feito, chegando-se aos respectivos valores, em t/h: 6,24 e 40,13. No caso da operação 6, o balanço de massa foi feito por meio do reuso do efluente da refinaria e pela utilização de água limpa, sendo as vazões necessárias, respectivamente, 19,08 t/h e 23,09 t/h.

Realizadas as mudanças propostas no DFA preliminar do caso em estudo, chegando-se ao DFA final e, tendo-se atendido as demandas das operações que representam perda de vazão, pôde-se construir a rede de transferência de massa do quarto cenário. O resultado é exibido na figura 3.10.

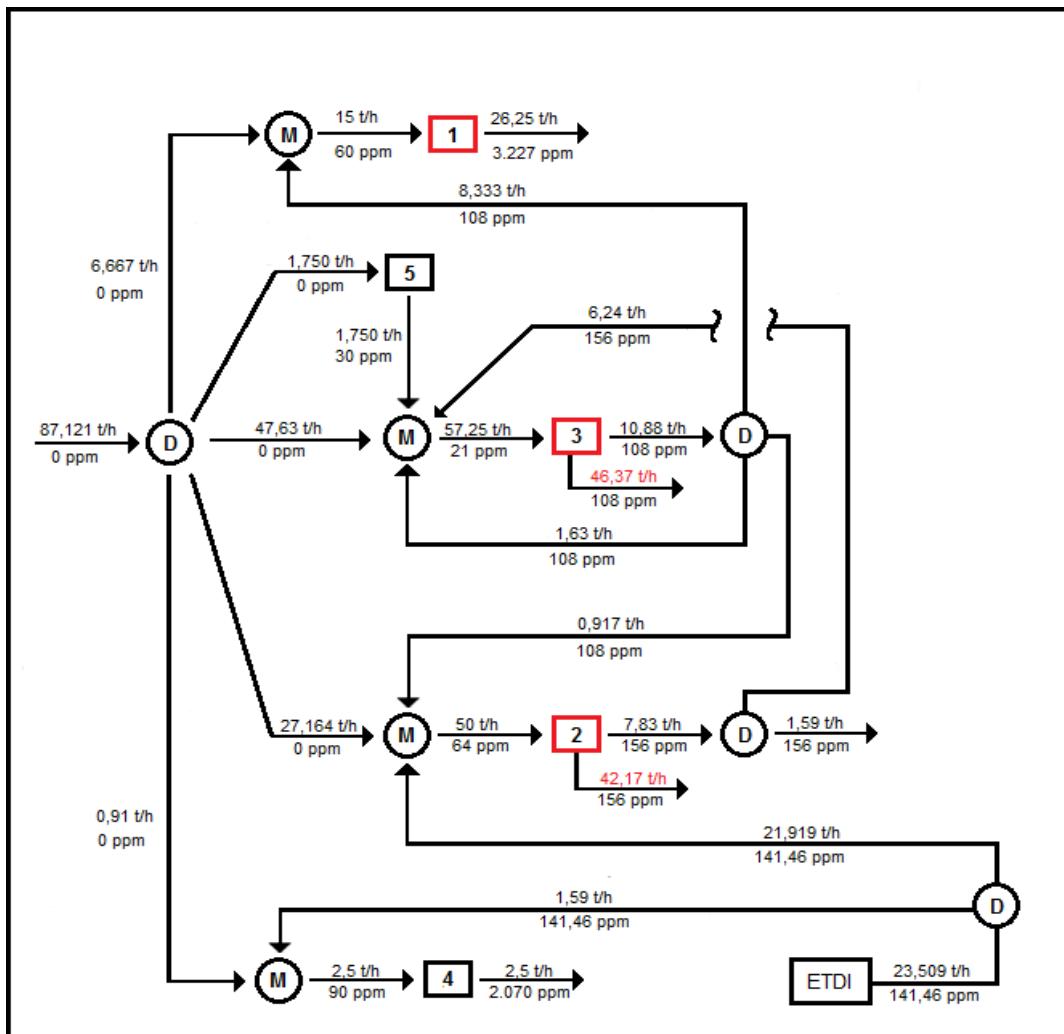


Figura 3.10 - Rede de transferência de massa para o cenário 4

Unindo-se as operações 6 (42,17 t/h – 64 ppm) e 2 a vazão fixa (7,83 t/h – 64 ppm), obtém-se a 2 original com vazão variável. Das 7,83 t/h de água da operação 2 a vazão fixa, 4,074 t/h são de água a 0 ppm. Tratando-se da operação 6, 23,09 t/h das 42,17 t/h de água utilizada na operação são puras. Sendo assim, a captação de água a zero ppm por parte da operação original é de 27,164 t/h, como pode ser visto na figura 3.10. O mesmo raciocínio explica o balanço hídrico da operação 3 original. Das 10,88 t/h de água da operação 3 a vazão fixa, 7,5 t/h são de água a 0 ppm, enquanto que, das 46,37 t/h de água utilizadas na operação 7, 40,13 t/h são puras. Dessa forma, a vazão de água a 0 ppm utilizada pela operação 3 original é de 47,63 t/h.

De forma contrária ao que se observou nos demais casos tratados até agora, neste quarto cenário houve reuso do efluente da refinaria na planta petroquímica. Diante deste fato, é de se esperar que a captação de água limpa por parte desta seja menor neste cenário do que nos outros. Analisando-se a RTM proposta, pode-se perceber que a captação de água limpa foi reduzida de 3037 t/d para 2090,9 t/d, o que representa uma redução de aproximadamente 31,2% em relação ao cenário base e de 17% em relação aos cenários 1, 2 e 3. Além disso, a geração de efluentes na planta petroquímica foi reduzida de 1181,04 t/d para 728,16 t/d, representando uma queda de 38,3%. Em relação aos demais cenários propostos, a geração de efluentes pela planta petroquímica no caso em estudo foi superior. Em contrapartida, tanto a captação de água limpa pela petroquímica, quanto o descarte de efluentes pela refinaria foram reduzidos em função da reutilização do efluente tratado desta indústria naquela.

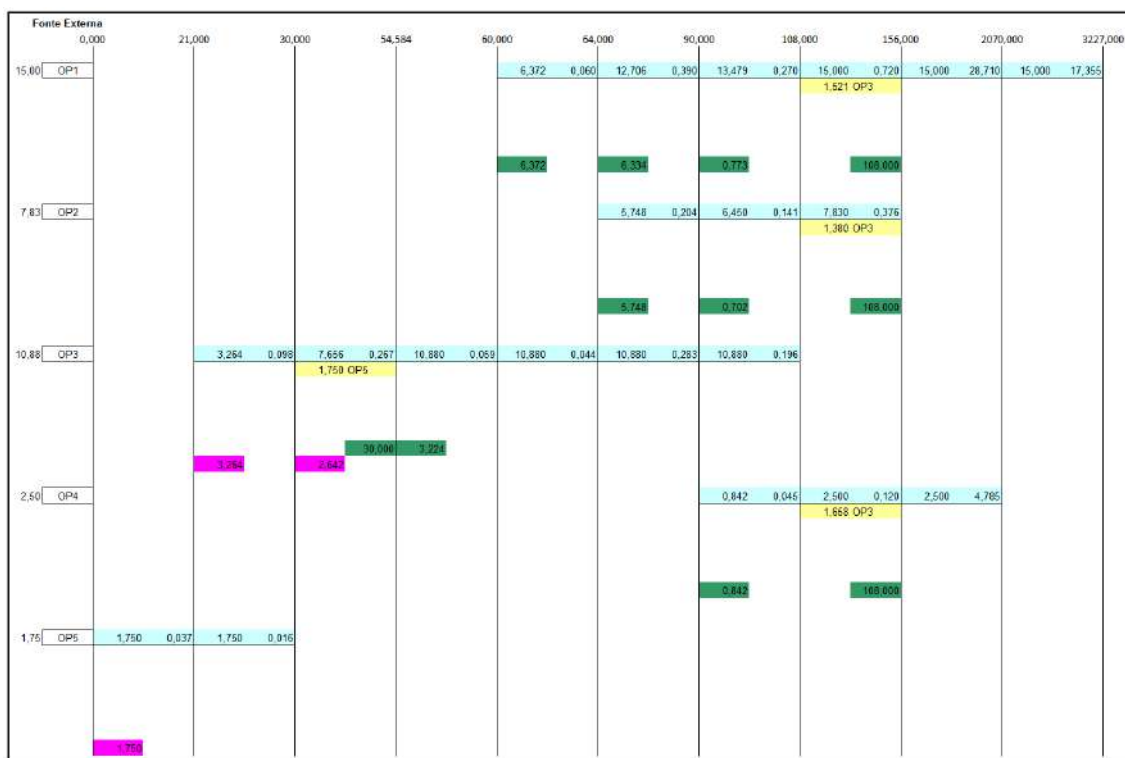
### **3.3.5 Cenário 5**

Finalizando-se o primeiro tipo de abordagem, o quinto cenário proposto leva em consideração todas as etapas de tratamento da ETDI incorporada à refinaria. Desta forma, além da sua fonte de água a 0 ppm, a planta petroquímica dispõe, também, de 354,84 t/h de água com concentração de orgânicos igual a 56,584 ppm. A tabela 3.13 reúne as informações sobre vazão e qualidade das fontes de água disponíveis para a planta petroquímica neste quinto cenário estudado.

**Tabela 3.13 - Fontes de água para o cenário 5**

Fonte	[Orgânicos] (ppm)	Vazão Máxima (t/h)
Pura	0	∞
Carvão Ativado	56,584	354,84

A partir da tabela de oportunidades rearranjada, tabela 3.8, e da tabela de fontes de água para o quinto cenário, tabela 3.13, gerou-se, com auxílio do software MINEA, o DFA preliminar para o caso estudado. O resultado é exibido na figura 3.11.



**Figura 3.11 - DFA preliminar para o cenário 5**

O DFA preliminar gerado pelo software para o quinto caso proposto não apresentou o erro de extrapolação da vazão disponível para reuso da operação 3. Dessa forma, a única modificação necessária para obtenção do DFA final é a inclusão das operações que representam perda de vazão. O DFA final, sem a inclusão das operações que representam perda, pode ser visto no apêndice 2 deste trabalho.

Analisando-se o DFA final, pode-se verificar que os efluentes disponíveis para reuso nas operações 6 e 7 são os provenientes das operações 1, 2, 3 e 4.

Além destas fontes, há de se considerar também o efluente tratado da refinaria, uma vez que não se utilizou toda vazão disponível. Das 354,84 t/h de efluente, apenas 24,001 t/h foram utilizadas na planta petroquímica. A tabela 3.14 exibida a seguir apresenta as vazões e qualidades destas correntes disponíveis para reuso.

**Tabela 3.14** - Características das correntes disponíveis para reuso (Caso 5)

<b>Operação</b>	<b>Vazão (t/h)</b>	<b>[Orgânicos] (ppm)</b>
1	26,25	3.227
2	7,83	156
3	6,321	108
4	2,5	2.070
Efluente Tratado da Refinaria	330,839	54,584

A fim de se atender a concentração de entrada e a vazão requisitada pela operação 6, utilizou-se o efluente remanescente de 3 em sua totalidade, parte do efluente de 2 (reciclo local) e parte do efluente tratado da refinaria. Para se determinar as vazões, utilizou-se o procedimento já mostrado, onde se obteve, respectivamente, 6,321 t/h, 0,586 t/h e 35,263 t/h. Em se tratando da operação 7, para que seu balanço de massa fechasse, utilizou-se parte do efluente tratado da refinaria e água pura. As vazões necessárias para tanto foram, respectivamente, 17,84 t/h e 28,53 t/h.

Existe um artifício para se tornar possível a aplicação da ferramenta DFA em situações com operações de vazão variável. No caso de operações que apresentam perda, estas são abertas em duas novas operações. A primeira nova operação apresenta vazão fixa igual ao valor da vazão de saída da operação original e concentrações de entrada e saída idênticas à mesma, ao passo que, a segunda nova operação apresenta vazão dada pela diferença entre as vazões de entrada e saída da operação original. Ao final da construção do DFA, na hora de se construir a RTM, as operações criadas são unidas, gerando a operação original. Neste quinto cenário, a operação 2 (vazão fixa) fornece água para completar o balanço de massa da operação 6, que é a operação criada para representar a perda de vazão da operação 2 original. Dessa forma, na hora de se construir a RTM, a união dessas operações para criação da original, requer um reciclo local.

Uma vez atendidas as demandas das operações que representam as perdas de vazão, pôde-se construir a rede de transferência de massa para o último cenário da primeira abordagem proposta. O resultado pode ser conferido na figura 3.12.

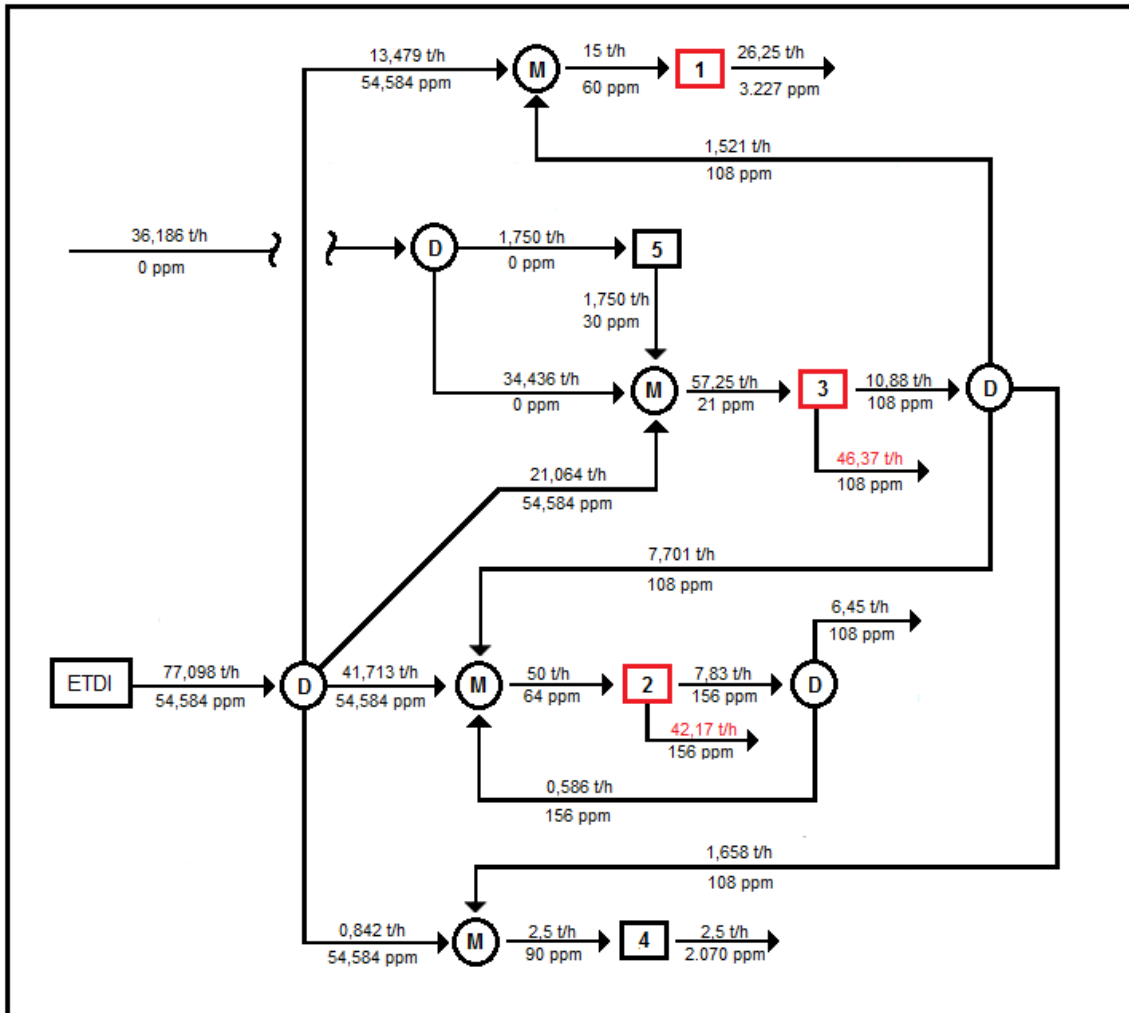


Figura 3.12 - Rede de transferência de massa para o cenário 5

A operação 2 original com vazão variável foi criada a partir da junção das operações 6 (42,17 t/h – 64 ppm) e 2 a vazão fixa (7,83 t/h – 64 ppm). Das 7,83 t/h de água da operação 2 a vazão fixa, 6,45 t/h são provenientes da ETDI. Considerando-se a operação 6, das 35,263 t/h das 42,17 t/h de água utilizada pela mesma também têm como origem a ETDI. Dessa forma, a operação 2 original utiliza um total de 41,713 t/h de efluente tratado. A operação 3, por sua vez, é formada pela união das operações 3 a vazão fixa e 7. Naquela, das 10,88 t/h de água consumida, 5,906 t/h são de água a 0ppm e 3,224 t/h são de efluente tratado da refinaria. Nesta, das 46,37 t/h de água



consumida, 28,53 t/h são de água a 0 ppm e 17,84 t/h são de efluente tratado da refinaria. Desta forma, a operação 3 original consome um total de 34,436 t/h de água a 0 ppm e 21,064 t/h de efluente tratado da refinaria.

