



Reutilização de Efluentes Industriais usando o Diagrama de Fontes de Água: Processos Contínuos e em Batelada

**Shaula Christine Leal Ferreira
Aline Rodrigues Dias**

Projeto de Final de Curso

Orientadores

Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

Reinaldo Coelho Mirre, M.Sc.

Outubro de 2010

REUTILIZAÇÃO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS USANDO O DIAGRAMA DE FONTES DE ÁGUA: PROCESSOS CONTÍNUOS E EM BATELADA

Shaula Christine Leal Ferreira

Aline Rodrigues Dias

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

Aprovado por:

Prof. Lidia Yokoyama, D.Sc.

Bernadete Elizardo Pereira da Costa Delgado, D.Sc.

Luciana Gomes Bastos

Orientado por:

Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

Reinaldo Coelho Mirre, M.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Outubro de 2010

Ferreira, Shaula Christine Leal.

Dias, Aline Rodrigues.

Reutilização de Efluentes Industriais usando o Diagrama de Fontes de Água: Processos Contínuos e em Batelada./Shaula Christine Leal Ferreira. Aline Rodrigues Dias. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2010.

x, 132 p.; il.

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

Orientadores: Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa e Reinaldo Coelho Mirre.

1.Recursos Hídricos 2.Diagrama de Fontes de Água 3.Processos em Batelada. 4.Análise de Custos 5.Projeto Final. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D. Sc. e Reinaldo Coelho Mirre, M.Sc. I. Título.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por abençoar nosso caminho e nos dar forças para superar as adversidades e alcançar objetivos.

Aos nossos pais e irmãos pelo apoio e compreensão nos momentos mais difíceis.

Aos nossos cônjuges pelo carinho e companheirismo de todas as horas.

Aos professores do Curso de Engenharia Química pelos conhecimentos transmitidos, em especial nosso orientador Prof. Fernando Pellegrini.

Em especial ao nosso co-orientador Reinaldo Mirre pela paciência, pelo conhecimento, empenho e esforço no desenvolvimento deste trabalho.

E a todos que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

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

REUTILIZAÇÃO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS USANDO O DIAGRAMA DE FONTES DE ÁGUA: PROCESSOS CONTÍNUOS E EM BATELADA

Aline Rodrigues Dias

Shaula Christine Leal Ferreira

Outubro, 2010

Orientadores: Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

Reinaldo Coelho Mirre, M.Sc.

Atualmente, com o surgimento de problemas relacionados à escassez e poluição de água nas áreas urbanas e rurais, começa a emergir um maior interesse para as questões ligadas ao gerenciamento dos recursos hídricos. O crescimento industrial e populacional desordenado influencia na qualidade e quantidade da água. O estudo foi conduzido com o objetivo de tentar reduzir a quantidade de água primária em processos contínuos e em batelada. Para tal, foi usada uma ferramenta denominada Diagrama de Fontes de Água (DFA). Foram propostos diversos cenários em que o método DFA foi aplicado. Para o processo contínuo com multicontaminantes, o método foi aplicado com o auxílio do programa MINEA, e foram obtidos casos em que a minimização do consumo de água foi alcançada, porém com a necessidade da utilização de regeneradores. Para os processos em batelada, o consumo de água limpa foi minimizado para um dos casos e se manteve o mesmo para o outro caso em estudo. Verificou-se que nos casos em batelada, o consumo de água limpa varia de acordo com a quantidade de tanques de estocagem utilizados. Dos estudos de caso, concluiu-se que o DFA é uma metodologia eficaz na minimização do consumo de água, porém sua aplicação nem sempre reduz, a curto prazo, os custos envolvidos no processo, pois pode gerar a necessidade da implantação de equipamentos de regeneração.

Palavras-chave: Recursos Hídricos; Diagrama de Fontes de Água; Processos em Batelada; Análise de Custos

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução	01
1.1 Objetivo geral.....	05
1.1.1Objetivos específicos.....	05
Capítulo 2 – Integração de Processos: Breve Revisão	07
2.1 Tecnologia <i>pinch</i>	09
2.1.1 <i>Water pinch</i>	09
2.2 Diagrama de Fontes de águas.....	14
2.2.1 Processos contínuos: Breve Revisão.....	14
2.2.2 Processos em batelada: Breve Revisão	18
2.2.3 Comentários Gerais.....	20
Capítulo 3 – O Procedimento Diagrama de Fontes de Águas	22
3.1 Aplicação do Método Algorítmico	22
3.2 DFA para Múltiplos Contaminantes.....	29
3.3 DFA para Processos em Batelada.....	35
3.4 O Programa Computacional MINEA.....	45

Capítulo 4 - Estudo de caso para um processo contínuo com múltiplos contaminantes.....	48
4.1 Apresentação do Caso Base.....	48
4.2 Cálculo da vazão limite das operações – Plantas A, B e C.....	53
4.3 Estudo de Caso	55
4.3.1 Cenário 4 – Reúso sem integração entre as plantas.....	56
4.3.2 Cenário 5 – Reúso com integração direta entre as plantas - considerando a transferência simultânea de contaminantes.....	70
4.3.3 Cenário 6 – Reúso com integração direta entre as plantas - contaminante c1.....	75
4.3.4 Cenário 7 – Reúso com integração direta entre as plantas - contaminante c2	83
4.3.5 Cenário 8 - Reúso com integração direta entre as plantas – contaminante c3	89
4.4 Resultados	95

Capítulo 5 – Estudo de Caso para um Processo em Batelada.....	97
5.1 Apresentação do Cenário – Caso 1.....	97
5.2 Cálculo da vazão limite para cada operação do caso 1.....	99
5.3 Estudo de caso – Caso 1.....	99
5.3.1 DFA sem o uso de tanques de estocagem - Cenário 2	100
5.3.2 DFA com o uso de tanques de estocagem - Cenário 3	104
5.4 Resultados.....	107
5.5 Apresentação do Cenário 4 – Caso 2.....	108
5.6 Estudo de Caso – Caso 2.....	110
5.6.1 DFA com mais de um tanque de estocagem – Cenário 5.....	111
5.6.2 DFA com apenas um tanque de estocagem – Cenário 6.....	114
5.7 Resultados – Caso 2.....	117

Capítulo 6 – Análise Preliminar de Custos.....	118
6.1 Avaliação econômica do processo contínuo com multicontaminantes.....	119
6.2 Avaliação econômica do estudo do processo em batelada – Caso 1.....	121
6.3 Avaliação econômica do estudo do processo em batelada – Caso 2.....	123
Capítulo 7 – Conclusão e Sugestões.....	125
Referências Bibliográficas.....	126

1-INTRODUÇÃO

A água é um recurso indispensável para a sobrevivência da humanidade. Embora o volume total de água existente na Terra seja de 1.386 milhões de km³, 97,5 % deste total é constituído pelos oceanos, mares e lagos de água salgada. Na parte formada pela água doce, 79% estão nas calotas polares e geleiras, inacessíveis para o uso humano pelos meios tecnológicos atuais. Outros 20% estão debaixo da terra, em lençóis freáticos e somente 1% está na superfície da terra. A água de superfície engloba lagos (52%), rios (1%), umidade do solo, vapor atmosférico e água incorporada em biomassa viva, conforme mostrado na Figura 1.1 - Rebouças (1999).

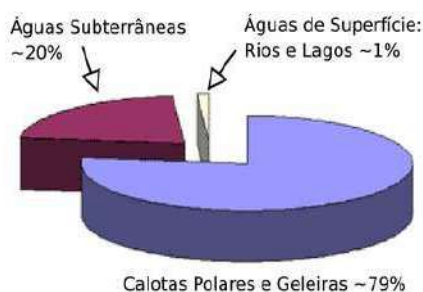


Figura 1.1 - Distribuição Aproximada da Água Doce no Planeta - Rebouças (1999)

O volume de reserva de água doce por pessoa vem diminuindo com o passar do tempo. Segundo estimativas, os gastos médios variam de 25 litros a 50 litros diários, o que indicam volumes de 9.125 litros a 18.250 litros por pessoa ao ano (UNESCO, 1998). Em 1950, essa reserva representava cerca de 16,8 mil metros cúbicos por pessoa no mundo; em 1998, essa quantidade era de 7,3 mil metros cúbicos; uma projeção para o ano 2018 estima que esse valor cairá para 4,8 mil metros cúbicos (UNESCO, 1998).

Um estudo realizado pela Unesco (Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura) sobre as condições de acesso à água, disponibilidade do recurso em diversos países e seus principais usos, informou que 1,1 bilhão de pessoas (ou quase um quinto de toda a população mundial) vive com uma quantidade insuficiente e insegura de água para suas necessidades mais fundamentais. Para piorar o quadro, a previsão é de que, em 2050, a população mundial alcançará 9,3 bilhões de pessoas. Em muitos países, a escassez de água poderá provocar problemas graves na saúde pública e inviabilizar o crescimento da economia e a geração de empregos.

Em âmbito mundial, o uso de água se distribui em 70% destinado às atividades agrícolas, 23% referentes à demanda do consumo doméstico e 7% referentes ao uso industrial.

No Brasil, o cenário é bem semelhante: 59% destina-se às atividades agrícolas, 22% ao consumo humano, e 19% para o uso industrial (CLARKE, 2005).

A quantidade e qualidade da água é cada vez mais ameaçada pelo crescimento desordenado da população e pela incontrolável expansão das atividades industriais e agrícolas. É necessário que os recursos hídricos apresentem condições físicas e químicas adequadas para sua utilização e consumo. Por isso, a disponibilidade de água é função não apenas da quantidade, mas também da qualidade.

A água é muito utilizada na indústria para diversos fins. Como uso geral para irrigação de áreas verdes, banheiros e refeitórios. Para laboratórios, como matéria-prima ou em soluções químicas. Usada também para geração de energia, na maioria dos processos industriais como fluido de aquecimento e/ou resfriamento, em torres de resfriamento e caldeira. De um modo geral, a quantidade e a qualidade da água necessária ao desenvolvimento das diversas atividades consumidoras em uma indústria dependem de seu ramo de atividade e capacidade de produção.

A Lei n 6.938/81 da Política Nacional do Meio Ambiente, ao tratar dos princípios norteadores das ações governamentais, estabelece em seu Art. 2, “incentivos ao estudo e pesquisa de tecnologias orientadas para o uso nacional e a proteção dos recursos ambientais”, e no seu Art. 9, orienta para a “racionalização do uso da água”. A Lei Federal nº 9.433 de 1997, institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e visa à utilização racional e integrada, tal como a cobrança de recursos hídricos sujeitos à outorga, iniciando um novo modelo econômico para o uso da água. Como o custo da água disponibilizada às indústrias é relativamente alto, a lei induz ao processo de reutilização e, com isto, à redução dos gastos com a água. A cobrança pelo uso dos recursos hídricos é atribuição da Agência Nacional de Águas (ANA), a partir da Lei Nº 9.984 de 2000, quando da criação da agência.

A Resolução do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) Nº 357 de 2005, foi criada visando, principalmente, a classificação dos corpos de água (doce, salobra ou salgada), assim como as condições e padrões de qualidade das águas e padrões de lançamento dos efluentes em corpos hídricos. A Resolução Nº 54 de 2005 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) estabelece “modalidades, diretrizes e critérios gerais que regulamentem e estimulem a prática de reúso direto não potável de água em todo território nacional”.

Em geral, a geração de resíduos nas mais variadas formas, inclusive como efluentes líquidos, é uma particularidade de cada indústria. Como exigência da legislação e com o objetivo de reduzir os impactos sobre o meio ambiente, as indústrias devem coletar e tratar os seus efluentes, antes do lançamento final.

De maneira similar ao que ocorre quando da seleção de tecnologias para tratamento da água para uso industrial, o tratamento de efluentes deve ser realizado por meio da utilização de operações e processos unitários, que sejam capazes de reduzir a concentração dos contaminantes presentes para níveis compatíveis com os padrões de emissão estabelecidos em normas ou a níveis adequados para formas de reúso subseqüentes. Em geral, as tecnologias empregadas são as mesmas utilizadas para o tratamento de água; porém, muitas vezes torna-se necessário lançar mão do uso de outras tecnologias (p.ex., Lodos ativados, Nitrificação-Desnitrificação, Filtro Biológico, Stripping da amônia, Osmose inversa), as quais são específicas para a remoção de contaminantes presentes nos efluentes.

A legislação para controle da qualidade e vazão de descarte de efluentes está cada vez mais rigorosa, a fim de manter a qualidade dos recursos hídricos. Assim, as indústrias têm procurado reduzir a vazão de efluente gerada através do reúso e da regeneração/reúso de água (HIGA et al., 2006). Para atender às indústrias e ao meio ambiente, faz-se necessária a otimização do processo de produção e do processo de tratamento dos resíduos gerados pela produção. É imprescindível que a redução dos efluentes esteja aliada às legislações vigentes para que a minimização seja feita no âmbito da esfera legal. No caso do reúso industrial é preciso ter consciência que ele não substitui integralmente a necessidade de água de uma planta industrial, pois existem limitações de ordem técnica, operacional e ambiental que restringem a utilização de sistemas de circuito fechado. Além disso, o reúso interno deve ser realizado após uma avaliação integrada do uso da água na fábrica. É importante ter em mente que antes de se pensar no reúso de efluentes da própria empresa, é preciso implantar medidas para a otimização do consumo e redução de perdas e desperdícios, além de programas de conscientização e treinamento.

Hoje o desafio das grandes e pequenas empresas é contribuir de alguma forma para o desenvolvimento da sociedade de forma sustentável. Tendo em vista a adoção das práticas citadas anteriormente, benefícios nas áreas ambientais, econômicas e sociais serão gerados quando a sustentabilidade estiver em foco. No Quadro 1.1 estão apontados alguns benefícios do reúso da água.

Quadro 1.1 – Benefícios do Reúso de Água

ÁREA	BENEFÍCIOS
AMBIENTAL	Redução do lançamento de efluentes industriais em cursos d'água
	Redução da captação de águas superficiais e subterrâneas
	Aumento da disponibilidade de água para uso mais exigente
ECONÔMICA	Conformidade ambiental em relação a padrões e normas ambientais
	Melhor inserção dos produtos brasileiros nos mercados internacionais
	Redução dos custos de produção e mudanças nos padrões de produção
	Recebimento de incentivos fiscais na cobrança pelo uso da água
SOCIAL	Ampliação na geração de empregos diretos e indiretos
	Melhoria da imagem do setor produtivo junto à sociedade
	Reconhecimento de empresas socialmente responsáveis
	Ampliação da oportunidade de negócios para as empresas sustentáveis

Em vista da limitação de reservas de água doce no planeta e em contrapartida ao aumento da demanda de água, torna-se necessária a adoção de estratégias que visem racionalizar a utilização dos recursos hídricos e mitigar os impactos negativos relativos à geração de efluentes pelas indústrias. Além disso, a heterogeneidade da distribuição dos recursos hídricos e das populações nas diversas regiões do planeta e mesmo no Brasil, faz com que seja cada vez mais difícil o abastecimento de algumas regiões, principalmente as metropolitanas, tendo por consequência aumentos gradativos dos custos de fornecimento de água.

A Engenharia de Processos tem como foco o projeto de processos químicos, a partir da decisão de produzir determinado produto, mediante um plano bem definido para a construção e a operação de uma instalação industrial (PERLINGEIRO, 2005). A Integração de Processos (IP) surgiu como uma área da Engenharia de Processos para designar certas atividades

orientadas para um sistema, no contexto dos processos químicos. Inicialmente, surgiu pela necessidade de se desenvolver uma Integração Energética, ou seja, estudos ligados à recuperação de calor nos processos industriais, a fim de reduzir custos para indústria. Posteriormente, o uso destes conceitos foi estendido para estudar redes de equipamentos de transferência de massa em geral e, em particular, no gerenciamento de água em processos. Sendo assim, a Integração de Processos tornou-se uma importante ferramenta para as indústrias, como principal estratégia para a tecnologia de planejamento e de projeto. Com isso, é possível reduzir significativamente o custo operacional de plantas existentes, enquanto os novos processos podem ser projetados com redução nos custos operacionais e de investimento (QUEIROZ e PESSOA, 2005).

Dentre as ferramentas utilizadas para minimização do consumo de água e a geração de efluentes, o Diagrama de Fontes de Água (GOMES, 2002; GOMES *et al.*, 2007), desenvolvido na Escola de Química da UFRJ, é um dos mais promissores e bem-sucedidos, especialmente pela sua simplicidade e praticidade nas aplicações. O método procura determinar a melhor combinação possível entre as correntes de efluentes aquosos dos diversos processos, com o objetivo de minimizar a geração total de efluentes e, com isso, os custos a eles vinculados. Para tanto, utiliza princípios da Tecnologia Pinch (LINNHOFF e HINAMARSH, 1993; WANG e SMITH, 1994) e incorpora um conjunto de regras heurísticas, as quais vêm tendo constantes aprimoramentos, visando adequar-se ao máximo à realidade dos processos industriais.

1.1 – Objetivo Geral

Neste trabalho é utilizado o método do Diagrama de Fontes de Água (DFA). O procedimento é utilizado em processos contínuos e em batelada, ao longo deste trabalho, buscando minimizar o consumo de água limpa e a geração de efluentes, para cada um dos casos estudados. O método foi aplicado manualmente, para processos em batelada, e com o auxílio de um programa chamado MINEA (Minimização de Efluentes Aquosos), para processos contínuos.

1.1.1 - Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste projeto consistem em:

- i) obter redes com mínimo consumo de água através da aplicação do DFA para processos contínuos com multicontaminantes, e para processos em batelada;

- ii) comparar os resultados obtidos a partir do DFA com os resultados gerados por outras tecnologias de minimização do consumo de água existentes na literatura;
- iii) realizar uma avaliação econômica dos cenários propostos.

No capítulo 2 é oferecida ao leitor uma revisão completa sobre toda a história da Integração de Processos, o que nos leva ao surgimento do Diagrama de Fontes de Água.

No capítulo 3 a metodologia e aplicação do Diagrama de Fontes de Água é apresentado ao leitor. Também será apresentado um forma minuciosa de calculo de DFA para multicontaminantes e batelada.

No capítulo 4 é feita uma introdução dos objetivos específicos do projeto. Estão inseridos neste capítulo três estudos de casos para aplicação do método DFA estudo com multicontaminantes e outro com uso da batelada no reúso.

No capítulo 5, as unidades sofrem um estudo de batelada no com a apresentação do processo e dos cenários gerados com o DFA.

No capítulo 6 são analisados os cenários gerados para cada caso e avaliados os custos operacionais, definindo qual caso apresenta maior viabilidade econômica.

2-INTEGRAÇÃO DE PROCESSOS: BREVE REVISÃO

A Integração de Processos surgiu através da Engenharia de Processos e trata-se do seqüenciamento de um conjunto numeroso e diversificado de ações sistematizadas, voltadas para o auxílio da execução do projeto de processos, e que se divide em duas etapas tradicionais: a análise e a síntese de processos (PERLINGEIRO, 2005).

Na análise, o objetivo está em prever o desempenho físico e econômico de um processo já existente (em operação) ou ainda inexistente (em fase de projeto). Já a síntese consiste em gerar os fluxogramas plausíveis para um processo a partir do conjunto de equipamentos adequados para a finalidade a que se destinam, buscando o alcance da melhor estrutura (fluxograma). Determina a melhor combinação possível entre as correntes de efluentes aquosos dos diversos processos com objetivo de minimizar a geração total de efluentes e, com isso, os custos a eles vinculados. Anos mais tarde, teve seu enfoque ampliado para outras aplicações, como a síntese de redes de equipamentos de transferência de massa e, em particular, o gerenciamento hídrico em processos. Os benefícios da sua aplicação traduzem-se na generalidade em processos mais competitivos e atualizados em vários setores de atividade industrial, além de exercer um papel determinante na prevenção de danos ambientais através da redução da emissão de efluentes.

De acordo com Hallale (2001 apud MIRRE, 2006), a IP cobre quatro grandes áreas de aplicação, dentre as quais: uso eficiente de matérias-primas, eficiência energética, redução de emissões e operacionalidade do processo. A IP é uma forma sistemática para identificar e corrigir ineficiência em processos, pois analisa o processo global e as interações entre suas diferentes etapas no lugar de considerar operações individuais, tendo suas decisões orientadas para otimização técnico-econômica do conjunto de processo contínuo. Um dos maiores desafios da IP está em assegurar a viável praticidade através da adoção de suas ferramentas metodológicas.

Segundo Neto (2005 apud PEREIRA, 2007), as principais características dos métodos de integração de processos são: uso de regras heurísticas (conjunto de regras e métodos relacionados com a experiência), fundamentos termodinâmicos e técnicas de otimização matemática. Os trabalhos disponíveis na literatura distribuem-se em dois grupos, de acordo com o método sistemático de síntese utilizado: Programação Matemática e Procedimento Algorítmico. Os métodos de programação matemática resolvem problemas de otimização numérica equacionados por uma função objetivo. Já a categoria do procedimento algorítmico

utiliza regras heurísticas na identificação e analisa alternativas de minimização da vazão de água através de reúso e/ou reciclo das correntes.

A Figura 2.1 sintetiza as ferramentas utilizadas para Integração de Processos.

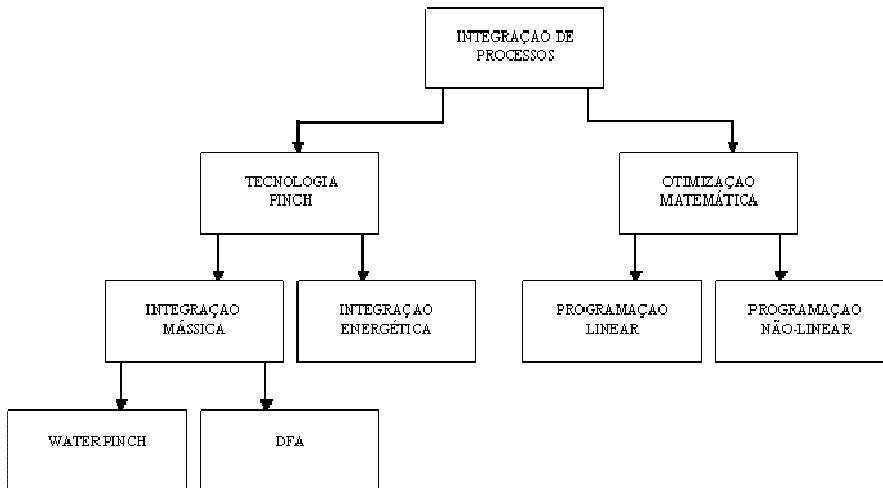


Figura 2.1 – Ferramentas de Integração de Processos

O problema de otimização do uso da água foi relatado pela primeira vez por Takama e colaboradores em 1980, gerando uma superestrutura com todas as possíveis oportunidades de reúso e regeneração. Utilizando métodos baseados em programação matemática, os autores propuseram uma solução de otimização do consumo de água em uma refinaria de petróleo. O trabalho resultou em uma superestrutura, considerando todas as possibilidades de reúso e regeneração. Porém, muitos parâmetros ainda necessitavam ser discutidos, aliado à carência de ferramentas computacionais da época, o que impossibilitou a simplificação da abordagem do problema.

Depois, El-Halwagi e Manousiouthakis (1989) relataram um problema mais geral de transferência de massa, onde os contaminantes de correntes ricas eram transferidos para correntes pobres. Esta metodologia foi adaptada de outra desenvolvida para rede de trocadores de calor por Linnhoff e Hindmarsh, em 1983. No entanto, o método apresentava a limitação de ser aplicado apenas para um componente chave. Mais tarde, El-Halwagi e Manousiouthakis, em 1990, automatizaram o ajuste e incluíram a regeneração, cuja solução determinava o mínimo custo e o ponto “*pinch*” (limite da transferência de massa entre as correntes ricas e pobres), utilizando programação linear. Esta metodologia poderia considerar restrições especiais, como questões de segurança de processo, considerações de controle e

problemas de transporte, dentre outros. Depois, um programa linear inteira mista (MILP) foi resolvido, identificando o mínimo número de unidades de transferência de massa consistente com o mínimo custo de utilidades.

2.1-Tecnologia *Pinch*

A “Tecnologia *Pinch*” (também chamada de Tecnologia do Ponto de Estrangulamento) surgiu no final da década de 70 como uma ferramenta para projetar redes de transferência de calor em um momento de crise energética mundial. Sua contribuição principal foi fornecer aos engenheiros conceitos simples que eram utilizados de forma interativa, diferente dos métodos computacionais utilizados naquela época. Usando os seus princípios, os engenheiros podiam controlar as modificações do processo, direcionando o projeto para soluções que ao mesmo tempo eram termodinamicamente eficientes como também industrialmente aceitáveis (LINNHOFF, 1983).

O termo “Tecnologia *Pinch*” foi utilizado por Linnhoff (1984, apud PEREIRA, 2007) para representar um novo conjunto de métodos termodinâmicos que garantam o uso mínimo de energia necessária aos processos industriais através de um projeto de Rede de Trocadores de Calor (RTC). As aplicações voltadas para minimização das vazões de consumo de água, surgem em meados da década de 1990, com a síntese de Redes de Equipamentos de Transferência de Massa (RETM), em analogia à síntese de RTC.

Até aquela época, um método bastante usado era o de “tentativa e erro”, onde uma corrente praticamente limpa era destinada a processos que possuíam um efluente altamente contaminado. Este fato poderia até ser uma boa premissa, no entanto prejudicava a busca pela solução mais próxima do ponto ótimo, que é o mínimo consumo de água fresca (WENZEL et al., 2002) .

Há vinte anos, a Análise *Pinch* vem sendo empregada com sucesso para reduzir o consumo de energia em processos individuais. Resultados em aplicações de otimização do consumo de água alcançaram economias de água fresca em torno de 15-40% e de efluentes de 20-50% (BAETENS, 2002).

2.1.1 - *Water Pinch*

A tecnologia “*Water Pinch*” é uma sistemática para análise de redes de água visando à redução dos custos no processo, utilizando métodos gráficos para identificar e otimizar as melhores oportunidades de reúso, regeneração e tratamento de efluentes (YOO, 2005).

De acordo com Smith (2005), a metodologia baseia-se no princípio de que a água em qualquer operação torna-se mais contaminada quando em contato com a corrente de processo, e que este nível de contaminação aumenta ao longo do processo de transferência de massa.

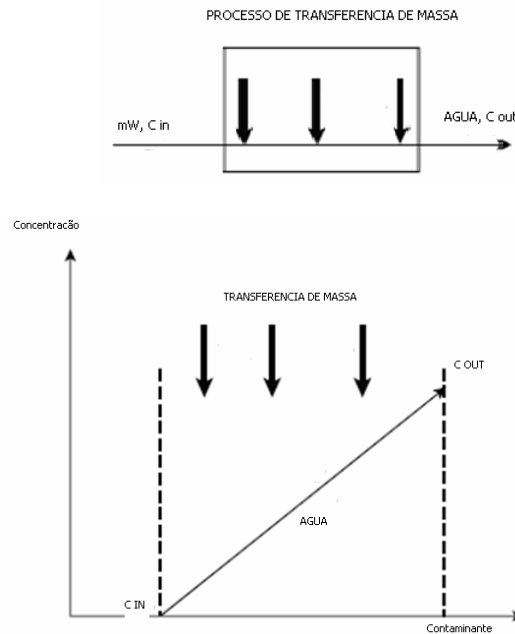


Figura 2.2 – Representação Gráfica do Uso da Água (SMITH, 2005)

Se a vazão de água para uma determinada operação diminuir, mantendo a mesma carga mássica de contaminantes, a concentração de saída da corrente de água irá aumentar, como é mostrado na Figura 2.2, através da maior inclinação da reta.

Esta redução de vazão será limitada por alguma restrição hidráulica do processo (mínima vazão requerida) ou pela concentração máxima de saída da corrente de água, em função de alguma restrição relacionada à: solubilidade máxima, limite de corrosão, limite de deposição, mínima força motriz de transferência de massa ou máxima concentração de entrada para o tratamento desta corrente. Caso ocorra esta redução em todas as operações, o processo alcançaria o ponto de mínimo consumo de água fresca, o que, por outro lado, reduziria as oportunidades de reúso.

Para criar possibilidades de reúso de água entre as operações, algum nível de entrada de contaminantes deve ser aceito. Nesta condição de entrada e saída de contaminantes no seu nível máximo de concentração é que se constrói a curva limite de água do referido processo, ou seja, a mínima força motriz necessária para retirar determinada quantidade de contaminantes do processo.

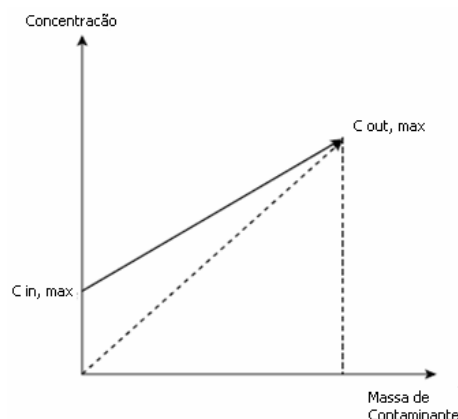


Figura 2.3 – Aumento do Nível de Contaminantes na Entrada (SMITH, 2005)

Segundo Pereira (2007), a tecnologia “*Water Pinch*” trata-se de um tipo de integração mássica em operações com uso de água, baseando-se em conceitos termodinâmicos e regras heurísticas, sendo dividida em três etapas:

- I. Análise: identificar o ponto *pinch*, também chamado de ponto de estrangulamento termodinâmico da rede, onde ocorre o mínimo consumo de água e geração de efluentes em operações com uso de água (Análise “*Water Pinch*”);
- II. Síntese: projetar uma rede de consumo de água que alcance as metas de vazão para água nova e efluente através do reúso, regeneração e reciclo (Síntese “*Water Pinch*”);
- III. Modificação: modificar uma rede existente de consumo de água, visando maximizar o reúso e minimizar a geração de efluentes através de mudanças efetivas no processo (Modificação “*Water Pinch*”).

O principal desafio da Análise “*Water Pinch*” é considerar todas as operações de uso de água simultaneamente, mesmo que não estejam relacionadas ao mesmo equipamento. Conseqüentemente, uma simples operação pode envolver uma série de reações químicas e processos mecânicos que podem limitar o reúso de água.

Sendo assim, para atingir o seu objetivo principal, que é identificar as oportunidades de reúso que permitam projetar uma rede mais próxima possível da mínima vazão de água fresca, ela passa por três objetivos intermediários: (i) reduzir o consumo de água nova, ou seja, identificar fontes secundárias de água; (ii) minimizar a vazão de descarte de efluentes e, conseqüentemente, a sua concentração de contaminantes; (iii) alcançar o estado de “Efluente Zero”, onde o efluente total de um processo é reutilizado (MANN, 1999). Contudo, apresenta

como principais desvantagens a complexidade na aplicação para muitos contaminantes ou restrições, dificuldade para avaliações econômicas e definição de arranjos da rede.

Wang e Smith (1994) estenderam o procedimento da Tecnologia do Ponto de Estrangulamento (Tecnologia *Pinch*) para a Integração Mássica e, usando o conceito de curva composta limite (curva composta de operações e curva limite de vazão de água) e transferência vertical no perfil limite de água, obtido a partir de concentrações máximas de entrada e de saída de contaminantes, estimaram metas para o consumo mínimo de água em sistemas e efluentes com um contaminante. Também foi aplicado a problemas com múltiplos contaminantes embora não tivesse sido adequado para todas as situações. A idéia básica era que o efluente pudesse ser usado diretamente em outra operação quando esta pudesse aceitar o nível de contaminantes da anterior; Com isso, identificaram o ponto “*pinch*”, que corresponde à mínima vazão global usada de água fresca, para diferentes cenários mencionados.

Segundo Wang e Smith (1994), se excluirmos a possibilidade de mudanças radicais no processo, existem três caminhos para se reduzir a demanda de água e conseqüentemente a geração de efluentes:

- I. Reúso: o efluente é reusado diretamente como corrente em outra operação, pois o nível de contaminação não irá interferir no processo. Neste caso consegue-se uma redução do consumo de água tratada. Este arranjo pode exigir que o efluente seja misturado com outros efluentes ou com água fresca, conforme Figura 2.4;

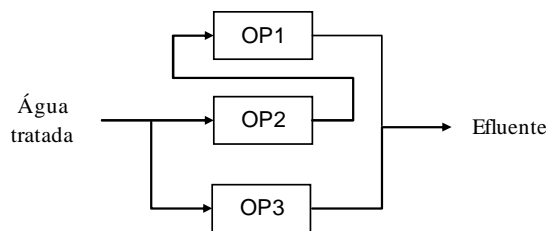


Figura 2.4 – Reúso do efluente da operação 2 na operação 1

- II. Regeneração e reúso: o efluente de uma ou mais operações é regenerado para remover total ou parcialmente um contaminante, antes que seja reusado em outra operação. Neste caso, também pode ser necessário misturar com outras correntes ou com água fresca. Esta solução reduz o consumo de água tratada, a geração de efluentes e a carga de contaminantes em função do processo de regeneração, conforme Figura 2.5;

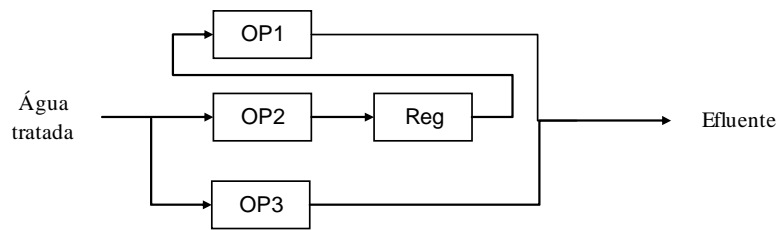


Figura 2.5 – Regeneração do efluente na operação 2 para reutilização na operação 1

III. Regeneração e reciclo: primeiro o efluente é regenerado e então reciclado na mesma operação. No entanto, é importante ter atenção especial na concentração dos contaminantes não removidos na regeneração a cada reciclo realizado. Neste caso, há também redução da captação de água tratada, geração de efluentes e carga de contaminantes, conforme Figura 2.6.

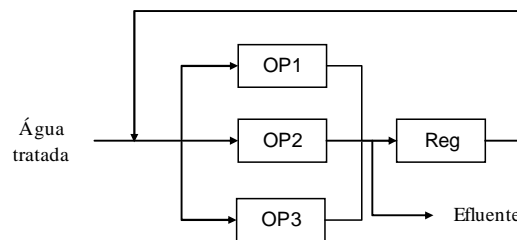


Figura 2.6 – Regeneração do efluente global para ser reutilizado na mesma operação

O método de Wang e Smith (1994) não é adequado para todas as situações. Uma das falhas do método é a necessidade de dividir operações para atingir a meta de consumo mínimo de água. Também há falha na determinação da meta de consumo mínimo de água quando são introduzidos processos de regeneração, devido ao deslocamento da concentração *pinch*. Além disso, a presença de múltiplos contaminantes torna o método muito complexo.

Neste sentido, Wang e Smith (1995) apresentaram uma extensão desta metodologia, passando a considerar restrições de vazão, perda de água ao longo do processo e múltiplas fontes de água. Os conceitos de reciclo local e operações de divisão foram introduzidos, além de fornecer informações suficientes para que fosse realizada uma avaliação preliminar de custos.

Castro et al. (1999) propuseram uma metodologia na qual a meta de consumo mínimo de água de fontes externas fosse alcançada, maximizando o reúso. Assim, o conceito de múltiplos pontos de estrangulamento (*pinch*) foi introduzido simultaneamente com a síntese da rede de transferência de massa. Este método não foi aplicado a casos de múltiplos contaminantes e, além disso, considerou apenas o reúso como alternativa para reduzir a vazão de efluentes líquidos. Um algoritmo para obtenção de metas de consumo de água considerando regeneração e reúso também foi apresentado, porém resultou na proposta de divisão de operações na rede final.

Gomez et al. (2001) desenvolveram um procedimento algorítmico, que pode ser resolvido manualmente, baseado na construção de grades de concentração e nas propostas de Wang e Smith (1994) e de Castro et al. (1999). Após o consumo mínimo de água ser determinado pelo método gráfico de Wang e Smith (1994), o método requer que seja construída uma grade de concentração, utilizando concentrações máximas de entrada e saída. Todas as operações são alocadas nesta grade e são calculadas as vazões de água nos intervalos de cada operação, priorizando o uso de água proveniente da própria operação e depois o reúso de água proveniente de outras operações ou outras fontes externas de água. Ao final, as vazões utilizadas em todos os intervalos de uma mesma operação são somadas.

Dunn e Wenzel (2001) também apresentaram uma metodologia gráfica, onde no primeiro momento eles aplicaram o Diagrama “Water Pinch” e depois o Diagrama de Mapeamento de Massa. Resolveram o exemplo proposto por Wang e Smith (1994), mas consideraram as vazões como fixas, sem avaliar possíveis restrições.

Segundo Dunn e Wenzel (2001), as redes de transferência de massa resultantes da aplicação do Diagrama de Mapeamento de Massa devem ser avaliadas sob diversos fatores, onde os cinco principais são:

- Econômico: o custo de capital e o custo operacional associado à cada rede devem ser determinados;
- Segurança: questões relacionadas à segurança associada aos demais contaminantes das correntes;
- Distância: o custo associado com a distância deveria ser previamente indicado e algumas redes poderiam ser eliminadas prioritariamente por razões econômicas;
- Simplificação, operabilidade e controlabilidade: a conexão de processos via reúso e reciclo de água na rede pode ser um fator decisivo;
- Processos proibidos: a existência deste tipo de restrição deve ser considerada na avaliação.

2.2 – Diagrama de Fontes de Água

2.2.1 – Processos contínuos: Breve Revisão

Dentre os métodos existentes e voltados para a síntese de redes de transferência de massa há um método algorítmico denominado Diagrama de Fontes de Água (DFA). Ele

procura determinar a melhor combinação possível entre as correntes de efluentes aquosos dos diversos processos, com objetivo de minimizar a geração total de efluentes e, com isso, os custos a eles vinculados.

Gomes (2002) apresentou o procedimento algorítmico Diagrama de Fontes de Água (DFA) para minimização de efluentes aquosos, baseado nos trabalhos de Castro e colaboradores (1999) e de Wang e Smith (1994). Gomes aplicou o algoritmo em exemplos com um contaminante e múltiplos contaminantes. O algoritmo proposto por Gomes utiliza concentrações máximas de entrada e saída e, desta forma, possibilita a localização de ótimos locais. O DFA mostrou-se eficiente e com resultados comparáveis a outros procedimentos da literatura sem, no entanto, depender de programas computacionais e ainda maximizando o reúso da água no sistema sem grandes modificações nos projetos já existentes. Permitiu sintetizar redes de transferência de massa, sendo capaz de considerar diversas situações como: reúso; múltiplas fontes de água; perdas de vazão ao longo do processo; restrição de vazão; regeneração e reúso; e regeneração e reciclo.

Delgado (2003) usou o algoritmo Diagrama de Fontes de Água para problemas com regeneração de efluentes diferenciada para cada contaminante em sistemas com múltiplos contaminantes. Propôs um novo procedimento para selecionar regeneradores com eficiência diferenciada para cada contaminante. A diferenciação foi feita através da eficiência do tratamento (taxa de remoção) de cada contaminante. A partir dos contaminantes de referência presentes nas correntes, sugeriu-se então um processo de regeneração adequado e, assim, observou-se antecipadamente a possibilidade ou não de reúso ou regeneração. As concentrações de água regenerada foram calculadas a partir da eficiência dos regeneradores selecionados. A concentração de água regenerada foi inserida no DFA como uma nova fonte de água externa para reúso ou reciclo.

Delgado (2003) aplicou o algoritmo proposto em quatro casos industriais reais: uma planta de fabricação de caixas de papelão, uma unidade de branqueamento de polpa kraft, um processo químico de fabricação de sorbitol e dextrose, e uma refinaria de petróleo. Também propôs um procedimento para obtenção dos dados industriais, quando se devem identificar as restrições de processo, os contaminantes presentes, verificar vazões, tomando-se conhecimento geral do processo. Verifica-se neste trabalho que o algoritmo é capaz de identificar a concentração adequada para regeneração e incorporá-la no Diagrama de Fontes de Água de forma simples.

Stelling (2004) utilizou o DFA na síntese combinada de redes de equipamentos de transferência de massa e de trocadores de calor, com a intenção de propor um novo método para esta síntese. No procedimento DFA (que obtém redes com consumo mínimo de água) é introduzida a variável temperatura de operação de cada equipamento e, assim, especifica-se qual das redes geradas apresenta menor custo operacional relativo ao aquecimento e resfriamento de correntes.

Higa e Penha (2006) aplicaram o procedimento algorítmico do DFA ao sistema de utilidades de uma refinaria de petróleo, por ser responsável pela maior parte do consumo total de água. Foram considerados quatro contaminantes/parâmetros (cloro, amônia, pH e fenol), de modo que os resultados levaram à redução do consumo de água cerca de 5,53%.

Santos (2007) automatizou o DFA através do desenvolvimento de um *software* em Excel, denominado MINEA – Minimização de Efluentes Aquosos. Além disso, desenvolveu algoritmos para a escolha do contaminante e da operação de referência para os casos de múltiplos contaminantes (o que não tinha sido feito anteriormente). Foram consideradas restrições de processos, tais como operações de perda e proibições de reúso em processos com um e múltiplos contaminantes, bem como foram consolidados estes algoritmos e o *software* através de estudos de casos da literatura, envolvendo um e múltiplos contaminantes. Todos os estudos envolveram opções apenas para máximo reúso. Foi alcançada uma redução do consumo inicial de água maior ou igual aos correspondentes apresentados na literatura.

Gomes et al. (2007) mostraram também a aplicação do DFA em sistemas com múltiplos contaminantes, regeneração, múltiplas fontes de água, perda de vazão e vazões fixas.

Mirre (2007) aplicou o procedimento algorítmico-heurístico Diagrama de Fontes de Água visando atingir a meta de consumo mínimo de água de processo para o caso de uma refinaria de petróleo. O estudo envolveu a consideração simultânea de três contaminantes nas correntes. Foram gerados diferentes cenários propostos por meio de reúso e/ou reciclo de correntes, incluindo regeneração. Um dos cenários proposto foi reaproveitar toda a corrente de efluente após ser tratada na ETDI (porém, com a qualidade não permitida para o despejo direto no rio) como *make-up* na torre de resfriamento. Outros cenários foram propostos considerando a presença e a ausência do sistema de osmose como tratamento do efluente, que, de acordo com os custos calculados, trouxe um ônus econômico ao processo. Ainda foi incluído o cenário envolvendo a possibilidade de se efetuar o tratamento distribuído de

efluentes, que gerou a melhor redução de custos. De acordo com a avaliação econômica realizada, uma redução de 20% nos custos totais foi obtida em virtude das configurações propostas. Ainda há uma lacuna que desperta para a grande necessidade de se aperfeiçoar a classe dos procedimentos algorítmicos quando se faz presente a consideração de sistemas multicomponentes (MIRRE, 2007).

Marques (2008) aplicou o DFA em indústrias dos diversos segmentos, verificando a viabilidade econômica dos cenários propostos no trabalho, considerando apenas o custo do tratamento de efluentes e o custo operacional para suprimento de água externa e para regeneração das correntes de efluentes. Através de seu trabalho foram verificadas boas indicações de viabilidade econômica em todos os cenários gerados, chegando a obter aproximadamente 92% de economia dos custos totais anuais.

Delgado (2008), utilizando o DFA, propôs algoritmos para a síntese de sistemas de regeneração e de tratamento final distribuído de efluentes, visando o consumo mínimo de água e a determinação e seleção da sequência de técnicas de tratamento. Outro algoritmo também foi desenvolvido (Diagrama de Fontes de Rejeitos) na síntese de tratamento distribuído, considerando restrições, como múltiplos contaminantes, múltiplos tratamentos, tratamentos com concentração de entrada máxima, tratamento com vazão máxima. Usando o DFA para a regeneração diferenciada de contaminantes, Delgado (2008) propôs dois algoritmos para reúso ou reciclo. O primeiro tomou como tratamento de referência o que gerou um fluxograma com mínimo custo anual total (MCAT) e o segundo tomou como base a menor concentração de entrada (CEM) das operações para determinar a concentração de água regenerada.

Domingos et al. (2009) realizaram estudos de casos visando a minimização do consumo de água e da geração de efluentes aquosos em uma Unidade de Tratamento de Água de um Complexo Petroquímico. Diferentes cenários foram gerados, propostos por meio de reúso de correntes, levando-se em conta as restrições da planta. Para isso, foi utilizada a metodologia do DFA e foram geradas Redes de Transferência de Massa (RTM). Foram estudados os casos para cada contaminante individualmente e para múltiplos contaminantes, e os resultados mostraram uma redução de cerca de 31% no reúso e de 30% na geração de efluentes. De modo geral, os resultados demonstraram que ao aplicar a metodologia foi possível obter êxito na redução do consumo de água e da geração de efluentes aquosos.

Curti e Costa (2009) também utilizaram o procedimento DFA para estudo de oportunidades de reúso e águas e efluentes em uma refinaria, considerando correntes com múltiplos contaminantes. Analisaram o custo individual por equipamento e obtiveram como resultado uma redução de quase 50% através do reúso de correntes.

Borges e Sardinha (2009) aplicaram o procedimento DFA para o reúso de água no sistema de utilidades de uma refinaria e avaliaram a influência dos custos adicionais gerados pelo rearranjo das tubulações. Consideraram quatro parâmetros (cloro, amônia, pH e fenol), obtendo ao final redução de até 19,12% na vazão.

2.2.2 – Processos em batelada: Breve revisão

Os processos em batelada têm sido alvo de estudos voltados para a necessidade de se desenvolver metodologias que atendam às necessidades de minimização de efluentes quando a variável tempo é um fator importante na operação do processo. Considerando a sua potencialidade, as técnicas matemáticas são superiores às técnicas gráficas, mesmo para processos em batelada, onde a dimensão do tempo é um fator relevante.

Almató et al. (1997) realizaram um estudo sobre minimização de água para processos industriais em batelada. Para viabilizar o processo e promover maiores possibilidades de reuso da água, os autores introduzem o conceito de tanque de estocagem. O objetivo consiste em selecionar o tanque que atenderá à demanda de cada corrente e para qual deles o efluente deve ser enviado. Uma característica inerente desse processo é a necessidade de considerar o tempo variável para a otimização do sistema. Nestes casos, os tanques de estocagem anulam o tempo restrição. O método foi aplicado aos processos de uma fábrica de sucos, alcançando-se uma reutilização de até 37%.

Puigjaner et al. (2000) desenvolveram um programa computacional de interface gráfica que permite aplicar uma metodologia para a redução do consumo de água em processos batelada ou em semi-contínuos. O *software* calcula não somente a demanda de água fresca associada ao plano de produção, como também os diferentes custos envolvidos no sistema de reúso, os quais são otimizados visando à obtenção da melhor rede de águas, incluindo o emprego e a localização de tanques de armazenamento de água para reúso. A metodologia se baseia no reúso de efluentes aquosos através de tanques de armazenamento de água. O uso de tanques de armazenamento de água proporciona um aumento nas oportunidades de reúso de água entre as operações que permitem a relaxação de restrições

dependentes do tempo. Estes equipamentos fornecem água para reúso em outros pontos da planta, em um tempo qualquer, atuando como estações de mistura.

Jodicke et al. (2005) empregaram um modelo baseado na programação linear inteira mista (MILP), que necessita de dados acessíveis como a locação do processo, a demanda de água atual e informações sobre as possibilidades de reúso de correntes aquosas. Os custos totais, custos operacionais (água limpa, tratamento de efluentes, bombeamento) e os custos de investimento (tubulação, tanques) são minimizados considerando um dado período de tempo. O modelo foi aplicado a um caso industrial de uma planta multiproduto, de processamento batelada de corantes reativos (incluindo nove operações e três tanques), onde várias configurações de reúso foram geradas e discutidas nos seus aspectos econômicos, ecológicos e técnicos.

Foo et al. (2004) sintetizaram redes de transferência de massa para processos em batelada, na qual a rede foi configurada a partir do método de cascata horizontal e vertical. Para tanto, foi elaborada uma tabela de intervalo de composição dependente do tempo, sendo adaptada da rede de troca de calor. Foo et al. (2005) apresentaram um procedimento voltado para a síntese de redes de transferência de massa em problemas acerca de processos em batelada, considerando a presença de um tanque de armazenamento de água para reúso. São apresentados dois estudos de casos, onde se pauta o compromisso de minimizar o uso de tanques de armazenamento. Contudo, não foram feitas estimativas de custos para as redes estruturadas.

Majozi (2005) apresentou uma formulação matemática para a minimização de água e efluentes em plantas batelada multipropósito, considerando casos de presença e ausência de um tanque central de armazenamento de água para reúso. A formulação do modelo se baseia numa super-estrutura que engloba todas as possibilidades de reciclo e reúso. O modelo foi aplicado a dois estudos de casos da literatura, demonstrando que o emprego de um tanque central de armazenamento aumenta a oportunidade de minimizar a água, com economias na demanda de água limpa acima de 50%. Embora possa ser estendida a problemas com múltiplos contaminantes nas correntes, a metodologia apresentada foi aplicada somente a sistemas com um contaminante.

Uma técnica que concentra-se estritamente em processos em batelada foi desenvolvida por Majozi (2005). Esta técnica apresentada se baseia no uso de uma formulação matemática de águas residuais e minimização de água doce em plantas de batelada multiuso (água doce é

usada aqui para significar água inserindo a planta de uma fonte externa, como a alimentação). Esta formulação é baseada em uma superestrutura que inclui todas as possibilidades para a reutilização e a reciclagem de água, tendo em conta o intervalo de tempo de cada batelada.

Em 2006, Majози e colaboradores apresentaram uma técnica gráfica para a minimização de água limpa e de efluentes aquosos de operações em batelada. A metodologia inclui a identificação de oportunidades de reúso e reciclo de água dentro do processo e entre processos. Foram exemplificadas as redes de água considerando a inclusão de vasos de processos voltados para armazenamento de água, aplicando a técnica a processos em batelada com correntes envolvendo um contaminante.

Immich et al. (2006) apresentaram uma adaptação da metodologia do DFA para um processo em batelada, a partir de dados com base em um estudo de caso apresentado por Majози (2005). Para comparar o procedimento, também foi utilizada a técnica gráfica empregada por Majози et al. (2006) para resolver o problema. Os resultados encontrados foram semelhantes, porém ficou evidente a simplicidade da aplicação do DFA na consideração de problemas em batelada.

Amim et al. (2007) aplicaram a metodologia DFA com base em um estudo de caso apresentado por Foot et al. (2004) para um processo em batelada. Obtiveram resultados bem semelhantes aos da literatura usada, comprovando assim a eficiência do método DFA.

Chen e Lee (2008) fizeram um estudo usando a técnica gráfica e aplicaram no processo batelada simples e batelada em ciclo, e alcançaram uma redução de 40% nos custos do processo para batelada simples, e 60% para batelada cíclica.

Tokos e Pintaric (2009) apresentaram uma aplicação industrial para a otimização de uma rede de água em uma cervejaria. Vários modelos matemáticos foram desenvolvidos a fim de reduzir o uso de água doce. Os processos em batelada com tanque de estocagem são utilizados na área de embalagens. Os modelos foram baseados no projeto desenvolvido por Kim e Smith (2004). Como resultado, os custos com tratamento da água sofreram redução de 27%.

2.2.3 – Comentários Gerais

Na revisão bibliográfica realizada acima foi possível contextualizar sucintamente o surgimento do DFA e sua evolução ao longo dos anos. Verifica-se que há mais estudos desenvolvidos e aprimorados para os processos contínuos. Para os processos em batelada, os

trabalhos divulgados fazem pouco uso da metodologia DFA. Em virtude disto, o projeto também verificou a necessidade de englobar este estudo para processos em batelada, como uma grande oportunidade para o desenvolvimento desta vertente.

3 - O PROCEDIMENTO DIAGRAMA DE FONTES DE ÁGUA

O Diagrama de Fontes de Água (DFA) (GOMES, 2002; GOMES et al., 2007) é um procedimento algorítmico-heurístico baseado em equações de balanço material e em regras heurísticas que procuram estabelecer conexões ótimas entre fontes e sumidouros de água, dentro do processo industrial, a fim de determinar a melhor combinação possível entre as correntes de efluentes aquosos de diversos processos, com o objetivo de minimizar os custos a elas vinculados.

As regras heurísticas adotadas são as seguintes:

- i) as fontes externas de água são utilizadas somente na indisponibilidade de fontes internas;
- ii) é necessário que a maior quantidade de massa seja transferida dentro do mesmo intervalo de concentração;
- iii) quando uma operação é dividida em vários intervalos, a prioridade de alocação provém da corrente da mesma operação, o que evita a divisão de operações; e
- iv) quando há mais de uma fonte de água disponível, a escolha deve ser pela que contiver a mais alta concentração.

A metodologia gera fluxogramas de processos em diferentes situações de reúso e regeneração, incluindo reciclo de correntes aquosas. Possui ainda a vantagem da geração simultânea de fluxogramas alternativos para o processo. Não define uma solução “ótima” para um determinado problema, diferente de como ocorre com os métodos de otimização matemática, mas aponta para soluções de menor consumo de água (PEREIRA, 2007).

3.1 – Aplicação do Método Algorítmico

Para ilustrar o procedimento do Diagrama de Fontes de Água será utilizado como base o trabalho publicado por Wang e Smith (1994) para máximo reúso. A Tabela 3.1 apresenta os dados principais do processo: vazão (f_k), concentrações máximas de entrada e de saída do contaminante ($C_{ik,max}$, e $C_{fk,max}$) nas operações e a carga mássica do contaminante na operação k (Δm_k). Esses são os dados limites para as correntes de água do processo. A resolução minuciosa deste problema, com a aplicação do DFA, pode ser encontrada no trabalho de Gomes (2002).

Tabela 3.1 - Dados do exemplo de Wang e Smith (1994)

Operação (k)	f _k (t/h)	C _{ik,max} (ppm)	C _{fk,max} (ppm)	Δm _k (kg/h)
1	20	0	100	2
2	100	50	100	5
3	40	50	800	30
4	10	400	800	4

Onde: f_k é a vazão limite na operação k;
 C_{ik,max} é a concentração máxima de entrada na operação k;
 C_{fk,max} é a concentração máxima de saída na operação k; e
 Δm_k é a carga de contaminante na operação k.

Para resolução do exemplo foram consideradas as seguintes hipóteses:

- (i) Redução da carga de um contaminante nas correntes de processo por agente extrator que será sempre a água.
- (ii) Cada corrente de processo tem uma vazão G_k e deve ser levada de uma concentração inicial (C_{PROC,IK}) até uma composição desejada final (C_{PROC,FK}) da espécie contaminante.
- (iii) Cada corrente do agente extrator tem uma vazão (f_k), com concentração inicial (C_{ik}) e concentração final (C_{fk}) do contaminante.
- (iv) A taxa de massa de contaminante a ser transferida entre as correntes (Δm_k) pode ser determinada através do balanço de massa, conforme Equação 3.1, em relação ao contaminante.

$$\Delta m_k = G_k \cdot (C_{PROC,IK} - C_{PROC,FK}) = f_k \cdot (C_{fk} - C_{ik})$$

Equação 3.1

- (v) Deve-se maximizar a composição de saída da corrente de água (C_{fk}), de modo a necessitar de sua menor vazão.
- (vi) Quando há mais de uma operação, o uso de água primária em todas as operações não garante o seu mínimo consumo global; pode ser utilizada parte do efluente de uma operação

como fonte em outra operação. A possibilidade de reúso é determinada pela máxima concentração de entrada da corrente de água ($C_{ikm\acute{a}x}$) nas diversas operações.

(vii) Para reúso máximo, o consumo de água primária ($C_{ik} = 0$) será mínimo.

(viii) Através do balanço de massa, a água a ser tratada corresponde à água primária a ser utilizada.

(ix) Para minimizar a vazão de água global, deve haver uma análise envolvendo todas as operações que utilizam água. As concentrações de entrada e de saída das correntes aquosas em cada operação definem um intervalo de concentração.

(x) O número de intervalos de concentração (N_{int}) pode ser relacionado ao número de operações (N_{op}) pela Equação 3.2. A igualdade desta equação somente ocorrerá quando não houver coincidência entre quaisquer das concentrações das operações.

$$N_{int} \leq (2 \cdot N_{op}) - 1$$

Equação 3.2

Após as devidas considerações, o método é aplicado através de quatro passos sequenciais descritos a seguir.

Primeiro Passo

Dividem-se os intervalos de concentração, tendo início na fonte de água primária, definido como fonte externa. As demais fontes de água com concentrações iguais às de entrada e de saída das operações são definidas como fontes internas. As fontes são colocadas em ordem crescente de concentração e, conseqüentemente, os intervalos são definidos, de acordo com a Figura 3.1.

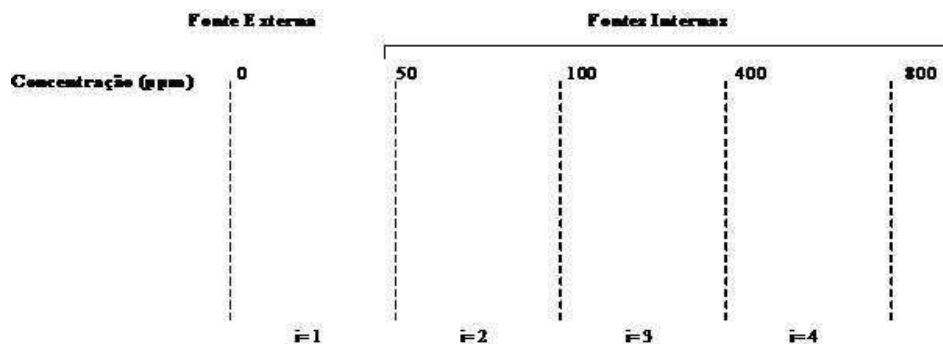


Figura 3.1 – Arranjo dos intervalos de concentração no DFA

Segundo Passo

Todas as operações onde há transferência de massa são representadas por setas. A origem sempre estará posicionada na respectiva concentração máxima de entrada; e a ponta da seta, sempre na correspondente concentração máxima de saída.

As vazões limites das operações f_k são posicionadas no lado esquerdo do diagrama e as operações são colocadas, de cima para baixo, em função da ordem crescente das concentrações de entrada, segundo a Figura 3.2.

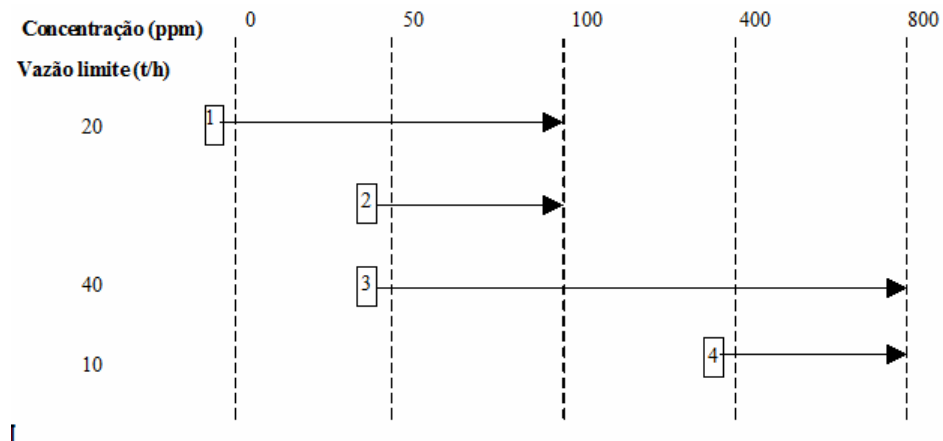


Figura 3.2 – Representação das concentrações e vazões no DFA

Terceiro Passo

Para calcular a quantidade de massa transferida em cada operação k e em cada intervalo i (Δm_{ki}) usa-se a Equação 3.3. Nesta equação C_{fi} é a concentração final do intervalo i , C_{ii} é a concentração inicial do intervalo i , f_k é a vazão mássica limite da corrente k , $k=1, \dots, N_{op}$ e $i=1, \dots, N_{int}$.

$$\Delta m_{ki} = f_k \cdot (C_{fi} - C_{ii})$$

Equação

3.3

Para o problema de WANG e SMITH (1994), os resultados obtidos podem ser observados entre parênteses sobre as setas na Figura 3.3, sendo expressos em kg/h.

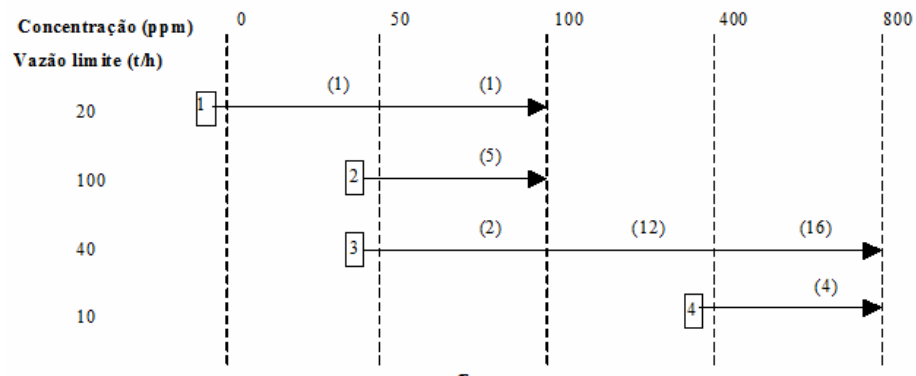


Figura 3.3 – Representação das operações e quantidade de massa transferida no DFA

Quarto Passo

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

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

Condição 2: A fonte de água utilizada em um certo intervalo de concentração deve absorver a quantidade de massa a ser transferida no respectivo intervalo. Portanto, não haverá violação das concentrações máximas de entrada e de saída.

O próximo passo é identificar todas as fontes internas e externas de água disponíveis nos intervalos. As fontes externas de água são dadas no problema e deve ser verificado em termos de concentração de cada intervalo. O número de possíveis fontes internas de água em cada intervalo é dado pelo número de operações presentes nos intervalos anteriores. Por exemplo, no primeiro intervalo de concentração existe somente uma fonte externa de água e nenhuma fonte interna encontra-se disponível.

A vazão de água requerida da fonte de água pela operação k , no intervalo de concentração i , pode ser determinada pelas Equações 3.4 e 3.5.

Fontes externas:

$$f_{pki}^e = \frac{\Delta m_{ki} - \sum_{j=1}^{N_{fiv,i}} (f_{jki}^i \cdot [C_{fi} - C_{ij}])}{C_{fi} - C_p^e}$$

Equação 3.4

Fontes internas:

$$f_{pki}^i = \frac{\Delta m_{ki} - \sum_{j=p-1}^p (f_{jki}^i \cdot [C_{fi} - C_{ij}])}{C_{fi} - C_p^i} \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde: C_{ij} : a concentração na qual a fonte interna j é usada no intervalo j;

C_p^e : a concentração da fonte externa p;

C_{fi} a concentração final do intervalo i;

$N_{fin,i}$: é o número de fontes internas disponíveis no intervalo i.

Pela ordem de cálculo, se houver utilização de fonte interna no intervalo, os valores dos respectivos f_{jki}^i são calculados antes do f_{pki}^i . O somatório na Equação 3.5 representa a quantidade de contaminante retirada pelas fontes internas, na operação k no intervalo i, que tem preferência sobre as fontes externas.

Determinação das Vazões das Fontes Externas e Internas

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

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

No terceiro intervalo de concentração estão disponíveis 20 t/h (100ppm) da operação 1, 50 t/h (100ppm) da operação 2, 20 t/h (100ppm) da operação 3 e água primária. Há somente a operação 3 no intervalo 3, que, de acordo com a Equação 3.5, necessita de $f_{333}^i=40$ t/h (100ppm), as quais não podem ser completamente fornecidas pela fonte interna originada da

operação 3 no intervalo 2. A vazão adicional necessária é igual a 20 t/h (100ppm). Esta vazão pode ser fornecida pelas fontes internas disponíveis nas operações 1 e 2, do intervalo 2. A escolha entre as duas opções, operação 1 ou operação 2, originará diferentes redes com diferentes custos. A seta linha traço-ponto na Figura 3.4 representa a vazão adicional requerida pela operação 3. Nesta solução é utilizada a saída da operação 1 para suprir a vazão exigida (observe os dois círculos indicados na Figura 3.4).

No quarto intervalo estão disponíveis uma fonte externa de água primária e duas fontes internas: 50 t/h (100ppm) disponíveis na operação 2 e 40 t/h (400ppm) na operação 3. Existem as operações 3 e 4 neste intervalo. Para a operação 3, $f_{334}^i=40$ t/h (400ppm), valor que pode ser completamente suprido com a vazão vinda da mesma operação no intervalo 3. Agora, tem-se 50 t/h (100ppm) disponíveis na operação 2 e água primária para a operação 4. Utiliza-se a fonte interna com maior nível de concentração, porém neste ponto as fontes com 400ppm estão esgotadas. Passa-se então para a fonte interna da operação 2, (observe os dois triângulos indicados na Figura 3.4). Agora, de acordo com a Equação 3.5, $f_{244}^i=5,7$ t/h (100ppm).

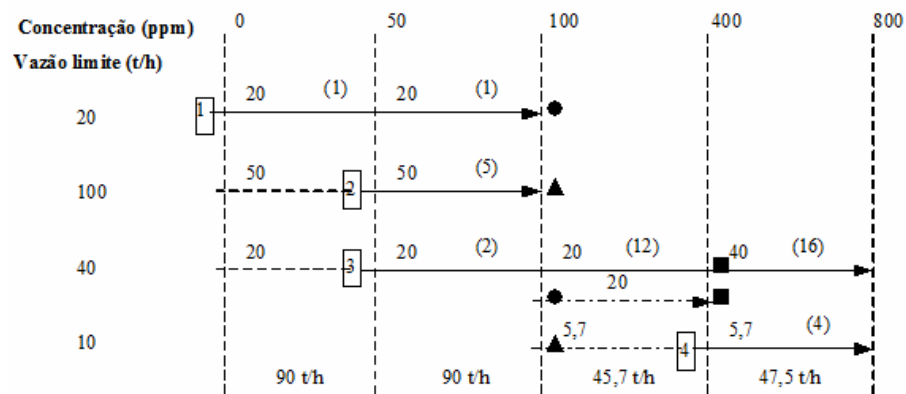


Figura 3.4: Representação do DFA, com indicações de reúso (GOMES, 2002).

As misturas das correntes de água podem criar uma corrente capaz de remover a mesma massa de contaminante, com uma concentração menor ou igual que a máxima concentração de entrada da operação (WANG e SMITH, 1994; CASTRO et al., 1999). Logo, uma corrente da fonte interna de água pode ser aproveitada através de sua mistura com a externa ou outra fonte interna de água com concentrações menores. Efetuar, então, o balanço de massa.

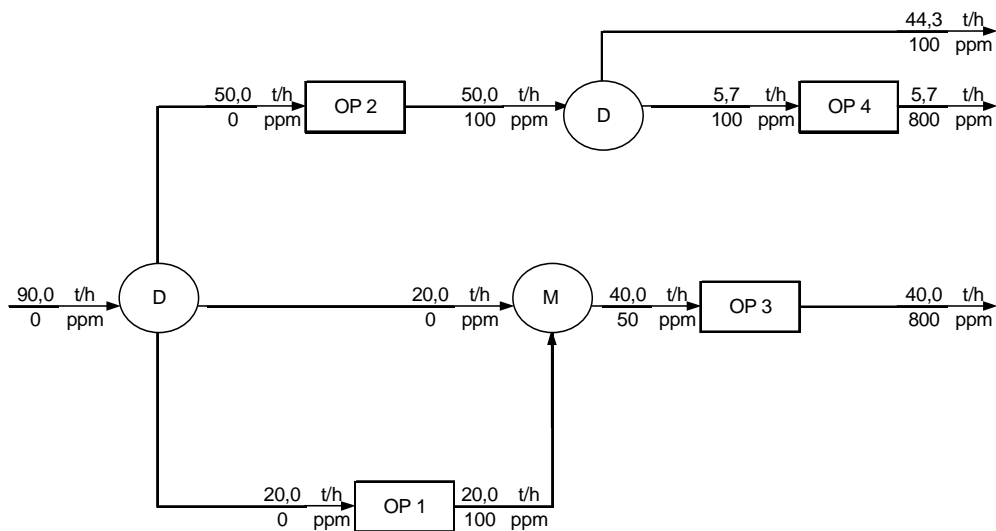
A vazão mínima de água da fonte externa, p , é obtida pela Equação 3.6:

$$f_p^e = \sum_{k=1}^{N_{op}} \sum_{i=1}^{N_i} f_{pki}^e$$

Equação 3.6

Através da Figura 3.4 pode-se notar que no exemplo em questão a mínima vazão de água primária (0ppm) pode ser obtida pela soma das vazões do intervalo 1, em concordância com a Equação 3.6. Já o ponto de pinch, localizado na concentração de 100 ppm, pode ser percebido quando o somatório das vazões em cada intervalo muda de 90 t/h, que é a vazão do pinch, para 45,7t/h. A Figura 3.5 apresenta a rede de transferência de massa.

Figura 3.5: RTM correspondente ao DFA da Figura 3.4. (GOMES, 2002)



3.2 - DFA para Múltiplos Contaminantes

Na seção anterior foi apresentado um procedimento para minimização de efluentes aquosos em sistemas com um contaminante. Porém, a maioria dos efluentes oriundos de processos industriais possui mais de um contaminante. O procedimento utilizado é semelhante ao de um contaminante, sendo uma extensão do mesmo. Será apresentado o exemplo problema de Wang e Smith (1994), cujos dados limites para as correntes de água de processo encontram-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Dados de Wang e Smith (1994) - Múltiplos contaminantes

Operação k	fk (t/h)	Contaminante	Cik, max	Cfk, max	Δmk (g/h)
1	45	A	0	15	675
		B	0	400	18.000
		C	0	35	1.575
2	34	A	20	120	3.400
		B	300	12.500	414.800
		C	45	180	4.590
3	56	A	120	220	5.600
		B	20	45	1.400
		C	200	9.500	520.800

Para múltiplos contaminantes, deve-se considerar que há uma transferência simultânea de contaminantes na corrente de água. Um contaminante é transferido na mesma proporção que o outro, segundo Equação 3.7.

$$\frac{\Delta C_{jk}}{\Delta C_{ik}} = cte$$

Equação 3.7

Onde: i e j representam os contaminantes; e k, a operação.

As possíveis relações de transferência estão apontadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Relações de Transferência de Massa

Relação de Transferência de Massa	
$\Delta C_{A1}/\Delta C_{B1}$	0,0375
$\Delta C_{A1}/\Delta C_{C1}$	0,4286
$\Delta C_{B1}/\Delta C_{C1}$	11,4286
$\Delta C_{A2}/\Delta C_{B2}$	0,0082
$\Delta C_{A2}/\Delta C_{C2}$	0,7407
$\Delta C_{B2}/\Delta C_{C2}$	90,3704
$\Delta C_{A3}/\Delta C_{B3}$	4,0000
$\Delta C_{A3}/\Delta C_{C3}$	0,0108
$\Delta C_{B3}/\Delta C_{C3}$	0,0027

Seleção do contaminante de referência

O contaminante a ser escolhido como o de referência, é aquele que possui a menor concentração de saída da operação de referência, uma vez que servirá de fonte para o reúso nas demais operações; Entretanto, para cada situação, esta regra deve ser revista. Após a escolha da referência, os cálculos devem ser baseados no mesmo. Neste exemplo foi escolhido o contaminante A. A Operação 1 foi definida como referência, pois o reúso é calculado a partir desta operação para as demais. Na Tabela 3.4, estão as concentrações dos contaminantes nas operações usando A como referência.

Tabela 3.4 -Concentração dos contaminantes A, B e C nas operações

Referência = contaminante A

Contaminantes	Concentrações (ppm)				
A	0	15	20	120	220
B (OP.1):	0	400			
B (OP.2):			300	12500	
B (OP.3):				20	45
C (OP.1):	0	35			
C (OP.2):			45	180	
C (OP.3):				200	9500

O Deslocamento

A saída de uma operação deve ter no máximo a concentração de entrada da candidata ao reúso, para não “sujá-la” com a adição de uma concentração maior. (Mirre, 2007). Para atender a esta restrição, é necessário corrigir as concentrações. Esta ação é denominada deslocamento, onde há alteração nos limites de concentração do contaminante de referência. Para ilustrar as concentrações que não atendem ao deslocamento na Tabela 3.5 as mesmas estão representadas com o símbolo de x.

Tabela 3.5 – Rearranjo das concentrações tendo A como referência

Contaminantes	Concentrações (ppm)				
	0	15	20	120	220
A	0	15	20	120	220
B (OP.1):	0	400	⊗	⊗	
C (OP.1):	0	35	↓	↓	
B (OP.2):			300	12500	
C (OP.2):			45	180	
B (OP.3):				20	45
C (OP.3):				200	9500

Pela relação de transferência $((1/0,0375)*(20-0)) = 526$ ppm. Sendo assim não se pode reusar o efluente considerando B de 1 para 2, pois a concentração de B em 1 é maior que na entrada da operação 2 que é 300 ppm. Então se deve deslocar o valor de 300 ppm em 2 até o ponto em que coincida com o valor de 300 ppm na operação 1. O valor correspondente para A, quando B for igual a 300 $((1/0,0375)=(300-0)/(x-0))$, $x=11,25$ ppm.

Assim como o valor de 300 ppm foi deslocado simultaneamente o valor de B na saída da operação que é 12500 ppm também deve ser deslocado. Usaremos a relação de transferência da operação 2 em função de A $((1/0,0082)=(12500-300)/(x-11,25))$, $x=111,25$ ppm. Agora se tem os valores limites de concentração de A deslocados, permitindo a prática do reúso entre as correntes. A mesma lógica é seguida para o contaminante B na operação 3 e também para o contaminante C nas operações. Na Tabela 3.6 estão os valores de concentrações corrigidos e na Tabela 3.7 os dados limites após o deslocamento.

Tabela 3.6 – Concentrações ajustadas pelo deslocamento

Contaminantes	Concentrações (ppm)					
	0	0,75	11,25	15	100,75	111,25
A	0	0,75	11,25	15	100,75	111,25
B1	0	[20]	[300]	400		
C1	0	[1,25]	[26,25]	35		
B2			300	[758]	[11.219]	12.500
C2			45	[50]	[166]	180
B3		20	[20]	[21]	45	
C3		200	[200]	[549]	9.500	

Tabela 3.7 – Dados limites do problema após o deslocamento.

Operação	fk	Contaminante	Cik, max	Cfk, max	Δm_k
1	45	A	0	15	675
		B	0	400	18.000
		C	0	35	1.575
2	34	A	11,25	111,25	3.400
		B	300	12.500	414.800
		C	45	180	4.590
3	56	A	0,75	100,75	5.600
		B	20	45	1.400
		C	200	9.500	520.800

O deslocamento não interfere na quantidade de contaminante transferido (Δm). O procedimento para múltiplos contaminantes é o mesmo utilizado em um contaminante, segue a estrutura do DFA. O DFA está ilustrado na Figura 3.6 e a rede de transferência de massa na Figura 3.7.