A análise da RTM proposta para o quinto cenário permite classificá-lo, segundo o critério estabelecido no início do trabalho, como o mais promissor dentre os estudados. Considerando-se o fato de que a proposta deste estudo é reduzir o consumo de água limpa e minimizar o descarte de efluente por meio da tentativa de máximo reuso do mesmo, dentre os casos propostos nesta primeira abordagem, o quinto é, sem sombra de dúvidas, o melhor. Este cenário apresenta um consumo de água limpa igual a 868,464 t/d e gera um efluente com vazão diária igual a 844,8 t. Estes valores representam, respectivamente, uma redução de 71,4% e 28,5% em relação ao cenário base. É importante que fique claro que este cenário foi classificado como mais vantajoso considerando-se o critério supracitado, isto é, mínimo consumo de água limpa. Não necessariamente este é o caso que apresenta maior redução de custo em relação ao cenário base. Mais a frente neste capítulo, uma análise de custos será realizada e esta questão será discutida.

### **3.3.6 Cenário 6**

O sexto cenário traz uma abordagem diferente da dos cinco cenários propostos, em que as duas indústrias podem ser vistas como um só bloco consumidor de água. Nesta abordagem, a estação de tratamento de água (ETA) da refinaria providencia água para ambas as indústrias em duas qualidades distintas (pura e fresca) e se avalia a possibilidade de reuso deste recurso entre as suas operações diretamente. Ao final do processo, os efluentes de todas as operações são centralizados e tratados na ETDI.

O sexto cenário contará como fontes de água aquelas fornecidas pela ETA e a vazão extra proveniente da operação com ganho de vazão da petroquímica (filtração). A tabela 3.15 reúne informações acerca da qualidade e da vazão destas fontes. Neste cenário, a qualidade da água pura é considerada 0 ppm, diferente do que se observa na refinaria base, em que a água pura proveniente da ETA tem concentração 1 ppm.

**Tabela 3.15** - Fontes de água para o cenário 6

<b>Fonte</b>	<b>[Orgânicos] (ppm)</b>	<b>Vazão Máxima (t/h)</b>
Água Pura	0	$\infty$
Água Fresca	15	$\infty$
Filtração	3.027	11,25

O fluxograma do balanço hídrico da refinaria utilizada neste estudo, figura 3.2, foi construído por Mirre (2007) a partir de dados operacionais acerca da vazão obtidos do trabalho de Huang et al. (1999) e de dados de carga mássica trocada em cada operação contidos no trabalho de Ullmer et al. (2005). A partir destas informações, e conhecendo-se a qualidade da água que alimentava cada operação, Mirre (2007) realizou o balanço de contaminantes em cada operação e em cada ponto de mistura e divisão de correntes da refinaria em questão, obtendo o balanço hídrico da refinaria.

Uma vez que o objetivo deste trabalho é diminuir ao máximo a captação de água por parte das plantas por meio do máximo reuso, a operação das plantas em condições limites de concentração de entrada e saída de cada equipamento favorece este ideal. Dessa forma, a partir dos dados contidos na tabela 3.1 de carga mássica trocada em cada operação, bem como de concentrações limites de entrada e saída, é possível se construir uma tabela de oportunidades com os dados limites rearranjados da refinaria, assim como foi feito para a planta petroquímica.

A integração das duas plantas, desconsiderando-se o *stripper*, totaliza doze operações. Levando-se em consideração que existem operações com vazão variável e que para aplicação da metodologia DFA, elas são abertas em 2 novas operações, o problema proposto contará com um total de 16 operações. Para facilitar o tratamento do mesmo, elas serão numeradas e a correspondência entre operações e números é apresentada nas tabelas 3.16 e 3.17.

**Tabela 3.16** - Correspondência entre operações e números adotados (caso 6) - Refinaria

<b>Refinaria</b>	
<b>Operação</b>	<b>N°</b>
Dessalgação	1
Lavagem de Amônia	2
Torre de Destilação	3
Caldeira	4
Caldeira (Perda)	13
Lavagem de H <sub>2</sub> S	5
Uso Geral	6
Torre de Resfriamento	7
Torre de Resfriamento (Perda)	14

**Tabela 3.17** - Correspondência entre operações e números adotados (caso 6) - Petroquímica

<b>Petroquímica</b>	
<b>Operação</b>	<b>N°</b>
Filtração	8
Torre de Resfriamento A	9
Torre de Resfriamento A (Perda)	15
Torre de Resfriamento B	10
Torre de Resfriamento B (Perda)	16
Lavador de Gases	11
Lavagem de Equipamentos	12

Conhecendo-se a correspondência entre operações e número adotados, pode-se interpretar com facilidade as informações contidas na tabela 3.18. Esta tabela apresenta os dados limites rearranjados das duas plantas em estudo. A partir dela e das informações encontradas na tabela de fontes de água para o sexto cenário (tabela 3.15), pode-se construir o DFA preliminar para o presente caso.

**Tabela 3.18 - Dados limites rearranjados das plantas**

Op.	$\Delta M$ (g/h)	Vazão de Entrada Limite (t/h)	Vazão de Saída Limite (t/h)	[Entrada] Máx (ppm)	[Saída] Máx (ppm)
1	480.000	75	75	100	6.500
2	81.750	12,67	12,67	50	6.500
3	104.481	16,08	16,08	0	6.500
4	147	3	3	0	50
5	1.200	2,67	2,67	50	500
6	52.500	7,5	7,5	50	7.050
7	0	220	220	220	220
8	47.505	15	15	60	3.227
9	720,67	7,83	7,83	64	156
10	946,13	10,88	10,88	21	108
11	4.950	2,5	2,5	90	2.070
12	52,5	1,75	1,75	0	30
13	-	18	18	0	-
14	-	405	405	220	-
15	-	42,17	42,17	64	-
16	-	46,37	46,37	21	-

A operação 7, torre de resfriamento, não apresenta carga mássica. Dessa forma, a água que a alimenta sai com a mesma qualidade que entrou. Uma vez que na planta não há nenhuma fonte de água a 220 ppm, a operação 7 é alimentada com água fresca, ou seja, não opera em suas condições limites.

A figura 3.13 exibe o DFA preliminar para o sexto caso obtido com auxílio do software MINEA a partir da tabela de oportunidades rearranjada (tabela 3.18) e da tabela de fontes de águas (tabela 3.15).



Figura 3.13 - DFA preliminar para o cenário 6

Para obtenção do DFA final, algumas alterações foram realizadas no DFA preliminar gerado pelo software. Analisando-se a figura 3.13, percebe-se que só houve reuso do efluente da operação 7 (15 ppm). Entretanto, alguns outros efluentes mais contaminados que este também poderiam ser reutilizados. Desta forma, com o intuito de se reutilizar uma menor quantidade de água proveniente da operação 7, para que, posteriormente, fosse possível atender a demanda das operações que representam perda de vazão sem maiores necessidades de captação de água pura ou fresca, optou-se, em alguns casos, pela reutilização de correntes provenientes de outras operações. A ideia desta estratégia reside no fato de que estes efluentes já foram vazões de água captadas. Portanto, um efluente com qualidade mais nobre é mais interessante para posterior reutilização.

A primeira mudança feita foi na operação 10. Ao invés de se fazer uso somente de água proveniente da operação 7, fez-se uso também do efluente da operação 12 em sua totalidade. Desta forma, a vazão reutilizada da operação 7, deixou de ser 10,178 t/h e passou a ser 8,71 t/h. Por fazer reuso também de um efluente com qualidade menos nobre que o proveniente da operação 7, a quantidade de água necessária para realizar a troca de massa requisitada na operação aumentou. Sendo assim, a operação 10, que no DFA preliminar apresentava um reciclo local de 0,702 t/h para atender seu balanço de massa, passou a necessitar de um reciclo local de 0,42 t/h no DFA final. Seguindo a mesma linha de raciocínio, ao invés de se utilizar somente água proveniente da operação 7 na operação 2, utilizou-se também o efluente da operação 4 em sua totalidade. Esta mudança reduziu a reutilização do efluente da operação 7 na operação 2 de 12,6 para 9,65 t/h e fez com o reciclo local da operação caísse de 0,068 t/h para 0,02 t/h. A última modificação similar feita foi na operação 1. Esta, que no DFA preliminar captava 74,017 t/h de água da operação 7, passou a captar somente 58,717 t/h mediante a reutilização dos efluentes provenientes das operações 9 e 10. Além disso, seu reciclo local passou a ser 0,715 t/h, ao invés de 0,983 t/h. O DFA final pode ser visto no apêndice 2 deste trabalho.

A análise do DFA final permite identificar as correntes disponíveis para reuso de forma a atender a demanda das operações que representam perda. A tabela 3.19 reúne informações acerca dessas correntes.

**Tabela 3.19** - Características das correntes disponíveis para reuso (Caso 6)

<b>Operação</b>	<b>Vazão (t/h)</b>	<b>[Orgânicos] (ppm)</b>
Água Pura	∞	0
Água Fresca	∞	15
1	74,285	6.500
2	12,65	6.500
3	16,08	6.500
5	2,478	500
6	7,46	7.050
7	110,677	15
8	26,04	3.227
11	2,41	2.070

Com o objetivo de se atender a concentração de entrada e a vazão requisitada pela operação 16, utilizou-se parte do efluente da operação 5 e parte do efluente da operação 7. Para se determinar as vazões necessárias, realizou-se o mesmo procedimento feito para os demais casos, obtendo-se, respectivamente, 0,57 t/h e 45,8 t/h. A operação 15, por sua vez, foi atendida a partir do reuso da outra parte do efluente da operação 5, de parte do efluente da operação 11 e de parte do efluente da operação 7. As vazões necessárias para tanto foram, respectivamente, 1,908 t/h, 0,55 t/h e 39,702 t/h.

A água que alimenta a operação 7 sai com a mesma qualidade que entrou e, uma vez que na planta não há nenhuma fonte de água a 220 ppm, a mesma é alimentada com água fresca, ou seja, não opera em suas condições limites. Portanto, a operação 14 que representa a perda de vazão da operação 7 original será suprida com água fresca, assim como a operação 7 a vazão fixa.

Após a determinação das vazões e qualidades das águas necessárias para se atender a demanda das operações que representam perda, pôde-se construir a rede de transferência de massa para o cenário em estudo e o resultado é exibido na figura 3.14.

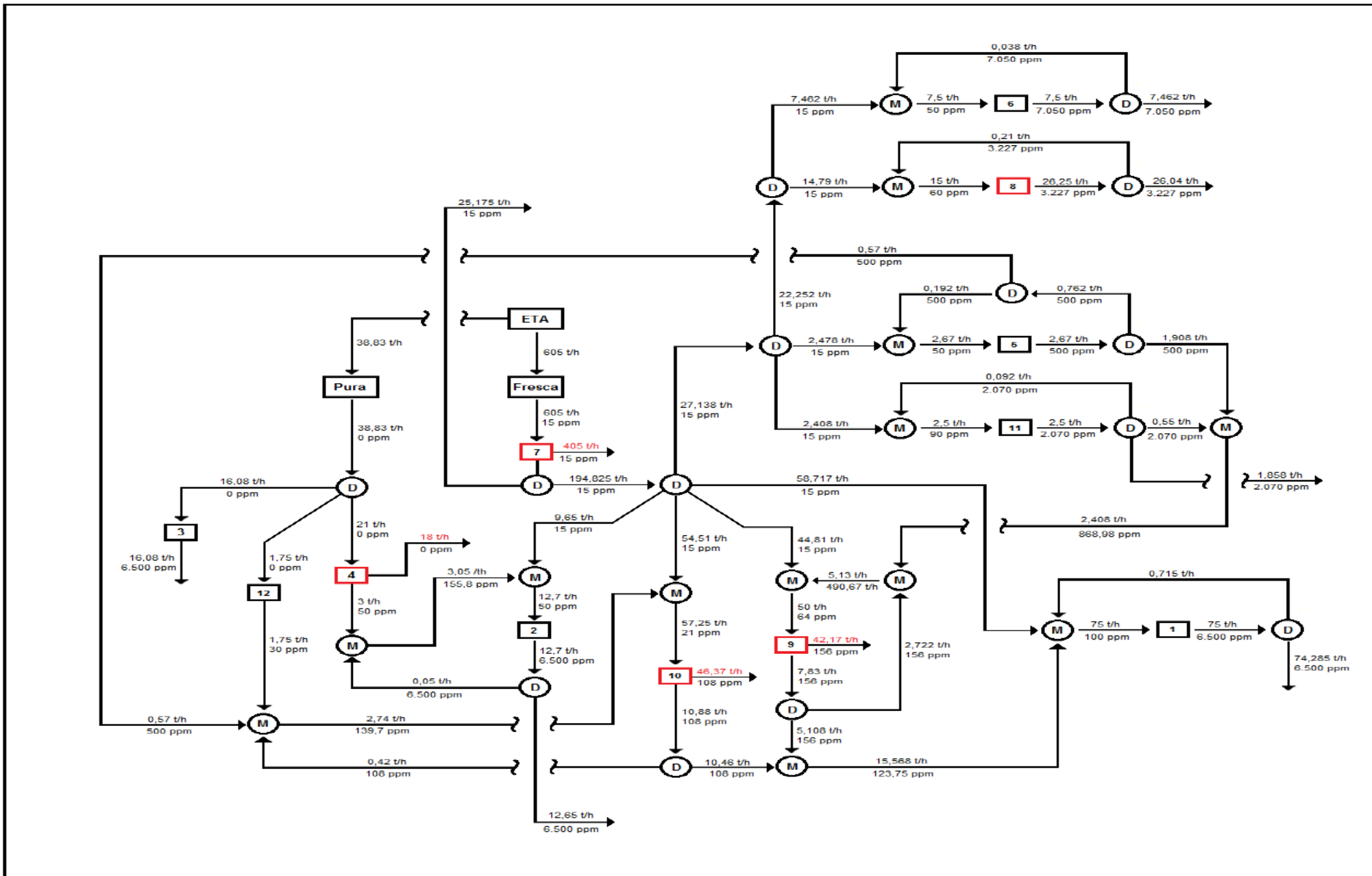


Figura 3.14 - Rede de transferência de massa para o cenário 6



Unindo-se as operações 15 (42,17 t/h – 64 ppm) e 9 a vazão fixa (7,83 t/h – 64 ppm), obtém-se a operação 9 original com vazão variável. Das 7,83 t/h de água da operação 9 a vazão fixa, 5,108 t/h são de água a 15 ppm proveniente da operação 7. De maneira análoga, 39,702 t/h das 42,17 t/h de água utilizada na operação 15 são parte do efluente da operação 7. O restante é formado por partes dos efluentes das operações 5 e 11. Sendo assim, a captação de água da operação 7 por parte da operação 9 original é de 44,81 t/h, como pode ser visto na figura 3.14. O mesmo raciocínio explica o balanço hídrico da operação 10. Das 10,88 t/h requisitadas pela operação 10 a vazão fixa, 8,71 t/h são de água (15 ppm) provindas da operação 7. Já a operação 16, que representa a perda de vazão da operação 10, reutiliza 45,8 t/h de água a 15 ppm provenientes da operação 7 e 0,57 t/h de água a 500 ppm provindas da operação 5. As operações 13 e 14, que representam a perda de vazão das operações 4 e 7, respectivamente, tiveram suas demandas atendidas, nesta ordem, por água pura e água fresca.

A análise da redução do consumo de água será feita sem distinção entre as qualidades oferecidas pela ETA, isto é, considerar-se-á a captação geral de água pelas plantas antes e depois da integração. Observando-se a figura 3.2, pode-se perceber que, a priori, a captação de água por parte da refinaria era de 762,64 t/h, o que representa um consumo diário de 18.303,36 t. Somando-se com as 3.037 t/d consumidas pela planta petroquímica antes de se realizar a integração proposta pelo sexto cenário, a captação diária total de água das duas plantas era de 21.340,36 t. Após a integração, esta captação caiu, como pode ser vista na figura 3.14, para 5.607,72 t/d, o que representa uma redução de 73,7%. Comparando-se ao cenário mais promissor da primeira abordagem, segundo os objetivos deste trabalho, que apresentou uma captação total de 19.171,824 t/d (868,464 t/d por parte da petroquímica e 18.303,36 t/d por parte da refinaria), a queda na captação de água foi de 70,8%.