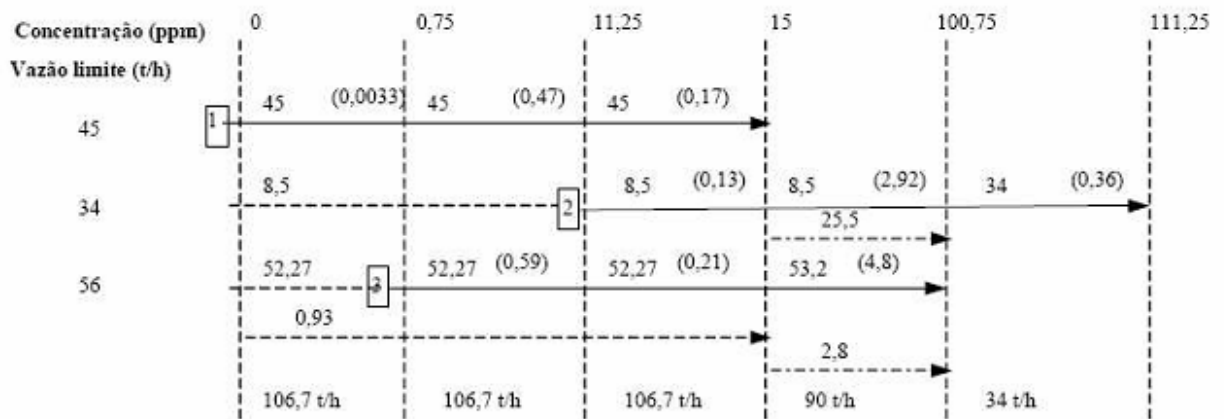


Figura 3.6 – DFA com contaminante A como referência.

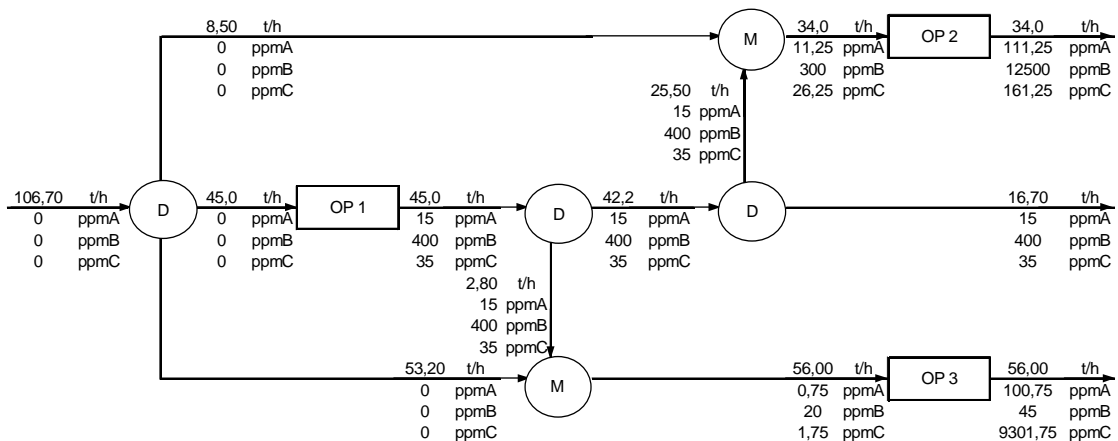


Figura 3.7 – RTM para o máximo reúso– contaminante A como referência

Com o DFA montado pode-se verificar se as restrições de concentração e taxa de transferência de massa são satisfeitas para todas as correntes. Em caso contrário devem ser recalculadas as vazões necessárias para não violar as concentrações máximas, a partir dos Δm estabelecidos. Existem duas regras evolutivas para redes que violam a concentração máxima (Mirre, 2007):

Regra 1: Reduzir a vazão da corrente de maior concentração dos contaminantes que é reusada na operação cuja concentração máxima de entrada foi violada.

Regra 2: Deslocar a vazão da corrente de entrada que está em concentração menor de contaminantes que a “concentração máxima” de entrada para a operação onde é reusada,

reduzindo sua vazão em outra operação que ainda não atingiu a concentração máxima de entrada.

3.3 - DFA para Processos em Batelada

Mirre (2006) apresentou e aplicou uma proposta de procedimento do DFA para processos em batelada a partir de dados do estudo de caso tratado por Foo et al. (2005), conforme mostrado na Tabela 3.8. O procedimento é semelhante ao apresentado por Immich et al. (2007).

Tabela 3.8 – Dados do exemplo para processo batelada de Foo et al. (2005)

Demanda Dj	Vazão limite FDj (t/h)	Concentração Cj (ppm)	Tempo inicial ts (h)	Tempo final tt (h)	Carga mássica limite, MDj (t)
D1	20	0	0	1,0	20
D2	100	50	1,0	3,5	250
D3	40	50	3,0	5,0	80
D4	10	400	1,0	3,0	20
Fonte Si	Vazão limite FSi (t/h)	Concentração Ci (ppm)	Tempo inicial ts (h)	Tempo final tt (h)	Carga mássica limite, MSi (t)
S1	20	100	0	1,0	20
S2	100	100	1,0	3,5	250
S3	40	800	3,0	5,0	80
S4	10	800	1,0	3,0	20

O problema pode ser dividido em intervalos de tempo de batelada. Para adaptação ao DFA deve-se tratar como uma operação e incorporar sua respectiva fonte e demanda, resultando assim em novos dados representados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Reconfiguração dos dados do processo

Operação	Vazão limite	Concentração	Tempo inicial	Tempo final	Carga mássica
D1/S1 (OP1)	20	0	0	1,0	20
D2/S2 (OP2)	100	50	1,0	3,5	250
D3/S3 (OP3)	40	50	3,0	5,0	80
D4/S4 (OP4)	10	400	1,0	3,0	20

Cada intervalo de tempo representa as operações, em estados terminais ou intermediários. A Figura 3.8 esquematiza a estrutura seccionada do intervalo de tempo de batelada para cada operação envolvida.

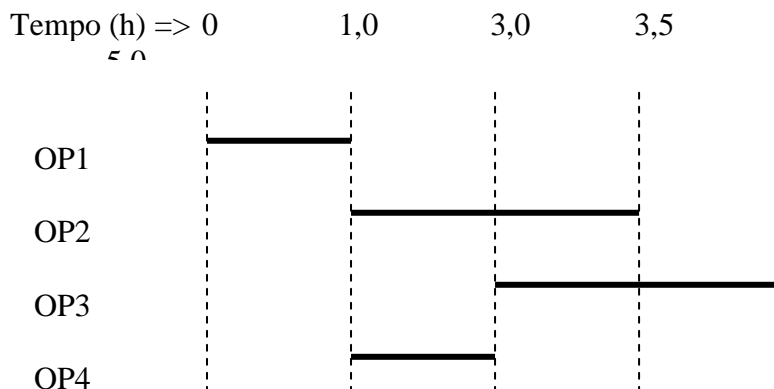


Figura 3.8 – Representação das operações em cada intervalo de tempo da batelada

Para o sistema de batelada, o reúso de correntes aquosas deve ser feito de forma sequencial ao intervalo de tempo. Ou seja, o reúso só é permitido ao término das operações inseridas nos intervalos de tempo subsequentes, indicados pelas respectivas setas, conforme ilustrado pela Figura 3.9. Após definição dos intervalos, o DFA é aplicado para um deles.

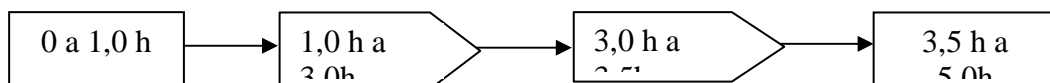


Figura 3.9 – Esquema do reúso sequencial entre os intervalos de tempo de batelada

Aplicação do DFA para os intervalos de tempo definidos

Primeiro intervalo de tempo: 0 a 1,0 h

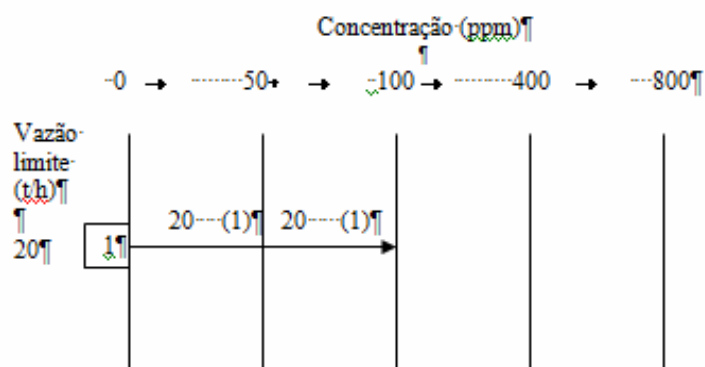


Figura 3.10 – DFA para primeiro intervalo da batelada

No primeiro intervalo de tempo de batelada, a operação 1 já é finalizada, com a quantidade de 20 t disponíveis para reúso em um período posterior.

Segundo intervalo de tempo: 1,0h a 3,0 h

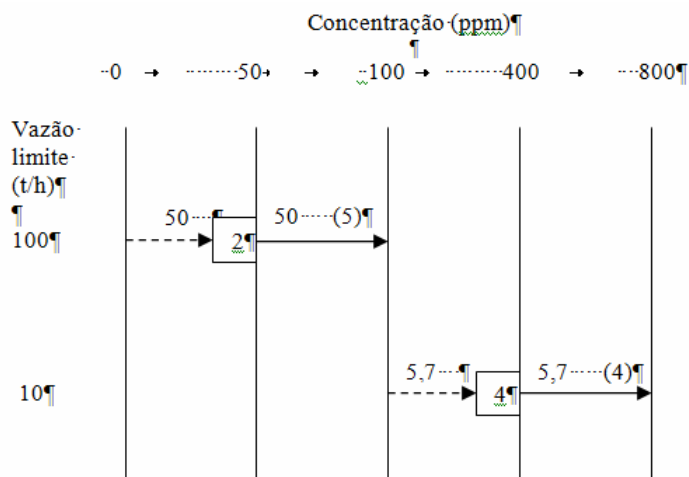


Figura 3.11 – DFA para segundo intervalo da batelada

No segundo intervalo, a quantidade de água necessária para suprir a necessidade da operação 2 pode ser proveniente da operação 1 que, no período considerado, já está finalizada e disponível para os objetivos de reúso. Deve-se calcular, por meio de um balanço no ponto de mistura, a quantidade necessária de água para minimizar a contribuição da água limpa (0 ppm). O problema consiste em encontrar a vazão, ou melhor, a quantidade que ajuste o mínimo uso da água limpa, maximizando o reúso da corrente efluente da operação 1 pela

combinação das correntes a montante do misturador. O procedimento deste cálculo é ilustrado conforme Figura 3.12.

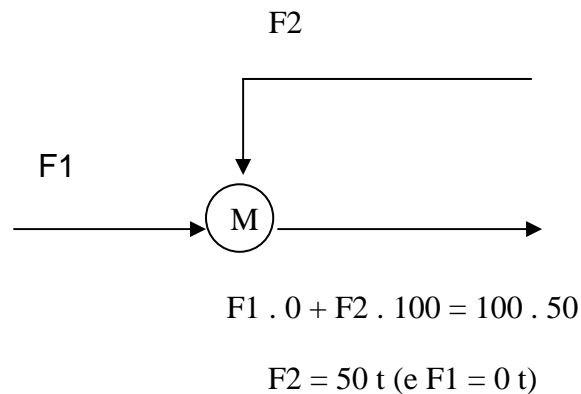


Figura 3.12 – Cálculo para minimização da água limpa

A quantidade calculada proveniente da operação 1 para o reúso é de 50 t (de modo que minimize o emprego da água limpa) e, somente tem-se disponíveis 20 t; procura-se aproveitar essa máxima quantidade disponível para recalculer, a partir de 20 t de F2, a contribuição de F1 (água limpa). Ou seja, quando há máxima contribuição do reúso da operação 1, o valor encontrado para F1 é de 20 t, totalizando F3 equivalente a 40 t.

Da mesma forma, o reúso da corrente da operação 2 pode ser prontamente destinado à operação 4, onde são necessários 5,7 t para assimilar a carga desta operação dentro do intervalo de 100 ppm (de onde se busca o efluente para o reúso) a 800 ppm.

Terceiro intervalo de tempo: 3,0h a 3,5h

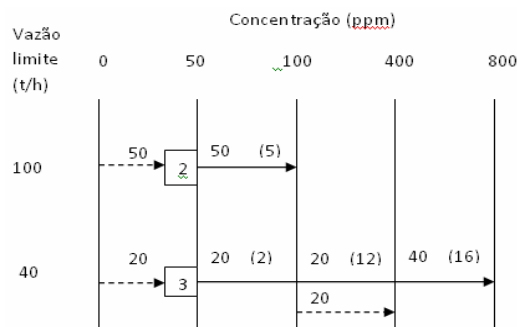


Figura 3.13 - DFA para terceiro intervalo da batelada

No terceiro intervalo, a parcela remanescente da operação 2 que não foi reutilizada na operação 4, será enviada como complemento de 20 t na operação 3, no intervalo entre 100 e 400.

Quarto intervalo de tempo: 3,5h a 5,0h

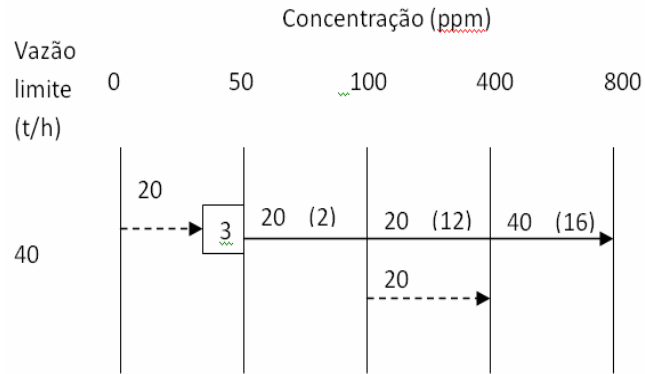


Figura 3.14 - DFA para quarto intervalo da batelada

No quarto intervalo, está presente apenas a operação 3 e a quantidade necessária para a assimilação do contaminante já está completamente preenchida.

Após a realização do DFA em cada intervalo de tempo de batelada, procede-se à união destes sub-DFA's gerados em um único diagrama, permitindo visualizar e auxiliar a montagem da configuração alternativa gerada, conforme mostra a Figura 3.15. O reúso da operação 2 nas operações 3 e 4 é simbolizado através de um triângulo e um círculo, respectivamente, indicando a ordem na qual se estabeleceu a seqüência do reúso. O *pinch* deste problema encontra-se localizado na concentração de 100 ppm.

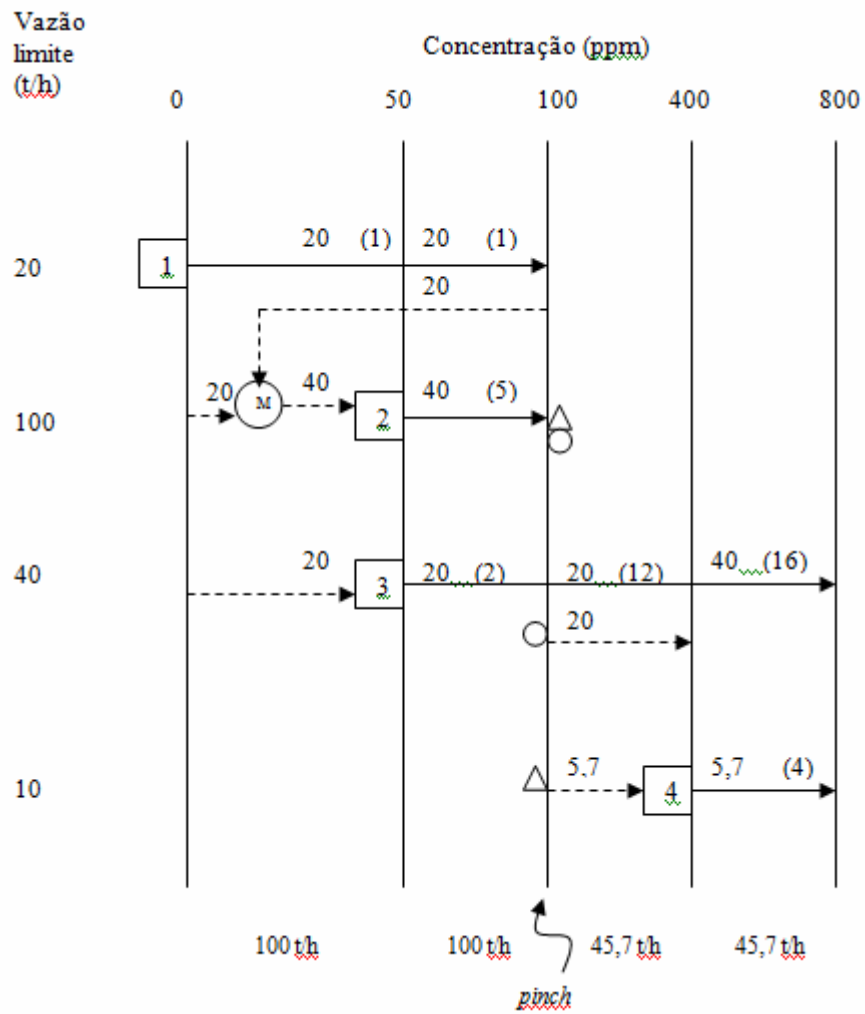


Figura 3.15 – Esquema final do DFA para batelada

A partir da estrutura unificada do DFA, torna-se possível construir um fluxograma representativo do processo hídrico, incluindo a configuração alternativa de reúso sugerida pela metodologia, conforme apresentado na Figura 3.16.

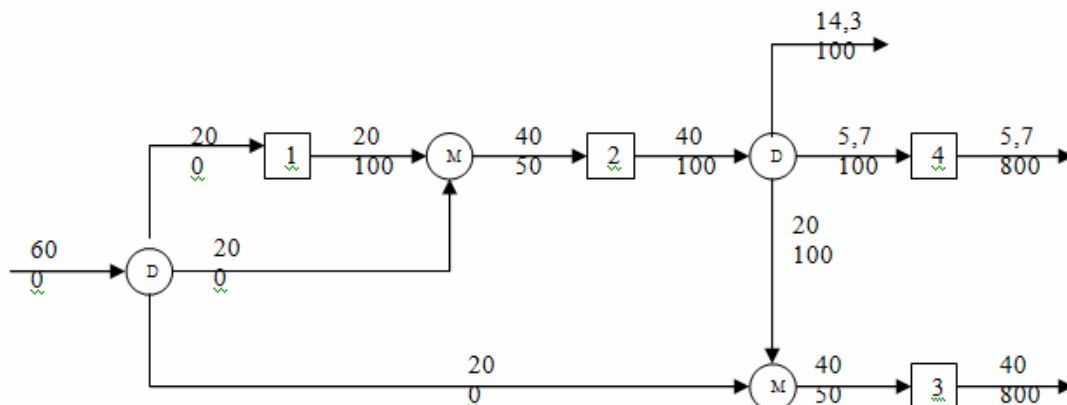


Figura 3.16 – Fluxograma do processo hídrico

A quantidade de água limpa utilizada no problema após a aplicação do DFA é de 60 t, enquanto que a técnica empregada no trabalho original utiliza uma quantidade de 211,25 t de água limpa, o que equivale a uma redução superior a 71%.

Vale observar, entretanto, que o cenário estudado não inclui a existência de um tanque de estocagem, o que facilitaria a distribuição em qualquer intervalo subsequente para as operações dentro de um limite de armazenamento, além de não considerar a restrição de vazão fixa nas operações, permitindo obter valores de quantidade disponibilizada menores.

Um outro cenário pode ser analisado, em que se faz necessária a inclusão de um tanque de estocagem para a redestinação das correntes de efluentes para as operações receptoras de reúso, desconsiderando a restrição de vazão fixa nas respectivas operações. O procedimento adotado para este exemplo é bastante semelhante ao anterior, conforme apresentado a seguir, onde, para cada intervalo de tempo, também é aplicado o DFA.

Primeiro intervalo de tempo: 0 a 1,0 h

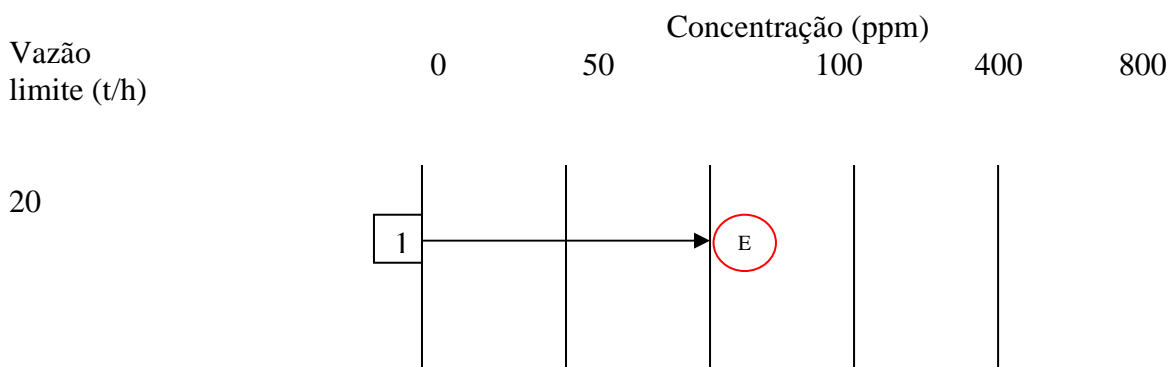


Figura 3.17 - DFA para primeiro intervalo da batelada

No primeiro intervalo, a operação 1 já está finalizada, com a quantidade de 20 t disponível para reúso em um período posterior. Esta quantidade pode ser então armazenada em um tanque de estocagem (simbolizado pelo círculo preenchido pela letra E), com uma capacidade predeterminada (não tratado neste caso) para redestinação a outras operações.

Segundo intervalo de tempo: 1,0h a 3,0 h

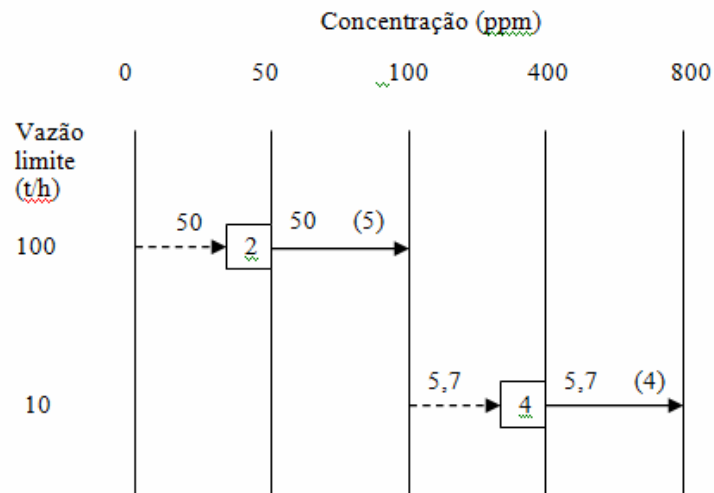


Figura 3.18 - DFA para segundo intervalo da batelada

Neste segundo intervalo, a quantidade de água necessária para suprir a necessidade da operação 2 pode ser proveniente da operação 1 que, no período considerado, já está finalizada e disponível para os objetivos de reúso. Trata-se do mesmo problema da situação anterior, em que se deve calcular, por meio de um balanço no ponto de mistura, a quantidade necessária de água para minimizar a contribuição da água limpa (0 ppm). Como se trata do mesmo problema, a quantidade encontrada foi de 20 t de contribuição de água limpa e de 20 t de água reutilizada do tanque de estocagem.

O reúso da corrente da operação 2 pode ser reutilizada na operação 4, onde são necessários 5,7 t para assimilar a carga desta operação dentro do intervalo de 100 (de onde se busca o efluente para o reúso) a 800 ppm.

Terceiro intervalo de tempo: 3,0h a 3,5 h

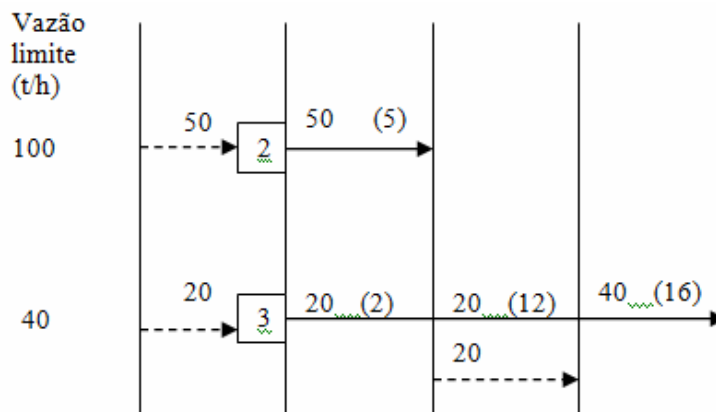


Figura 3.19 - DFA para terceiro intervalo da batelada

Neste intervalo, a parcela remanescente da operação 2 que não foi reutilizada na operação 4, é agora destinada como complemento de 20 t na operação 3, no intervalo entre 100 e 400 ppm.

Quarto intervalo de tempo: 3,5h a 5,0 h

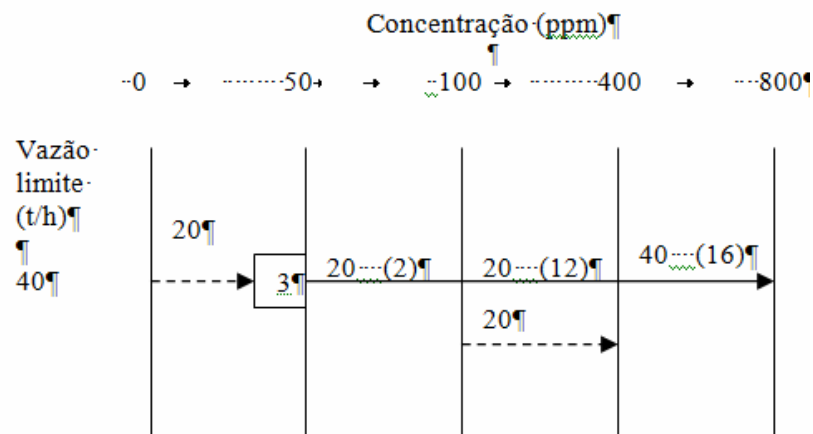


Figura 3.20 - DFA para quarto intervalo da batelada

Neste último intervalo, está presente apenas a operação 3 e a quantidade necessária para a assimilação do contaminante já se encontra completamente preenchida.

Como no primeiro cenário, procede-se à união dos sub-DFA's, de acordo com o diagrama da Figura 3.20. O reúso da operação 2 nas operações 3 e 4 é simbolizado através de um triângulo e um círculo, respectivamente, indicando a ordem na qual se estabeleceu a seqüência do reúso. O círculo envolvendo estes reúsos no término da operação 2 indica a existência de um tanque de estocagem; entretanto, o fato de se utilizar água limpa para diluir a concentração de entrada na operação 1 a 50 ppm dificulta a localização de um único tanque para receber as correntes de ambos, o que poderia ser aventado caso todas estivessem na mesma concentração de entrada do tanque (100 ppm), sem influenciar na qualidade do reúso.

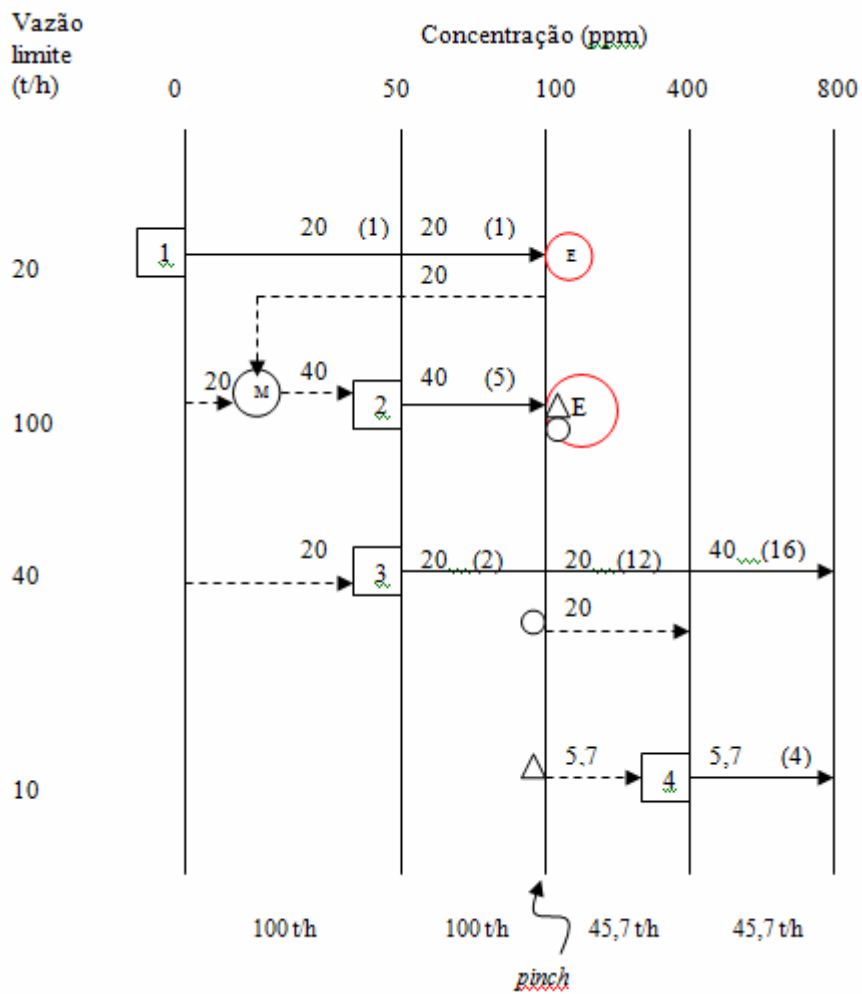


Figura 3.20 – Esquema final do DFA para o novo cenário

A partir da estrutura unificada do DFA, torna-se possível construir um fluxograma representativo do processo hídrico, incluindo a configuração alternativa de reúso sugerida pela metodologia, conforme apresentado na Figura 14.

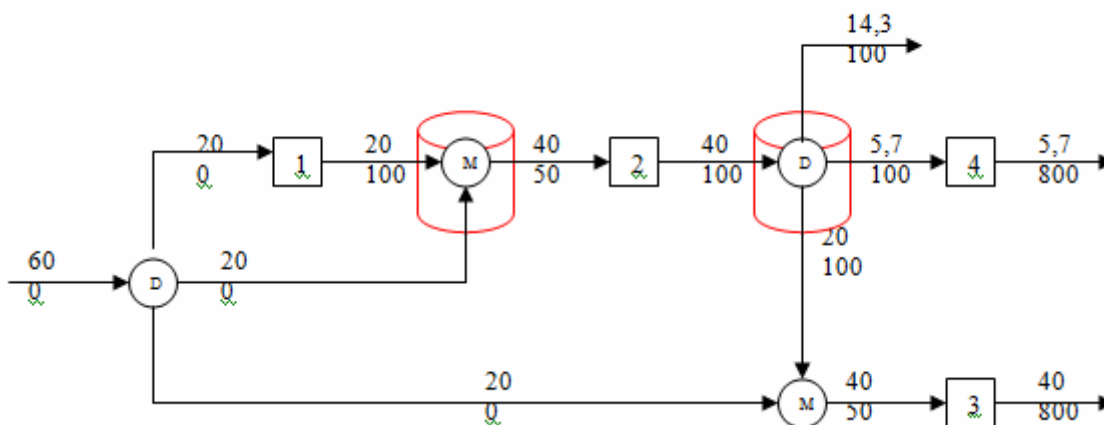


Figura 3.21 – Fluxograma do processo considerando a presença de tanque de estocagem

Este exemplo ilustrou a necessidade de se estocar apenas a quantidade de água necessária para o reúso. Esta quantidade armazenada no tanque servirá como fonte para as operações dos intervalos de tempo seguintes, seguindo a lógica estabelecida para o primeiro cenário. Com o tanque de estocagem, a operação 1 pode enviar o efluente tanto para a operação 2 como para as operações 3 e 4. Diante de tal situação, optou-se por destiná-la integralmente para a operação 2, combinando com a parcela de água limpa, permitindo a comparação com os resultados do primeiro cenário.

3.4 - O Programa Computacional MINEA

O MINEA (Minimização de Efluentes Aquosos) é um programa de síntese de redes de transferência de massa baseado na técnica do Diagrama de Fontes de Água. Este programa utiliza regras heurísticas para a síntese de uma rede que alcance um consumo de mínimo de água. O MINEA foi desenvolvido em plataforma Excel, o qual nos permite um uso amplo e fácil do programa. O mesmo possui linguagem de programação simples e clara.

O MINEA incorpora em sua estrutura facilidades tais como a possibilidade de como indicar proibições de reúsos, indicação de perda e/ou ganho de vazão e indicação de vazão fixa em operações distintas. Maiores detalhes do programa MINEA podem ser obtidos no trabalho de Santos (2006).

Na Figura 3.22 encontra-se a interface principal do programa MINEA. A Figura 3.23 mostra o DFA gerado a partir da tela de interface principal após o *input* de dados.

operação	F(t/h)	Dados				Vazão disponível	perda/ganho	Nome	Pode ter uma vazão menor?
		Ce (ppm)	Cs (ppm)	Δm (kg/h)					
OP1	30,00	0,00	60,00	1800,00	30,000				
OP2	40,00	15,00	105,00	3600,00	40,000				
OP3	20,00	30,00	130,00	2000,00	20,000				
OP4	15,00	48,00	208,00	2400,00	15,000				
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									

Gerar Linha Base de Concentrações

Calcular

Gerar Saída

Figura 3.22 – Interface principal do Programa MINEA

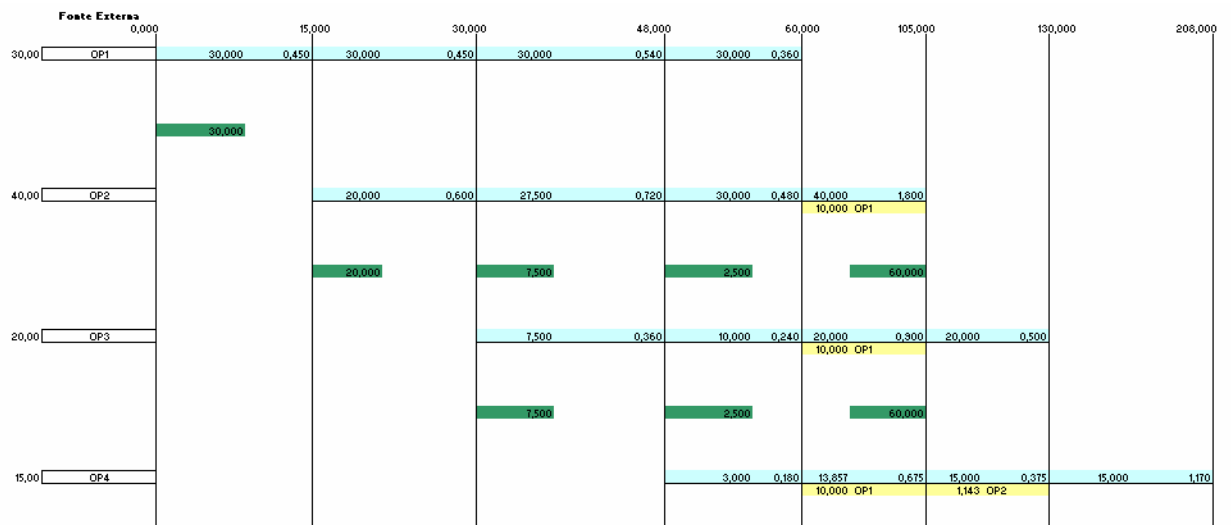


Figura 3.23 – DFA gerado a partir da interface principal do Programa MINEA

A Figura 3.24 sintetiza a identificação dos dados gerados pelo Programa MINEA. Trata-se da legenda do DFA gerada para uso do programa.

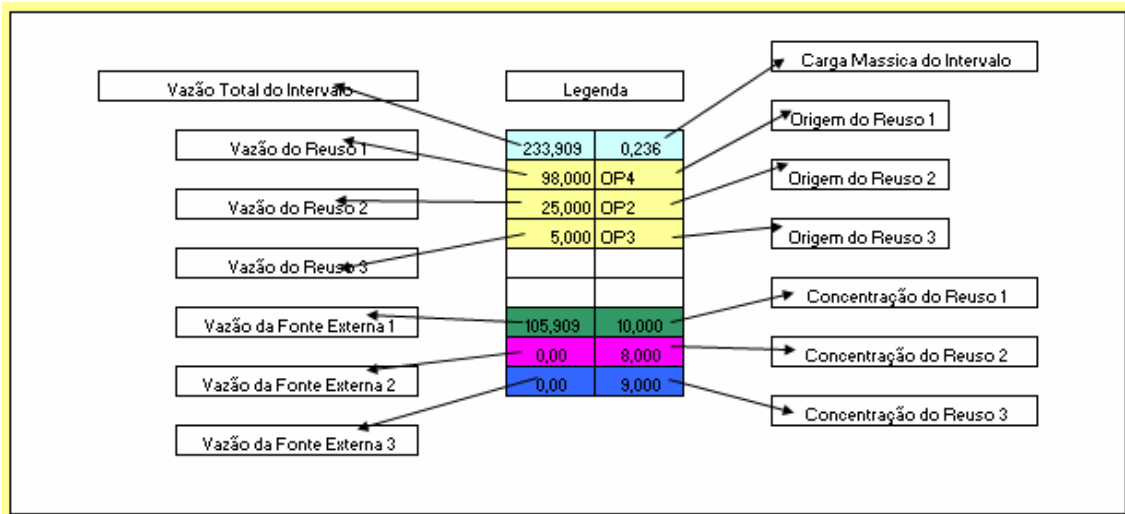


Figura 3.24 – Legenda do DFA no Programa MINEA.

Este projeto utiliza o programa MINEA para a aplicação do DFA na geração de cenários com oportunidades de reuso de efluentes industriais, relativo a processos contínuos. No entanto, para processos em batelada a ferramenta computacional não é aplicável e, neste caso, os cálculos foram realizados manualmente.

Os próximos capítulos abordam a apresentação dos estudos de casos e os resultados obtidos com a aplicação do procedimento DFA, tanto para processos contínuos envolvendo múltiplos contaminantes (capítulo 4) como para processos em batelada (capítulo 5). Uma análise preliminar dos custos relativos aos cenários obtidos é apresentada no capítulo 6, identificando as alternativas mais promissoras.

4-ESTUDO DE CASO PARA UM PROCESSO CONTÍNUO COM MÚLTIPLOS CONTAMINANTES

4.1 – Apresentação do Caso Base

Neste capítulo, o procedimento Diagrama de Fontes de Água (DFA) foi aplicado para um conjunto de dados obtidos do estudo de Chen et al. (2010), constituídos por três plantas (A, B e C), e suas respectivas unidades que utilizam água em seus processos.

Diferentes possibilidades serão avaliadas para esse conjunto de dados, com o objetivo de verificar a eficácia do procedimento DFA na minimização do consumo de água e geração de efluentes, através de integração mássica entre as correntes.

A eficácia do Diagrama de Fontes de Água será verificada comparando-se o consumo necessário de água externa (limpa) em toda a unidade quando o método é utilizado, com o consumo de água limpa obtido através de programação matemática por Chen et al. (2010), para o mesmo cenário.

Chen et al. (2005) desenvolveram um modelo de programação não linear inteira mista (MINLP) para a síntese de redes de água com integração entre plantas, baseado na otimização de superestruturas, utilizaram a linguagem GAMS (*Genera Algebraic Modeling System* – Brooke et al., 2005) para resolver o modelo de otimização empregado, tendo como objetivos a minimização do consumo de água limpa e do custo total anualizado.

As concentrações máximas de entrada e saída de cada contaminante (C_i , C_f) e a quantidade de massa trocada para cada contaminante (Δm), foram descritas conforme Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3.

Tabela 4.1 - Dados para o caso base - Planta A (Chen et al., 2010)

DADOS - PLANTA A				
Operação	Contaminante	C_i	C_f	Δm
1	c1	0	15	750
	c2	0	400	20.000
	c3	0	35	1.750
2	c1	20	120	3.400
	c2	300	12.500	414.800
	c3	45	180	4.590
3	c1	120	220	5.600
	c2	20	45	1.400
	c3	200	9.500	520.800
4	c1	0	20	160
	c2	0	60	480
	c3	0	20	160
5	c1	50	150	800
	c2	400	8.000	60.800
	c3	60	120	480

Tabela 4.2 - Dados para o caso base - Planta B (Chen et al., 2010)

DADOS - PLANTA B				
Operação	Contaminante	C_i	C_f	Δm
6	c ₁	150	900	22.500
	c ₂	700	4.500	114.000
	c ₃	800	3.000	66.000
7	c ₁	20	120	3.400
	c ₂	300	12.500	414.800
	c ₃	45	180	4.590
8	c ₁	120	220	5.600
	c ₂	20	45	1.400
	c ₃	200	9.500	520.800

Tabela 4.3 - Dados para o caso base – Planta C (Chen et al., 2010)

DADOS - PLANTA C				
Operação	Contaminante	C_i	C_f	Δm
9	c1	0	50	1.250
	c2	0	100	2.500
	c3	0	50	1.250
10	c1	0	100	7.000
	c2	0	300	21.000
	c3	0	600	42.000
11	c1	20	150	4.550
	c2	50	400	12.250
	c3	50	800	26.250
12	c1	50	600	22.000
	c2	110	450	13.600
	c3	200	700	20.000
13	c1	20	500	3.840
	c2	100	650	4.400
	c3	200	400	1.600
14	c1	500	1.100	30.000
	c2	300	3.500	160.000
	c3	600	2.500	95.000
15	c1	0	15	675
	c2	0	400	18.000
	c3	0	35	1.575

Os fluxogramas iniciais do caso base, apresentados em Chen et al. (2010), representam as operações e o fluxo de água em cada planta da unidade, conforme ilustrados pela Figura 4.1.

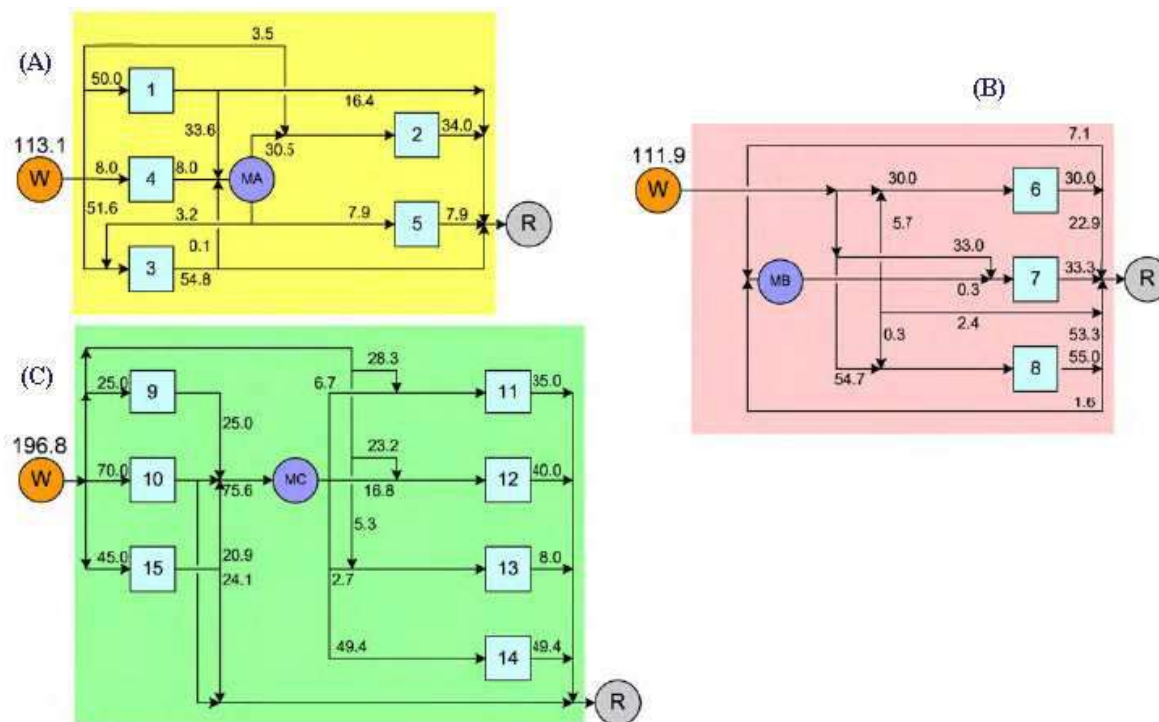


Figura 4.1 – Fluxograma Base: (A) Planta A, (B) Planta B e (C) Planta C

Pode-se observar a partir da Figura 4.1, que este cenário inicial apresenta um consumo total de água de 421,8 ton/h, sendo 113,1 ton/h para a planta A, 111,9 ton/h para a planta B e 196,8 ton/h para a planta C. Nota-se também que a vazão total de água destinada ao tratamento final é de 421,7 ton/h.

Chen et al. (2010) propuseram uma opção de minimização do consumo de água para a unidade através do reúso ,a partir da integração entre as operações das 3 plantas, com o uso de uma rede central de distribuição, responsável por fazer a conexão entre as plantas, captando e redistribuindo a água entre as plantas A, B e C, conforme as necessidades e possibilidades de reúso. Nesta configuração, nenhuma conexão direta entre operações de plantas diferentes é permitida. Essa proposta de Chen et al. (2010) é representada pela Figura 4.2.

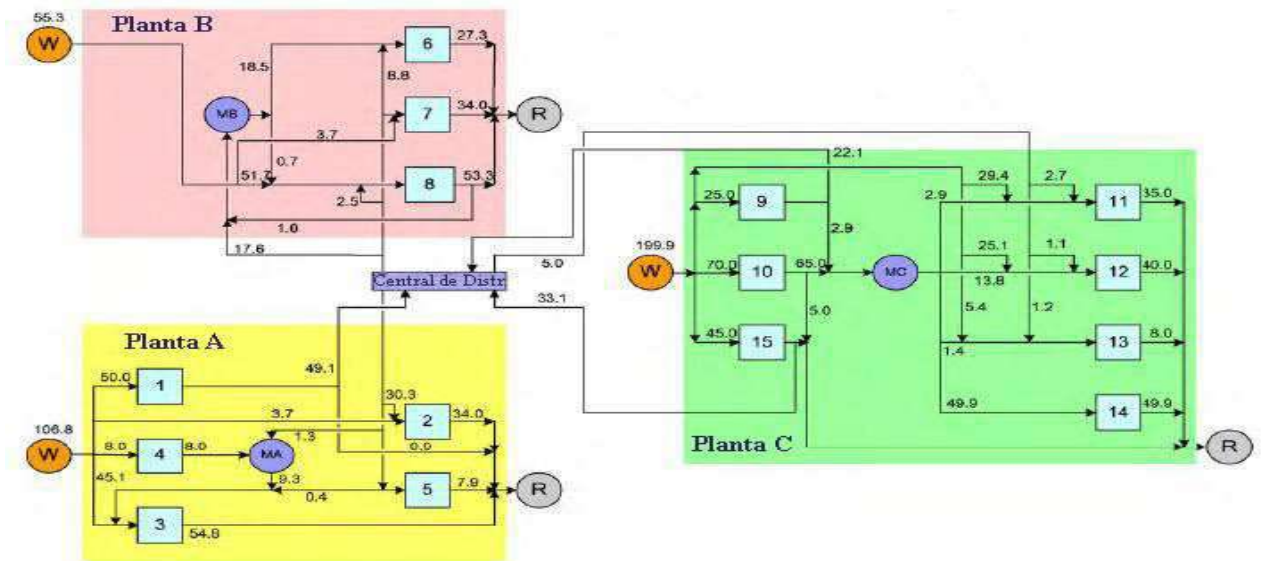


Figura 4.2 – Fluxograma – Integração com central de distribuição (Chen et al., 2010)

Esta possibilidade de reúso gera um consumo total de água limpa de 362 ton/h, apresentando uma redução de 14,18% em relação ao cenário inicial. A vazão de água destinada ao tratamento final para esta possibilidade é de 361,7 ton/h.

Outra possibilidade de minimização de água apresentada em Chen et al. (2010) foi o reúso baseado em um esquema de integração direta (Chen et al., 2008), onde as 3 plantas são tratadas como um todo, e as conexões diretas entre as operações das 3 plantas são permitidas. Esta possibilidade de integração direta está ilustrada pelo fluxograma da Figura 4.3.

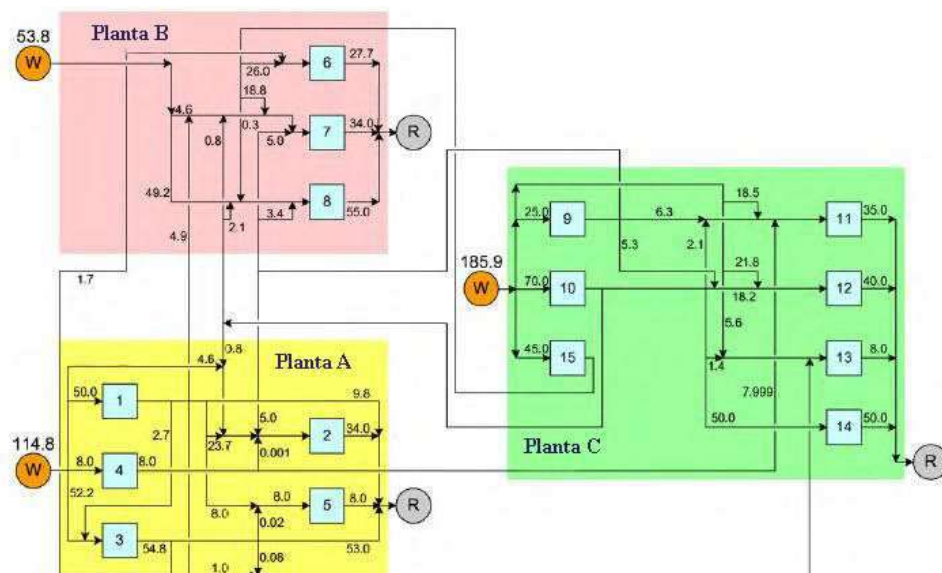


Figura 4.3 – Fluxograma apresentado – Integração direta (Chen et al., 2010)

Para este esquema, o consumo total de água foi de 354,5 ton/h, representando uma redução de 2,12% em relação à proposição de Chen et al. (2010) em que não pode haver

conexão direta entre operações de diferentes plantas. A vazão total de água destinada ao tratamento final para este caso é de 354,5 ton/h.

Este estudo de caso propõe novas possibilidades de minimização do consumo de água limpa para o cenário inicial através de reúso, utilizando como base a aplicação da metodologia DFA.

4.2 – Cálculo da vazão limite das operações – Plantas A, B e C

Para a aplicação do DFA é preciso conhecer os seguintes parâmetros:

-Vazão limite para cada operação;

-Concentrações de entrada e saída máximas para cada operação.

Como Chen et al.(2010) apresentam o cenário base com os dados relativos às concentrações de entrada e saída e às massas de contaminantes trocadas, foi preciso calcular a vazão limite para cada um dos equipamentos pertencentes às três plantas, para que o método DFA pudesse ser devidamente aplicado, através da utilização do programa MINEA.

Segundo a metodologia do DFA, a massa de contaminante trocada pode ser determinada utilizando a seguinte expressão:

$$\Delta m_{i,k} = f_k * (C_{s,i,k} - C_{e,i,k})$$

Equação 4.1

Onde: $\Delta m_{i,k}$ -> massa do contaminante i trocada na operação k

f_k -> vazão limite para a operação k

$C_{s,i,k}$ -> concentração de saída do contaminante i na operação k

$C_{e,i,k}$ -> concentração de entrada do contaminante i na operação k

Rearranjando a equação 4.1:

$$f_k = \Delta m_i / (C_{s,i} - C_{e,i})$$

Assim pode-se calcular a vazão limite para cada operação utilizando os dados de qualquer um dos três contaminantes presentes. Por exemplo, para a operação 1 da planta A, é possível afirmar que:

$$f_1 = \Delta m_{c1,1} / (C_{s,c1,1} - C_{e,c1,1}) = \Delta m_{c2,1} / (C_{s,c2,1} - C_{e,c2,1}) = \Delta m_{c3,1} / (C_{s,c3,1} - C_{e,c3,1})$$

Substituindo os valores correspondentes:

$$f_1 = 750 / (15 - 0) = 20000 / (400 - 0) = 1750 / (35 - 0) = 50 \text{ ton/h}$$

Analogamente, com a mesma expressão, foram calculadas as vazões limites para todas as operações pertencentes às plantas A, B e C. Os dados das três plantas foram agrupados em uma única planilha e as vazões limites foram encontradas, conforme a Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Dados para o cenário inicial incluindo a vazão limite–Plantas A, B e C

Operação	Contaminante	C _i (ppm)	C _f (ppm)	Δm (g/h)	f _k (ton/h)
1	c ₁	0	15	750	50
	c ₂	0	400	20.000	
	c ₃	0	35	1.750	
2	c ₁	20	120	3.400	34
	c ₂	300	12.500	414.800	
	c ₃	45	180	4.590	
3	c ₁	120	220	5.600	56
	c ₂	20	45	1.400	
	c ₃	200	9.500	520.800	
4	c ₁	0	20	160	8
	c ₂	0	60	480	
	c ₃	0	20	160	
5	c ₁	50	150	800	8
	c ₂	400	8.000	60.800	
	c ₃	60	120	480	
6	c ₁	150	900	22.500	30
	c ₂	700	4.500	114.000	
	c ₃	800	3.000	66.000	
7	c ₁	20	120	3.400	34
	c ₂	300	12.500	414.800	
	c ₃	45	180	4.590	
8	c ₁	120	220	5.600	56
	c ₂	20	45	1.400	
	c ₃	200	9.500	520.800	
9	c ₁	0	50	1.250	25
	c ₂	0	100	2.500	
	c ₃	0	50	1.250	
10	c ₁	0	100	7.000	70
	c ₂	0	300	21.000	
	c ₃	0	600	42.000	

Tabela 4.4 - Dados para o cenário inicial incluindo a vazão lipara todas as operações (Continuação)

Operação	Contaminante	C _i (ppm)	C _f (ppm)	Δm (g/h)	f _k (ton/h)
11	c ₁	20	150	4.550	35
	c ₂	50	400	12.250	
	c ₃	50	800	26.250	
12	c ₁	50	600	22.000	40
	c ₂	110	450	13.600	
	c ₃	200	700	20.000	
13	c ₁	20	500	3.840	8
	c ₂	100	650	4.400	
	c ₃	200	400	1.600	
14	c ₁	500	1.100	30.000	50
	c ₂	300	3.500	160.000	
	c ₃	600	2.500	95.000	
15	c ₁	0	15	675	45
	c ₂	0	400	18.000	
	c ₃	0	35	1.575	

Assim, após esses cálculos, têm-se todos os dados necessários para aplicar a metodologia DFA para múltiplos contaminantes.

4.3 –Estudo de caso

O Estudo de caso a seguir propõe diferentes cenários a partir dos dados apresentados no item 4.1. Todos os cenários avaliados estão ilustrados na Figura 4.4, incluindo o caso base e as propostas de reúso apresentadas em Chen et al.(2010), bem como as possibilidades exploradas neste estudo de caso com a aplicação da metodologia DFA.

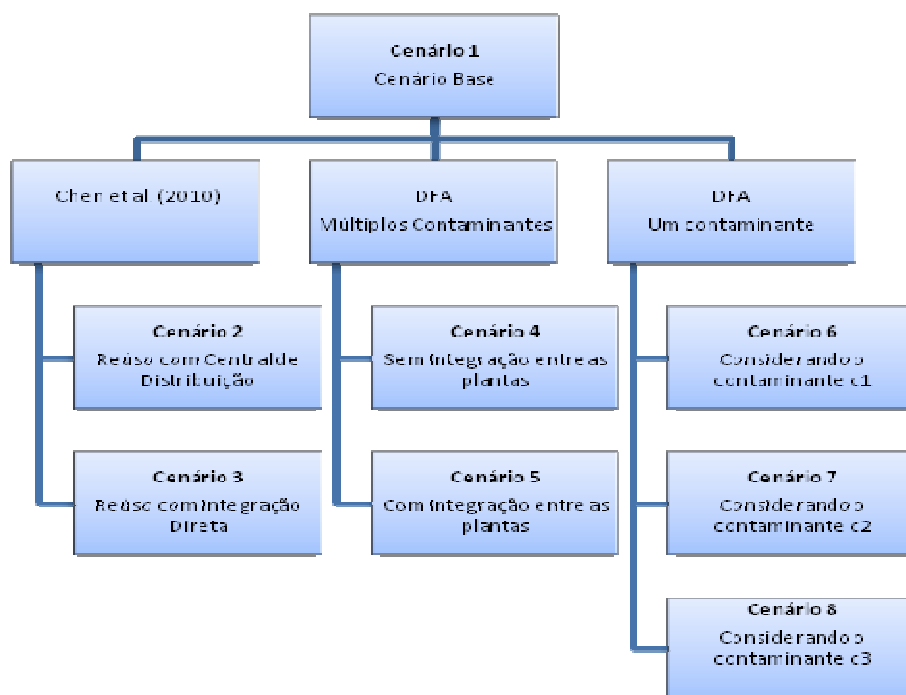


Figura 4.4 – Apresentação dos cenários para o estudo de caso

4.3.1 – Cenário 4 – Reúso sem integração entre as plantas

Para uma primeira análise, será proposta uma possibilidade de reúso em que não há integração entre as operações das 3 diferentes plantas. Cada uma das plantas será avaliada individualmente e a minimização do consumo de água será aplicada para cada planta separadamente.

Como se trata de um caso com múltiplos contaminantes, deve-se iniciar a aplicação do DFA com o deslocamento de concentrações, para que nenhuma das concentrações máximas apresentadas nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 seja violada. O programa MINEA se apresenta como uma ferramenta muito útil também para os casos de multicontaminantes, já que possui como uma de suas funções a capacidade de considerar a transferência simultânea de contaminantes e avaliar a necessidade de deslocamento de concentrações, de modo a permitir o reúso de contaminantes com a aplicação do DFA.

Assim, os dados apresentados na Tabela 4.4 foram alimentados para cada uma das plantas em uma planilha do programa MINEA, que avaliou a necessidade do deslocamento e gerou uma saída com novas concentrações. Estas novas concentrações geradas representam as concentrações de entrada e saída que devem ser utilizadas na aplicação do método, para que a

violação das concentrações máximas dos contaminantes nas operações seja a menor possível com o reúso.

As planilhas que avaliam a necessidade de geração do deslocamento, alimentadas com os dados das Tabelas 4.4, e as saídas geradas com as novas concentrações, obtidas nestes casos, estão ilustradas nas figuras 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10.

Operação	f t/h	Contaminante	C _e	C _s	Operação de Referência	Contaminante de Referência
1	50,0	1	0,0	15,0	1	1
		2	0,0	400,0		
		3	0,0	35,0		
		4				
		5				
		6				
		7				
2	34,0	1	20,0	120,0	1	1
		2	300,0	12500,0		
		3	45,0	180,0		
		4				
		5				
		6				
		7				
3	56,0	1	120,0	220,0	1	1
		2	20,0	45,0		
		3	200,0	9500,0		
		4				
		5				
		6				
		7				
4	8,0	1	0,0	20,0	1	1
		2	0,0	60,0		
		3	0,0	20,0		
		4				
		5				
		6				
		7				
5	8,0	1	50,0	150,0	1	1
		2	400,0	8000,0		
		3	60,0	120,0		
		4				
		5				
		6				
		7				

Deslocar

Figura 4.5 – Planilha de deslocamento alimentada com os dados da planta A

operação	f (t/h)	C _e (ppm)	C _s (ppm)
OP1	50,00	0,00	15,00
OP2	34,00	11,25	111,25
OP3	56,00	0,75	100,75
OP4	8,00	0,00	20,00
OP5	8,00	15,00	115,00
OP6	0,00	#N/D	#N/D

Figura 4.6 – Saída com as concentrações obtidas – Planta A

Operação	f t/h	Contaminante	C _e	C _s	Operação de Referência	Contaminante de Referência
6	30,0	1	150,0	900,0	6	1
		2	700,0	4500,0		
		3	800,0	3000,0		
		4				
		5				
		6				
		7				
7	34,0	1	20,0	120,0	6	1
		2	300,0	12500,0		
		3	45,0	180,0		
		4				
		5				
		6				
		7				
8	56,0	1	120,0	220,0	6	1
		2	20,0	45,0		
		3	200,0	9500,0		
		4				
		5				
		6				
		7				

Deslocar

Figura 4.7 - Planilha de deslocamento alimentada com os dados da planta B

operação	f (t/h)	C _e (ppm)	C _s (ppm)
OP1	0,00	#N/D	#N/D
OP2	0,00	#N/D	#N/D
OP3	0,00	#N/D	#N/D
OP4	0,00	#N/D	#N/D
OP5	0,00	#N/D	#N/D
OP6	30,00	150,00	900,00
OP7	34,00	0,00	100,00
OP8	56,00	15,79	115,79

Figura 4.8 - Saída com as concentrações obtidas – Planta B

Operação	f (t/h)	Contaminante	C _e	C _s	Operação de Referência	Contaminante de Referência
9	25,0	1	0,0	50,0	9	1
		2	0,0	100,0		
		3	0,0	50,0		
		4				
		5				
		6				
		7				
10	70,0	1	0,0	100,0	9	1
		2	0,0	300,0		
		3	0,0	600,0		
		4				
		5				
		6				
		7				
11	35,0	1	20,0	150,0	9	1
		2	50,0	400,0		
		3	50,0	800,0		
		4				
		5				
		6				
		7				
12	40,0	1	50,0	600,0	9	1
		2	110,0	450,0		
		3	200,0	700,0		
		4				
		5				
		6				
		7				
13	8,0	1	20,0	500,0	9	1
		2	100,0	650,0		
		3	200,0	400,0		
		4				
		5				
		6				
		7				
14	50,0	1	500,0	1100,0	9	1
		2	300,0	3500,0		
		3	800,0	2500,0		
		4				
		5				
		6				
		7				
15	45,0	1	0,0	15,0	9	1
		2	0,0	400,0		
		3	0,0	35,0		
		4				
		5				
		6				
		7				

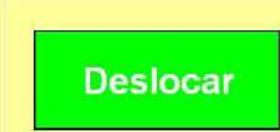


Figura 4.9 - Planilha de deslocamento alimentada com os dados da planta C

operação	f (t/h)	C _e (ppm)	C _s (ppm)
OP1	0,00	#N/D	#N/D
OP2	0,00	#N/D	#N/D
OP3	0,00	#N/D	#N/D
OP4	0,00	#N/D	#N/D
OP5	0,00	#N/D	#N/D
OP6	0,00	#N/D	#N/D
OP7	0,00	#N/D	#N/D
OP8	0,00	#N/D	#N/D
OP9	25,00	0,00	50,00
OP10	70,00	0,00	100,00
OP11	35,00	20,00	150,00
OP12	40,00	50,00	600,00
OP13	8,00	20,00	500,00
OP14	50,00	150,00	750,00
OP15	45,00	0,00	15,00

Figura 4.10 - Saída com as concentrações obtidas – Planta C

As concentrações de saída geradas, ilustradas nas Figuras 4.6, 4.8 e 4.10, foram as concentrações de entrada e saída máximas utilizadas para a aplicação do método DFA.

Estas concentrações, juntamente com a vazão limite calculada para cada operação, foram utilizadas como base para gerar o Diagrama de Fontes de Água para cada uma das plantas.

Esses dados foram inseridos no programa MINEA para cada uma das três plantas separadamente. Inicialmente foi gerado o DFA para a planta A, em seguida para a planta B, e ao final foi gerado o DFA para a planta C.

As telas com os dados de cada planta alimentados para a geração do DFA podem ser vistas nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13.

operação	Dados				Vazão disponível	perda/ganho	Nome	Pode ter uma vazão menor?
	F(t/h)	Ce (ppm)	Cs (ppm)	Δm (kg/h)				
OP1	50,00	0,00	15,00	750,00	50,000			
OP2	34,00	11,25	111,25	3400,00	34,000			
OP3	56,00	0,75	100,75	5600,00	56,000			
OP4	8,00	0,00	20,00	160,00	8,000			
OP5	8,00	15,00	115,00	800,00	8,000			
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								

Gerar Linha Base de Concentrações

Calcular

Gerar Saida

Figura 4.11 – Tela com os dados alimentados para geração do DFA – Planta A

operação	F(t/h)	C _e (ppm)	C _s (ppm)	Dados		perda garrho	Nome	Pode ter uma vazão menor?
				Δm (kg/h)	Vazão disponível			
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	30,00	150,00	900,00	22500,00	20,031			
OP7	34,00	0,00	100,00	3400,00	34,000			
OP8	56,00	15,79	115,79	5600,00	56,000			
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								

Gerar Linha Base de Concentrações

Calcular

Gerar Saida

Figura 4.12 – Tela com os dados alimentados para geração do DFA – Planta B

operação	F(t/h)	C _e (ppm)	C _s (ppm)	Dados		perda garrho	Nome	Pode ter uma vazão menor?
				Δm (kg/h)	Vazão disponível			
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	25,00	0,00	50,00	1250,00	25,000			
OP10	70,00	0,00	100,00	7000,00	70,000			
OP11	35,00	20,00	150,00	4550,00	35,000			
OP12	40,00	50,00	800,00	22000,00	40,000			
OP13	8,00	20,00	500,00	3840,00	8,000			
OP14	50,00	150,00	750,00	30000,00	50,000			
OP15	45,00	0,00	15,00	675,00	45,000			
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								

Gerar Linha Base de Concentrações

Calcular

Gerar Saida

Figura 4.13 – Tela com os dados alimentados para geração do DFA – Planta C

Assim, para cada uma destas entradas de dados no MINEA, foram gerados diferentes diagramas, relativos às plantas A, B e C, conforme Figuras 4.14, 4.15 e 4.16.

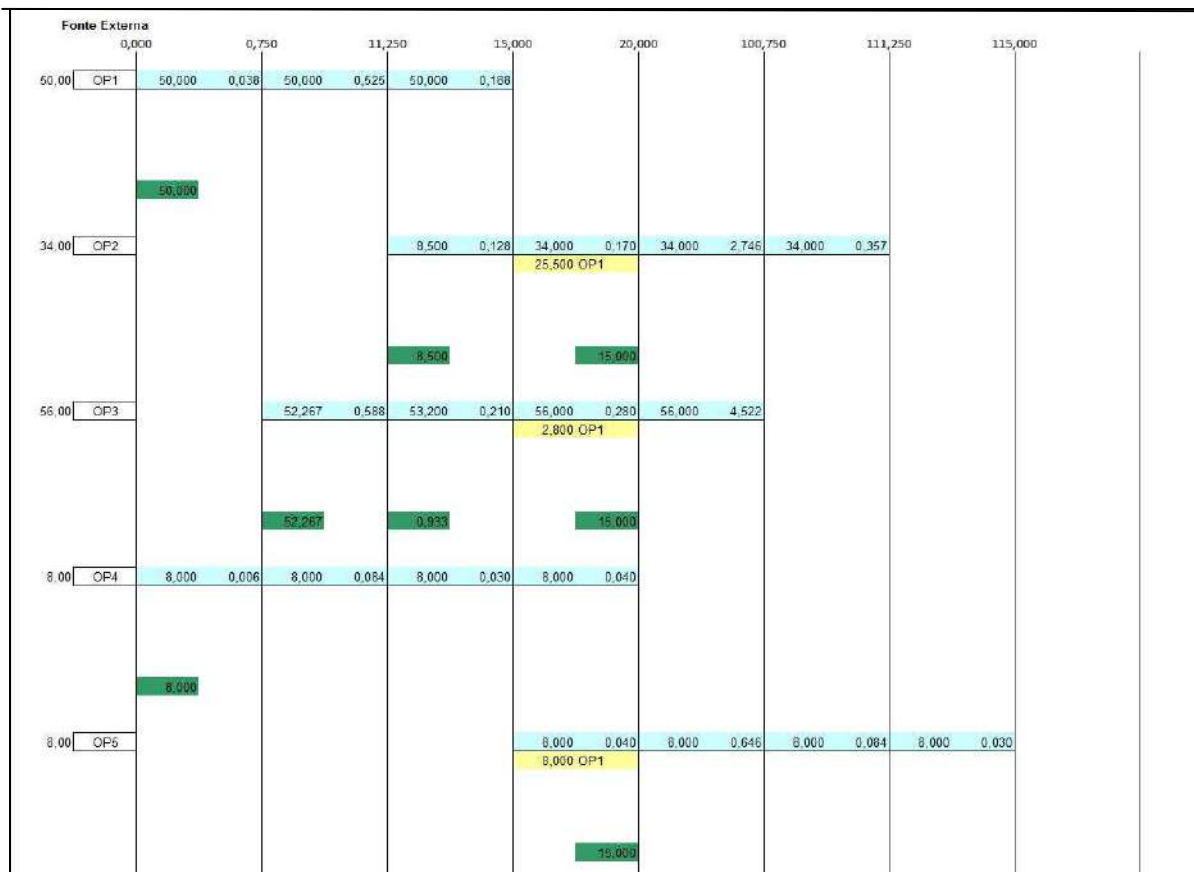


Figura 4.14 – DFA gerado para a planta A

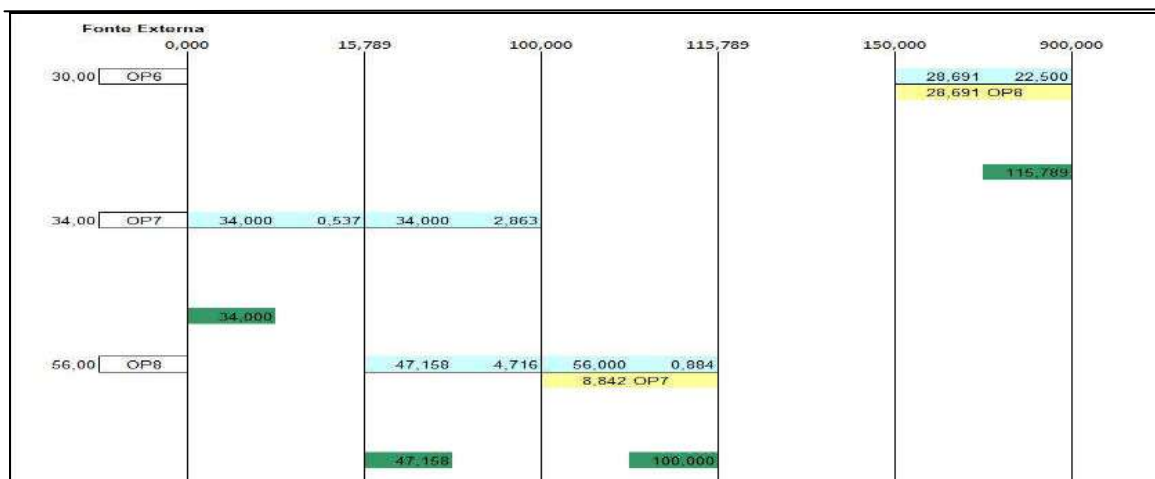


Figura 4.15 – DFA gerado para a planta B

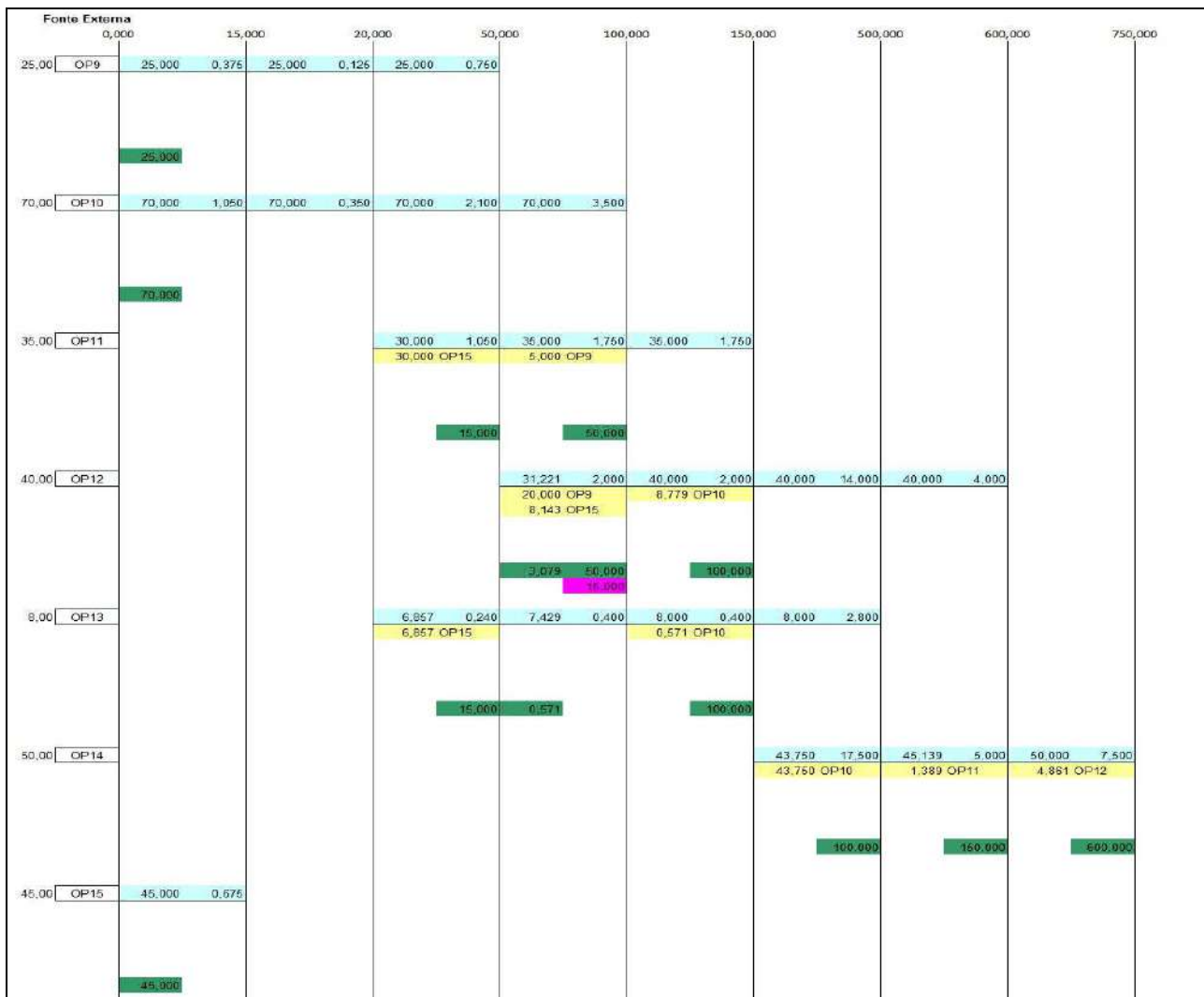


Figura 4.16 – DFA gerado para a planta C

Esta aplicação do DFA para cada uma das plantas gerou as propostas de reuso descritas pelos fluxogramas das figuras 4.17, 4.18 e 4.19, respectivamente.