Diante dos números apresentados, pode-se dizer que a integração refino-petroquímica merece uma atenção especial. Mais uma vez é válido ressaltar que não necessariamente este é o caso que apresenta maior redução de custo em relação ao cenário base. O próximo tópico deste capítulo tem como proposta uma breve análise de custos para discutir esta questão.

### 3.4 Análise Econômica

É extremamente comum em estudos que envolvem o gerenciamento dos recursos hídricos a avaliação dos resultados obtidos com base em critérios ambientais, o que envolve a redução da captação de água e até mesmo do descarte de efluentes. Neste estudo de caso apresentado, a análise comparativa dos cenários não foi diferente. A classificação dos casos foi feita com base na redução da captação de água e da geração de efluentes pelas plantas. Entretanto, no mundo capitalista atual, é impossível deixar de lado a atratividade econômica em jogo. Os critérios econômicos, na maioria dos casos, têm a responsabilidade de apontar, em conjunto com os critérios ambientais, a alternativa mais adequada dentre as diversas propostas.

Toda prática empresarial que tange essa questão da redução do impacto ambiental inerente ao seu processo produtivo, seja reduzindo a captação de água, seja diminuindo o descarte de efluentes, apresenta benefícios financeiros diretos e indiretos. Em paralelo aos ganhos obtidos pelas práticas mencionadas, os ganhos diretos, existe uma espécie de maior apreciação da imagem da empresa frente às demais concorrentes, o que acaba por valorizar suas ações na bolsa de valores, por exemplo. Esta valoração empresarial, explicada pela adoção do pensamento verde por parte da sociedade atual, pode ser vista como um benefício econômico indireto, que é de difícil mensuração. Conseqüentemente, a análise econômica de projetos relacionados às reduções de impactos ambientais dificilmente levará em conta todos os aspectos existentes. Além disso, embora esta análise não leve em consideração os gastos relacionados às mudanças de arranjo de tubulação propostas, bem como aos custos extras de bombeamento, ou até mesmo à inclusão de novos equipamentos eventualmente necessários, para uma avaliação mais apurada, a inclusão destes gastos é imprescindível. Apesar da imprecisão atrelada, este critério é útil no sentido de orientar tomadas de decisão.

Com o intuito de se avaliar o desempenho das redes de transferência de massa obtidas por meio da ferramenta DFA, a minimização da captação de água e a redução dos custos totais foram os índices de méritos utilizados na

análise. Neste estudo, utilizaram-se os dados econômicos apresentados no trabalho de Mirre (2007). Os dados utilizados pelo autor referentes à captação de água e ao descarte de efluentes foram adaptados dos trabalhos de Takama et al. (1980) e Wang e Smith (1994a). Considerando-se os processos de tratamento que compõem a ETDI, Mirre (2007) obteve os dados referentes ao separador API e ao tratamento biológico do trabalho de Gunaratnam *et al.* (2005), enquanto que os referentes ao flotador a ar dissolvido, por não haver informações, foram considerados similares ao de uma unidade de coagulação, sedimentação e filtração, disponível no trabalho de Takama et al.(1980). A unidade carvão ativado, por sua vez, teve seus dados estimados a partir do trabalho de Azevedo et al. (1999). Como a Refinaria utilizada como base para este estudo, bem como a ETDI incorporada para tratamento do efluente centralizado são provenientes do trabalho de Mirre (2007), os dados econômicos também foram retirados do trabalho deste autor e são apresentados nas tabelas 3.20 e 3.21, onde  $f$  é a vazão da corrente que alimenta a operação em t/h.

**Tabela 3.20 - Correlações de custos (adaptado de Mirre, 2007)**

	<b>Custo de Investimento (U\$)</b>	<b>Custo Operacional (U\$/h)</b>
Regeneração ( <i>Stripper</i> )	$16.800 \times f^{0,7}$	$1,0 \times f$
Água Pura	-	0,3 \$/t
Água Fresca	-	0,1 \$/t
Efluente de Descarte	-	0,03 \$/t

**Tabela 3.21 - Correlações de custos dos processos da ETDI (adaptado de Mirre, 2007)**

<b>Processo</b>	<b>Custo de Investimento (U\$)</b>	<b>Custo Operacional (U\$/h)</b>
Separador API	$4.800 \times f^{0,7}$	0
Flotador a Ar Dissolvido	$12.600 \times f^{0,7}$	$0,0067 \times f$
Tratamento Biológico	$12.600 \times f^{0,7}$	$0,0067 \times f$
Carvão Ativado	$49.884 \times f^{0,7}$	$0,177 \times f$

As análises de custo serão feitas em uma base anual, levando-se em conta a média de horas operadas pela planta proposta por Wang e Smith (1994a). Considerando-se que as plantas operam cerca de 8.600 horas em um ano, as tabelas 3.22, 3.23 e 3.24 apresentam os resultados da análise econômica.

Investimento	Cenário Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
Captação de Água Pura	-	-	-	-	-	-	-
Captação de Água Fresca	-	-	-	-	-	-	-
Efluente de Descarte	-	-	-	-	-	-	-
<i>Stripper</i>	441.508,32	441.508,32	441.508,32	441.508,32	441.508,32	441.508,32	-
Separador API	318.187,59	-	0,00	0,00	43.762,80	100.501,24	318.187,59
Flotador a Ar Dissolvido	835.242,41	-	-	0,00	114.877,36	263.815,75	835.242,41
Tratamento Biológico	835.242,41	-	-	-	114.877,36	263.815,75	835.242,41
Carvão Ativado	3.306.764,48	-	-	-	-	1.044.459,13	3.306.764,48
<b>Total</b>	<b>5.736.945,21</b>	<b>441.508,32</b>	<b>441.508,32</b>	<b>441.508,32</b>	<b>715.025,84</b>	<b>2.114.100,19</b>	<b>5.295.436,89</b>

Tabela 3.22 - Custos de investimento

Operação	Cenário Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
Captação de Água Pura	654.834,10	599.297,88	599.297,88	599.297,88	553.128,78	421.716,48	100.181,40
Captação de Água Fresca	546.246,20	546.246,20	546.246,20	546.246,20	546.246,20	546.246,20	520.300,00
Efluente de Descarte	104.244,90	98.702,03	98.702,03	98.702,03	99.376,44	100.630,32	42.195,90
<i>Stripper</i>	917.362,00	917.362,00	917.362,00	917.362,00	917.362,00	917.362,00	-
Separador API	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Flotador a Ar Dissolvido	23.048,00	-	-	0,00	1.354,59	4.442,39	23.048,00
Tratamento Biológico	23.048,00	-	-	-	1.354,59	4.442,39	23.048,00
Carvão Ativado	608.880,00	-	-	-	-	117.358,58	608.880,00
<b>Total</b>	<b>2.877.663,20</b>	<b>2.161.608,11</b>	<b>2.161.608,11</b>	<b>2.161.608,11</b>	<b>2.118.822,60</b>	<b>2.112.198,36</b>	<b>1.317.653,30</b>

Tabela 3.23 - Custo anual operacional

Total	Cenário Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
<b>Custo Anual*</b>	<b>8.614.608,41</b>	<b>2.603.116,43</b>	<b>2.603.116,43</b>	<b>2.603.116,43</b>	<b>2.833.848,44</b>	<b>4.226.298,55</b>	<b>6.613.090,19</b>

Tabela 3.24 - Custo anual total

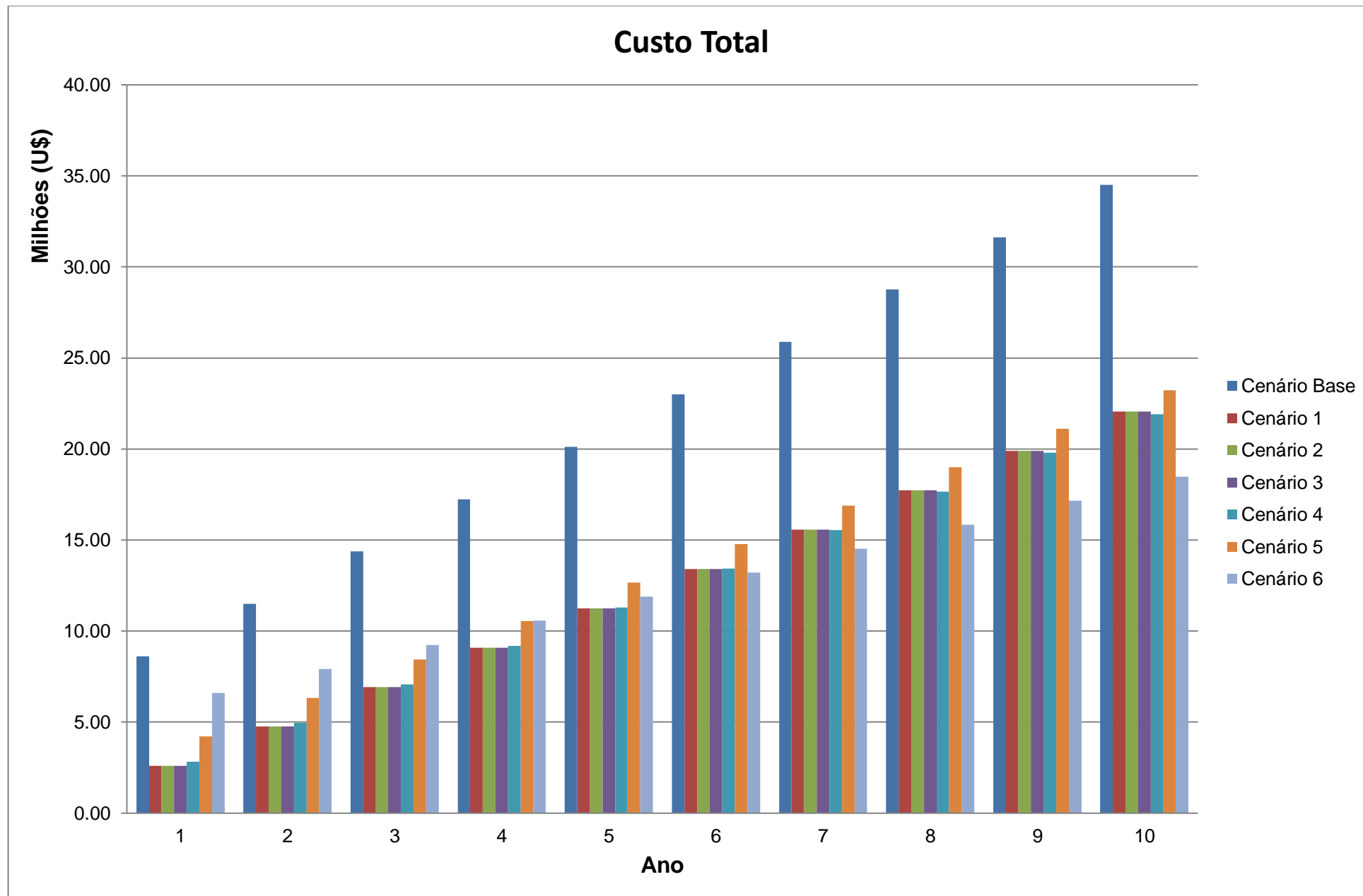
\* O custo anual total leva em consideração o custo de investimento também. Portanto, trata-se do custo anual referente ao primeiro ano.

Com o intuito de se viabilizar a comparação inter-abordagens, considerou-se o limite físico da ETDI para obtenção dos custos operacionais e de investimento referentes às etapas de tratamento do cenário base e do cenário sexto. Para se obter estes custos, necessita-se ter conhecimento das vazões tratadas, o que não é conhecido para os cenários mencionados. Desta forma, considerou-se 400 t/h, vazão máxima que pode ser tratada na ETDI incorporada, a vazão de efluente tratada nesses casos.

Os cinco primeiros cenários propostos, que fazem parte da primeira abordagem, não provocaram mudanças no sistema hídrico da refinaria utilizada como base para o estudo de caso. A diferença entre eles está nos tipos de tratamento empregados no efluente centralizado da refinaria. Dessa forma, o custo de investimento e operacional da unidade *stripper* da refinaria é o mesmo para todos os casos, a não ser para o sexto, em que esta unidade foi desconsiderada. Além disso, o custo operacional relacionado à captação de água fresca também é o mesmo, uma vez que somente a refinaria faz uso de água com esta qualidade nesses casos.

Dentre os cinco cenários propostos para a primeira abordagem, os três primeiros apresentaram RTM's e custos iguais. O que ocorre é que a qualidade da água regenerada pelas etapas de tratamento propostas para cada um deles não se mostrou propícia para reuso. Dessa forma, o tratamento de efluentes não foi considerado, fazendo com que os três primeiros cenários da primeira abordagem fossem idênticos.

Analisando-se os custos totais anuais dos cenários propostos, percebe-se que todos eles apresentaram redução de custo considerável em relação ao cenário base. Como destacado, o custo anual total apresentado na tabela 3.24, leva em consideração o custo de investimento. Entretanto, a quantia desembolsada com este fim é um gasto realizado apenas uma vez. Portanto, levando-se em consideração que o tipo de negócio aqui tratado é duradouro, os cenários que apresentam menor custo operacional anual são mais promissores, haja visto que as plantas funcionarão por tempo suficiente para compensar a diferença dos custos de investimento. A figura 3.15 apresenta a evolução do custo total dos cenários ao longo de dez anos.



**Figura 3.15** - Evolução do custo total dos cenários ao longo de dez anos

Analisando-se a figura, percebe-se que, dentre os cenários propostos, apesar do sexto apresentar o maior custo total no primeiro ano, decorrente da maior necessidade de investimentos, seu custo operacional é muito inferior em relação aos demais. Por conta da grande redução na captação de água possibilitada pelo reuso intenso entre as operações consumidoras de água da planta integrada, o sexto cenário, em apenas seis anos, mostrou-se o melhor dentre os propostos, tanto em termos financeiros, quanto em termos de impacto ambiental. Apesar de seu desempenho notório frente aos demais, este cenário requer um grande planejamento. A integração entre plantas já existentes e em operação, implicaria numa mudança estrutural muito severa, sendo quase que inviável a sua execução. Dessa forma, um cenário como este deve ser avaliado em fase de projeto, para que sua execução seja possível. Em plantas já existentes, ou até mesmo em casos em que uma planta está sendo projetada nas proximidades de uma outra, a reutilização dos recursos hídricos provenientes de uma na outra, como tratado na primeira abordagem, mostra-se uma boa estratégia financeira e ambiental.

# **Capítulo 4**

## **Conclusões**

Atualmente, influenciadas pelo pensamento verde que, aos poucos, incrusta-se na cabeça da sociedade moderna, as legislações ambientais estão cada vez mais severas. A questão da escassez dos recursos hídricos, impulsionada pelo crescimento populacional, bem como pelo desenvolvimento industrial e tecnológico, colocou em xeque a disponibilidade de água com qualidade para o ser humano, despertando a sociedade para um estado de alerta, em que se percebeu ser possível aliar desenvolvimento econômico e social com preservação ambiental. Nesse contexto, a valorização da água vem provocando grandes mudanças nas estratégias de atuação de empresas que consomem volumes consideráveis deste recurso. Paralelamente às obrigações para com as legislações ambientais que devem ser atendidas, estas mudanças são instigadas pelos ganhos diretos e indiretos proporcionados pela adoção de práticas ambientalmente corretas. A busca pela melhoria na gestão dos recursos hídricos oferece uma série de economias como consequência de projetos que visam o reusode efluentes, sendo capazes de diminuir, de forma concomitante, o consumo de água e a geração de efluentes.

O objetivo deste trabalho foi a busca por oportunidades de conservação e uso racional da água em plantas integradas de refino e petroquímica, em função da notoriedade da questão dos recursos hídricos nos dias atuais, bem como da tendência de integração entre as indústrias estudadas, impulsionada pelo potencial sinérgico entre suas atividades. Com intuito de se identificar estas oportunidades, aplicou-se a ferramenta DFA a um estudo de caso. Diversos cenários, que promoviam níveis cada vez maiores de integração entre as plantas, foram propostos e as redes de transferência de massa foram construídas a partir da interpretação dos diagramas de fonte gerados. A análise das redes geradas e a utilização de dados econômicos referentes à captação de água, ao despejo de efluentes e aos custos de investimento permitiram a classificação dos cenários quanto aos índices de méritos adotados.



Os resultados obtidos foram satisfatórios. A partir da análise das RTM's construídas, pôde-se verificar a eficácia da ferramenta DFA na busca pela redução do consumo de água e geração de efluentes, por meio da identificação de oportunidades de reuso de efluentes entre operações consumidoras de água. Além disso, constataram-se também os benefícios relacionados à integração entre as indústrias envolvidas. Conforme se progrediu ao longo dos cenários, aumentando-se o nível de integração entre as plantas, a captação de água e o custo operacional foram reduzidos, promovendo ganhos diretos e indiretos para o complexo integrado. Estes ligados à valoração da imagem da empresa em relação às concorrentes e aqueles atrelados aos resultados observados na análise econômica realizada.

Os resultados obtidos comprovam que, de fato, a integração refino-petroquímica se apresenta como uma boa estratégia de atuação. O sexto cenário proposto, o de maior nível de integração, foi o que apresentou maior redução na captação de água e menor custo operacional. Embora tenha exigido maior nível de investimento, em apenas seis anos a economia realizada compensou o excedente investido em relação aos demais cenários. Apesar dos benefícios notórios, este nível elevado de integração requer um planejamento prévio. Não é simples realizar uma mudança estrutural com tal nível de agressividade em plantas já atuantes. Entretanto, o estudo foi útil para ratificar as vantagens oferecidas pela integração de processos e, possivelmente, instigar projetos futuros com maiores níveis de integração, acarretando numa maior competitividade das empresas envolvidas, bem como num mundo mais desenvolvido e sustentável.

# **Capítulo 5**

## **Sugestões**

O estudo de caso apresentou uma série de simplificações por conta da falta de informações. Apesar das simplificações realizadas, os resultados obtidos e as conclusões a que se chegou a partir deles não são inválidos. Em processos reais, há uma série de contaminantes que devem ser removidos para que o produto final atinja às especificações desejadas. Dificilmente, observar-se-ão processos das indústrias abordadas que apresentem apenas uma substância indesejada nas correntes finais. Dessa forma, como primeira sugestão, a proposta de se estudar a integração mássica de plantas de refino e petroquímica considerando-se uma quantidade maior de contaminantes e que sejam mais representativos, trata-se de uma ideia promissora.

Segundo Perlingeiro (2005), um método heurístico consiste numa metodologia baseada em regras práticas que não são deduzidas matematicamente a partir de princípios físicos, mas que são validadas pelo uso. O método heurístico consiste em aplicar em cada estado a regra mais apropriada nas circunstâncias vigentes, levando a um estado seguinte. Desta forma, a busca heurística resulta em apenas um fluxograma, que não necessariamente é o ótimo, mas que, dependendo da qualidade das regras utilizadas, pode se encontrar próximo da solução ótima. Apesar de não necessariamente atingir a melhor solução, a grande vantagem dos métodos heurísticos está na praticidade de aplicação, sendo, portanto, um bom ponto de partida para a busca de soluções mais refinadas.

Levando-se em consideração os conceitos apresentados no parágrafo anterior, como segunda sugestão, sugere-se a aplicação de um método evolutivo para se aprimorar progressivamente as redes de transferência obtidas, buscando-se soluções mais elaboradas.

O presente trabalho propôs apenas a integração mássica entre as plantas, apresentando soluções de compartilhamento e reuso do recurso água entre as mesmas. Apesar dos resultados satisfatórios, o nível de integração entre elas pode ser maior. Baseando-se na ideia do trabalho de Stelling (2004) que propôs a incorporação da variável temperatura à ferramenta DFA, sugere-se o estudo da possibilidade de integração entre as correntes quentes e frias das indústrias estudadas, para se minimizar o consumo energético da superestrutura formada pelas plantas. Além disso, a ideia de *suplychain* pode ser incorporada ao trabalho, aprofundando ainda mais o nível de integração entre as plantas por meio do aproveitamento de sub-produto de baixo valor agregado de uma instalação como insumo na outra e vice-versa.

## Referências Bibliográficas

- AMORIM, R. S. Abastecimento de Água de uma Refinaria de Petróleo. Caso Replan. Dissertação de Mestrado. Sistema de Gestão da Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2005.
- AZEVEDO, C.A.L., KAYANO, C.A.S., ABREU, G.M.R., SALVESTRO, R.E. Reutilização de Efluentes Líquidos de uma Refinaria de Petróleo. Trabalho de Conclusão de Curso de Pós-Graduação em Controle da Poluição Ambiental, FAAP / CENAP. São José dos Campos, SP, 1999.
- AZNALIN, R. R., ARSLANOV, M. M. AKHMETOV, A. F., BALYANOV, A. G. Refinery Technological Processes Integration. Propylene Production On Fcc Unit. Disponível em: <[http://www.ogbus.ru/eng/authors/Aznalin/Aznalin\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/eng/authors/Aznalin/Aznalin_1.pdf)>. Acessado em: 27 abril. 2014.
- BESTETTI, A. L. Refino de Petróleo e Indústria Petroquímica - Benefícios da Integração. Trabalho de Conclusão de Curso. Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- BNDES, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. "Indústria Petroquímica Brasileira: Situação Atual e Perspectivas". Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set2105.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set2105.pdf)>. Acessado em: 10 de maio de 2014
- CASTRO, P., MATOS, H., FERNANDES, M.C., PEDRO NUNES, C. "Improvements for mass-exchange networks design". Chemical Engineering Science, 54, 1649-1665, 1999.
- CAO, D., FENG, X., DUAN, X. "Design of Water Network with Internal Mains for Multi-Contaminant Wastewater Regeneration Recycle". Chemical Engineering Research and Design, 82 (A10), 1331-1336, 2004.
- COLLARES, S. Avaliação do Uso de Recursos Hídricos em Refinarias de Petróleo: Um Estudo de Caso na Petrobras. Dissertação de Mestrado. Sistema de Gestão da Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2004.

- CUNHA, F.R., MIRRE, R.C., SANTOS, R.P. Minimização de Efluentes Aquosos na Indústria de Processos Químicos: O Caso de uma Refinaria de Petróleo. Projeto Final de Curso de Graduação. Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- DAE, Departamento de Água e Esgoto de São Caetano do Sul. “A Distribuição de Água no Mundo”. Disponível em: <<http://www.daescs.sp.gov.br/index.asp?dados=ensina&ensi=planeta>>. Acessado em: 06 de agosto de 2014.
- DELGADO, B.E.P.C. Minimização de Efluentes Aquosos em Plantas Industriais – Extensão do Algoritmo Diagrama de Fontes de Água para Regeneração Diferenciada. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.
- FARIA, D. C. Reuso das Correntes de Efluentes Aquosos em Refinarias de Petróleo. Dissertação de Mestrado. Centro de Tecnologia/UFSC, Florianópolis, Fevereiro de 2004.
- FRANÇA, A. L. F. Minimização do Consumo de Água e da Geração de Líquidos em Siderurgia. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.
- GOMES, J. F. S. Procedimento para Minimização de Efluentes Aquosos. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.
- GOMES, J.F.S., QUEIROZ, E.M., PESSOA, F.L.P., “Design procedure for water/wastewater minimization: single contaminant”, Journal of Cleaner Production, 15, 474-485, 2007.

- GOMES, J.F.S., MIRRE, R.C., DELGADO, B.E.P.C., QUEIROZ, E.M., PESSOA, F.L.P., "Water Sources Diagram in Multiple Contaminant Processes: Maximum Reuse", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52, 1667-1677, 2013.
- GUNARATNAM, M., ALVA-ARGÁEZ, A. KOKOSSIS, A., KIM, J.-K., SMITH, R., "Automated design of total water systems", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44, 588-599, 2005.
- HIGA, C. M., PENHA, N. P. Minimização de Efluentes Aquosos: O Caso de uma Refinaria de Petróleo. Projeto Final de Curso de Graduação. Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.
- HUANG, C-H., CHANG, C-T., LING, H-C. "A mathematical programming model for water usage and treatment network design". *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 38, 2666-2679, 1999.
- IMMICH, A.P.S., GUSATTI, M., MELLO, J.M.M., GUELLI, U. SOUZA, S.M.A., PESSOA, F.L.P., ULSON DE SOUZA, A.A. "Application of the water source diagram (WSD) procedure to water use minimization in a batchy process", In: EUROPEAN CONGRESS OF CHEMICAL ENGINEERING, 2007, Proceedings of ECCE-6, Copenhagen, Denmark, 1-14, 2007.
- KARTHICK, R., KUMARAPRASAD, G., SRUTI, B., "Hybrid optimization approach for water allocation and mass exchange network", *Resources, Conservation and Recycling*, 54 (11), 783-792, 2010.
- KUMARAPRASAD, G., MUTHUKUMAR, K., Design of mass exchange network and effluent distribution system for effective water management, *Journal of Cleaner Production*, 17 (17), 1580-1593, 2009.
- MARQUES, S.V. Minimização do Consumo de Água e da Geração de Efluentes Aquosos – Estudos de Casos. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, Agosto, 2008.

- MELO, A.R. Uso Integrado e Eficiente da Água nas Indústrias Têxteis Catarinenses. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2008.
- MIRRE, R.C. Recuperação e Reuso de Água na Indústria de Petróleo: Síntese de Redes de Transferência de Massa. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímico. Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.
- MIRRE, R. C. Metodologia para o Gerenciamento Sustentável do Reuso de Águas e Efluentes Industriais por meio da Integração de Processos. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, Agosto de 2012.
- Nexant Chem Systems. “Benefits of Refinery/Petrochemical Integration 06/07S7”. Disponível em: [http://thinking.nexant.com/sites/default/files/report/field\\_attachment\\_toc/200709/0607S7\\_toc.pdf](http://thinking.nexant.com/sites/default/files/report/field_attachment_toc/200709/0607S7_toc.pdf). Acessado em: 14 de maio de 2014.
- Notas de aula da disciplina Integração de Processos, EQE723. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, Junho - Agosto de 2014.
- PERLINGEIRO, C.A.G., Engenharia de Processos: análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos, São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 2005.
- PNUMA, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. “Cuidando das Águas soluções para melhorar a qualidade dos recursos hídricos”. Disponível em: [http://www.pnuma.org.br/admin/publicacoes/texto/Cuidando\\_das\\_aguas\\_final\\_baixa.pdf](http://www.pnuma.org.br/admin/publicacoes/texto/Cuidando_das_aguas_final_baixa.pdf) >. Acessado em: 02 de agosto de 2014.

- QUEIROZ, E.M., PESSOA, F.L.P., “Integração de Processos: uma ferramenta para minimizar o consumo energético e o impacto ambiental”, In: MELO Jr., P.A. (Org.), Fronteiras da Engenharia Química 1, Série Escola Piloto de Engenharia Química, PEQ/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro: Ed. e-papers, 2005.
- REBOUÇAS, A. C. Água no Brasil: Abundância, Desperdício e Escassez. Bahia Análise & Dados, Salvador, v. 13, n. especial, p. 341-345, 2003. Disponível em: <[http://www.icb.ufmg.br/labs/benthos/index\\_arquivos/pdfs\\_pagina/Minicurso/pag\\_341.pdf](http://www.icb.ufmg.br/labs/benthos/index_arquivos/pdfs_pagina/Minicurso/pag_341.pdf)>. Acessado em: 02 de Agosto de 2014.
- SANTOS, P. C. Recentes Impactos da Indústria Petroquímica Sobre o Parque de Refino. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímico. Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, Setembro, 2008.
- SANTOS, R.P. Extensão e Automatização do Diagrama de Fontes de Água Usado no Gerenciamento e Redução do Consumo de Água em Plantas Industriais. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.
- SCARLATI, P.R.S. Redução do Consumo de Água na Indústria Petroquímica. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímico. Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.
- SOUZA, A.A.U. et al. Application of Water Source Diagram (WSD) Method for the Reduction of Water Consumption in Petroleum Refineries. Resources, Conservation and Recycling, v. 53, p. 149-154, 2009.
- SOUZA, A.A.U. et al. The Modified Water Source Diagram Method Applied to Reuse of Textile Industry Continuous Washing Water. Resources, Conservation and Recycling, v. 54, p. 1405-1411, 2010.



- STELLING, R.J. Síntese Combinada de Redes de Equipamentos de Transferência de Massa e de Trocadores de Calor. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.
- TAKAMA, N., KURIYAMA, T., SHIROKO, K., UMEDA, T., “Optimal water allocation in a petroleum refinery”, Computers and Chemical Engineering, 4, 251-258, 1980.
- TAVARES, M. E. E. Análise do Refino no Brasil: Estado e Perspectivas – Uma Análise “Cross-Section”. Tese de Doutorado. Programa de Planejamento Energético/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- ULLMER, C., KUNDE, N., LASSAHN, A., GRUHN, G., SCHULZ, K., “WADO TM: Water design optimization – methodology and software for the synthesis of process water systems”, Journal of Cleaner Production, 13, 485-494, 2005.
- WANG, Y.P., SMITH, R., “Wastewater minimisation”, Chemical Engineering Science, 49 (7), 981-1006, 1994a.

# Apêndices

## Apêndice 1 – Tutorial MINEA

O MINEA é um programa desenvolvido em plataforma Microsoft Excel® a partir do estudo de Santos (2007), na Escola de Química (UFRJ), como uma ferramenta de automação do método Diagrama de Fontes de Água (DFA). Sua principal utilidade está proporcionar cálculos rápidos na geração do DFA, tornando mais prática a identificação de oportunidades de reuso em processos industriais. Assim, fornece ao usuário informações acerca da rede de transferência de massa com consumo mínimo de água, embora não ilustre a estrutura da rede nem realize seu balanço material, deixando para o usuário a análise das propostas de reuso.

A interface do programa permite indicar restrições como proibições de correntes para reuso, perda e/ou ganho de vazão, operações com vazão fixa, bem como análise de possibilidade de deslocamento quando se considera simultaneidade na transferência de componentes (análise de múltiplos componentes).

Ao abrir o programa e prepará-lo para uso, é necessário habilitar macros, clicando na opção que disponibiliza esta função (Figura A1.1).

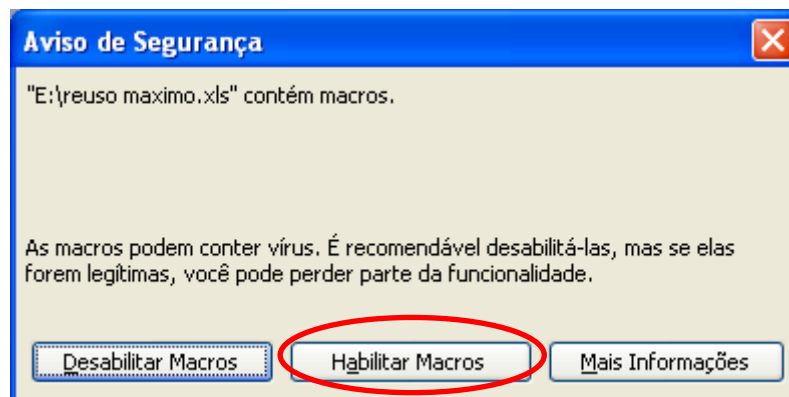


Figura A1.1 – Tela inicial para habilitar a macro do MINEA

Se não for possível habilitar esta função com este procedimento inicial, deve-se então verificar se o aplicativo Excel está no nível de segurança avançado, sendo necessário modificá-lo para nível médio, em “Ferramentas” e “Opções”. Na janela Opções, deve-se clicar na aba

“Segurança” e em seguida clicar em “Segurança de macro” (Figura A1.2), para então marcar a opção de nível médio, e clicar em OK (Figura A1.3). Após isto, deve-se fechar o programa em Excel e reabri-lo em seguida.