FIGURA 4.18 - FLUXOGRAMA GERADO - PLANTA B

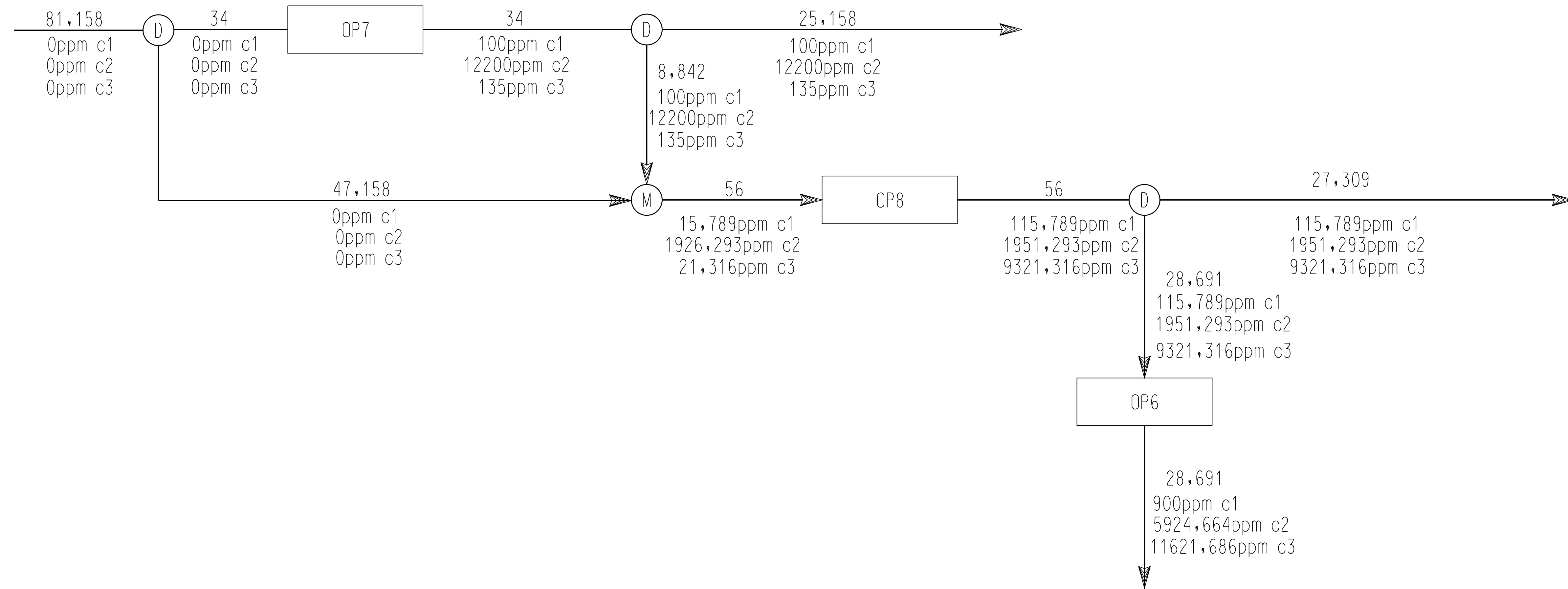


FIGURA 4.17 - FLUXOGRAMA GERADO - PLANTA A

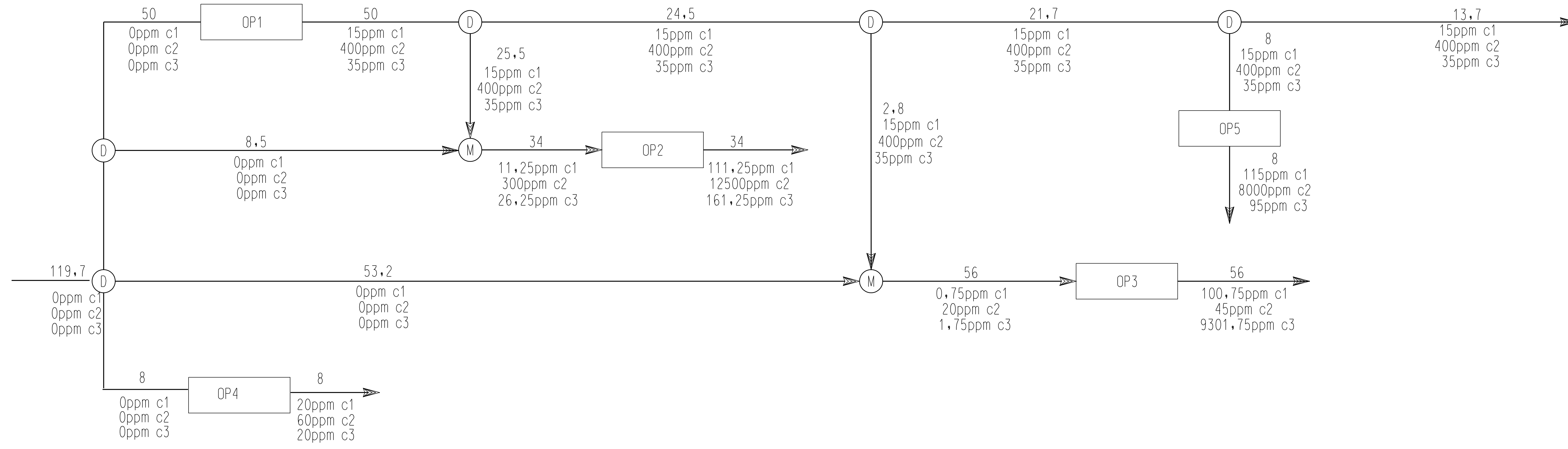
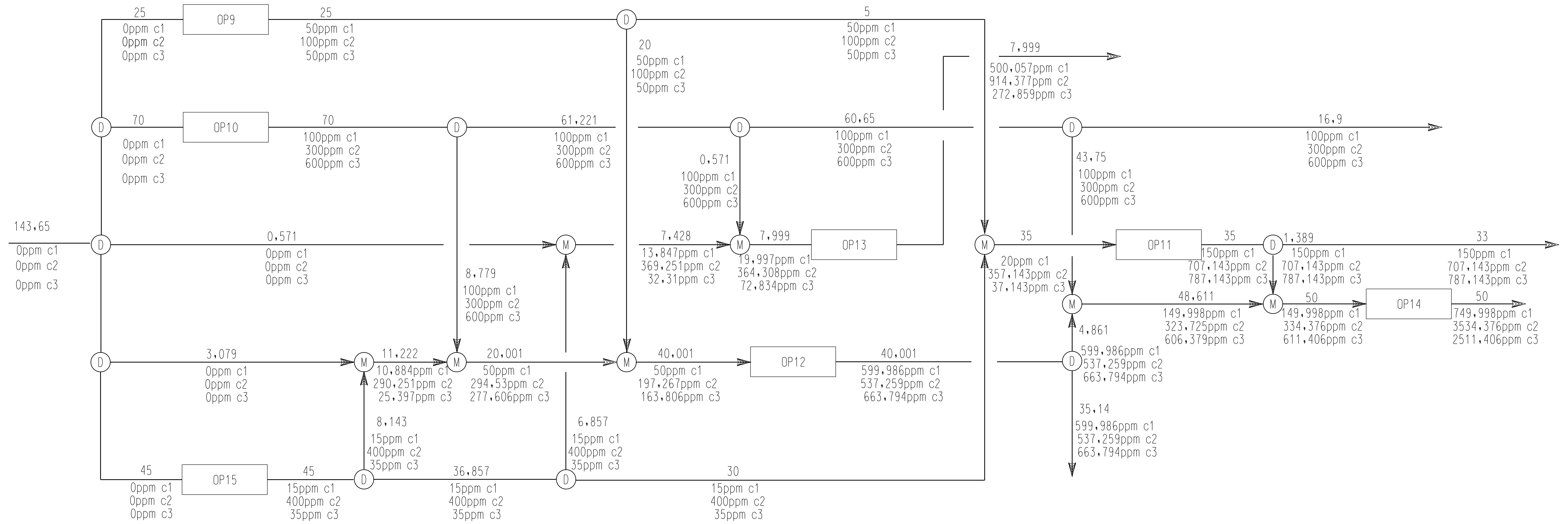


FIGURA 4.19 - FLUXOGRAMA GERADO - PLANTA C



Observando-se a proposta de reúso apresentada nos fluxogramas das Figuras 4.17, 4.18 e 4.19, pode-se verificar que o consumo de água total de água limpa foi de 344,508 ton/h, sendo destes 119,7 ton/h destinados à planta A, 81,158 ton/h destinados à planta B e 143,65 ton/h destinados à planta C.

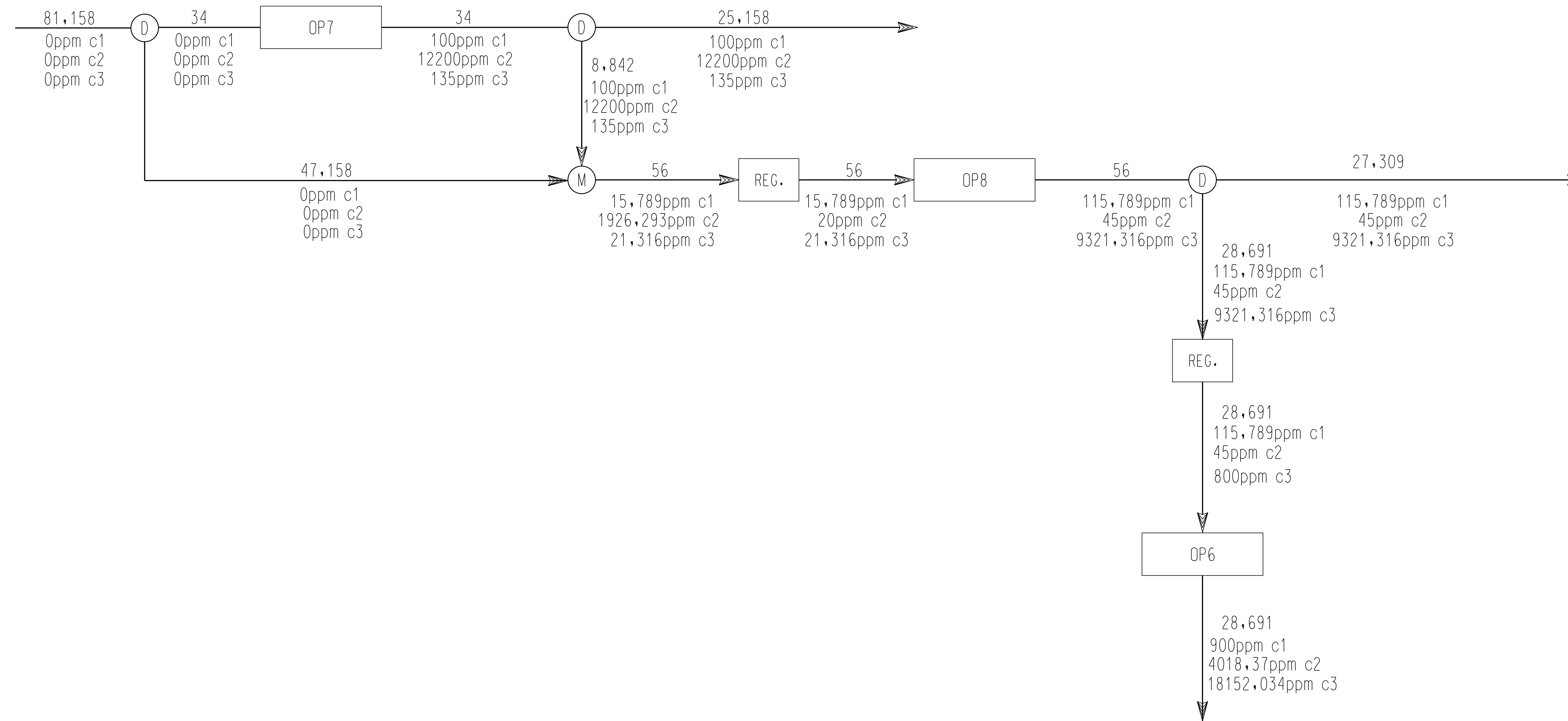
Este consumo de 344,508 ton/h representa uma redução de 18% em relação ao consumo de 421,8 ton/h do cenário 1. Essa redução alcançada a partir do DFA é maior do que a redução atingida nos cenários 2 e 3, apresentados em Chen et al. (2010). O consumo de água limpa utilizando o DFA foi 5% menor do que no cenário 2, e 3% menor do que no cenário 3.

No entanto, pode-se observar que, mesmo com a utilização do deslocamento no início do procedimento para tentar minimizar a violação nas concentrações máximas de entrada, algumas das concentrações limites foram violadas. Por exemplo, no fluxograma da Figura 4.18 nota-se que as concentrações máximas de entrada do contaminante c3 na operação 6, e a concentração máxima de entrada de c2 na operação 8, foram violadas.

Logo, uma das soluções possíveis para que o fluxograma da Figura 4.18 fosse aplicado como uma alternativa de reúso para este processo seria o uso de regeneradores, que seriam alocados antes das operações 6 e 8. A vazão total de água regenerada seria de 84,691 ton/h de água.

Esta solução está ilustrada no fluxograma da Figura 4.20.

FIGURA 4.20 FLUXOGRAMA GERADO - PLANTA B - COM REGENERADOR



Processos de regeneração, tais como processos de filtração e permeação por membranas, empregados sozinhos ou combinados, podem ser utilizados em conjunto com as alternativas de reúso, de forma a remover contaminantes em uma etapa intermediária.

A eficiência de remoção pode ser calculada pela Equação 4.2, considerando que a vazão tratada nos processos regenerativos seja sempre constante:

$$\text{Eficiência} = (C_{e,i,r} - C_{s,i,r}) / C_{e,i,r} \quad \text{Equação 4.2}$$

Onde

$C_{e,i,r}$ -> Concentração de entrada do contaminante i no regenerador

$C_{s,i,r}$ -> Concentração de saída do contaminante i no regenerador

A Tabela 4.5 mostra as eficiências requeridas para os regeneradores da Figura 4.20.

Tabela 4.5 – Eficiência requerida para os regeneradores da Planta B

Operação	Contaminante	Eficiência requerida (%)
6	c3	91,42
8	c2	98,96

Supondo que os regeneradores atingissem a eficiência requerida, não ocorreriam violações nas concentrações limite das operações. Vale ressaltar que este estudo de caso trata de contaminantes hipotéticos c1, c2 e c3. Para um estudo real, os contaminantes envolvidos seriam conhecidos e um estudo de síntese de processo de tratamento (Delgado, 2008) deveria ser realizado para definir a regeneração adequada a ser aplicada.

Assim, pode-se observar que os fluxogramas descritos pelas Figuras 4.17, 4.18 e 4.20 apresentam uma maior economia de água do que os cenários 2 e 3 apresentadas em Chen et al. Porém, serão explorados a seguir outros cenários de aplicação do DFA para este mesmo exemplo, envolvendo agora a integração das 3 plantas, para investigar se, com estas novas possibilidades, será possível atingir uma redução ainda mais eficiente no consumo de água limpa.

A aplicação do método DFA será avaliada a seguir com a integração direta das 3 plantas, analisando preliminarmente a necessidade de deslocamento para este sistema de multicontaminantes.

4.3.2 – Cenário 5 – Reúso com integração direta entre as plantas - considerando a transferência simultânea de contaminantes

Nesta parte do estudo de caso, a viabilidade da aplicação do método do DFA será avaliada considerando as 3 plantas como uma única unidade a ser avaliada. Deste modo, pode haver conexão entre operações de diferentes plantas.

Como se trata de um sistema de multicontaminantes, inicialmente foi utilizada a parte do programa MINEA que avalia e calcula o deslocamento de concentrações, para que as concentrações máximas de entrada nas operações não sejam violadas para nenhum dos contaminantes.

Os dados foram alimentados em uma planilha, que pode ser vista na Figura 4.21.

Operação	f (t/h)	Contaminant	C _w	C _p	Operação de Referência	Contaminante de Referência
1	50.0	1	0.0	15.0	1	1
		2	0.0	400.0		
		3	0.0	35.0		
		4				
		5				
		6				
		7				
2	34.0	1	20.0	120.0	1	1
		2	300.0	12500.0		
		3	45.0	180.0		
		4				
		5				
		6				
		7				
3	56.0	1	120.0	220.0	1	1
		2	20.0	45.0		
		3	200.0	9500.0		
		4				
		5				
		6				
		7				
4	8.0	1	0.0	20.0	1	1
		2	0.0	60.0		
		3	0.0	20.0		
		4				
		5				
		6				
		7				
5	9.0	1	50.0	150.0	1	1
		2	400.0	8000.0		
		3	60.0	120.0		
		4				
		5				
		6				
		7				
6	30.0	1	150.0	900.0	1	1
		2	700.0	4500.0		
		3	300.0	3000.0		
		4				
		5				
		6				
		7				
7	34.0	1	20.0	120.0	1	1
		2	300.0	12500.0		
		3	45.0	180.0		
		4				
		5				
		6				
		7				
8	56.0	1	120.0	220.0	1	1
		2	20.0	45.0		
		3	200.0	9500.0		
		4				
		5				
		6				
		7				
9	25.0	1	0.0	50.0	1	1
		2	0.0	100.0		
		3	0.0	50.0		
		4				
		5				
		6				
		7				
10	70.0	1	0.0	100.0	1	1
		2	0.0	300.0		
		3	0.0	600.0		
		4				
		5				
		6				
		7				
11	95.0	1	20.0	150.0	1	1
		2	50.0	400.0		
		3	50.0	600.0		
		4				
		5				
		6				
		7				
12	40.0	1	50.0	800.0	1	1
		2	110.0	450.0		
		3	200.0	700.0		
		4				
		5				
		6				
		7				
13	8.0	1	20.0	500.0	1	1
		2	100.0	650.0		
		3	200.0	400.0		
		4				
		5				
		6				
		7				
14	50.0	1	500.0	1100.0	1	1
		2	300.0	3500.0		
		3	600.0	2500.0		
		4				
		5				
		6				
		7				
15	45.0	1	0.0	15.0	1	1
		2	0.0	400.0		
		3	0.0	35.0		
		4				
		5				
		6				
		7				

Deslocar

Figura 4.21 – Planilha de deslocamento alimentada com os dados de todas as plantas

A partir da planilha da Figura 4.21, foram obtidas novas concentrações a serem utilizadas para a aplicação do DFA, conforme Figura 4.22.

operação	f (t/h)	C _e (ppm)	C _s (ppm)
OP1	50.00	0.00	15.00
OP2	34.00	11.25	111.25
OP3	56.00	0.75	100.75
OP4	8.00	0.00	20.00
OP5	8.00	15.00	115.00
OP6	30.00	26.25	776.25
OP7	34.00	11.25	111.25
OP8	56.00	0.75	100.75
OP9	25.00	0.00	50.00
OP10	70.00	0.00	100.00
OP11	35.00	1.88	131.88
OP12	40.00	4.13	554.13
OP13	8.00	3.75	483.75
OP14	50.00	11.25	611.25
OP15	45.00	0.00	15.00
OP16	0.00	#N/A	#N/A

Figura 4.22 - Concentrações obtidas a partir do deslocamento para todas as plantas

Assim, com estas novas concentrações, o método DFA foi aplicado considerando as operações de todas as plantas, conforme Figura 4.23.

operação	F (t/h)	C _e (ppm)	C _s (ppm)	Dados		perda/ganho	Nome	Pode ter uma variável menor?
				Δm (kg/h)	Vazio disponível			
OP1	50.00	0.00	15.00	750.00	50.000			
OP2	34.00	11.25	111.25	3400.00	34.000			
OP3	56.00	0.75	100.75	5600.00	66.000			
OP4	8.00	0.00	20.00	160.00	8.000			
OP5	8.00	15.00	115.00	800.00	8.000			
OP6	30.00	26.25	776.25	22500.00	30.000			
OP7	34.00	11.25	111.25	3400.00	34.000			
OP8	56.00	0.75	100.75	5600.00	66.000			
OP9	25.00	0.00	50.00	1250.00	25.000			
OP10	70.00	0.00	100.00	7000.00	70.000			
OP11	35.00	1.88	131.88	4550.00	35.000			
OP12	40.00	4.13	554.13	22000.00	40.000			
OP13	8.00	3.75	483.75	3840.00	8.000			
OP14	50.00	11.25	611.25	30000.00	50.000			
OP15	45.00	0.00	15.00	675.00	45.000			
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								

Gerar Linha Base de Concentrações

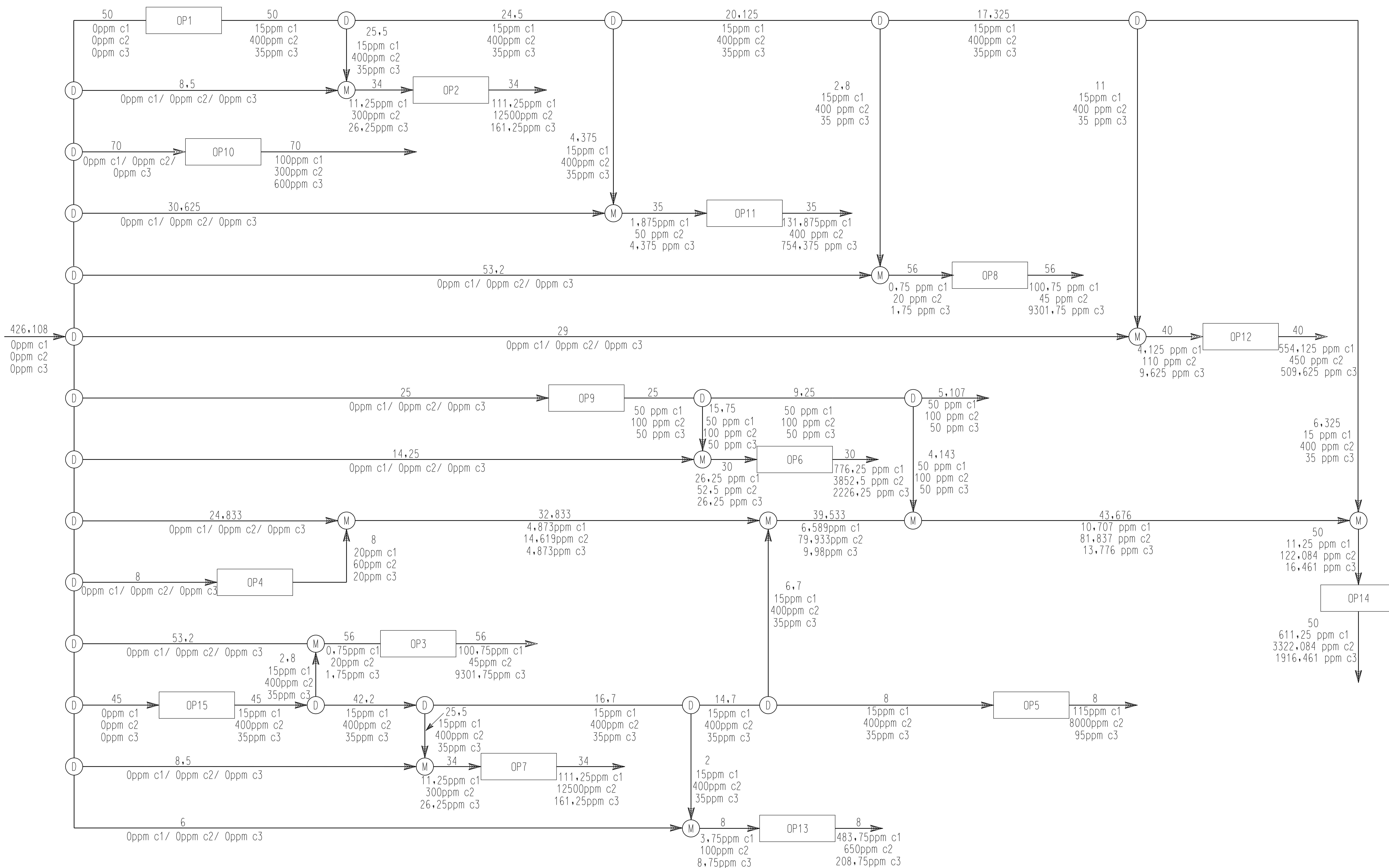
Calcular

Gerar Saida

Figura 4.23 – Planilha com os dados alimentados para a geração do DFA - Todas as plantas

Deste modo, o DFA para a unidade contendo as 3 plantas e o fluxograma sintetizado a partir do DFA foram obtidos, conforme Figuras 4.24 e 4.25, respectivamente.

FIGURA 4.25 - FLUXOGRAMA GERADO - INTEGRA*O DE TODAS AS PLANTAS



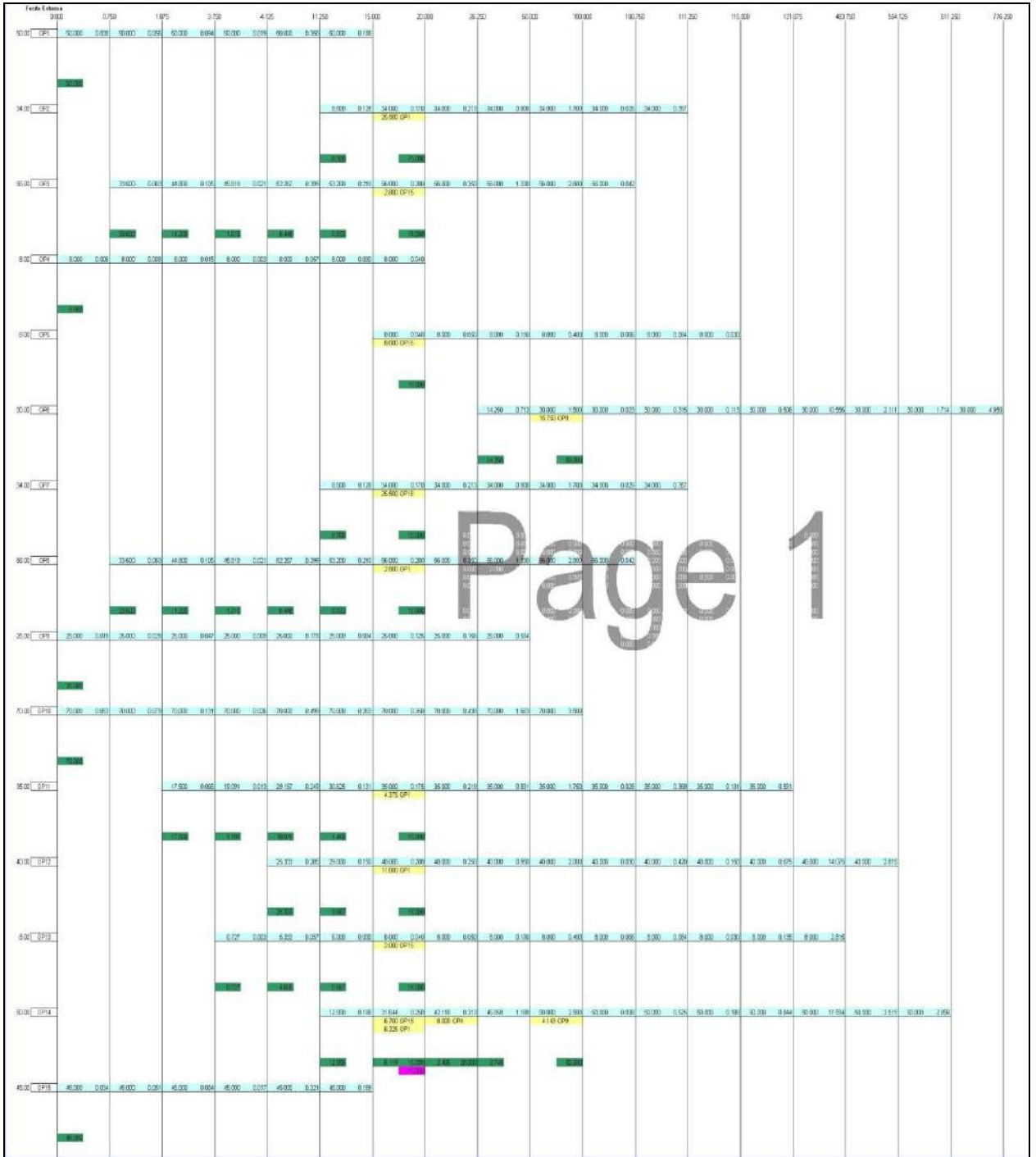


Figura 4.24 – DFA gerado para as 3 plantas

Observando o fluxograma proposto na Figura 4.25, observa-se que as concentrações máximas de entrada das operações não foram violadas para nenhum dos 3 contaminantes.

Porém, o consumo de água limpa neste caso foi de 426,106 ton/h. Este consumo foi maior do que o consumo nos cenários 1, 2, 3 e 4.

Assim, esta proposta de reúso não atende ao objetivo de minimizar o consumo de água da unidade. Esta configuração não representaria uma proposta promissora de reúso, pois não levaria a uma economia no custo com água limpa.

Contudo, existem ainda outras possibilidades a serem exploradas na integração das três plantas através do DFA. Nos cenários 1 e 2 consideramos a transferência simultânea de contaminantes, e por isso realizamos a análise de deslocamento.

Para investigar se é possível atingir uma maior economia no consumo de água limpa, serão explorados a seguir casos de integração entre as diferentes plantas, sem levar em conta a transferência simultânea de contaminantes. As concentrações máximas de entrada e saída de apenas um dos contaminantes será considerada, e a unidade será tratada como um sistema de um único contaminante.

4.3.3–Cenário 6–Reúso com integração direta entre as plantas-contaminante c1

Para a implementação do DFA o sistema será tratado como um sistema com um único contaminante e, na elaboração do fluxograma, a concentração dos outros contaminantes será obtida pelo balanço de massa. Neste cenário, serão consideradas somente as concentrações limite apresentadas para o contaminante c1.

Assim, o programa MINEA foi alimentado com as vazões limites de cada operação e com as concentrações limites para o contaminante c1, conforme figura 4.26.

operação	Dados				Vazão disponível	perda/ganho	Nome	Pode ter uma vazão menor?
	F(t/h)	Ce (ppm)	Cs (ppm)	Δm (kg/h)				
OP1	50.00	0.00	15.00	750.00	50.000			
OP2	34.00	20.00	120.00	3400.00	34.000			
OP3	56.00	120.00	220.00	5600.00	56.000			
OP4	8.00	0.00	20.00	160.00	8.000			
OP5	8.00	50.00	150.00	800.00	8.000			
OP6	30.00	150.00	800.00	22500.00	30.000			
OP7	34.00	20.00	120.00	3400.00	34.000			
OP8	56.00	120.00	220.00	5600.00	56.000			
OP9	25.00	0.00	60.00	1250.00	25.000			
OP10	70.00	0.00	100.00	7000.00	70.000			
OP11	35.00	20.00	150.00	4550.00	35.000			
OP12	40.00	50.00	800.00	22000.00	40.000			
OP13	8.00	20.00	500.00	3840.00	8.000			
OP14	50.00	500.00	1100.00	30000.00	34.091			
OP15	45.00	0.00	15.00	675.00	45.000			
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								

Gerar Linha Base de Concentrações

Calcular

Gerar Saida

Figura 4.26–Planilha com os dados alimentados para a geração do DFA–Todas as plantas -c1

A partir da alimentação destes dados, o programa gerou o DFA ilustrado na Figura 4.27.

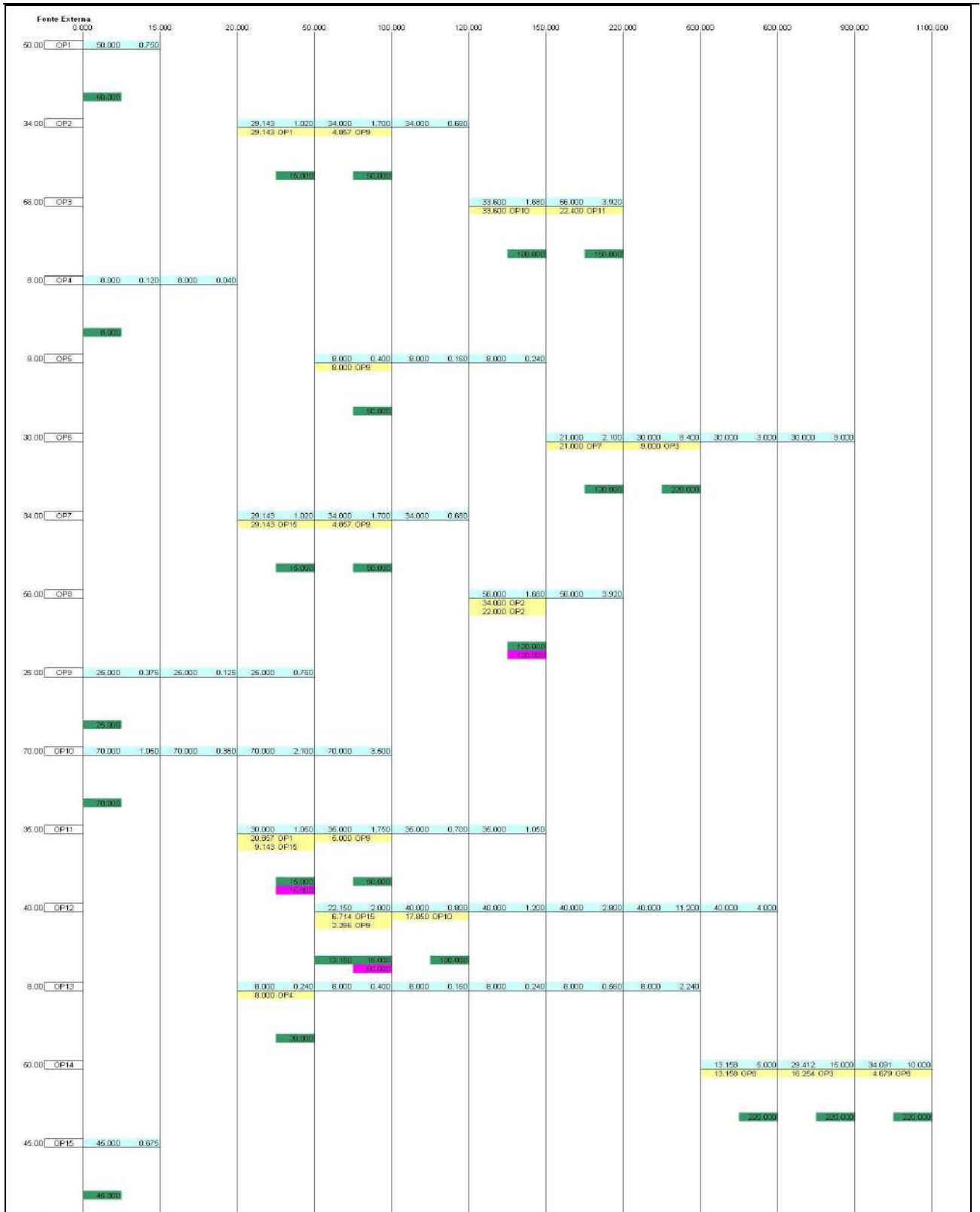


Figura 4.27 – DFA gerado – Todas as plantas – c1

Neste DFA, é possível perceber uma inconsistência gerada pelo programa MINEA: Neste diagrama gerado, 56 ton/h da operação 2 são reutilizados na operação 8. Porém a

operação 2 possui somente uma vazão disponível de 34 ton/h para ser reutilizada. Não seria possível reutilizar na operação 8 uma vazão maior que a disponível. Assim, esse DFA gerado não poderia ser fisicamente realizável.

Deste modo, foi preciso propor uma modificação nos dados alimentados no programa para que o resultado fosse consistente e o DFA gerado pudesse ser traduzido em uma proposta de fluxograma possível de ser aplicado fisicamente no caso inicial, minimizando o consumo de água limpa.

Assim, aplica-se novamente o método, mas desta vez impondo uma restrição. Para evitar a inconsistência gerada anteriormente, é determinado que a saída da operação 2 não poderia ser reutilizada na operação 8.

Assim, a alimentação dos dados é feita exatamente do mesmo modo, conforme indicado na Figura 4.23, mas desta vez foi utilizada uma parte do programa chamada de “Proibição”, onde a condição foi imposta, como pode ser visto na Figura 4.28.

	Destino																								
Origem	op1	op2	op3	op4	op5	op6	op7	op8	op9	op10	op11	op12	op13	op14	op15	op16	op17	op18	op19	op20	op21	op22	op23	op24	op25
op1	---	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
op2	Sim	---	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
op3	Sim	Sim	---	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
op4	Sim	Sim	Sim	---	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
op5	Sim	Sim	Sim	Sim	---	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
op6	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	---	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
op7	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	---	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
op8	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	---	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
op9	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	---	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
op10	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	---	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
op11	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	---	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
op12	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	---	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
op13	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	---	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
op14	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	---	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
op15	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	---	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
op16	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	---	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
op17	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	---	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
op18	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	---	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
op19	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	---	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
op20	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	---	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
op21	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	---	Sim	Sim	Sim	Sim
op22	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	---	Sim	Sim	Sim
op23	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	---	Sim	Sim
op24	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	---	Sim
op25	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	---

Figura 4.28 – Proibição imposta no DFA – Restrição da operação 2 para a operação 8

Esta ferramenta do programa possibilita a proibição da reutilização da saída de uma operação na entrada de outra, caso haja a necessidade.

Com a proibição, o programa MINEA gerou um novo DFA consistente para este cenário em estudo, conforme Figura 4.29. O fluxograma obtido a partir deste pode ser visto na Figura 4.30.