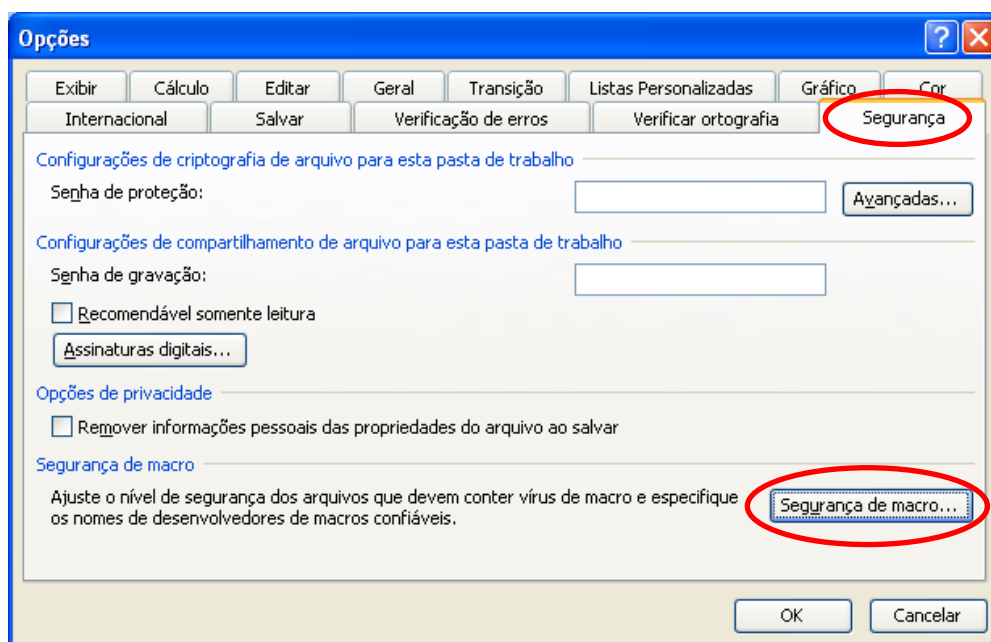


Figura A1.2 – Tela de opções para habilitar macros no Excel

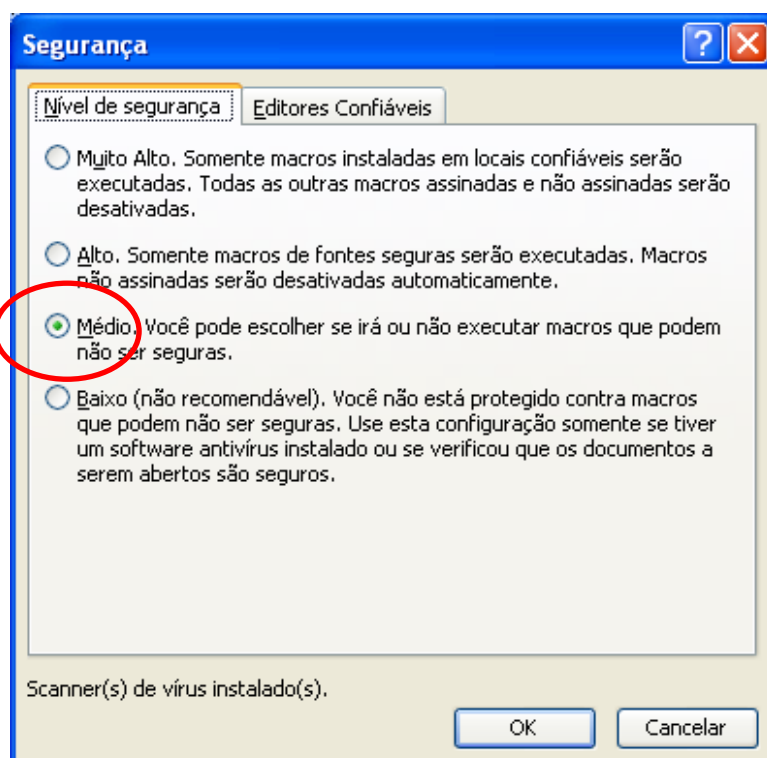


Figura A1.3 – Tela de segurança para habilitar macros no Excel

Ao reabrir o programa MINEA, com a macro habilitada, tem-se a tela conforme mostrada na Figura A1.4, e os campos podem então ser preenchidos

com os respectivos dados referentes à: vazão (em t/h); concentração de entrada (em ppm); concentração de saída (ppm); perda ou ganho de vazão (t/h) em determinada operação, se houver; indicação de vazão menor ou igual à atual; indicação de concentração de fontes externas (limitada a três fontes).

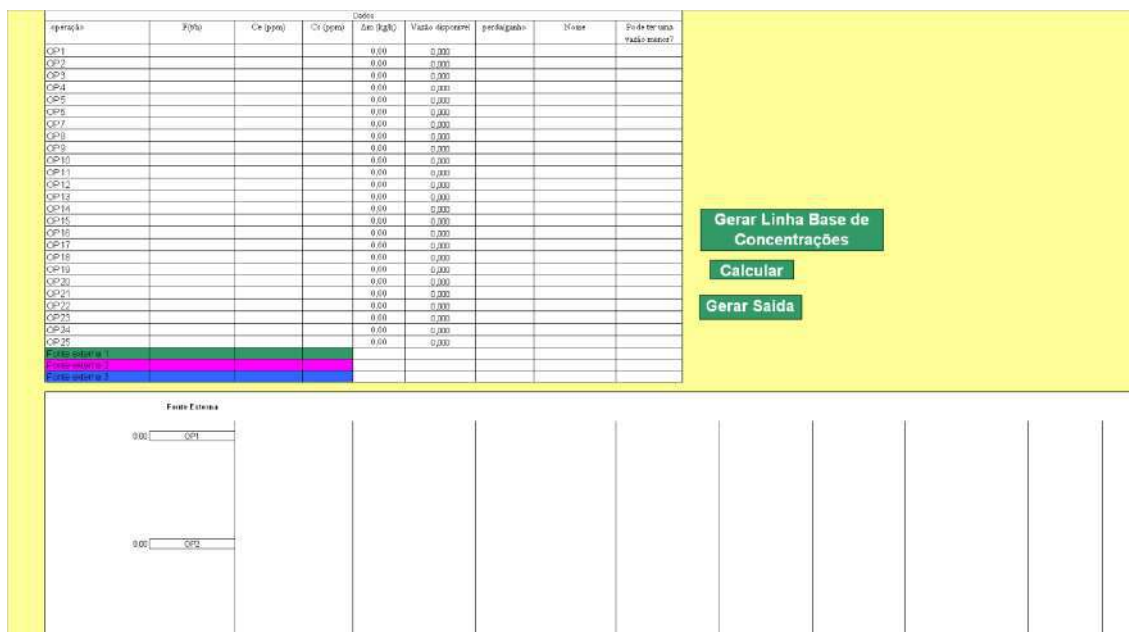


Figura A1.4 – Tela inicial do MINEA

A Figura A1.5 focaliza a tabela na qual as informações de entrada devem ser inseridas. Assim, com os dados de vazão (F (t/h)) e concentração de entrada ( $C_e$ ) e de saída ( $C_s$ ) em cada operação identificada e nomeada opcionalmente (Coluna “Nome”), o programa realiza o cálculo da carga mássica transferida na operação ( $\Delta m$ ), em kg/h. A coluna de vazão disponível em cada operação indica o valor que pode ser reutilizado, descontando a perda ou o ganho de vazão informado. Por convenção neste programa, valores positivos de vazão indicam perda e valores negativos para ganho. Tem-se ainda a opção de indicar se a vazão em uma dada operação pode ser menor que a indicada no campo F (t/h), ou se este valor deve ser fixado, por conta de restrição de vazão; a indicação é realizada simplesmente digitando “Sim” ou “Não”.

operação	F(vh)	Dados		Vazão disponível	perda/ganho	Nome	Pode ter uma vazão menor?
		Ce (ppm)	Co (ppm)				
OP1				0,00	0,000		
OP2				0,00	0,000		
OP3				0,00	0,000		
OP4				0,00	0,000		
OP5				0,00	0,000		
OP6				0,00	0,000		
OP7				0,00	0,000		
OP8				0,00	0,000		
OP9				0,00	0,000		
OP10				0,00	0,000		
OP11				0,00	0,000		
OP12				0,00	0,000		
OP13				0,00	0,000		
OP14				0,00	0,000		
OP15				0,00	0,000		
OP16				0,00	0,000		
OP17				0,00	0,000		
OP18				0,00	0,000		
OP19				0,00	0,000		
OP20				0,00	0,000		
OP21				0,00	0,000		
OP22				0,00	0,000		
OP23				0,00	0,000		
OP24				0,00	0,000		
OP25				0,00	0,000		
Fonte externa 1							
Fonte externa 2							
Fonte externa 3							

Figura A1.5 – Tabela de dados do MINEA

Após preencher a tabela de dados, deve-se clicar em “Calcular” para que o programa determine os respectivos valores na coluna de  $\Delta m$  (kg/h). Em seguida, deve-se clicar em “Gerar Linha Base de Concentrações”, o que permite ao programa definir a sequência ordenada de concentrações por intervalos na estrutura inicial do DFA. Logo após, deve-se clicar novamente em “Calcular”, e então o programa gera o DFA, indicando as vazões, concentrações, cargas mássicas e origens de possíveis reusos, conforme mostra a legenda no exemplo da Figura A1.6.

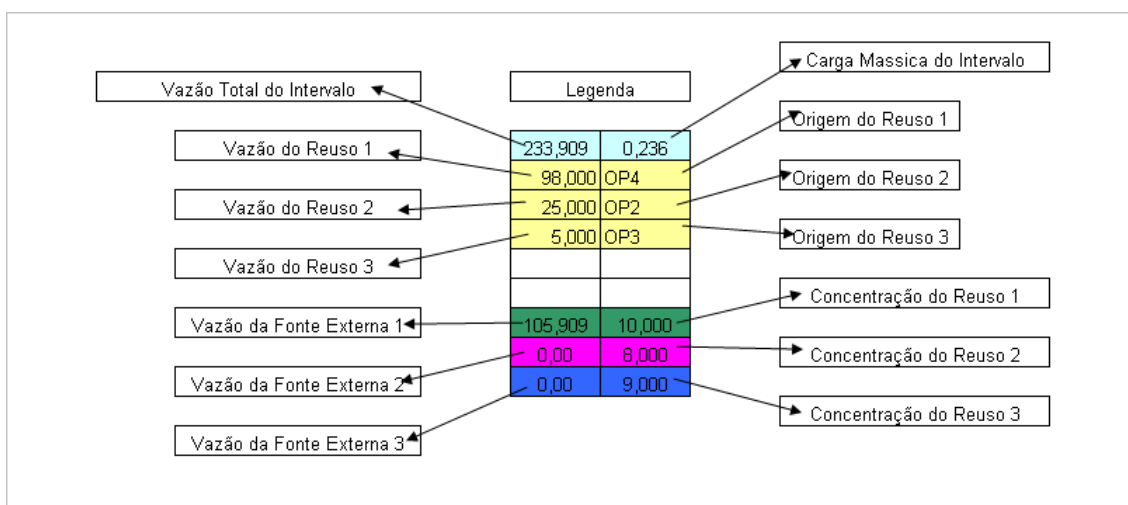


Figura A1.6 – Legenda do MINEA

Para salvar a estrutura do DFA gerada pelo programa, deve-se clicar em “Gerar Saída”, sendo então as informações transferidas para uma planilha à parte.

### Exemplo de aplicação do MINEA

De acordo com os dados da Tabela A1.1, retirados de Wang e Smith (1994a), pode-se preencher tais informações no programa, conforme mostrado na Figura 7.

**Tabela A1.1 – Tabela de dados do problema**

Operação	F (t/h)	C <sub>e</sub> (ppm)	C <sub>s</sub> (ppm)	Δm (kg/h)
1	20	0	100	2
2	100	50	100	5
3	40	50	800	30
4	10	400	800	4

operação	Dados					perda/ganho	Nome	Pode ter uma vazão menor?
	F(t/h)	C <sub>e</sub> (ppm)	C <sub>s</sub> (ppm)	Δm (kg/h)	Vazão disponível			
OP1	20,00	0,00	100,00	0,00	0,000	0	OP1	Sim
OP2	100,00	50,00	100,00	0,00	0,000	0	OP2	Sim
OP3	40,00	50,00	800,00	0,00	0,000	0	OP3	Sim
OP4	10,00	400,00	800,00	0,00	0,000	0	OP4	Sim
OP5				0,00	0,000			
OP6				0,00	0,000			
OP7				0,00	0,000			
OP8				0,00	0,000			
OP9				0,00	0,000			
OP10				0,00	0,000			
OP11				0,00	0,000			
OP12				0,00	0,000			
OP13				0,00	0,000			
OP14				0,00	0,000			
OP15				0,00	0,000			
OP16				0,00	0,000			
OP17				0,00	0,000			
OP18				0,00	0,000			
OP19				0,00	0,000			
OP20				0,00	0,000			
OP21				0,00	0,000			
OP22				0,00	0,000			
OP23				0,00	0,000			
OP24				0,00	0,000			
OP25				0,00	0,000			
Fonte externa 1		0,00						
Fonte externa 2								
Fonte externa 3								

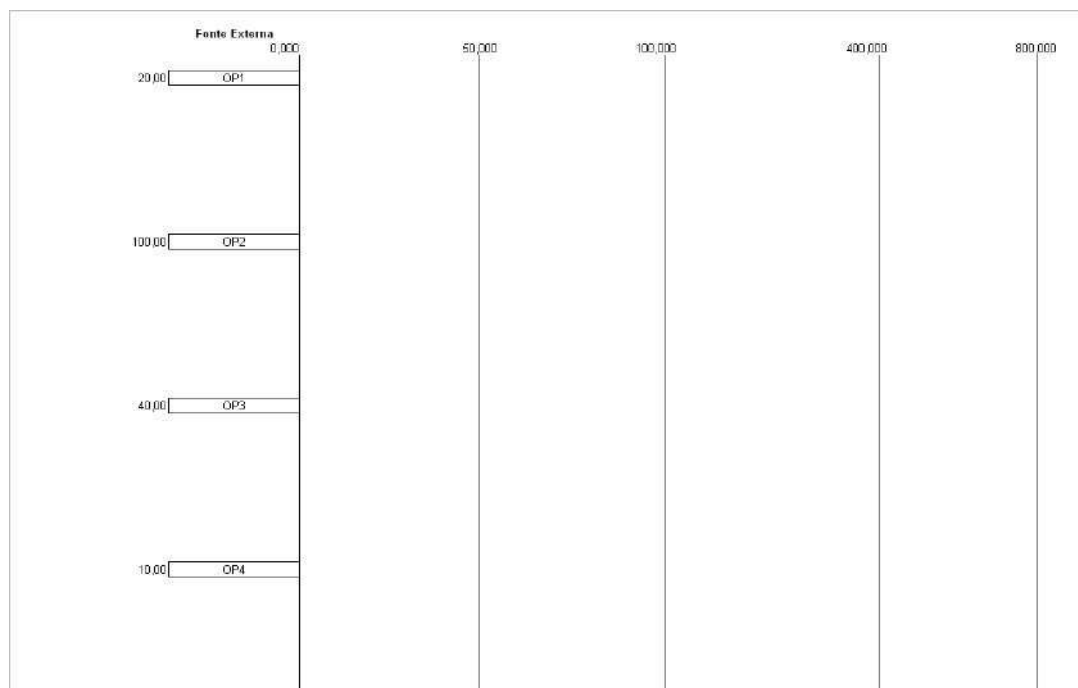
**Figura A1.7 – Tabela de dados preenchida no MINEA**

Clicando-se em “Calcular”, tem-se o cálculo dos respectivos valores de Δm (embora o programa indique em kg/h, os valores mostrados estão em g/h) (Figura A1.8).

operação	Dados						Nome	Pode ter uma vazão menor?
	F (t/h)	Ce (ppm)	Cs (ppm)	$\Delta m$ (kg/h)	Vazão disponível	perda/ganho		
OP1	20,00	0,00	100,00	2000,00	0,000	0	OP1	Sim
OP2	100,00	50,00	100,00	5000,00	0,000	0	OP2	Sim
OP3	40,00	50,00	800,00	30000,00	0,000	0	OP3	Sim
OP4	10,00	400,00	800,00	4000,00	0,000	0	OP4	Sim
OP5				0,00	0,000			
OP6				0,00	0,000			
OP7				0,00	0,000			
OP8				0,00	0,000			
OP9				0,00	0,000			
OP10				0,00	0,000			
OP11				0,00	0,000			
OP12				0,00	0,000			
OP13				0,00	0,000			
OP14				0,00	0,000			
OP15				0,00	0,000			
OP16				0,00	0,000			
OP17				0,00	0,000			
OP18				0,00	0,000			
OP19				0,00	0,000			
OP20				0,00	0,000			
OP21				0,00	0,000			
OP22				0,00	0,000			
OP23				0,00	0,000			
OP24				0,00	0,000			
OP25				0,00	0,000			
Fonte externa 1		0,00						
Fonte externa 2								
Fonte externa 3								

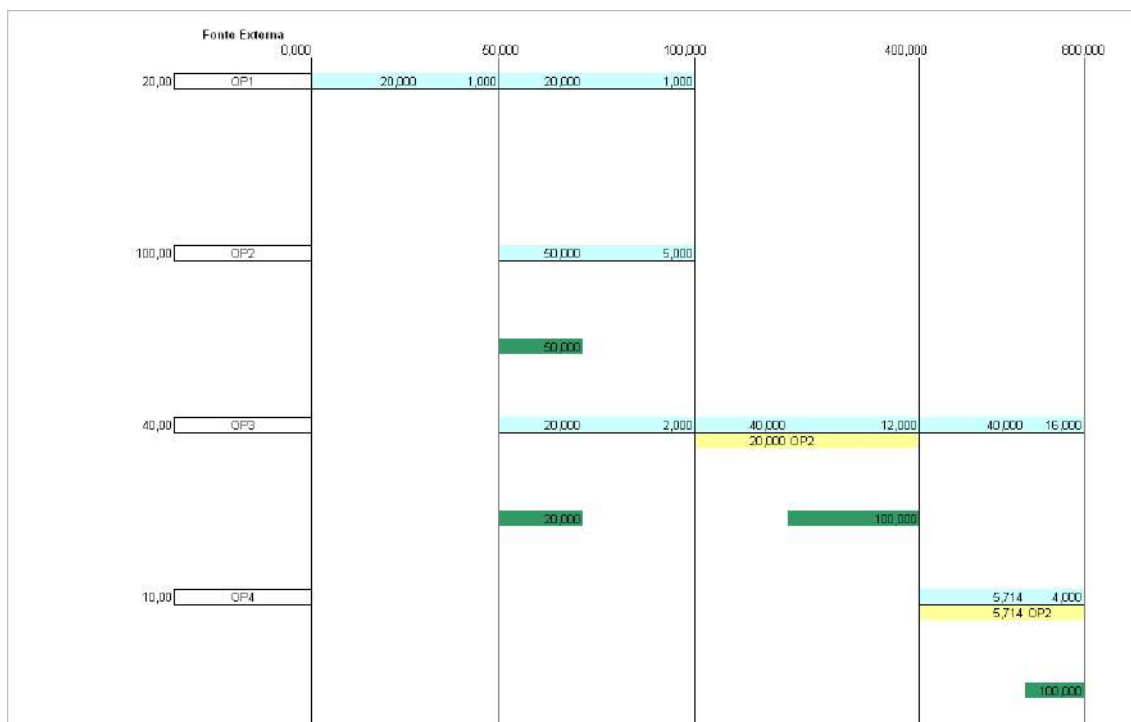
**Figura A1.8** – Tabela de dados do MINEA após o cálculo de  $\Delta m$

A etapa seguinte do procedimento automático é a geração da linha base de concentrações, conforme mostrado na Figura A1.9.



**Figura A1.9** – Estrutura inicial do DFA gerado pelo MINEA a partir da linha base de concentrações

Clicando-se novamente em “Calcular”, tem-se a estrutura final do DFA gerado pelo MINEA, conforme a Figura A1.10.



**Figura A1.10** – DFA gerado pelo MINEA para o problema exemplo

Após a geração do DFA, devem ser verificadas as oportunidades ocasionalmente levantadas: as operações 1 e 2 utilizam apenas água da fonte a 0 ppm, com vazão de 20 t/h e 50 t/h, respectivamente. A operação 3 utiliza 20 t/h da fonte a 0 ppm e 20 t/h provenientes da operação 2, na concentração de 100 ppm; já a operação 4 utiliza a parcela de 5,714 t/h da operação 2, na concentração de 100 ppm.



Por fim, o usuário pode salvar o DFA em uma planilha à parte, clicando-se na opção “Gerar Saída”, como mostrado na Figura A1.11.

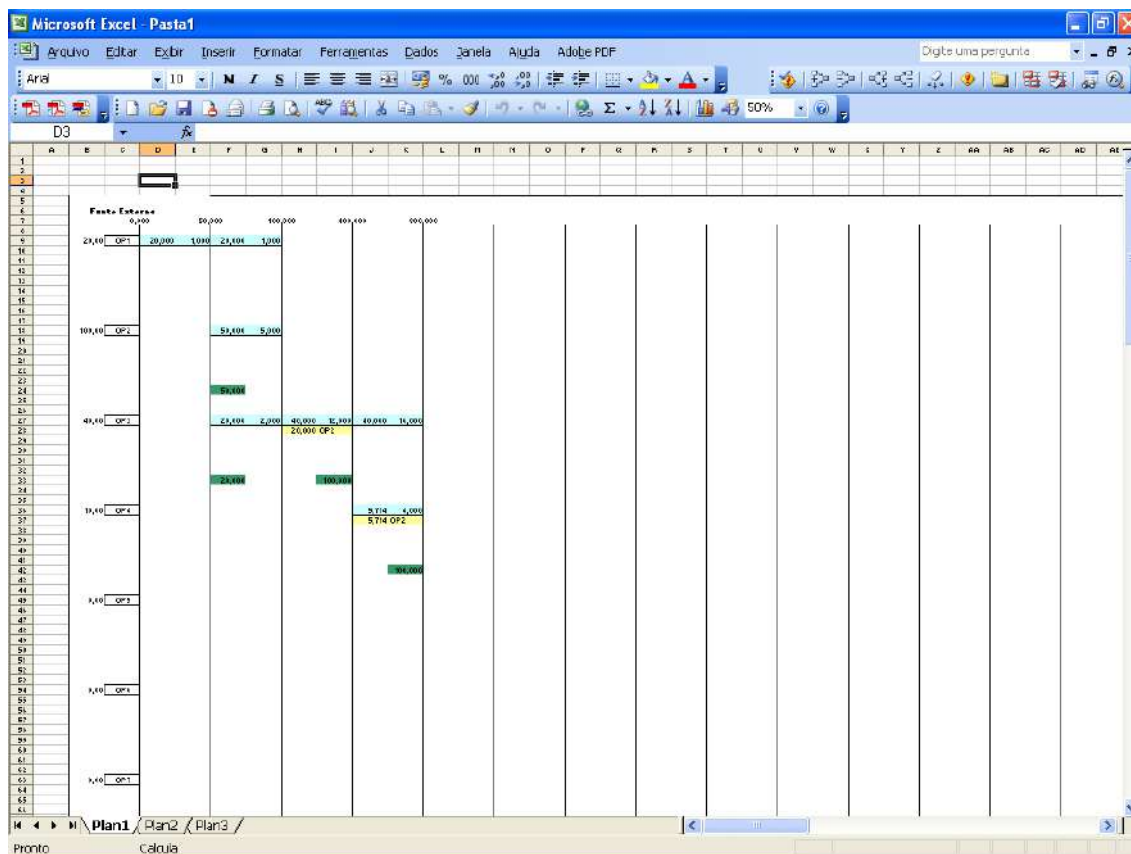


Figura A1.11 – Planilha do DFA a ser gravada como arquivo exclusivo

## Proibição de reusos no MINEA

Na prática, é possível que o método indique correntes que não sejam convenientes para reuso entre operações. Nestes casos, o programa tem a opção de proibir que determinadas correntes sejam passíveis de reuso; como exemplo, utiliza-se a planilha “Proibição” do MINEA (realçada na Figura A1.12) para desconsiderar a possibilidade de reuso da operação 2 para a operação 3, indicando “Não” na planilha de origem e destino das operações, conforme mostrado na Figura A1.13.

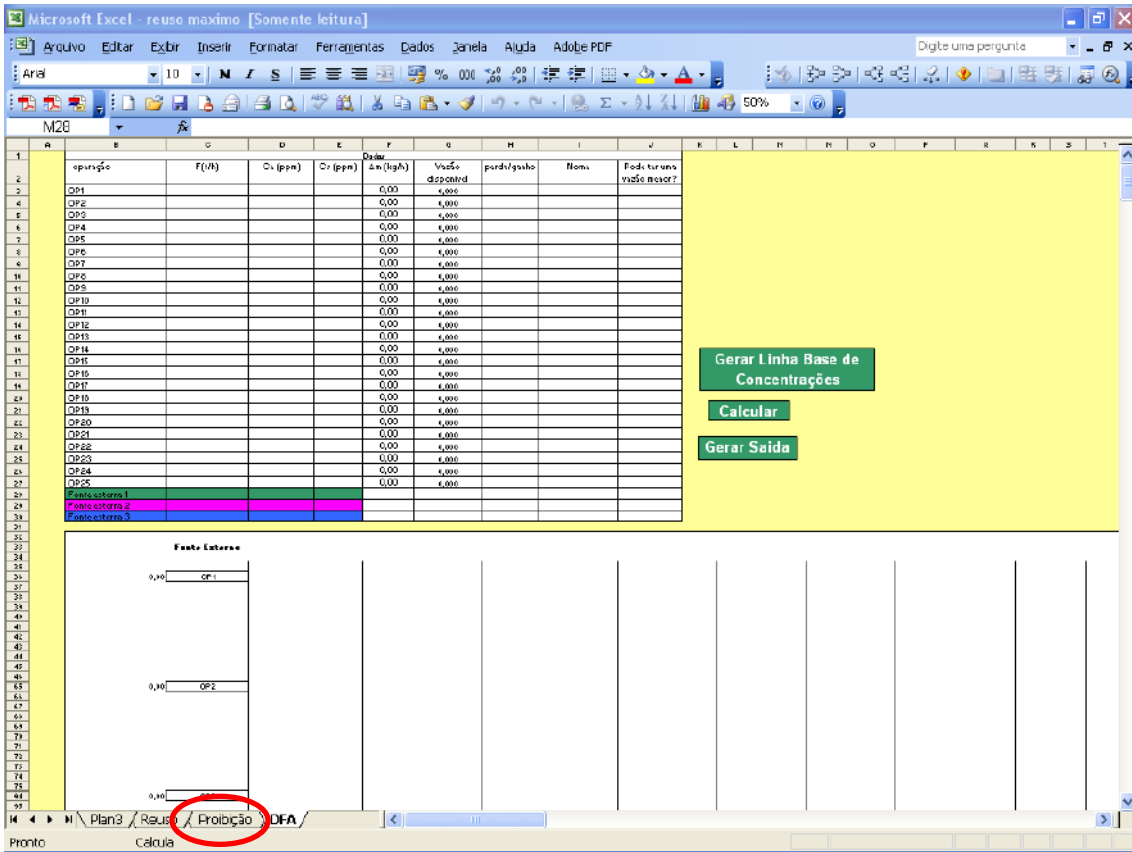


Figura A1.12 – Localização da planilha Proibição no MINEA

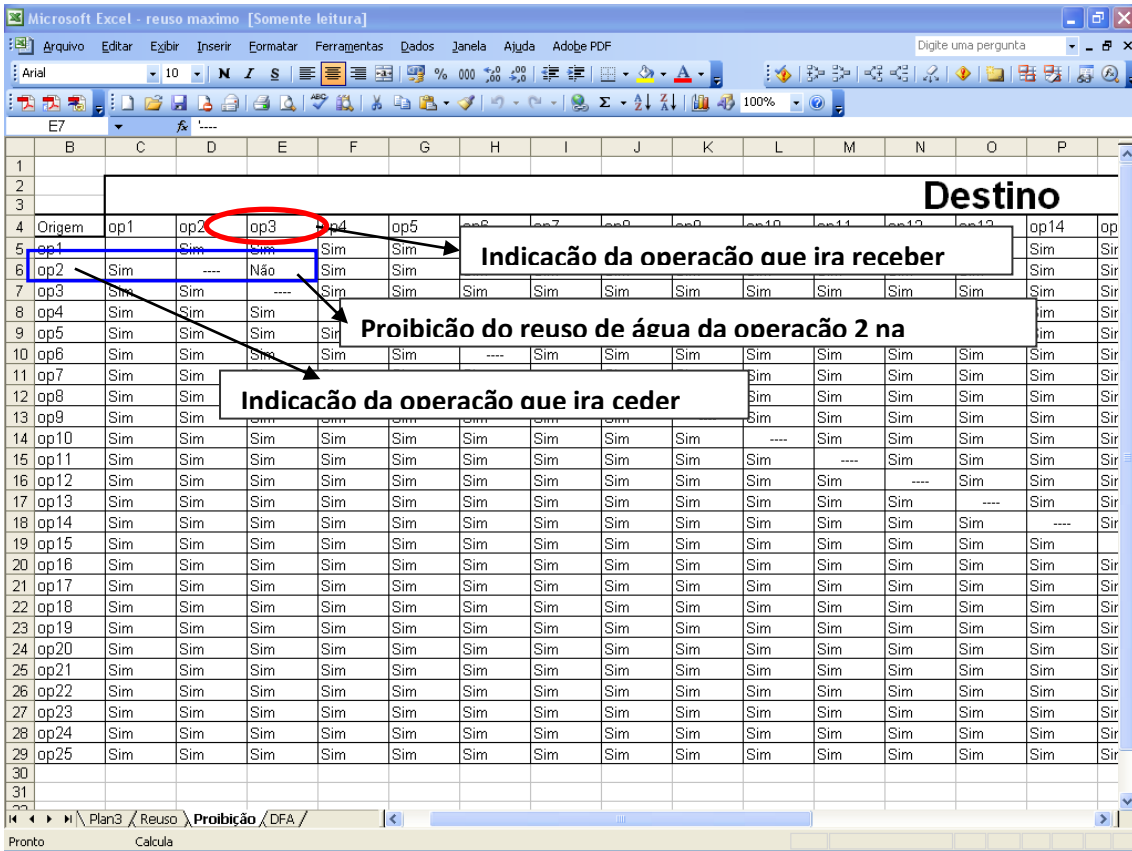
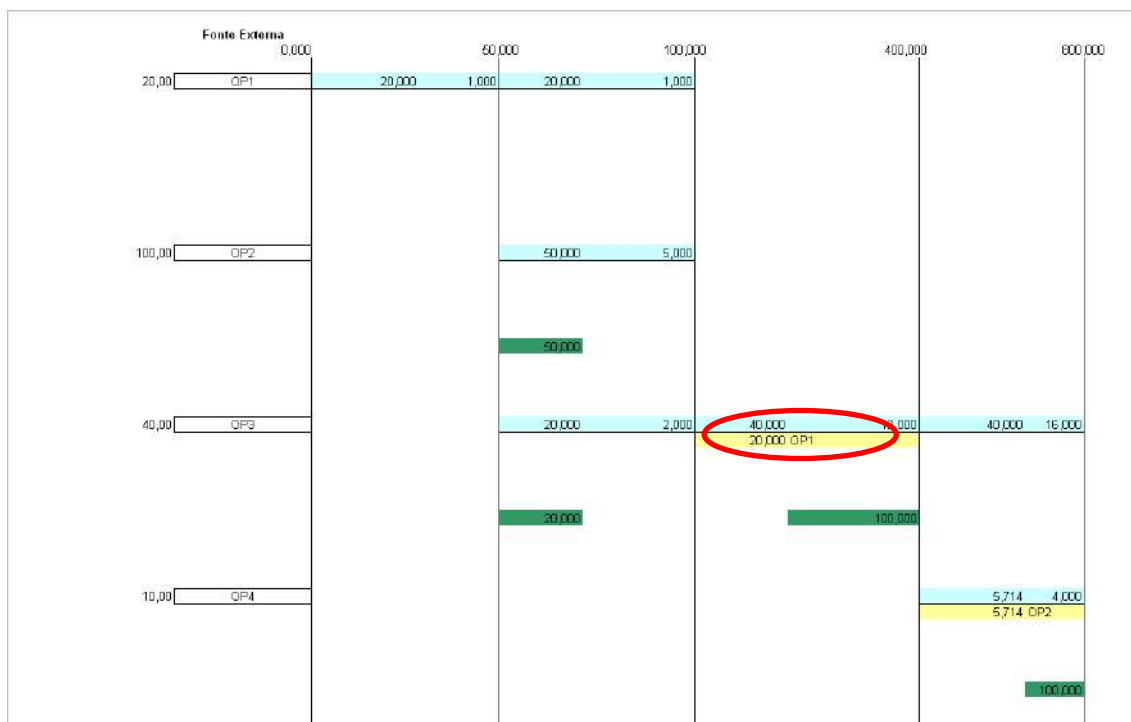


Figura A1.13 – Proibição de reúso da operação 2 na operação 3

Após estabelecer a proibição do reuso de água da operação 2 na operação 3, deve-se clicar novamente em “Calcular” para a geração atualizada do DFA (Figura A1.14).



**Figura A1.14** – DFA gerado após a proibição de reuso de água da operação 2 na operação 3

Com a nova estrutura do DFA, as operações 1 e 2 continuam utilizando água a 0 ppm na vazão de 20 t/h e 50 t/h, respectivamente; porém, a operação 3 utiliza 20 t/h de água a 0 ppm e 20 t/h da operação 1, a 100 ppm; a operação 4 mantém o consumo de 5,714 t/h da operação 2, na concentração de 100 ppm.