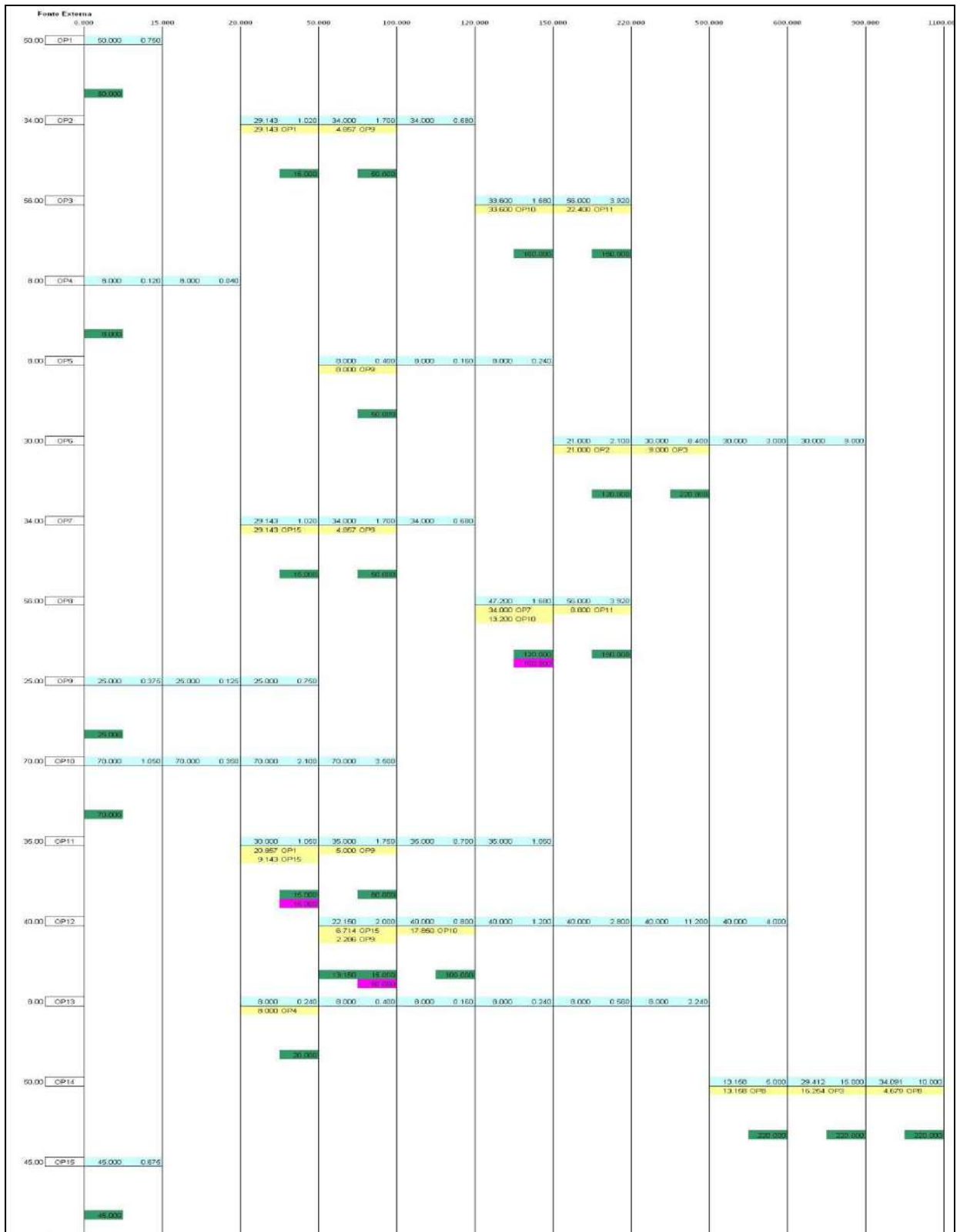
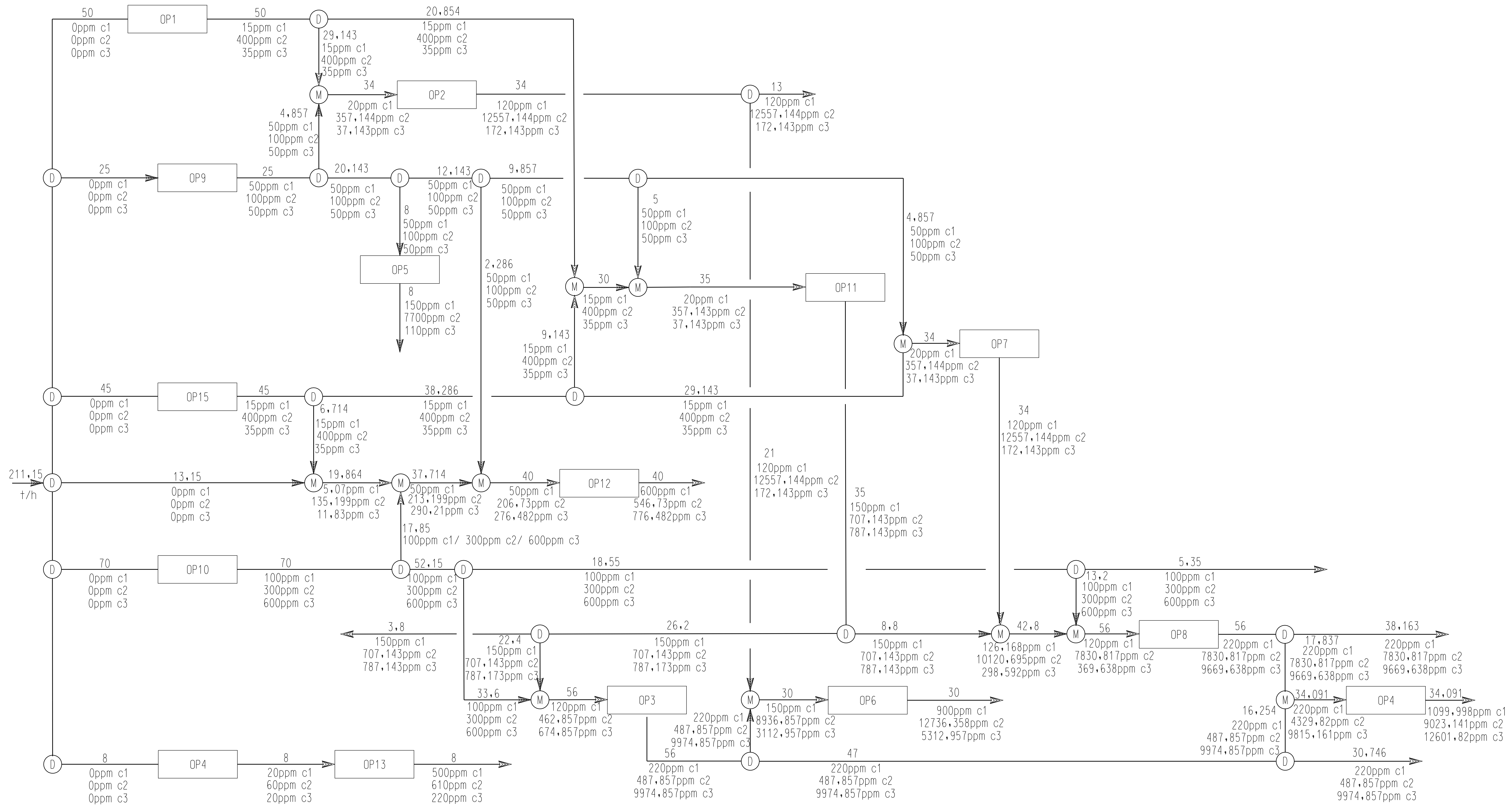


Figura 4.29 – Novo DFA gerado com a restrição – Todas as plantas – c1

FIGURA 4.30 - FLUXOGRAMA GERADO - CONSIDERANDO C1



Neste fluxograma proposto, o consumo total de água para as três plantas foi de 211,15 ton/h, o que representa uma redução de aproximadamente 50% do consumo de água limpa em comparação ao cenário 1. Esta proposta também apresenta um consumo 42,5% menor do que o consumo no cenário 2, e 40% menor do que no cenário 3.

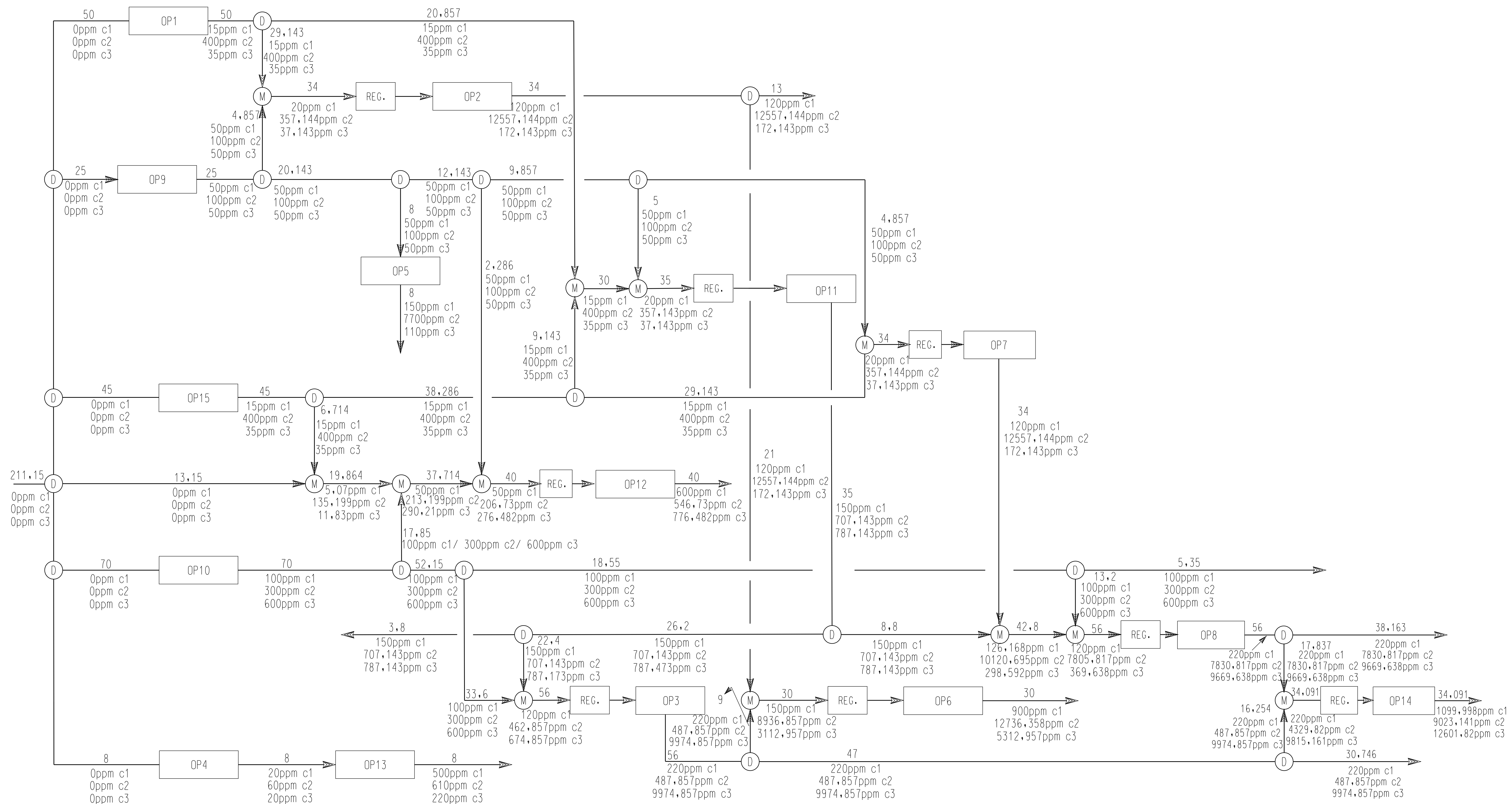
Porém, nota-se que as concentrações máximas de entrada para os contaminantes c2 e c3 foram violadas para algumas das operações:

- A concentração máxima de entrada do contaminante c2 foi violada na operação 2;
- As concentrações máximas de entrada dos contaminantes c2 e c3 foram violadas na operação 3;
- As concentrações máximas de entrada dos contaminantes c2 e c3 foram violadas na operação 6;
- A concentração máxima de entrada do contaminante c2 foi violada na operação 7;
- As concentrações máximas de entrada dos contaminantes c2 e c3 foram violadas na operação 8;
- A concentração máxima de entrada do contaminante c2 foi violada na operação 11;
- As concentrações máximas de entrada dos contaminantes c2 e c3 foram violadas na operação 12;
- As concentrações máximas de entrada dos contaminantes c2 e c3 foram violadas na operação 14;

Assim, uma das soluções propostas para este cenário seria alocar regeneradores antes de cada uma das operações onde houve violação, para levar a concentração dos contaminantes c2 e c3 à concentração de entrada permitida pela operação.

Os regeneradores trariam, a princípio, um custo adicional para o sistema, mas este custo não seria tão significativo se a economia atingida pela redução do consumo de água limpa compensasse este custo de investimento dentro de um tempo de retorno aceitável. Uma análise econômica dos cenários será avaliada no Capítulo 6. O sistema de reúso proposto com a regeneração pode ser ilustrado pelo fluxograma da figura 4.31.

FIGURA 4.31 - FLUXOGRAMA GERADO - CONSIDERANDO C1 - COM RENERADOR



A eficiência requerida para os regeneradores está ilustrada na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Eficiência requerida para os regeneradores – Cenário 6

Operação	Contaminante	Eficiência requerida
2	c2	16
3	c2	95,68
	c3	70,36
6	c2	92,17
	c3	74,3
7	c2	16
8	c2	99,74
	c3	45,89
11	c2	86
12	c2	46,8
	c3	27,66
14	c2	93,07
	c3	93,89

4.3.4–Cenário 7– Reúso com integração direta entre as plantas-contaminante c2

Nesta possibilidade, o método DFA será aplicado tratando o sistema como de único contaminante, e somente as concentrações limite de c2 serão levadas em conta para a aplicação do método.

As concentrações dos outros contaminantes serão obtidas a partir do balanço de massa, quando o fluxograma for elaborado.

Analogamente ao cenário 6, o programa MINEA foi alimentado com os dados do contaminante c2 e as vazões limites das operações, conforme Figura 4.32.

operação	Dados					perda/ganho	Nome	Pode ter uma vazão menor?
	F (t/s)	Ce (ppm)	Cs (ppm)	Δm (kg/h)	Vazão disponível			
OP1	50.00	0.00	400.00	20000.00	60.000			
OP2	34.00	300.00	12500.00	414800.00	34.000			
OP3	56.00	20.00	45.00	1400.00	31.111			
OP4	8.00	0.00	60.00	480.00	6.000			
OP5	8.00	400.00	8000.00	60800.00	8.000			
OP6	93.00	700.00	4500.00	114000.00	30.000			
OP7	34.00	300.00	12500.00	414800.00	34.000			
OP8	56.00	20.00	45.00	1400.00	31.111			
OP9	25.00	0.00	100.00	2500.00	25.000			
OP10	70.00	0.00	300.00	21000.00	70.000			
OP11	35.00	50.00	400.00	12250.00	35.000			
OP12	40.00	110.00	450.00	12600.00	40.000			
OP13	0.00	100.00	650.00	4400.00	6.000			
OP14	50.00	300.00	3500.00	160000.00	60.000			
OP15	45.00	0.00	400.00	18000.00	45.000			
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								

Gerar Linha Base de Concentrações

Calcular

Gerar Saída

Figura 4.32 – Planilha com os dados alimentados para a geração do DFA – Todas as plantas – c2

Esta alimentação de dados gerou o DFA ilustrado na Figura 4.33 e, a partir deste, foi sintetizado o fluxograma da Figura 4.34.

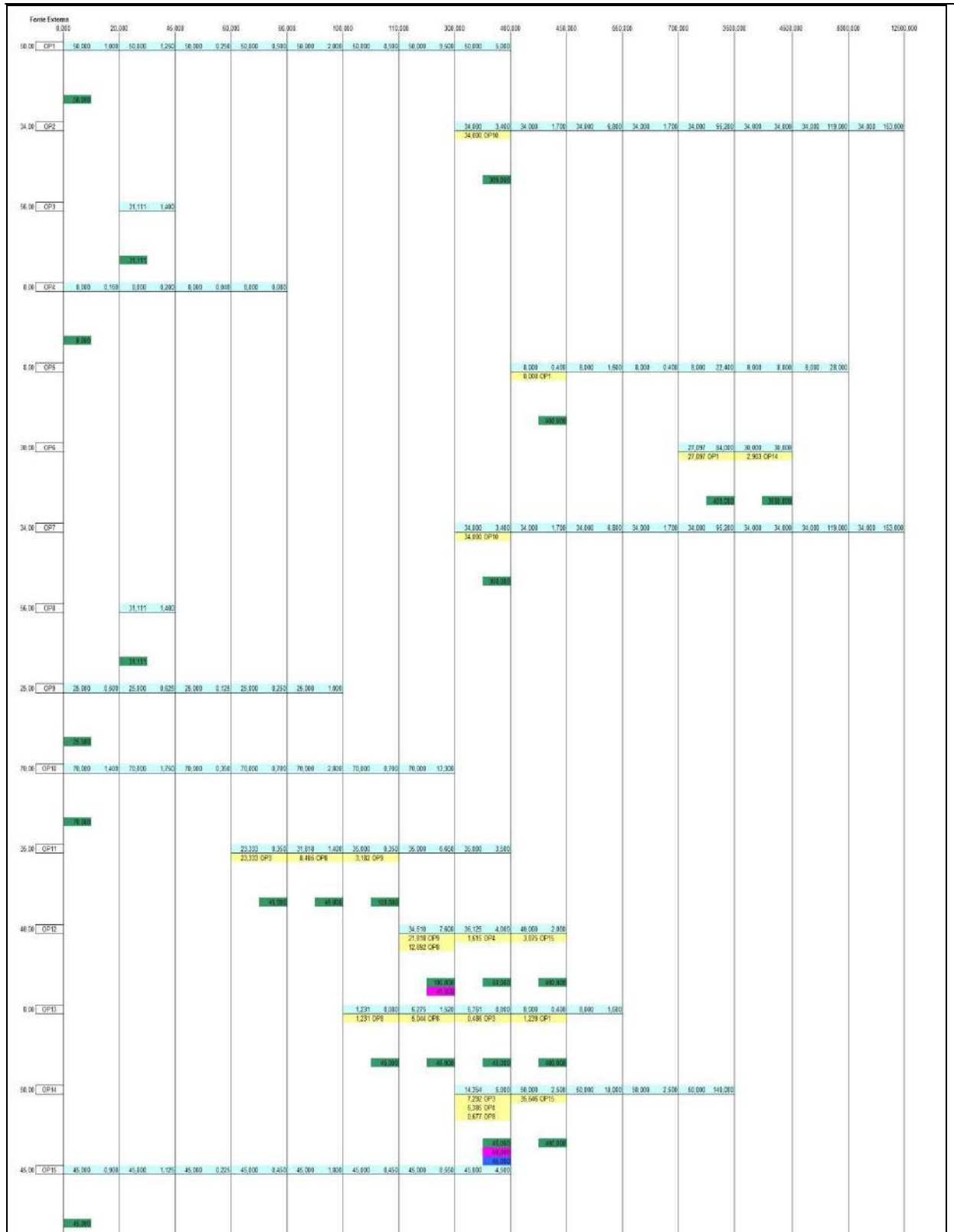
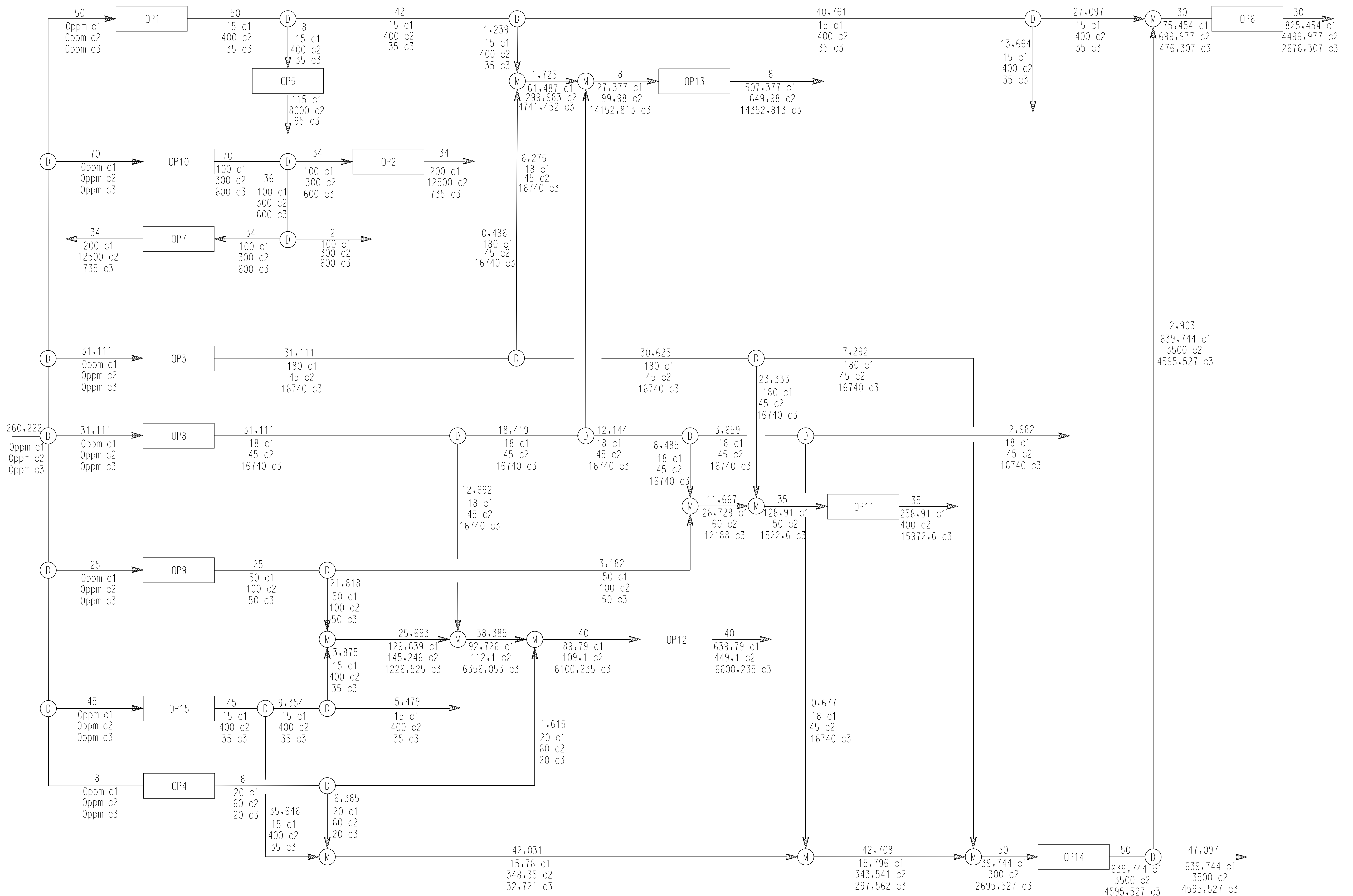


Figura 4.33 – DFA grado – Todas as plantas – c2

FIGURA 4.34 - FLUXOGRAMA GERADO - CONSIDERANDO C2



Esta proposta gerou um consumo de água limpa de 260,222 ton/h, o que representa uma redução de 38% em relação ao cenário 1.

Quando comparado aos casos apresentados em Chen et al(2010), este caso apresentou uma redução de 28% em relação ao cenário 2, e uma redução de 26,5% em relação ao cenário 3.

Esta redução no consumo, apesar de ter sido menor do que a redução apresentada no cenário 6, também foi significativa. Porém, ocorreram violações nas concentrações máximas de entrada:

- As concentrações máximas de entrada de c1 e c3 foram violadas na operação 2;
- As concentrações máximas de entrada de c1 e c3 foram violadas na operação 7;
- As concentrações máximas de entrada de c1 e c3 foram violadas na operação 11;
- As concentrações máximas de entrada de c1 e c3 foram violadas na operação 12.

Assim como no cenário anterior, a utilização de regeneradores também pode ser recomendada como uma solução possível.

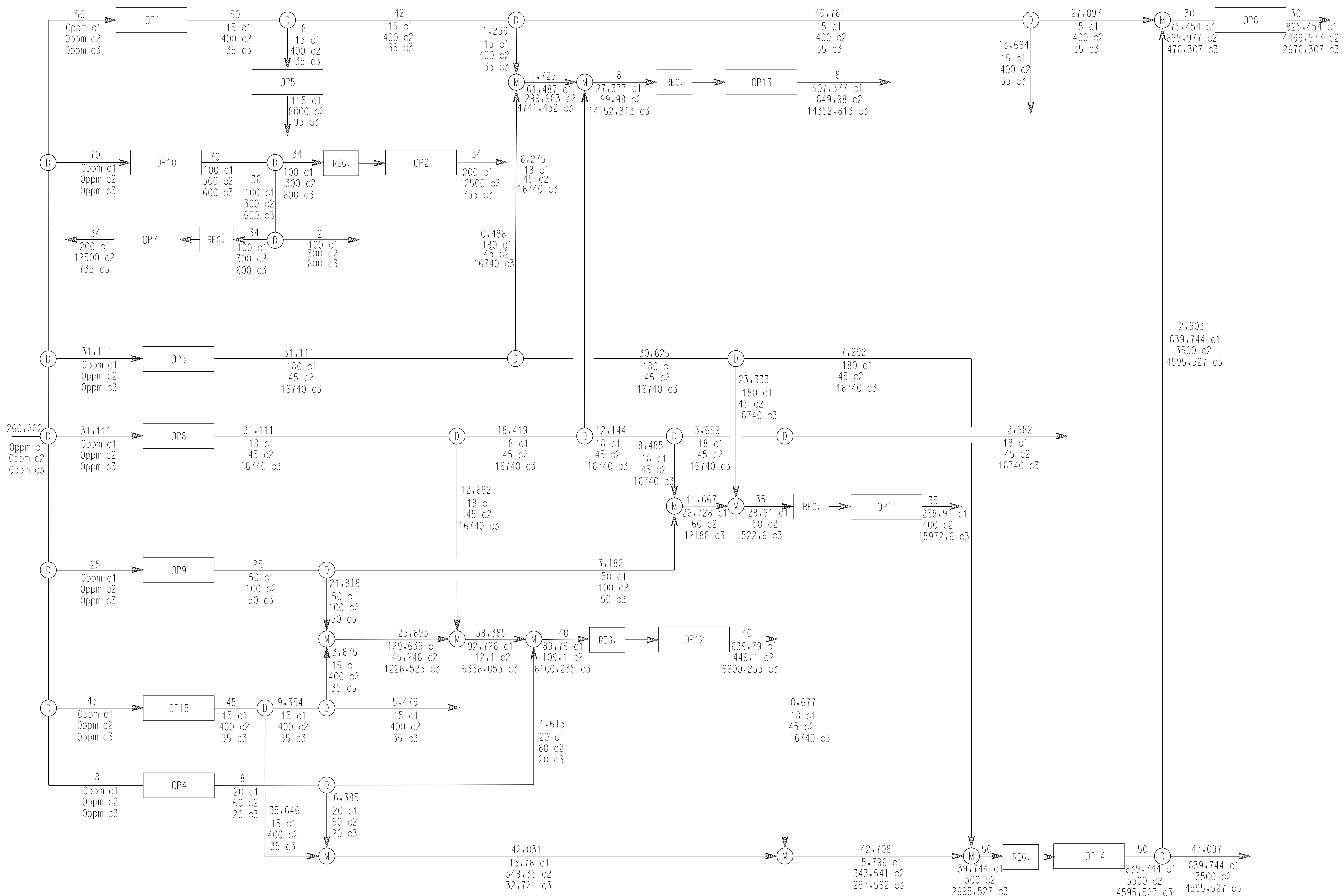
A eficiência requerida para os regeneradores está ilustrada na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Eficiência requerida para os regeneradores – Cenário 7

Operação	Contaminante	Eficiência requerida(%)
2	c1	80
7	c1	80
	c3	92,5
11	c1	84,48
	c3	96,72
12	c1	44,31
	c3	96,72

Assim um fluxograma com o uso de regeneradores é proposto há Figura 4.35.

FIGURA 4.35 - FLUXOGRAMA GERADO - CONSIDERANDO C2 - COM REGENERADOR



4.3.5 – Cenário 8 - Reúso com integração direta entre as plantas - contaminante c3

Novamente o DFA foi aplicado para o cenário inicial, integrando as 3 plantas. Neste estudo, foram consideradas somente as concentrações limite do contaminante c3, e as concentrações dos outros contaminantes foram, como nos cenários 6 e 7, determinadas pelo balanço de massa, após a elaboração dos fluxogramas.

Assim como nos outros exemplos, o programa MINEA foi alimentado com as vazões limites de cada operação e com as concentrações limites do contaminante c3 para cada uma delas, conforme Figura 4.35.

operação	Dados				Vazão disponível	perda/ganho	Nome	Pode ter uma vazão menor?
	F (t/h)	Ce (ppm)	Cs (ppm)	Δm (kg/h)				
OP1	50,00	0,00	35,00	1750,00	50,000			
OP2	34,00	45,00	180,00	4590,00	32,954			
OP3	56,00	200,00	9500,00	520800,00	56,000			
OP4	8,00	0,00	20,00	160,00	8,000			
OP5	8,00	60,00	120,00	480,00	5,647			
OP6	30,00	800,00	3000,00	66000,00	30,000			
OP7	34,00	45,00	180,00	4590,00	31,846			
OP8	56,00	200,00	9500,00	520800,00	56,000			
OP9	25,00	0,00	50,00	1250,00	25,000			
OP10	70,00	0,00	600,00	42000,00	70,000			
OP11	35,00	50,00	800,00	26250,00	35,000			
OP12	40,00	200,00	700,00	20000,00	40,000			
OP13	8,00	200,00	400,00	16000,00	4,000			
OP14	50,00	600,00	2500,00	95000,00	50,000			
OP15	45,00	0,00	35,00	1575,00	45,000			
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								

Gerar Linha Base de Concentrações

Calcular

Gerar Saída

Figura 4.35 – Planilha com os dados alimentados para a geração do DFA – Todas as plantas - c3

A partir destes dados alimentados, foi gerado o DFA para este caso, que pode ser visto na Figura 4.36. A partir deste DFA foi sintetizado o fluxograma da Figura 4.37.

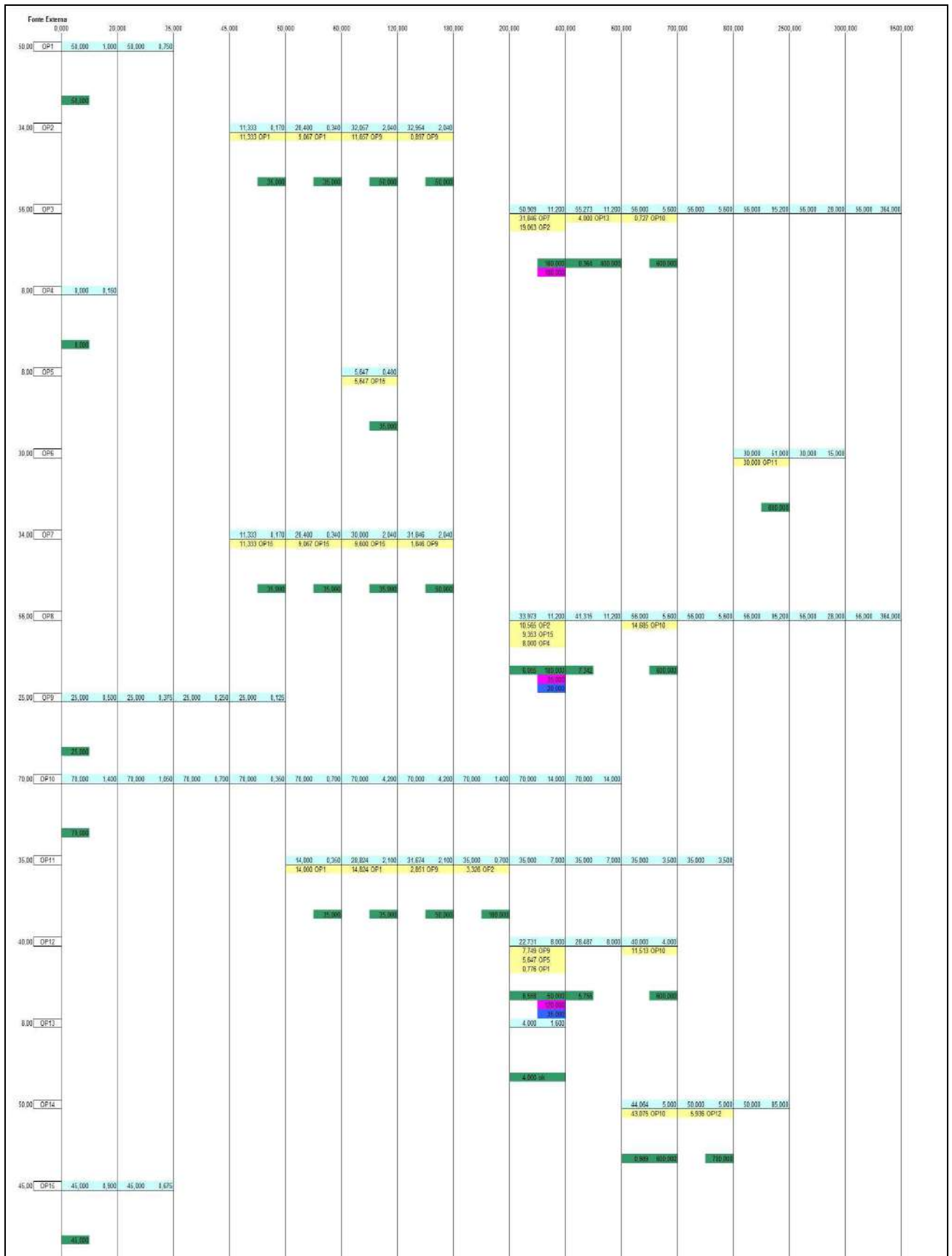
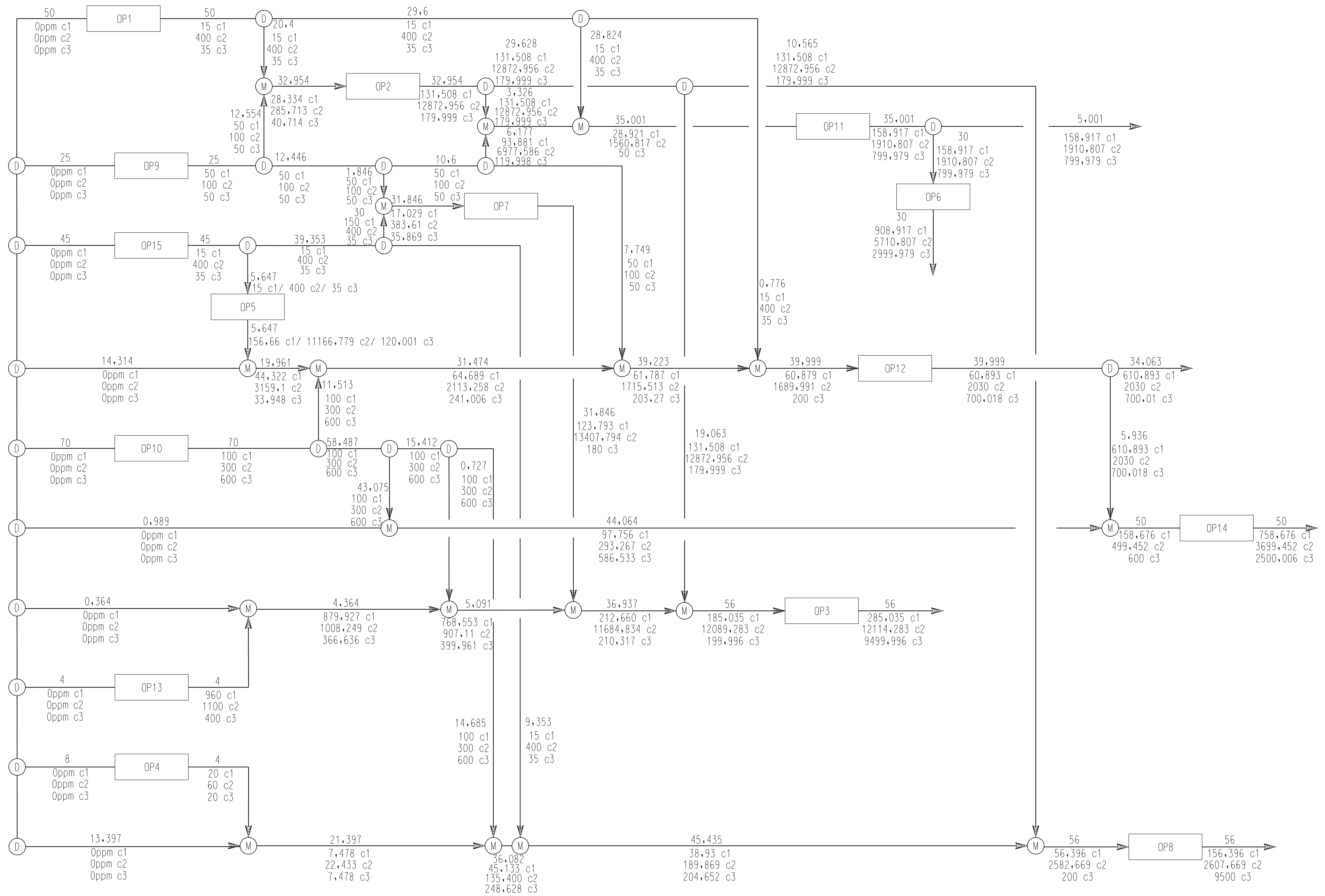


Figura 4.36 – DFA gerado – Todas as plantas – c3

FIGURA 4.37 - FLUXOGRAMA GERADO - CONSIDERANDO C3



Para este cenário, o consumo total de água limpa para a unidade seria de 231,064 ton/h, reduzindo assim em 45% o consumo em relação ao cenário 1.

Comparando com os casos de Chen et al.(2010), obtém-se uma redução de 36% em relação ao cenário 2, e 35% em relação ao cenário 3.

Mas, assim como nos cenários 6 e 7, houve violação da concentração máxima de entrada para algumas operações:

- A concentração máxima de entrada do contaminante c1 foi violada na operação 2;
- As concentrações máximas de entrada dos contaminantes c1 e c2 foram violadas na operação 3;
- As concentrações máximas de entrada dos contaminantes c1 e c2 foram violadas na operação 6;
- A concentração máxima de entrada do contaminante c2 foi violada na operação 7;
- A concentração máxima de entrada do contaminante c2 foi violada na operação 8;
- As concentrações máximas de entrada dos contaminantes c1 e c2 foram violadas na operação 12;
- A concentração máxima de entrada do contaminante c2 foi violada na operação 14;

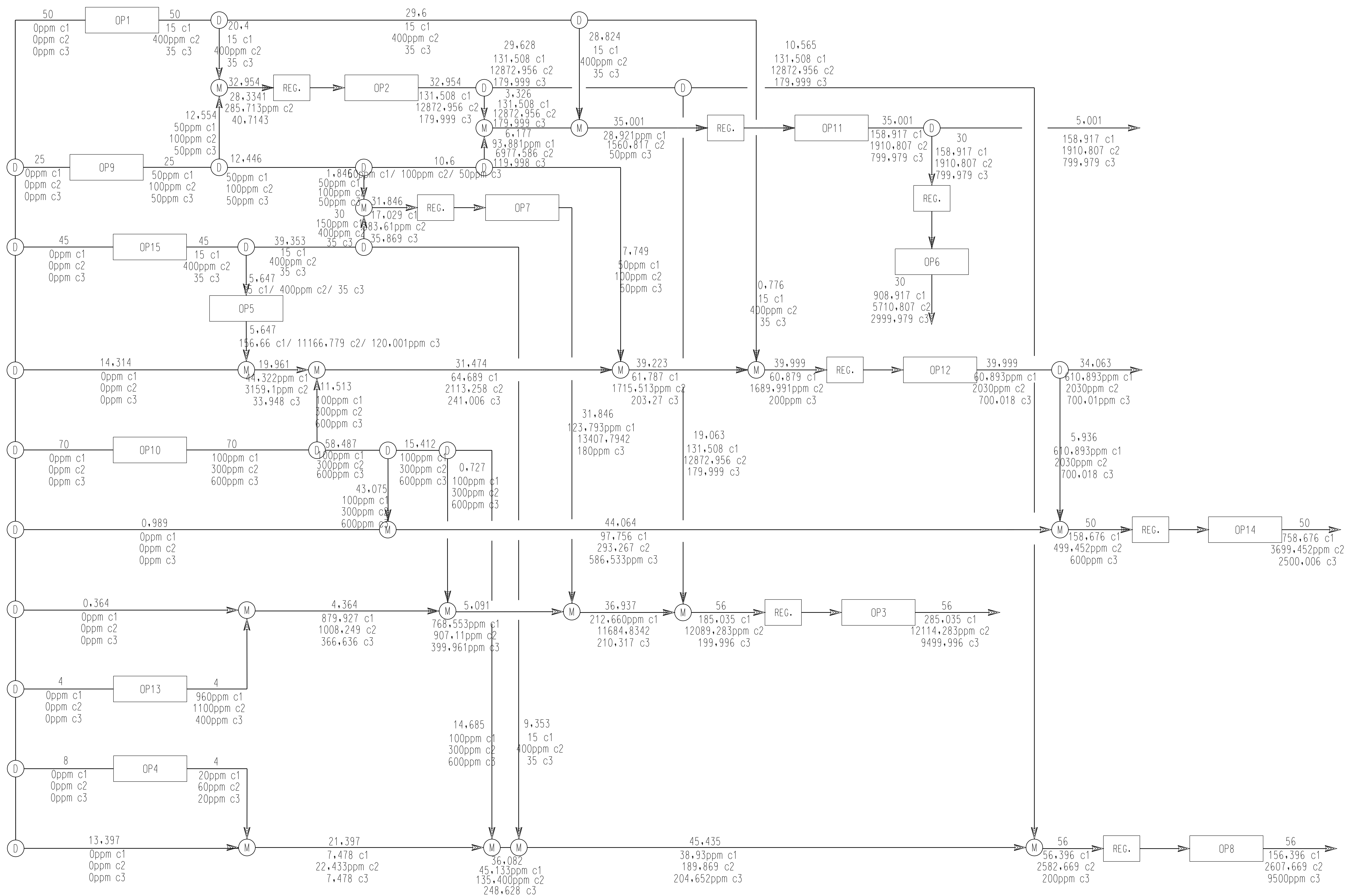
E, assim como nos outros exemplos, o uso de regeneradores, cujas eficiências estão ilustradas na Tabela 4.8, pode ser recomendado como uma das possíveis soluções, já que o consumo de água limpa foi reduzido significativamente.

Tabela 4.8 – Eficiência requerida para os regeneradores – Cenário 8

Operação	Contaminante	Eficiência requerida (%)
2	c1	29,41
3	c1	35,15
	c2	98,35
6	c1	5,61
	c2	63,37
7	c2	21,85
8	c2	99,22
12	c1	17,87
	c2	93,49
14	c2	39,93

O fluxograma, incluindo os regeneradores, está apresentado na Figura 4.38.

FIGURA 4.38 - FLUXOGRAMA GERADO - CONSIDERANDO C3 - COM REGENERADOR



4.4 – Resultados

Os resultados obtidos neste estudo de minimização do consumo de água estão resumidos na Tabela 4.9 e no gráfico da Figura 4.39.

Tabela 4.9 – Resultados para todos os cenários

Cenário	Consumo de água (ton/h)	Vazão de água destinada ao Trat. Final (ton/h)	Vazão de água regenerada (ton/h)
1	421,8	421,8	0
2	362	362	0
3	354,5	354,5	0
4	344,508	344,508	84,691
5	426,106	426,106	0
6	211,15	211,15	319,091
7	260,222	260,222	201
8	231,064	231,064	331,8

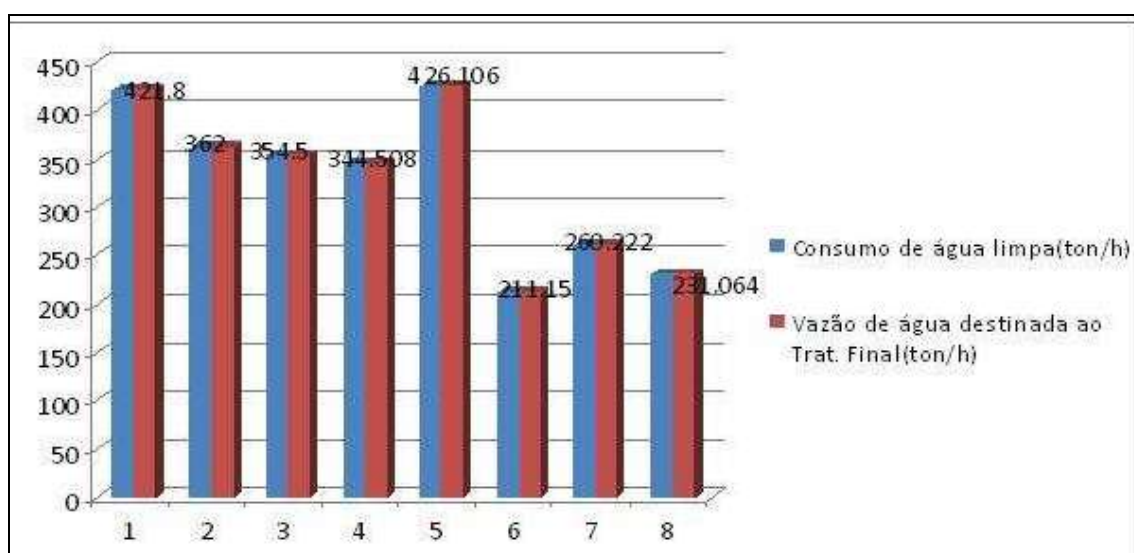


Figura 4.39 – Gráfico – Resultados – Todos os cenários

A partir destes resultados, observa-se que o cenário 6 e o cenário 5 apresentaram, respectivamente, o menor e o maior consumo de água. O DFA reduziu o consumo de água, porém cabe ressaltar que para atingir uma redução considerável no consumo, foi necessário utilizar regeneradores, diferentemente de Chen et al.(2010), cujas propostas de reuso não requeriam regeneração.

Uma análise econômica será realizada no capítulo 6 a partir dos resultados obtidos neste capítulo.

5–ESTUDO DE CASO PARA UM PROCESSO EM BATELADA

Neste capítulo serão realizados estudos de caso para dois diferentes processos que trabalham em regime de batelada. A metodologia do DFA será aplicada a estes casos para que seja avaliada a possibilidade de minimizar o consumo de água limpa para cada um deles. Dois casos existentes na literatura serão apresentados e o Diagrama de Fontes de Água será proposto como uma opção de metodologia de reúso, avaliando a possibilidade de utilizar uma nova configuração para o processo e diminuir a quantidade de água limpa requerida para cada batelada.

Para os estudos de caso em batelada, o programa MINEA não pode ser utilizado, já que só se aplica a processos contínuos. O DFA nestes casos, terá que ser feito sem o auxílio de nenhum programa.

Todos os cenários apresentados neste capítulo, para os dois casos estão ilustrados na Figura 5.1.

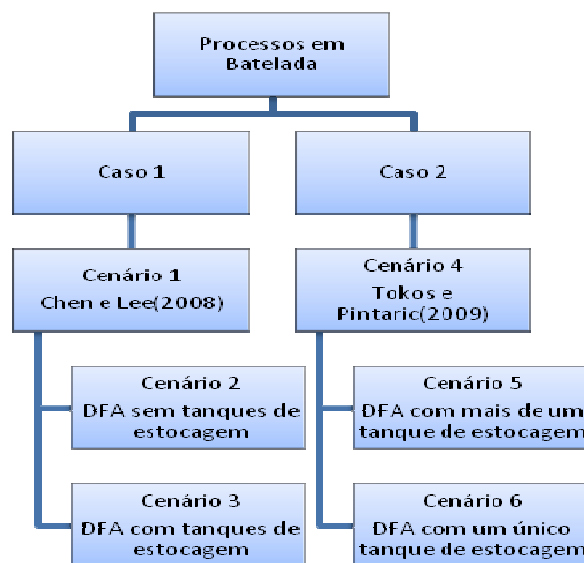


Figura 5.1 – Cenários apresentados – Processos em Batelada

5.1 – Apresentação do Cenário 1 – Caso 1

O primeiro caso a ser estudado foi retirado de Chen e Lee (2008), em que uma unidade hipotética foi apresentada. Esta unidade possui cinco operações que utilizam água e operam em regime de batelada. Para cada operação foram apresentadas as concentrações máximas de entrada ($C_{e,max}$) e saída ($C_{s,max}$) e a massa trocada de contaminante (Δm). Foram apresentados também os intervalos de tempo de *input* e *output*, ou seja, os intervalos de tempo em que as operações estão sendo, respectivamente, abastecidas e descarregadas.

Estas informações fornecidas em Chen e Lee(2008) estão apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Dados para a unidade hipotética apresentada em Chen e Lee (2008)

Operação	Intervalo de <i>input</i> (h)	Intervalo de <i>output</i> (h)	Ce, max(kg sal/kg água)	Cs, max(kg sal/kg de água)	Δm (ton)
1	0-1	4-5	0	0,2	4
2	0-0,5	4,5-5	0,25	0,5	4
3	5-6,5	5-6,5	0,1	-	0
4	2-2,5	6,5-7	0,25	0,4	3,6
5	7-8,5	7-8,5	0,1	-	0,3

Nas operações 3 e 5, as massas de contaminantes trocadas são desprezíveis, e estas operações possuem uma vazão mínima requerida de 15 toneladas, para cada uma delas.

Para este estudo de caso serão consideradas bateladas não-cíclicas sem reciclo, ou seja, a água que sai ao final de uma operação não pode ser retornada para o início da mesma operação e, se um tanque de estocagem for utilizado, a água que sai do tanque de estocagem não pode retornar para o mesmo tanque.

Em Chen e Lee(2008), o consumo de água limpa para bateladas não-cíclicas sem reciclo foi de 44,5 toneladas para cada batelada.

Os intervalos de tempo de cada operação foram apresentados em Chen e Lee(2008). Estes intervalos estão representados na Figura 5.2.

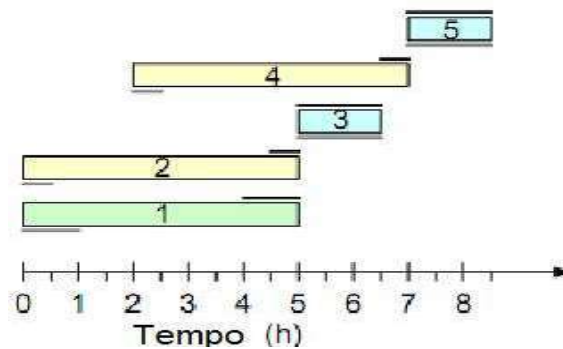


Figura 5.2 – Intervalos de tempo – Caso 1

O método DFA será aplicado para o caso acima para tentar minimizar a quantidade de água limpa requerida para cada batelada nesse processo. Porém, para a aplicação do DFA é preciso conhecer a vazão limite de cada uma das operações. Neste caso, como trata-se de batelada, ao invés de vazão limite utilizaremos a quantidade de água necessária, expressa em

toneladas. Como esta quantidade não foi informada em Chen e Lee (2008), é preciso calculá-la, como foi feito no item 4.2.

5.2 – Cálculo da vazão limite para cada operação do caso 1

Para as operações 3 e 5 a massa de contaminante trocada é desprezível, por isso não foram informadas suas concentrações de saída. Para estas operações a quantidade de água necessária não será calculada, mas será utilizada como vazão na implementação do DFA, a quantidade de água requerida informada: 15 toneladas para cada uma delas.

Para as operações 1, 2 e 4, será calculada a quantidade de água necessária para cada operação através da Equação 4.1 utilizada no item 4.2.

$$f_k = \Delta m_i / (C_{s,i} - C_{e,i})$$

Equação 4.1

Onde f_k neste caso não representa a vazão limite, mas a quantidade de água para cada operação, já que se trata de um processo em batelada.

Assim, analogamente ao item 4.2, a quantidade de água para as operações 1, 2 e 4 foram calculadas, conforme Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Dados com quantidade de água – Caso 1

Operação	Intervalo de <i>input</i> (h)	Intervalo de <i>output</i> (h)	C _e , max(kg sal/kg água)	C _s , max(kg sal/kg de água)	Δm(ton)	f _k (ton)
1	0-1	4-5	0	0.2	4	20
2	0-0.5	4.5-5	0.25	0.5	4	16
3	5-6.5	5-6.5	0.1	-	0	15
4	2-2.5	6.5-7	0.25	0.4	3.6	24
5	7-8.5	7-8.5	0.1	-	0.3	15

5.3 – Estudo de caso – Caso 1

Para aplicar a metodologia do DFA em um sistema não-contínuo, é preciso considerar os intervalos de tempo em que as operações são iniciadas e finalizadas, para avaliar se o reúso é possível.

Em um processo em batelada, a corrente de saída de uma operação só pode ser reutilizada em outra se a primeira operação já tiver sido finalizada, porque neste tipo de operação a corrente de saída de uma operação só está disponível ao fim da operação.

Outro fator a ser considerado no estudo de caso é a presença ou não de tanques de estocagem. O fato de haver ou não tanques de estocagem faz diferença na aplicação do método, já que se não houver tanques de estocagem, a água que sai de uma determinada operação será descartada ao final do processo. Assim, se não houver um tanque onde a água que sai do processo possa ser estocada, a água que sai de uma operação só pode ser reutilizada em outra se a primeira for finalizada exatamente no momento em que a outra está se iniciando. Se existem um ou mais tanques de estocagem no processo, água que sai de uma operação pode ser estocada no momento em que a operação terminou, e como a água pode ser armazenada, esta pode ser reutilizada em um processo que se inicie horas depois.

Para este estudo, serão avaliadas duas possibilidades de aplicação do DFA: na primeira não consideraremos o uso de tanques de estocagem, e na segunda o uso de tanques de estocagem será considerado.

5.3.1 – DFA sem o uso de tanques de estocagem – Cenário 2

Para este caso a metodologia do DFA foi aplicada, obtendo-se o diagrama representado na Figura 5.3.

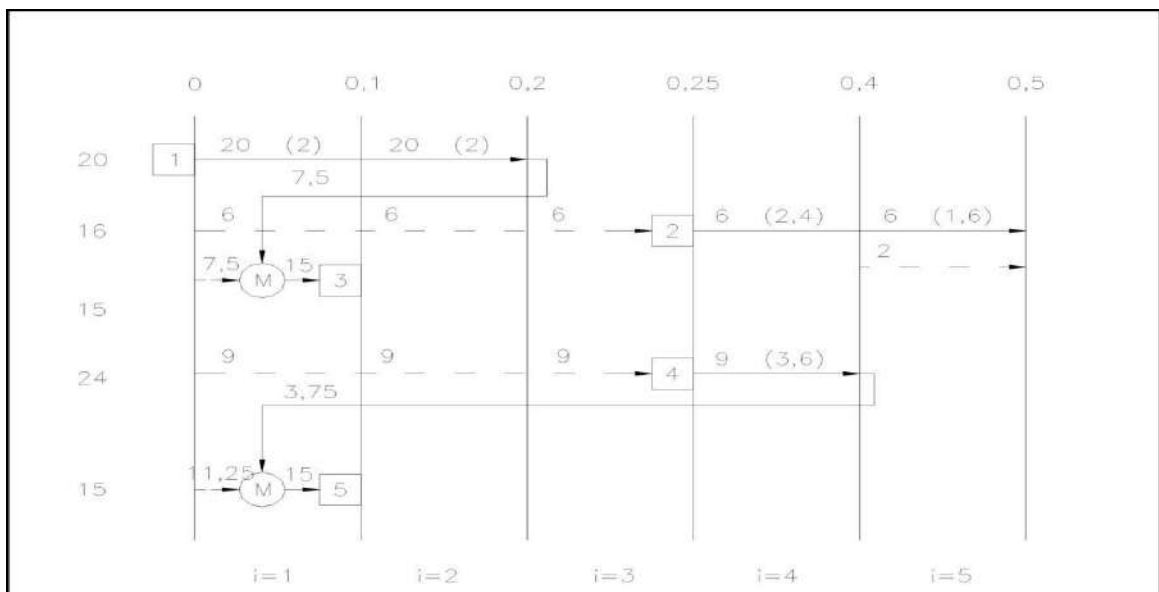


Figura 5.3 – DFA gerado para caso 1 – sem tanques de estocagem

Este DFA foi gerado de maneira similar ao DFA aplicado para processos contínuos, porém considerando os intervalos de tempo. Os intervalos de concentrações foram definidos, e as operações foram dispostas no diagrama de acordo com as concentrações limites de entrada e saída para o contaminante em cada operação.

Após esta etapa, o reúso foi avaliado de acordo com os intervalos de tempo em que as operações ocorrem.

Observa-se de acordo com o diagrama da Figura 5.2, que as primeiras operações a serem iniciadas são as operações 1 e 2. Ambas se iniciam no intervalo $t=0h$, e os intervalos de tempo de *input* para as operações 1 e 2 são $0h-1h$ e $0h-0,5h$, respectivamente. Assim, não existe nenhuma operação finalizada no momento em que estas se iniciam. Logo a única fonte disponível de água neste caso é a fonte externa.

O mesmo raciocínio é válido para a operação 4. O intervalo de *input* para esta operação é de $2h-2,5h$. Neste caso, também não existem operações finalizadas no início dessa operação, e a única fonte disponível a ser utilizada é a fonte externa.

Seguindo a ordem cronológica, tem-se a operação 3 que possui um tempo de *input* de $5h-6,5h$. No instante $t=5h$ esta operação se inicia, e nesse mesmo instante são finalizadas as operações 1 e 2. Assim, pode-se reutilizar a água que sai da operação 1 ou a que sai da operação 2. Porém, a operação 3 possui uma restrição que exige que sua concentração máxima de entrada seja $0,1 \text{ kg sal/ kg água}$. E a água na saída das operações 1 e 2 possuem concentrações de $0,2$ e $0,5 \text{ kg sal/kg água}$, respectivamente. Sendo assim, nenhuma destas poderia ser diretamente reutilizada na operação 3, pois violariam a concentração máxima de sal na entrada.

Para não violar esta concentração máxima, a saída de uma destas operações será misturada à água limpa antes de entrar na operação 3, até que esta saída seja diluída até a concentração máxima permitida na operação 3 ($0,1 \text{ kg sal/kg água}$).

Como a operação 1 sai a uma concentração menor que a operação 2, ela será utilizada, pois como a concentração de saída é menor, será necessária uma menor quantidade de água limpa para fazer com que esta água chegue à concentração necessária para ser utilizada na operação 3.

Como a quantidade de água necessária na operação 3 é de 15 toneladas, podemos realizar o seguinte cálculo para determinar a quantidade de água que sai da operação 1, a qual deverá ser utilizada para que a menor quantidade de água limpa seja necessária:

$$(\text{Água da op1}) \cdot 0,2 + (\text{Água limpa}) \cdot 0 = 15 \cdot (0,1)$$

$$(\text{Água da op1}) = 15 \cdot (0,1) / 0,2$$

$$(\text{Água da op1}) = 7,5 \text{ toneladas}$$

Logo, a quantidade de água limpa a ser misturada com a saída da operação 1 é:

$$(\text{Água limpa}) = 15 - 7,5 = 7,5 \text{ ton}$$

Seguindo na ordem dos intervalos de tempo, tem-se a operação 5, cujo tempo de *input* é de 7-8,5h. Como neste caso tanques de estocagem não estão sendo considerados, só podemos reutilizar na operação 5 a água que sai de operações que terminam exatamente no instante em que esta começa. De acordo com este critério, encontra-se disponível para reutilização a operação 4, que termina em $t=7h$. Porém, a concentração de saída da operação 4 é de 0,4 kg sal/kg água, o que violaria a concentração máxima de entrada na operação 5 se a reutilização fosse feita diretamente.

Assim, é preciso fazer como no reúso da operação 1 na operação 3, ou seja, misturar a saída da operação 4 com a água limpa vinda da fonte externa, para que a concentração atingida seja de 0,1 kg sal/kg água. Somente quando esta concentração for atingida é que esta água deve ser reutilizada na operação 5.

Como feito anteriormente, será determinada a quantidade de água vinda da operação 4 que requer o mínimo de água limpa da fonte externa para chegar à concentração necessária:

$$(\text{Água da op4}) \cdot 0,4 + (\text{Água limpa}) \cdot 0 = 15 \cdot (0,1)$$

$$(\text{Água da op4}) = 15 \cdot (0,1) / 0,4$$

$$(\text{Água da op1}) = 3,75 \text{ toneladas}$$

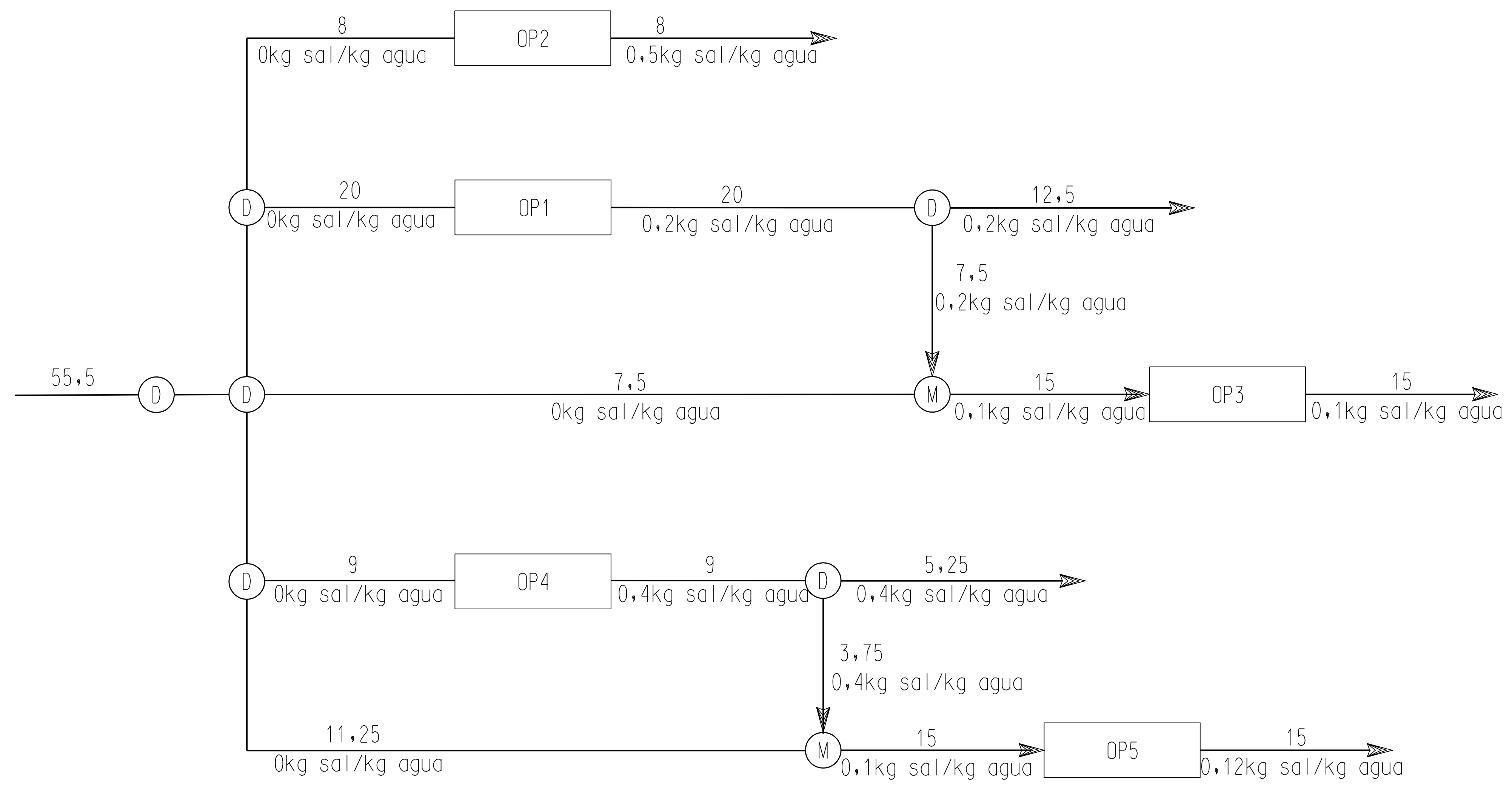
Logo, a quantidade de água limpa requerida foi:

$$(\text{Água limpa}) = 15 - 3,75 = 11,25 \text{ ton}$$

A partir do desenvolvimento acima foi obtido o DFA ilustrado na Figura 5.3.

E o diagrama obtido pode ser descrito pelo fluxograma da Figura 5.4 que propõe uma nova configuração para o sistema.

FIGURA 5.4 - FLUXOGRAMA GERADO - SEM TANQUE DE ESTOCAGEM



O consumo para este caso foi de 55,75 toneladas de água. Esta proposta apresentou consumo de água limpa maior do que o cenário 1, o que faz com que esta aplicação do DFA sem a utilização de tanques de estocagem não seja recomendada para este caso.

A seguir, a aplicação do DFA será explorada para este mesmo caso. Porém, admitindo a utilização de tanques de estocagem.

5.3.2 – DFA com o uso de tanques de estocagem – Cenário 3

O método do DFA foi aplicado novamente para este caso. Desta vez, considerando a possibilidade de utilização de tanques de estocagem. O resultado encontra-se apresentado no diagrama da Figura 5.5.

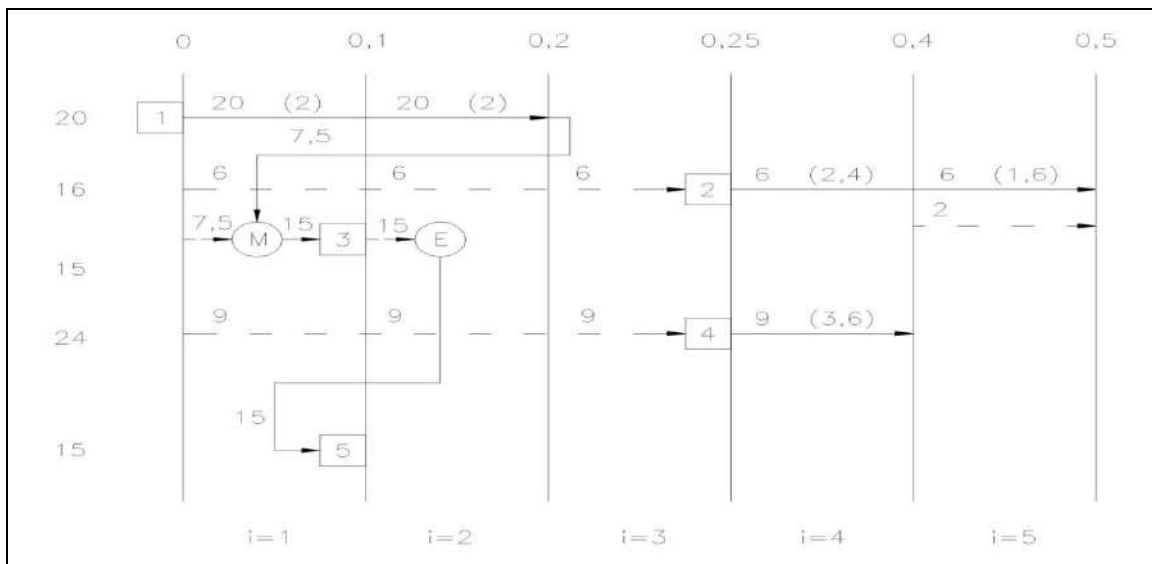


Figura 5.5 – DFA gerado para o caso 1 – com uso de tanques de estocagem

Para a elaboração deste DFA, o procedimento foi o seguinte:

Para as operações 1, 2 e 4, a determinação da água de entrada foi feita exatamente como no item 4.3.1. Como não existem outras operações finalizadas quando estas se iniciam, a única fonte de água disponível é a fonte externa.

Para a operação 3, a presença do tanque de estocagem não afetou a elaboração do DFA. Para o seu intervalo de tempo de *input*, as únicas operações disponíveis continuam sendo as operações 1 e 2. Então, o reúso é feito da mesma forma do que no item 5.3.1: 7,5 toneladas de água que saem da operação 1 se misturam com 7,5 toneladas de água limpa antes de entrar na operação 3. Para este reúso, a utilização de tanques de estocagem não é necessária, pois a operação 1 termina no instante em que a operação 3 se inicia. O reúso de água pode ser feito diretamente.

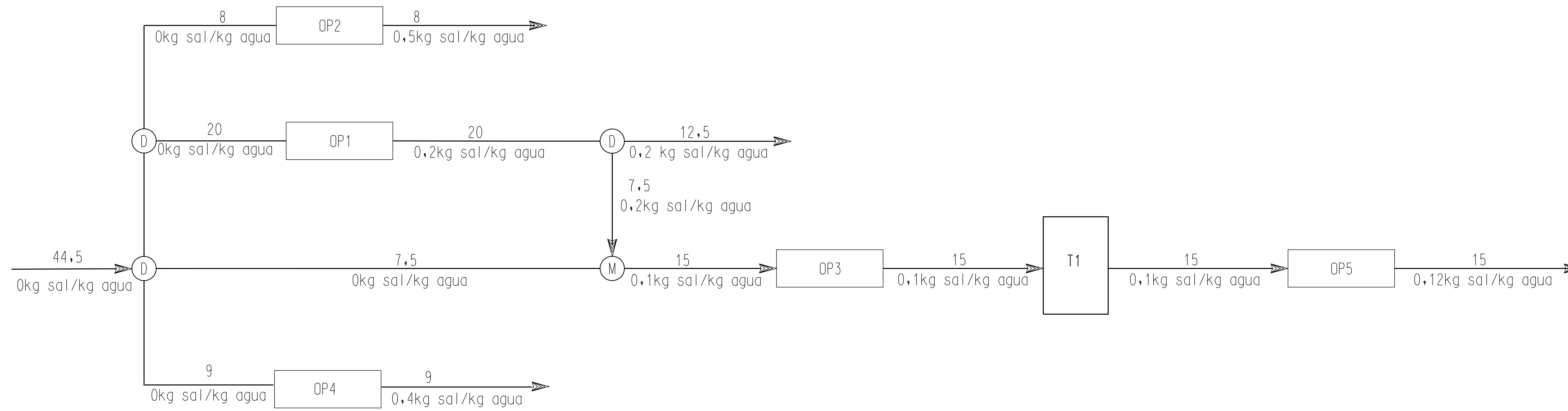
Já na operação 5, a possibilidade de se haver um tanque de estocagem gera um novo cenário: Agora, no tempo em que esta operação está iniciando, além de se ter disponível a saída da operação 4 que termina no instante em que a operação 5 começa, tem-se disponíveis também as saídas das operações 1, 2 e 3, que terminaram anteriormente. Porém, a saída da operação 1 só está disponível parcialmente, já que foi reutilizada na operação 3.

De todas estas possibilidades disponíveis, a saída da operação 3 é a única que possui uma concentração que não viola a concentração máxima de entrada na operação 5. Por isso, ela foi a corrente escolhida para ser reutilizada, já que nenhuma água limpa precisará ser utilizada para este reúso.

Desta forma, o Diagrama de Fontes de Água foi gerado, e um fluxograma com uma nova proposta de reúso é apresentada na Figura 5.6.

Este cenário apresentou um consumo requerido de água limpa de 44,5 toneladas por batelada. Este consumo tem o mesmo valor do consumo requerido para a proposta apresentada no cenário 1.

FIGURA 5.6 - FLUXOGRAMA GERADO - COM TANQUE DE ESTOCAGEM



5.4 – Resultados – Caso 1

Os resultados obtidos no estudo do caso 1 podem ser resumidos na Tabela 5.3 e na Figura 5.7.

Tabela 5.3 – Resultados para Batelada – Caso 1

Cenário	Consumo de água por batelada	Quantidade de água destinada ao tratamento	Tanques de estocagem
1	44,5	44,5	1 tanque com capacidade para 15 toneladas de água
2	55,75	55,75	-
3	44,5	44,5	1 tanque com capacidade para 15 toneladas de água

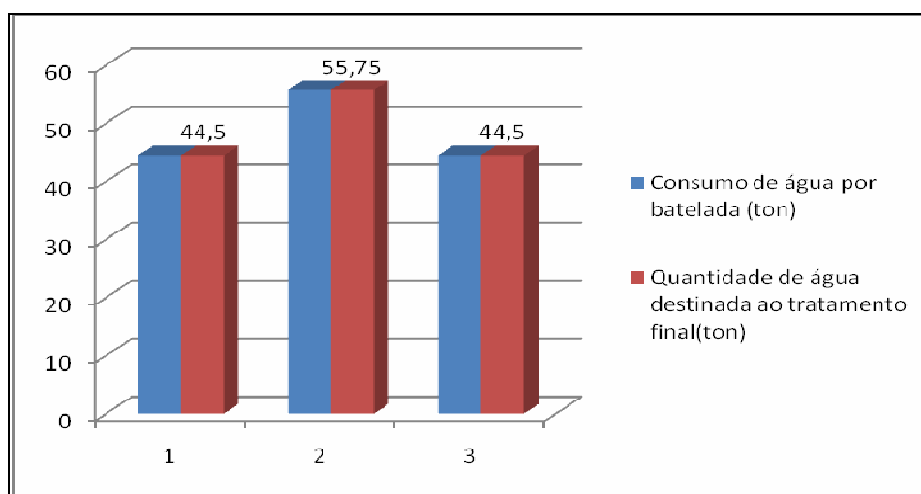


Figura 5.7 – Resultados para Batelada – Caso 1

Nota-se que o DFA com tanque de estocagem requer o mesmo consumo e a mesma capacidade para o tanque de estocagem que são requeridos pela metodologia apresentada em Chen e Lee. Contudo, o método do DFA apresenta a vantagem de possuir uma metodologia mais simples do que a utilizada no caso base.

5.5 – Apresentação do Cenário 4 – Caso 2

O segundo caso a ser estudado foi retirado de Tokos e Pintaric (2009), que propuseram uma estratégia de reúso, utilizando um modelo matemático desenvolvido por Kim e Smith (2004), para diversos setores de uma cervejaria. Para este estudo, será considerado apenas o setor de produção, que possui apenas operações que trabalham em regime de batelada.

O setor de produção é constituído por 6 processos não-contínuos e que consomem no total 1076 toneladas de água limpa por dia. Os dados limites de cada operação, divididos nos intervalos de tempo em que cada operação ocorre, são apresentados na Tabela 5.5, obtida de Tokos e Pintaric (2009).

Tabela 5.5 – Dados limite para as operações da unidade de produção

Operação (n)	Tempo de Intervalo	Concentração Limite (g/m ³)		G , MAX /t	Δt / h
		C IN, MAX	C OUT,		
1	1 (P1)	24,25	425	41	4
	2 (P2)	24,25	425	41	4
	3 (P3)	24,25	425	41	4
	4 (P4)	24,25	425	41	4
2	4 (P5)	100	299	261	4
3	1 (P6)	100	980	47,2	4
	2 (P7)	100	980	47,2	4
	3 (P8)	100	980	47,2	4
	4 (P9)	100	980	47,2	4
4	1 (P10)	100	330	46,2	4
	2 (P11)	100	330	46,2	4
	3 (P12)	100	330	46,2	4
	4 (P13)	100	330	46,2	4
5	2 (P14)	24,25	56	46,9	4
	4 (P15)	24,25	56	46,9	4
6	2 (P16)	100	329	115,3	4

O P1 é uma unidade de fervura do mosto, as operações 2 e 5 são sistemas de limpeza. Já nas operações 3 e 4, a água é utilizada para verter materiais no processo de batelada. E a operação 6 é uma operação de filtração.

Os resultados apresentados em Tokos e Pintaric (2009), incluindo os intervalos de tempo em que os processos ocorrem, estão representados pelo diagrama da Figura 5.8.