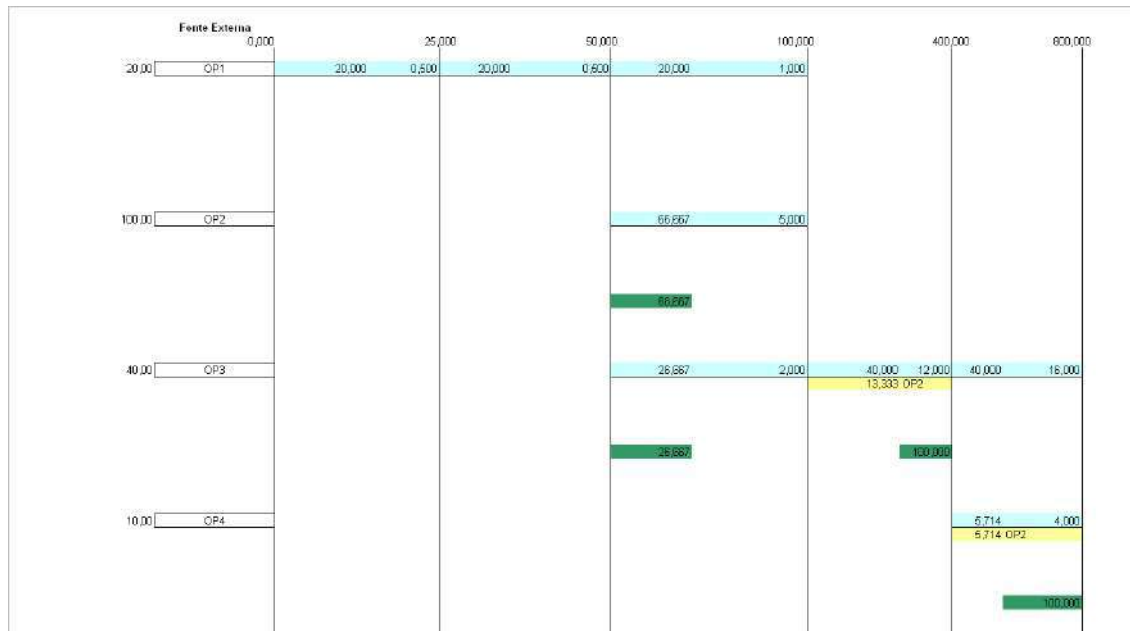
### Múltiplas Fontes no MINEA

Considerando a possibilidade de inclusão de mais uma fonte externa, a 25 ppm, por exemplo, o usuário deverá então indicar as fontes externas 1 e 2, ou seja, a 25 ppm e 0 ppm, respectivamente. O programa convencionou a prioridade de inclusão das fontes partindo daquela de maior concentração (Fonte externa 1) para a de menor concentração (Fonte Externa 3) (Figura A1.15).

operação	F (m³/h)	C <sub>e</sub> (ppm)	C <sub>s</sub> (ppm)	Dados		perda/ganho	Nome	Pode ter uma vazão menor?
				Δm (kg/h)	Vazão disponível			
OP1	20,00	0,00	100,00	2000,00	20,000	0	OP1	Sim
OP2	100,00	50,00	100,00	5000,00	66,667	0	OP2	Sim
OP3	40,00	50,00	800,00	30000,00	40,000	0	OP3	Sim
OP4	10,00	400,00	800,00	4000,00	5,714	0	OP4	Sim
OP5				0,00	0,000			
OP6				0,00	0,000			
OP7				0,00	0,000			
OP8				0,00	0,000			
OP9				0,00	0,000			
OP10				0,00	0,000			
OP11				0,00	0,000			
OP12				0,00	0,000			
OP13				0,00	0,000			
OP14				0,00	0,000			
OP15				0,00	0,000			
OP16				0,00	0,000			
OP17				0,00	0,000			
OP18				0,00	0,000			
OP19				0,00	0,000			
OP20				0,00	0,000			
OP21				0,00	0,000			
OP22				0,00	0,000			
OP23				0,00	0,000			
OP24				0,00	0,000			
OP25				0,00	0,000			
Fonte externa 1		25,00						
Fonte externa 2		0,00						
Fonte externa 3								

**Figura A1.15** – Tabela de dados do programa considerando mais de uma fonte externa de água

Após indicar a concentração da segunda fonte externa, deve-se clicar em “Gerar Linha Base de Concentração”, seguida de “Calcular”, para que o programa gere uma nova estrutura do DFA (Figura A1.16).



**Figura A1.16** – DFA gerado para múltiplas fontes de água

O DFA da Figura A1.16 utiliza 20 t/h de água a 0 ppm na operação 1; porém, 66,667 t/h da fonte a 25 ppm são destinados na operação 2. A operação 3 consome a combinação de 26,667 t/h de água a 25 ppm e 20 t/h a 100 ppm da operação 2. A operação 4 utiliza 5,714 t/h da operação 2, na concentração de 100 ppm.

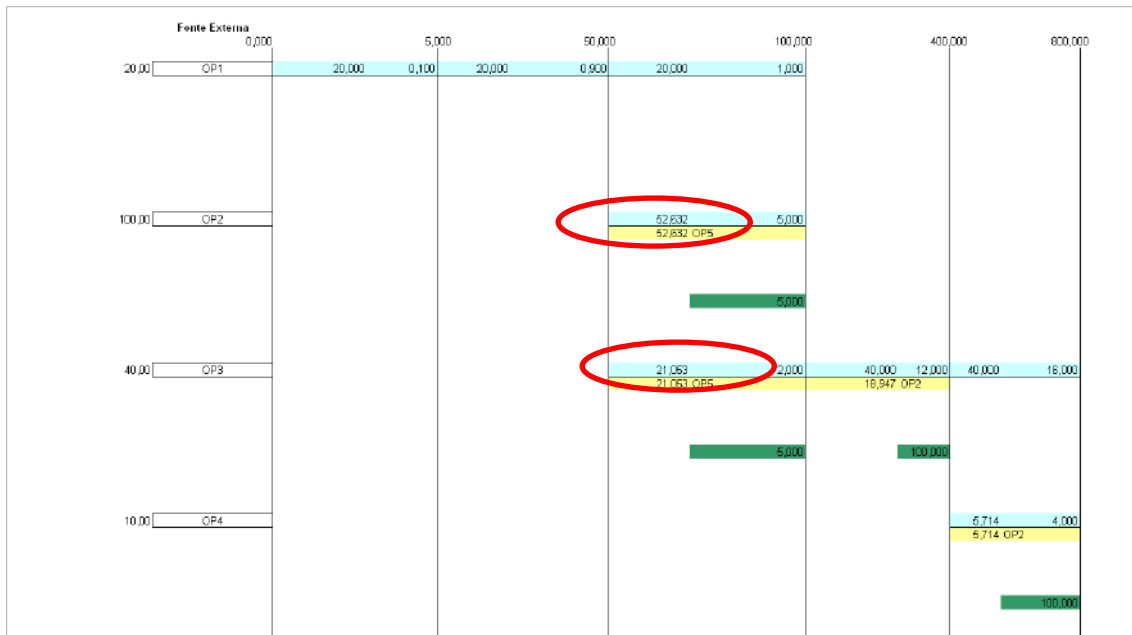
### Regeneração no MINEA

A qualidade de água regenerada disponível pode ser indicada no MINEA pelo valor de concentração de entrada no campo “ $C_e$ ”, e a concentração de saída no campo “ $C_s$ ”, clicando-se em seguida em “Calcular”. Supondo que, no exemplo considerado, o regenerador receba água a 800 ppm e regenere a 5 ppm, tem-se a tabela de entrada de dados da Figura 17 (após clicar em “Calcular”).

operação	Dados							
	F(t/h)	$C_e$ (ppm)	$C_s$ (ppm)	$\Delta m$ (kg/h)	Vazão disponível	perda/ganho	Nome	Podê ter uma vazão menor?
OP1	20,00	0,00	100,00	2000,00	20,000	0	OP1	Sim
OP2	100,00	50,00	100,00	5000,00	62,632	0	OP2	Sim
OP3	40,00	50,00	800,00	30000,00	40,000	0	OP3	Sim
OP4	10,00	400,00	800,00	4000,00	5,714	0	OP4	Sim
OP5	100,00	800,00	5,00	Regenerador	100,000			
OP6				0,00	0,000			
OP7				0,00	0,000			
OP8				0,00	0,000			
OP9				0,00	0,000			
OP10				0,00	0,000			
OP11				0,00	0,000			
OP12				0,00	0,000			
OP13				0,00	0,000			
OP14				0,00	0,000			
OP15				0,00	0,000			
OP16				0,00	0,000			
OP17				0,00	0,000			
OP18				0,00	0,000			
OP19				0,00	0,000			
OP20				0,00	0,000			
OP21				0,00	0,000			
OP22				0,00	0,000			
OP23				0,00	0,000			
OP24				0,00	0,000			
OP25				0,00	0,000			
Fonte externa 1		0,00						
Fonte externa 2								
Fonte externa 3								

Figura A1.17 – Tabela de dados considerando regeneração (OP 5)

No lugar do campo reservado ao valor de  $\Delta m$  surge a palavra “Regenerador”, caracterizando sua condição atual, na operação 5. Após clicar em “Gerar Linha Base de Concentração” e “Calcular”, tem-se a nova estrutura do DFA, conforme a Figura A1.18.



**Figura A1.18 – DFA considerando regeneração**

De acordo com o diagrama, a operação 1 utiliza somente água a 0 ppm, na vazão de 20 t/h, enquanto a operação 2 consome 52,632 t/h de água regenerada (operação 5) a 5 ppm. A operação 3 consome 21,053 t/h de água regenerada (5 ppm) e 18,947 t/h a 100 ppm da operação 2; e a operação 4 mantém o consumo de 5,714 t/h da operação 2, na concentração de 100 ppm.

### Perda de vazão no MINEA

A consideração relativa à perda ou a ganho de vazão também é possível no MINEA. Basta indicar o respectivo valor de vazão no campo destinado ao preenchimento da coluna “perda/ganho”, para a devida operação. Por convenção, valores positivos indicam perda e valores negativos de vazão referem-se ao ganho (Figura A1.19).

No exemplo, pode-se considerar perda de 40 t/h na operação 2, inserindo o respectivo valor na célula “perda/ganho” para esta operação, e em seguida clicar em “Gerar Linha Base de Concentração” e “Calcular”, de forma a gerar uma nova estrutura do DFA (Figura A1.20).

operação	F (t/h)	C <sub>e</sub> (ppm)	C <sub>s</sub> (ppm)	Dados		Nome	Pode ter uma vazão menor?
				Δm (kg/h)	Vazão disponível		
OP1	20,00	0,00	100,00	2000,00	0,000		Sim
OP2	100,00	50,00	100,00	5000,00	0,000	40	Sim
OP3	40,00	50,00	800,00	30000,00	0,000	0	Sim
OP4	10,00	400,00	800,00	4000,00	0,000	0	Sim
OP5				0,00	0,000		
OP6				0,00	0,000		
OP7				0,00	0,000		
OP8				0,00	0,000		
OP9				0,00	0,000		
OP10				0,00	0,000		
OP11				0,00	0,000		
OP12				0,00	0,000		
OP13				0,00	0,000		
OP14				0,00	0,000		
OP15				0,00	0,000		
OP16				0,00	0,000		
OP17				0,00	0,000		
OP18				0,00	0,000		
OP19				0,00	0,000		
OP20				0,00	0,000		
OP21				0,00	0,000		
OP22				0,00	0,000		
OP23				0,00	0,000		
OP24				0,00	0,000		
OP25				0,00	0,000		
Fonte externa 1		0,00					
Fonte externa 2							
Fonte externa 3							

Figura A1.19 – Tabela de dados considerando perda de vazão

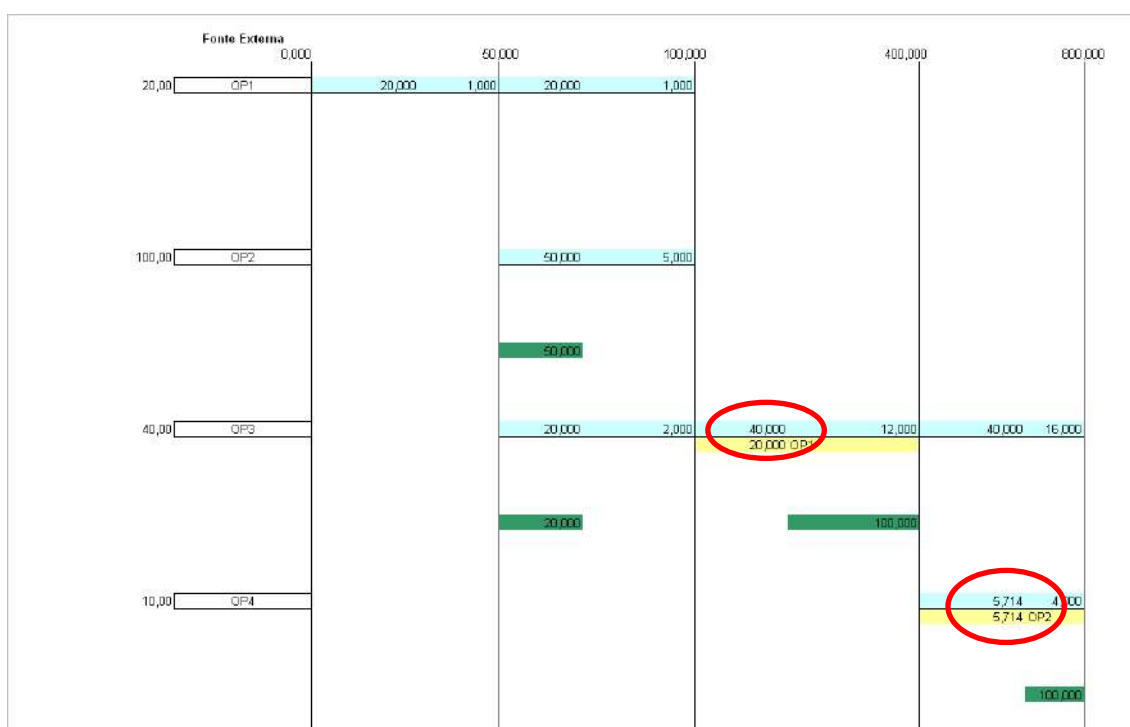


Figura A1.20 – Estrutura do DFA considerando perda de vazão

O diagrama da Figura 20 estabelece o consumo de 20 t/h e 50 t/h de água a 0 ppm para as operações 1 e 2, respectivamente; para a operação 3, são destinados 20 t/h a 0 ppm e 20 t/h a 100 ppm provenientes da operação 1; e a operação 4 mantém 5,714 t/h a 100 ppm da operação 2.

## Restrição de vazão no MINEA

Se houver a necessidade de se manter o valor de vazão em determinada operação (vazão fixa no seu valor limite F (t/h)), basta digitar a palavra “Não” na célula correspondente ao campo “Pode ter uma vazão menor?”, conforme mostrado na Figura A1.21. Assim, o programa completa a vazão da operação utilizando uma fonte externa conveniente. Considerando o exemplo apresentado, pode-se indicar que a operação 4 necessite de vazão fixa (10 t/h), levando ao DFA da Figura A1.22.

operação	Dados							
	F (t/h)	Ce (ppm)	Cs (ppm)	$\Delta m$ (kg/h)	Vazão disponível	perda/ganho	Nome	Pode ter uma vazão menor?
OP1	20,00	0,00	100,00	2000,00	20,000	0		Sim
OP2	100,00	50,00	100,00	5000,00	10,000	0		Sim
OP3	40,00	50,00	800,00	30000,00	40,000	0		Sim
OP4	10,00	400,00	800,00	4000,00	5,714	0		Não
OP5				0,00	0,000			
OP6				0,00	0,000			
OP7				0,00	0,000			
OP8				0,00	0,000			
OP9				0,00	0,000			
OP10				0,00	0,000			
OP11				0,00	0,000			
OP12				0,00	0,000			
OP13				0,00	0,000			
OP14				0,00	0,000			
OP15				0,00	0,000			
OP16				0,00	0,000			
OP17				0,00	0,000			
OP18				0,00	0,000			
OP19				0,00	0,000			
OP20				0,00	0,000			
OP21				0,00	0,000			
OP22				0,00	0,000			
OP23				0,00	0,000			
OP24				0,00	0,000			
OP25				0,00	0,000			
Fonte externa 1		0,00						
Fonte externa 2								
Fonte externa 3								

Figura A1.21 – Tabela de dados considerando restrição de vazão



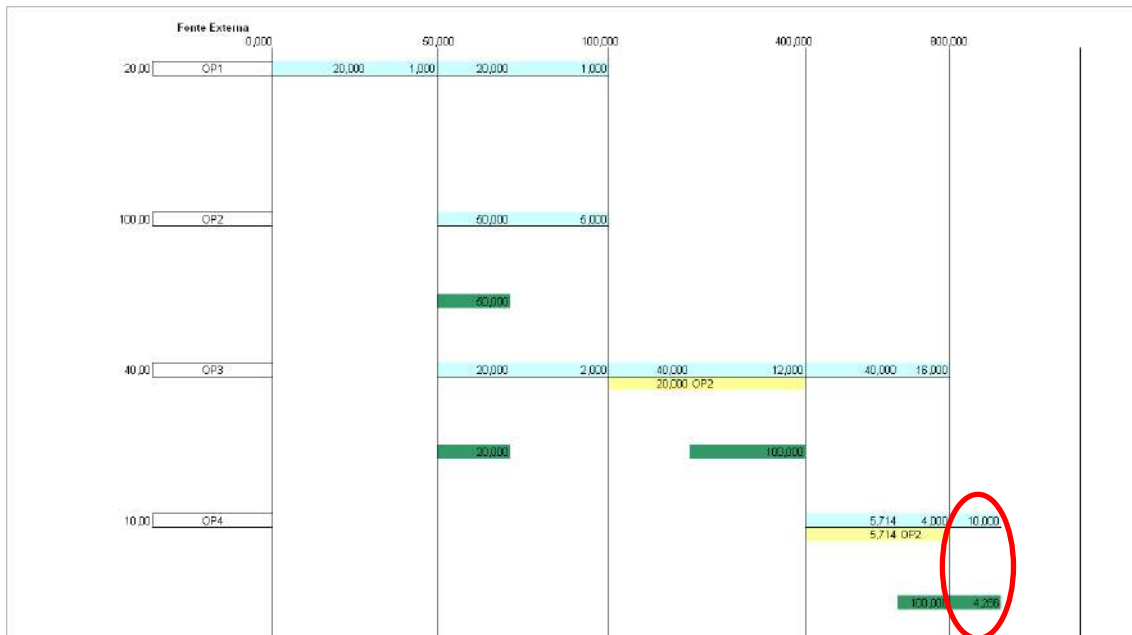


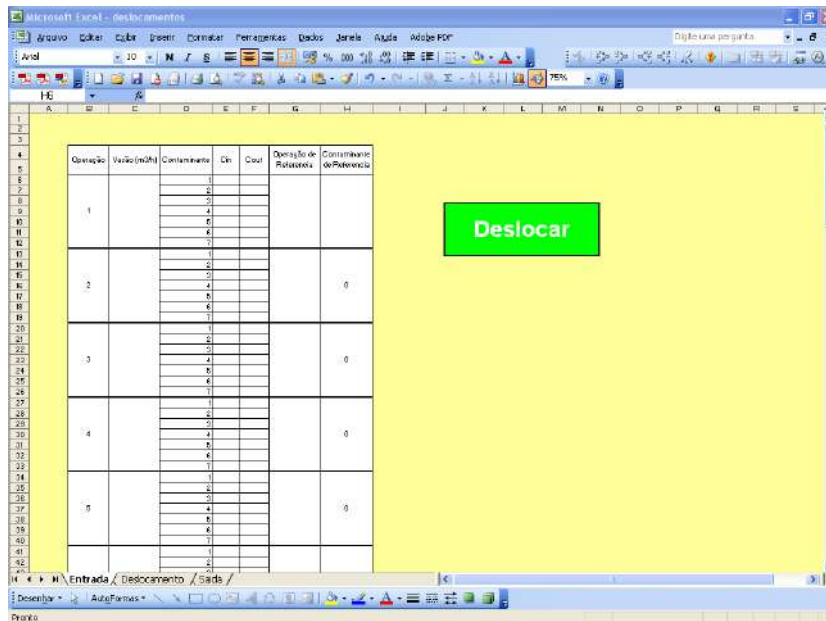
Figura A1.22 – DFA do exemplo com restrição de vazão

No DFA gerado, as operações 1 e 2 utilizam somente água a 0 ppm, nas vazões de 20 t/h e 50 t/h, respectivamente. A operação 3 consome 20 t/h a 0 ppm, e 20 t/h a 100 ppm, da operação 2. A operação 4 mantém o consumo de 5,714 t/h a 100 ppm da operação 2, porém a vazão é completada a 10 t/h utilizando 4,286 t/h da fonte a 0 ppm.

### **Análise da possibilidade de deslocamento de concentrações – Múltiplos componentes**

Para problemas envolvendo a consideração de transferência simultânea de componentes (análise de múltiplos componentes), o programa MINEA dispõe a planilha denominada “Deslocamentos”, na qual verifica a possibilidade de deslocamento de concentrações a partir dos seus valores de entrada e saída em cada operação. A Figura A1.23 apresenta a tela inicial da planilha. Com isso, após a geração do DFA tem-se a concentração dos componentes igual ou inferior ao máximo estabelecido pelos dados do problema.

Como dados de entrada, o usuário deve identificar as operações e as respectivas vazões, e incluir as concentrações de entrada e saída de cada operação, sendo necessário definir a operação de referência, bem como o componente de referência.



**Figura A1.23 – Tela inicial da planilha de deslocamentos**

Para demonstrar a aplicação do programa quanto à análise de múltiplos componentes, utilizam-se os dados do problema de Wang e Smith (1994a), conforme apresentados na Tabela A1.2.

**Tabela A1.2 – Dados do problema para 3 operações e 3 componentes**

Operação	Componente	$C_e$ (ppm)	$C_s$ (ppm)	Vazão (t/h)
1	1	0	15	45
	2	0	400	
	3	0	35	
2	1	20	120	34
	2	300	12500	
	3	45	180	
3	1	120	220	56
	2	20	45	
	3	200	9500	

A Figura A1.24 ilustra a tabela de dados de entrada preenchida no programa MINEA. Foi definido o componente 1 e a operação 1 como referências, tais condições são colocadas em seus respectivos campos. Após o preenchimento da tabela no MINEA, o usuário deve então clicar em “Deslocar”, e automaticamente o programa realiza os cálculos e exibe uma planilha contendo as concentrações de entrada e saída das respectivas operações, ocasionalmente atualizadas pela análise de concentrações máximas (Figura A1.25).

Operação	Vazão (m³/h)	Contaminante	Din	Csref	Operação de Referência	Contaminante de Referência	
1	45		1	0	15	1	1
			2	0	400		
			3	0	35		
			4				
			5				
			6				
			7				
2	34		1	20	120	1	1
			2	300	1500		
			3	65	180		
			4				
			5				
			6				
			7				
3	56		1	100	220	1	1
			2	20	45		
			3	290	3500		
			4				
			5				
			6				
			7				
4			1				1
			2				
			3				
			4				
			5				
			6				
			7				
5	100		3				1
			4				
			5				
			6				
			7				
			1				
			2				

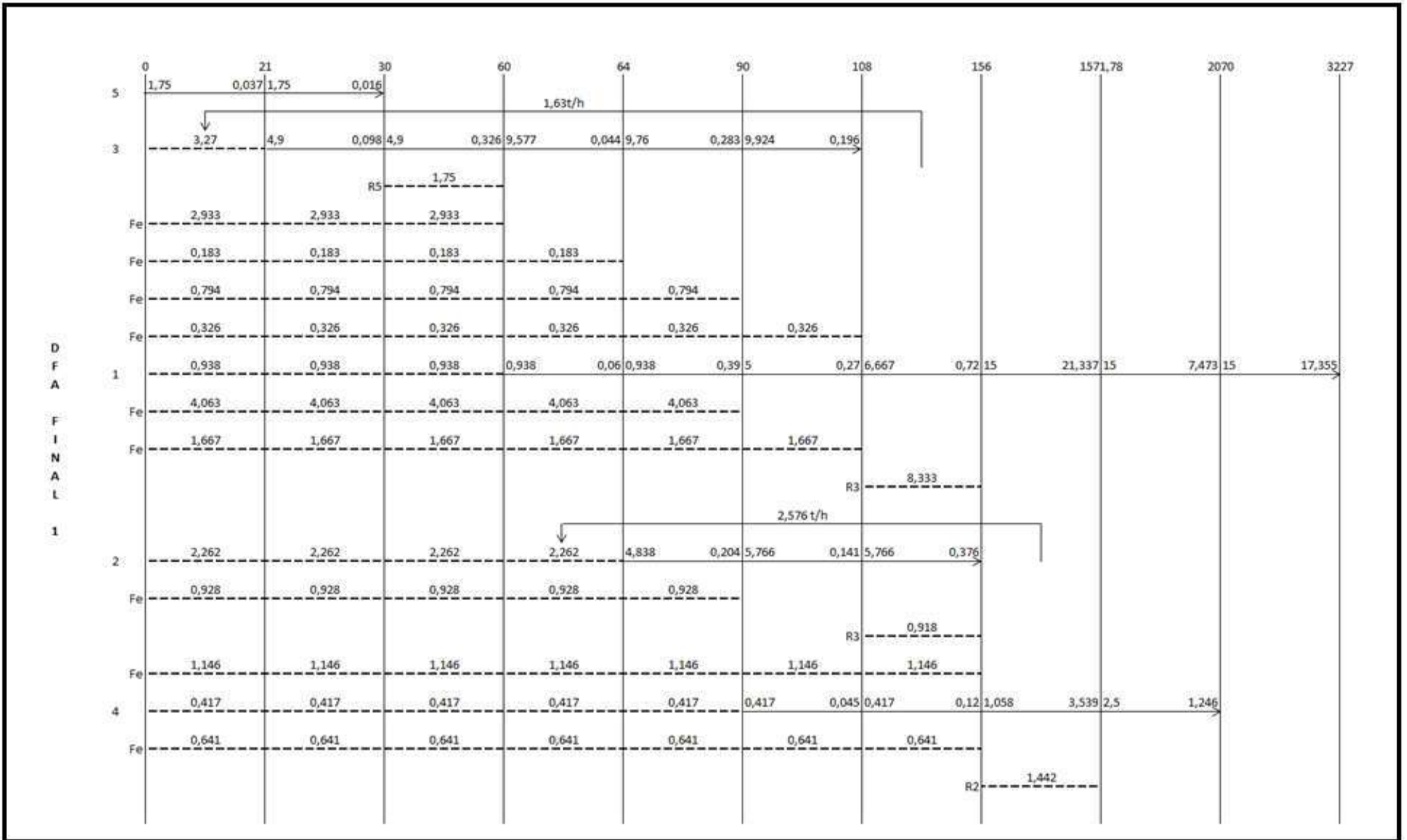
Figura A1.24 – Tabela de dados preenchida para o exemplo de múltiplos componentes

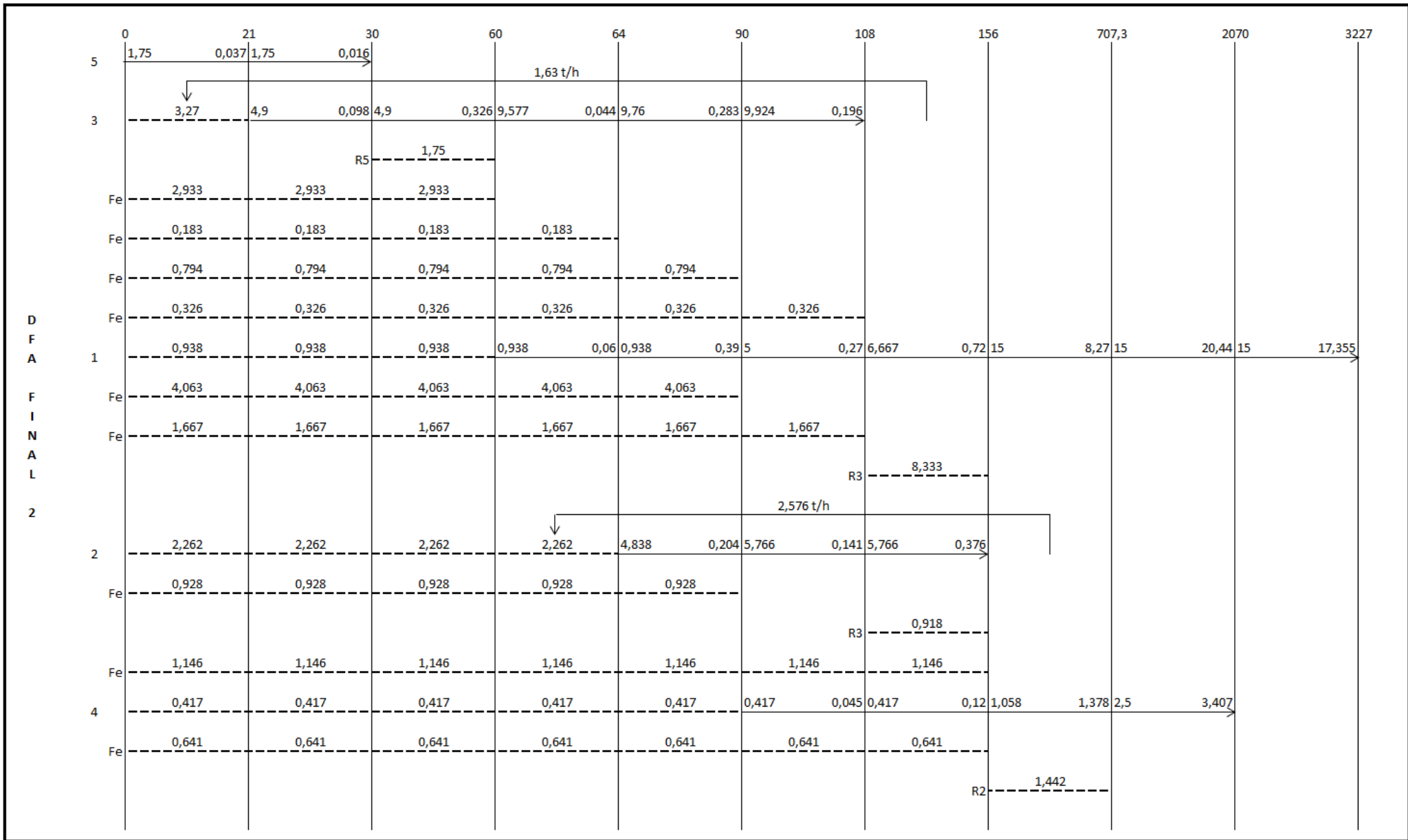
operação	F(m³)	Ce (ppm)	Cs (ppm)
OP1	45,00	0,00	15,00
OP2	34,00	11,25	111,25
OP3	56,00	0,75	100,75
OP4	0,00	0,00	0,00
OP5	0,00	0,00	0,00
OP6	0,00	0,00	0,00
OP7	0,00	0,00	0,00
OP8	0,00	0,00	0,00
OP9	0,00	0,00	0,00
OP10	0,00	0,00	0,00
OP11	0,00	0,00	0,00
OP12	0,00	0,00	0,00
OP13	0,00	0,00	0,00
OP14	0,00	0,00	0,00
OP15	0,00	0,00	0,00
OP16	0,00	0,00	0,00
OP17	0,00	0,00	0,00
OP18	0,00	0,00	0,00
OP19	0,00	0,00	0,00
OP20	0,00	0,00	0,00
OP21	0,00	0,00	0,00
OP22	0,00	0,00	0,00
OP23	0,00	0,00	0,00

Figura A1.25 – Valores de concentração deslocados

A partir deste resultado, o usuário deve então transferir manualmente os valores de concentração da planilha para a tabela de dados do MINEA, e proceder normalmente às etapas para a geração do DFA.

## Apêndice 2 – DFA'S Finais





	0	21	30	60	64	90	108	141,46	156	2070	3227							
5	1,75	0,037	1,75	0,016														
					1,63 t/h													
3	3,264	4,894	0,098	4,894	0,326	9,577	0,044	9,76	0,283	9,924	0,196							
			R5	1,75														
Fe	2,933	2,933	2,933															
Fe	0,183	0,183	0,183	0,183														
Fe	0,794	0,794	0,794	0,794		0,794												
Fe	0,326	0,326	0,326	0,326		0,326		0,326										
1	0,938	0,938	0,938	0,938	0,06	0,938	0,39	5	0,27	6,667	0,502	15	0,218	15	28,71	15	17,355	
Fe	4,063	4,063	4,063	4,063		4,063												
Fe	1,667	1,667	1,667	1,667		1,667		1,667										
								R3	8,333									
2	2,267	2,267	2,267	2,267	2,267	0,204	2,267	0,141	3,194	0,262	4,991	0,114						
Fe	0,928	0,928	0,928	0,928		0,928		0,928										
								R3	0,917									
Fe	0,88	0,88	0,88	0,88		0,88		0,88										
										Refinaria	2,839							
4	0,417	0,417	0,417	0,417	0,417	0,417	0,045	0,417	0,084	0,91	0,036	2,5	4,785					
Fe	0,493	0,493	0,493	0,493		0,493		0,493										
										Refinaria	1,59							

	0	21	30	54,584	60	64	90	108	156	2070	3227						
5	1,75	0,037	1,75	0,016													
3		3,264	3,264	0,098	3,264	0,267	7,656	0,059	10,88	0,044	10,88	0,283	10,88	0,196			
				R5	1,75												
Fe		2,642	2,642	2,642													
D F A				Refinaria	3,224												
1				Refinaria	6,372	6,372	0,06	6,372	0,39	12,706	0,27	13,479	0,72	15	28,71	15	17,355
F I N A L				Refinaria	4,063	4,063											
				Refinaria	1,667	1,667	1,667										
5							R3	1,521									
2				Refinaria	5,748	5,748	5,748	0,204	5,748	0,141	6,45	0,376					
				Refinaria	0,702	0,702	0,702	0,702	0,702								
							R3	1,38									
4				Refinaria	0,842	0,842	0,842	0,842	0,045	0,842	0,12	2,5	4,785				
								R3	1,658								