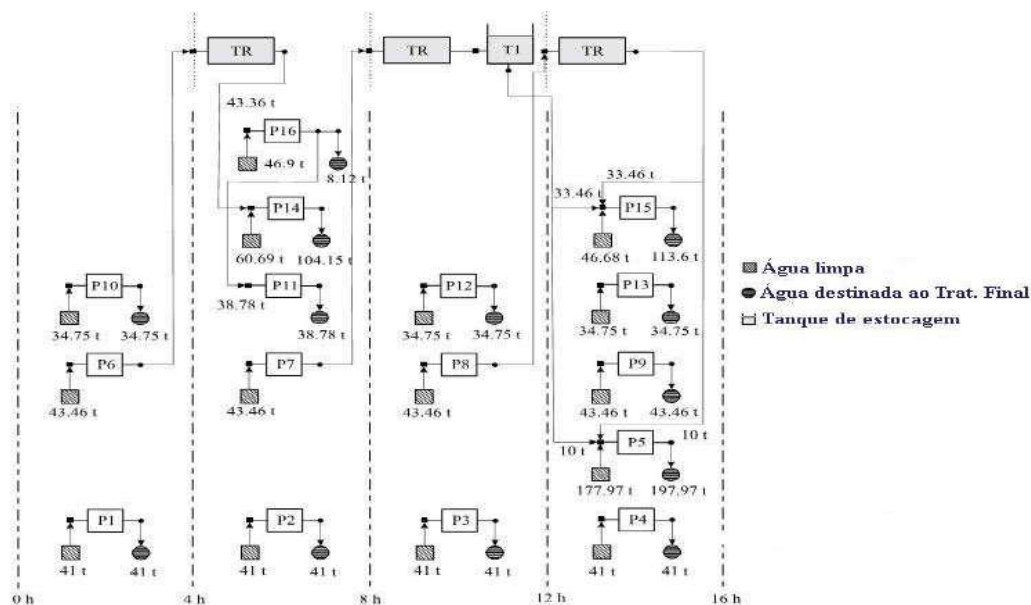


Figura 5.8 – Resultado do reuso aplicado em Tokos e Pintaric (2009)

A metodologia aplicada em Tokos e Pintaric (2009) reduziu o consumo de água a 774,33 toneladas por dia, gerando 774,33 toneladas de efluentes que serão destinados ao tratamento final de linha. Além disso, este procedimento requer o uso de unidades de tratamento da água, indicadas pela sigla TR. Passam pela regeneração nesse processo 130,38 toneladas de água, e é necessário utilizar um tanque com capacidade para 43,46 toneladas.

Com as informações contidas na Tabela 5.5. e na Figura 5.8, podemos montar uma planilha com os dados limites do cenário base, para a aplicação do DFA.

Tabela 5.6 – Dados para Cenário 4 - Batelada

Operação	Ce,	Cs,max(ppm)	Fk	Intervalo de tempo ti(h) -
1	24,25	425	41	0-16
2	100	299	261	12-16
3	100	980	47,2	0-16
4	100	330	46,2	0-16
5	24,25	56	46,9	4-8 e 12-16
6	100	329	115,3	4-8

A operação 5 é uma operação de limpeza que ocorre em dois intervalos de tempo distintos. Por isso, para a aplicação do DFA neste caso, essa operação será dividida em

duas: a operação 5 que ocorre no intervalo de 4h a 8h; e a operação 5', que ocorre no intervalo de 12h a 16h.

Assim, tem-se a Tabela 5.7 após essa modificação.

Tabela 5.7 – Dados para o Cenário 4 – Batelada - modificado

Operação	Ce,	Cs,max(ppm)	fk	Intervalo de tempo ti(h)- tf(h)
1	24,25	425	41	0-16
2	100	299	261	12-16
3	100	980	47,2	0-16
4	100	330	46,2	0-16
5	24,25	56	46,9	4-8
5'	24,25	56	46,9	12-16
6	100	329	115,3	4-8

A Figura 5.9 ilustra os intervalos de tempo para cada uma das operações.

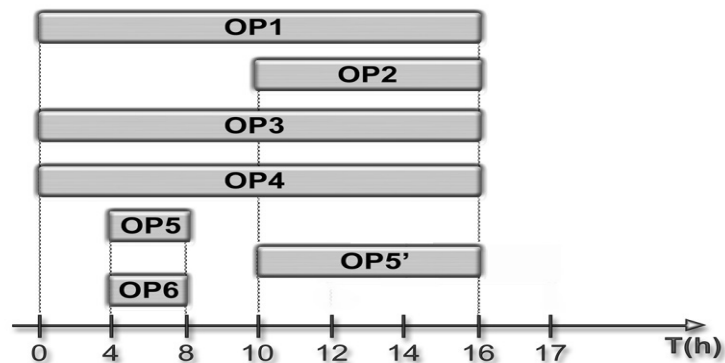


Figura 5.9 – Intervalos de tempo para o caso 2

5.6 – Estudo de caso – Caso 2

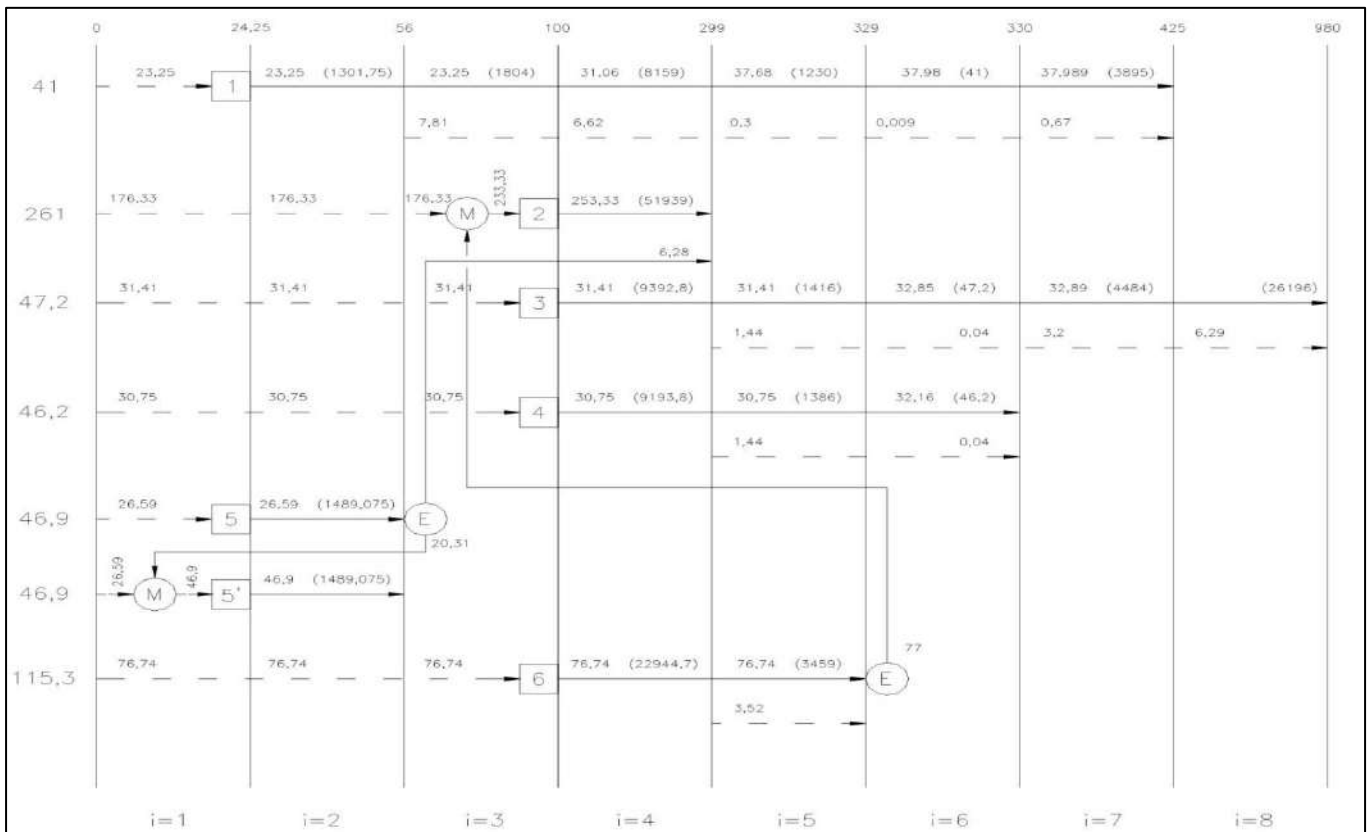
A seguir será elaborado um estudo em que o DFA será aplicado para o caso 2. Neste caso, não existe a possibilidade de aplicação do DFA sem a utilização de tanques de estocagem, pois não existem operações que terminam no mesmo instante em que outras começam. Desta forma, se não existem tanques de estocagem, não existe reúso.

Então serão avaliadas duas opções diferentes para este estudo: na primeira, o DFA será aplicado com a possibilidade de se utilizar mais de um tanque de estocagem; e na

segunda opção será utilizado apenas um único tanque de estocagem que receberá as correntes de saída de todas as operações que forem necessárias para o reúso.

5.6.1 –DFA com mais de um tanque de estocagem – Cenário 5

Para este caso, o DFA foi aplicado sendo considerada a possibilidade de utilizar um tanque de estocagem para a saída de cada operação, de modo que pudesse ser reutilizada em outra que se inicie em um instante posterior.



A Figura 5.10 ilustra a aplicação do DFA.

Figura 5.10 – DFA gerado para o cenário 5

Para a geração deste caso, o raciocínio foi análogo ao utilizado para montar o DFA para o caso 1:

Para as operações 1, 3, 4, 5 e 6, não existem outras fontes de água disponíveis, além da fonte externa. No momento em que estas operações são iniciadas, nenhuma outra foi finalizada. Assim, o reúso não é possível.

No instante $t=12$ h iniciam-se duas operações: operação 2 e operação 5'. Como os intervalos de tempo são os mesmos, avalia-se primeiro a operação 5', pois o início desta se encontra em um intervalo menor de concentração ($i=1$).

Quando a operação 5' se inicia tem-se disponíveis duas fontes de água: as operações 5 e 6, que terminaram em $t=8$ h. A saída de ambas viola a concentração máxima de entrada da operação 5'. A operação escolhida para o reúso foi a operação 5, já que possui menor concentração de saída que a operação 6, e por isso menos água limpa terá que ser misturada a essa corrente, para que se alcance a concentração de entrada máxima na operação 5.

Assim, pode-se calcular a quantidade de água saída da operação 5, que requer a mínima quantidade de água limpa a ser misturada para o reúso:

$$(\text{Água da op5}) \cdot 56 + (\text{Água limpa}) \cdot 0 = 46,9 \cdot (24,25)$$

$$(\text{Água da op5}) = 46,9 \cdot (24,25) / 56$$

$$(\text{Água da op5}) = 20,31 \text{ toneladas}$$

Logo, a quantidade de água limpa requerida foi:

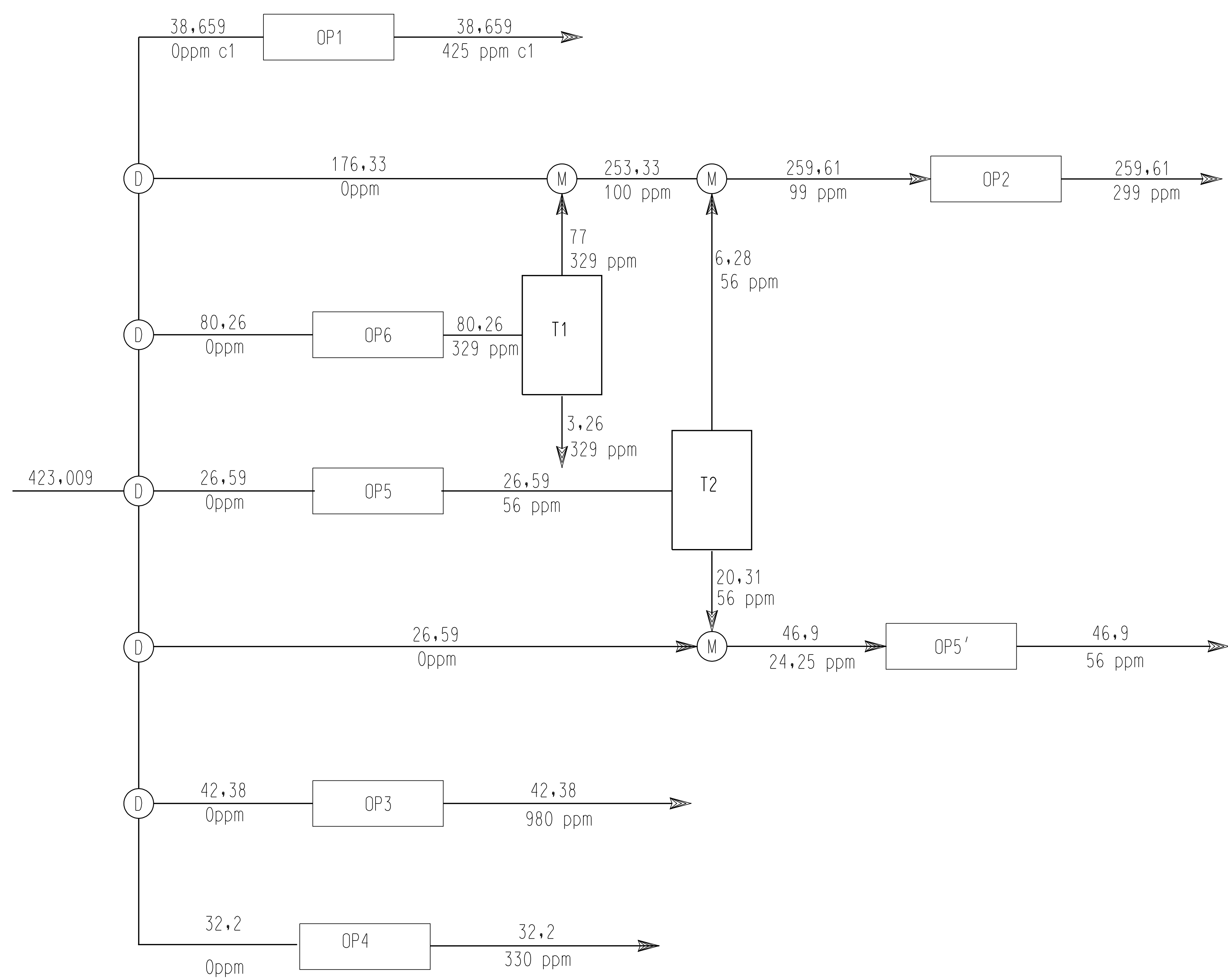
$$(\text{Água limpa}) = 46,9 - 20,31 = 26,59 \text{ ton}$$

No momento em que se inicia a operação 2 ($t=12$ h), tem-se duas fontes disponíveis de água: as operações 5 e 6, que terminaram em $t=8$ h. Opta-se pela operação 5, pois sua concentração de saída não viola a concentração máxima de entrada da operação 2. Toda a saída restante no tanque de estocagem da operação 5 (6,28 toneladas) foi utilizada, mas ainda assim não foi possível atingir a massa de contaminante trocada para esta operação. Então a entrada desta operação será complementada com o reúso vindo da operação 6. Como a saída da concentração 6 viola a concentração limite de entrada da operação 2, é preciso misturá-la com água limpa.

O cálculo das quantidades de saída da operação 6 e de água limpa foi feito como nos anteriores, e os valores necessários foram 77 toneladas para operação 6, e 176,33 toneladas de água limpa necessárias para a mistura antes do reúso.

O fluxograma obtido a partir deste DFA encontra-se apresentado na Figura 5.11.

FIGURA 5.11 - FLUXOGRAMA GERADO - 2 TANQUE DE ESTOCAGEM



Este cenário apresentou um consumo de água limpa de 423,009 toneladas por dia, e uma geração de 423,009 toneladas de efluente que serão destinados ao tratamento final.

O consumo de água foi 45,4% menor do que o consumo requerido para o cenário 4.

A seguir, o DFA será aplicado para este mesmo caso, porém considerando agora a possibilidade de utilizar apenas um único tanque de estocagem.

5.6.2 –DFA com apenas um tanque de estocagem – Cenário 6

A metodologia do DFA foi aplicada com a possibilidade de utilizar apenas um tanque de estocagem, e o resultado está ilustrado na Figura 5.12.

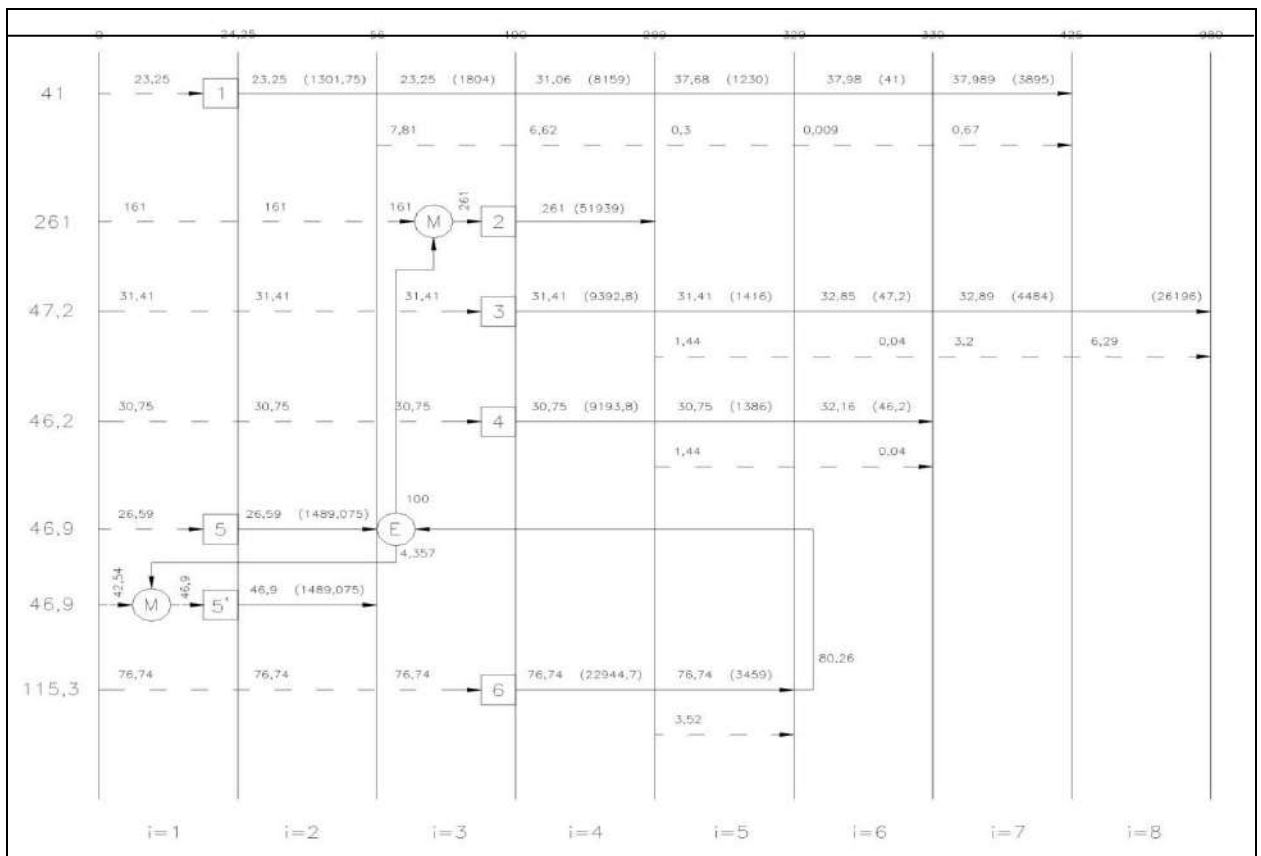


Figura 5.12 – DFA gerado – Cenário 6

Assim como no item anterior, as operações 1, 3, 4, 5 e 6 receberam água da fonte externa, e as saídas das operações 5 e 6 foram reutilizadas nas operações 2 e 5'.

Porém, desta vez, as saídas das operações 5 e 6 não foram estocadas em diferentes tanques. Ambas as saídas foram direcionadas para um mesmo tanque. Assim, foram

misturadas 26,59 toneladas de água a 56 ppm com 80,26 toneladas de água a 329 ppm, obtendo assim um tanque com 106,85 toneladas de água a 261 ppm.

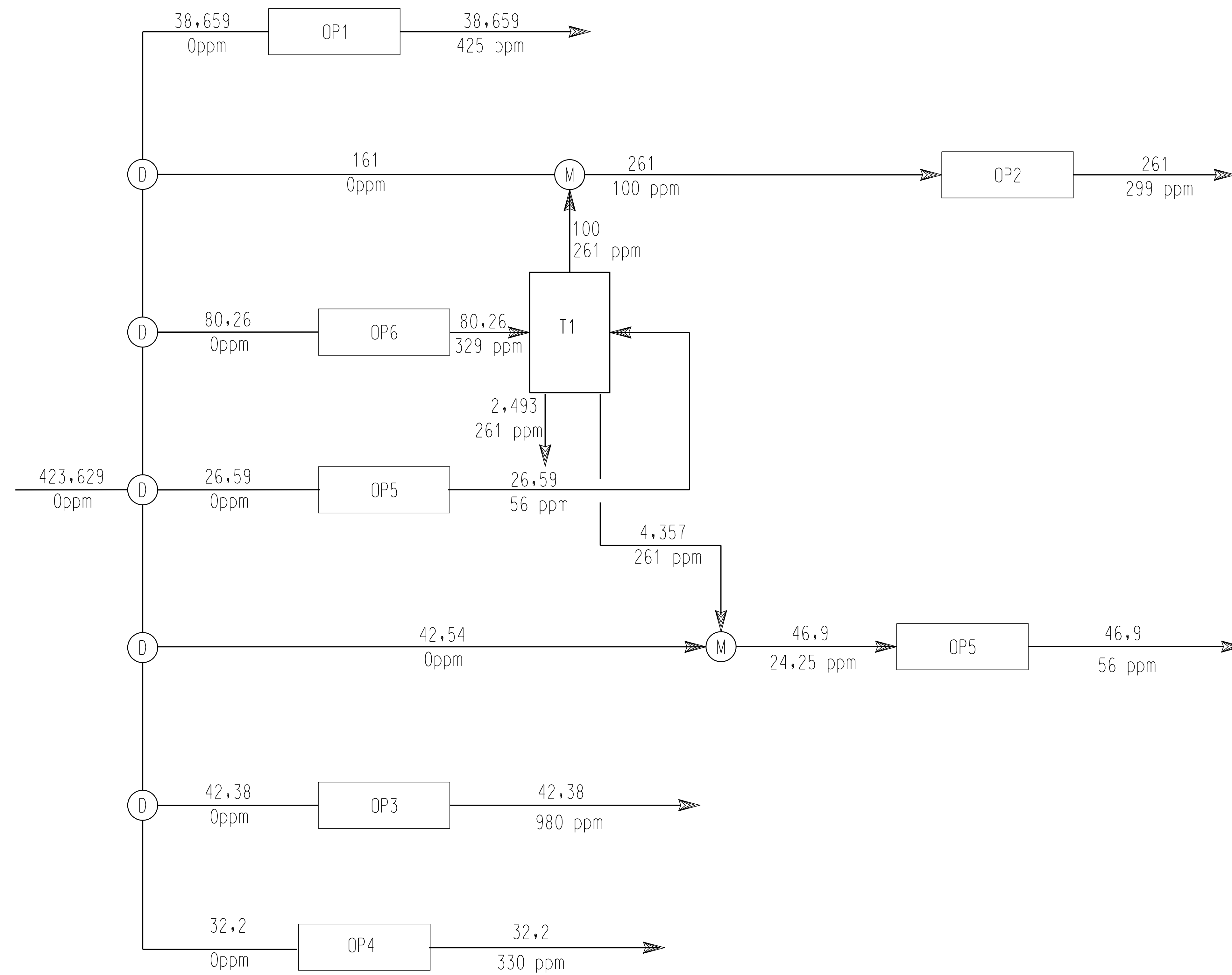
Com isso, a água estocada neste tanque em $t=8h$ é utilizada para alimentar as operações 2 e 5', que se iniciam em instantes posteriores, e como esta concentração de 261 ppm viola as concentrações limite de entrada para ambas as operações, água limpa teve que ser adicionada a estas correntes.

As quantidades de água limpa e de água vinda do tanque a serem utilizadas para o reúso foram determinadas através de balanço material, como nos exemplos anteriores, e suas quantidades podem ser vistas no fluxograma ilustrado na Figura 5.13.

O consumo de água requerido para este cenário foi de 423, 629 toneladas de água, o que representa uma redução de 45,2% em relação a Tokos e Pintarik (2009) .

Foram gerados 423,632 toneladas de efluentes a serem destinados ao tratamento final.

FIGURA 5.13 - FLUXOGRAMA GERADO - 1 TANQUE DE ESTOCAGEM



5.7 – Resultados – Caso 2

Os resultados obtidos para o caso 2 estão resumidos na Figura 5.14 e na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Resultados - Caso 2

Cenário	Consumo de água por batelada (ton)	Quantidade de água destinada ao tratamento final(ton)	Quantidade de água regenerada durante o processo(ton)	Tanques de estocagem
4	774,330	774,33	180,38	1 tanque com capacidade para 43,36 toneladas de água
5	423,009	423,01	-	2 tanques com capacidade para 80,26 e 26,59 toneladas de água
6	423,629	423,62	-	1 tanque com capacidade para 106,85 toneladas de água

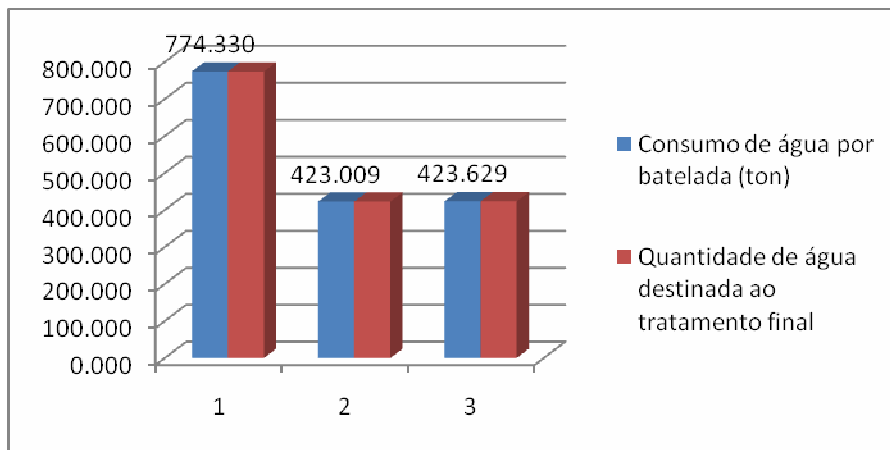


Figura 5.14 – Resultados – Caso 2

A partir desta tabela observamos que, levando em conta a minimização de água como critério, o DFA apresentou grande eficácia se for aplicado a este processo, sendo o cenário 5 o que apresentou uma maior redução no consumo.

6-ANÁLISE PRELIMINAR DE CUSTOS

Os casos estudados foram avaliados até agora somente em função da quantidade de água limpa consumida em cada um deles. Neste capítulo serão discutidos os custos relacionados a cada cenário avaliado, e a partir destes custos será possível determinar qual cenário apresentado representa a proposta de reúso mais viável economicamente.

O custo total anual corresponde ao somatório do custo de investimento anual com o custo operacional anual.

O custo de investimento corresponde ao total de recursos empatados e arriscados no empreendimento. Este custo é constituído do investimento fixo, do capital de giro e do investimento para a partida da planta.

O custo operacional inclui os custos diretos, que abrangem assim os custos diretamente proporcionais à produção, incluindo matéria-prima, utilidades, manutenção, suprimentos operacionais, mão de obra operacional e de supervisão, administração, utilização de laboratórios e patentes.

Nesta avaliação, o custo de equipamentos não levará em conta os equipamentos pertencentes às operações da planta. Este custo somente considerará os equipamentos para regeneração da água, que são utilizados antes de algumas operações, para permitir o reúso. No caso dos estudos de batelada, o custo de tanques será levado também em conta.

A estimativa destes custos será realizada com base nos dados da Tabela 6.1, retirados de Wang e Smith (1994):

	Custo de Investimentos (US\$)	Custo Operacional (US\$/h)
Tratamento final de linha	34200 f ^{0,7}	1,0067 f
Stripper para regeneração de água	16800 fr ^{0,7}	1,0 fr

onde f é a vazão de água consumida diferente da água regenerada em t/h e fr é a vazão de água regenerada em t/h.

Dados adicionais:

Custo de água tratada = 0,3 US\$/ton @ 0ppm

Custo de água suja = 0,03 US\$/ton ∇ppm

Operação anual = 8600h/ano

Depreciação anual do custo de capital = 0,1

Para os casos avaliados, como um estudo mais detalhado sobre a seleção de regeneradores não foi feito, vamos adotar o stripper como regeneração utilizada, para todos os casos onde a regeneração é necessária. Isto é feito como uma estimativa para obter a comparação entre os custos dos diferentes cenários.

O custo total anual é a soma do custo operacional (US\$/ano) com o custo de investimento em base anual (US\$/ano). O custo operacional anual de operação é a soma dos custos operacionais dos processos de tratamento final e regeneração, dos custos de consumo de água a 0ppm e de água contaminada. O custo de investimento em base anual é a soma dos custos de investimento nos processos pertinentes multiplicados pelo fator de depreciação anual.

6.1–Avaliação econômica do estudo do processo contínuo com multicontaminantes

Para o estudo de caso realizado no capítulo 4, temos a Tabela 6.2 com o resumo dos dados.

Tabela 6.2 – Resumo de dados do Capítulo 4

Cenário	Consumo de água limpa (ton/h)	Vazão de água destinada ao Trat. Final (ton/h)	Vazão de água regenerada (ton/h)
1	421,8	421,7	0
2	362	361,7	0
3	354,5	254,5	0
4	344,508	329,508	84,691
5	426,106	442,105	0
6	211,15	211,15	319,091
7	260,222	260,222	201
8	231,064	231,064	331,8

Levando em consideração os dados acima e aplicando a proposta de avaliação econômica, temos os resultados apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Custos – Capítulo 4

Cenário	Custo operacional anual (USD)	Custo de investimento anual(USD)	Custo anual total(USD)
1	4.739.162,35	235.249,46	4.974.411,81
2	4.065.421,15	211.285,68	4.276.706,83
3	3.117.974,29	165.199,05	3.283.173,34
4	4.469.928,29	235.505,45	4.705.433,74
5	4.926.930,57	243.160,99	5.170.091,56
6	5.117.006,06	240.028,53	5.357.034,60
7	4.652.875,95	236.583,68	4.889.459,64
8	5.450.089,43	252.103,29	5.702.192,72

Após essa avaliação econômica verifica-se que apesar do DFA ter minimizado o consumo de água limpa, os custos das propostas apresentadas em Chen et al. (2010) foram menores. Os processos gerados pelo DFA obtiveram então custos maiores com tratamento final de linha ou regeneração. É importante lembrar que o custo com regeneração foi estimado e, na realidade, deveria ser levada em conta a síntese de Tratamento de Processo e Regeneração (DELGADO, 2008). Vale ressaltar que este estudo econômico é apenas uma estimativa e um estudo detalhado deveria ser feito para avaliar a real viabilidade de aplicação do método, incluindo a determinação do tempo necessário para que o custo de investimento dos regeneradores seja compensado pela redução de custo gerada pela redução no consumo de água.

Os resultados da Tabela 6.3, estão ilustrados na Figura 6.1.

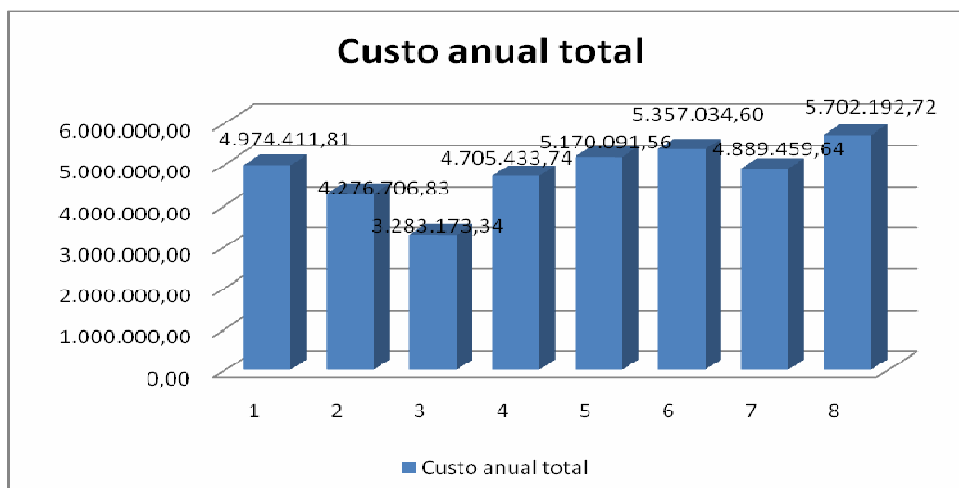


Figura 6.1- Resultado da Avaliação Econômica

6.2 – Avaliação econômica do estudo do processo em batelada – Caso 1

Para o caso 1 consideraremos como custo de investimento o custo da unidade de tratamento final e o custo dos tanques, se existirem.

Do artigo de Tokos e Pintaric (2009) apresentado no caso 2, obtivemos a informação de que um tanque com capacidade de 43,36 toneladas de água custaria, em 2009, 4036 euros. Convertendo para dólares, tem-se um preço de aproximadamente 5.560 dólares por tanques com essa capacidade.

Como neste caso os tanques utilizados possuem capacidade para 15 toneladas de água, será utilizada uma correlação apresentada em Perlingeiro(2005). Supondo que o tanque seja feito em aço inoxidável tem-se:

$$(Ie/Ieb) = (Q/Qb)^{0,69} \quad \text{Equação 6.1}$$

Onde Ie e Ieb são o investimento do equipamento e o investimento do equipamento utilizado como base; e Q e Qb são a capacidade do equipamento e a capacidade utilizada como base.

Tomando como base um tanque de 43,36 toneladas que possui um investimento de 5.560 dólares, estima-se que um tanque de 15 toneladas custe aproximadamente 2673 dólares.

Para este caso, como cada batelada dura 8,5h, admite-se que a unidade realize 2 bateladas por dia, para estimar o custo anual.

Para o caso 1 tem-se os dados da Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Resultados – Caso 1 - Batelada

Cenário	Consumo de água por batelada (ton)	Quantidade de água destinada ao Trat. Final (ton)	Tanques de estocagem
1	44,5	44,5	1 tanque com capacidade para 15 toneladas de água
2	55,75	55,75	-
3	44,5	44,5	1 tanque com capacidade para 15 toneladas de água

A partir destes dados a Tabela 6.5 e a Figura 6.2 foram elaboradas.

Tabela 6.5 – Resultado da Aval. Econômica – Caso 1 - Batelada

Cenário	Custo operacional anual (USD)	Custo de investimento anual(USD)
1	42.448,15	6.252,81
2	53.179,42	7.008,43
3	42.448,15	6.252,81

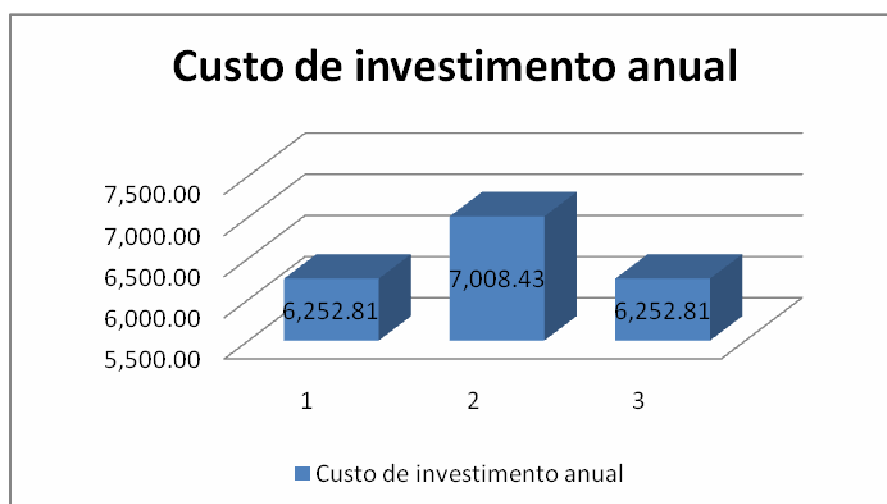


Figura 6.2 - Tabela 6.5 – Resultado da Avaliação Econômica – Caso 1 - Batelada

Assim, percebe-se que, a partir desta estimativa de custos, o DFA com uso de tanque de estocagem se apresenta como uma alternativa interessante, pois manteve o custo do caso base com uma metodologia mais simples do que a de Chen e Lee(2008).

6.3 – Avaliação econômica do estudo do processo em batelada – Caso 2

Para o caso 2 temos a Tabela 6.6 com o resumo dos dados.

Tabela 6.6 – Resultados – Caso 2 - Batelada

Cenário	Consumo de água por batelada (ton)	Quantidade de água destinada ao tratamento final(ton)	Quantidade de água regenerada durante o processo(ton)	Tanques de estocagem
4	774,330	774,33	180,38	3 tanques com capacidade para 43,36 toneladas de água cada
5	423,009	423,01	-	2 tanques com capacidade para 80,26 e 26,59 toneladas de água
6	423,629	423,62	-	1 tanque com capacidade para 106,85 toneladas de água

Foi utilizada a correlação de Perlingeiro(2005) e foram encontrados os seguintes custos para os tanques, para o ano de 2009:

- Tanque de 80,26 toneladas – 8503 dólares
- Tanque de 26,59 toneladas – 3967 dólares
- Tanque de 106,85 toneladas – 10359 dólares

Considera-se apenas uma batelada por dia para as estimativas de custo, que estão ilustradas na Tabela 6.7 e na Figura 6.3.

Tabela 6.7 – Resultados da Aval. Econômica – Caso 2 – Batelada

Cenário	Custo de investimento anual(USD)	Custo operacional anual(USD)	Custo total anual(USD)
4	45.875,66	16.744.616,75	16.790.492,41
5	30.200,03	11.023.010,84	11.053.210,87
6	30.018,34	10.956.694,51	10.986.712,85

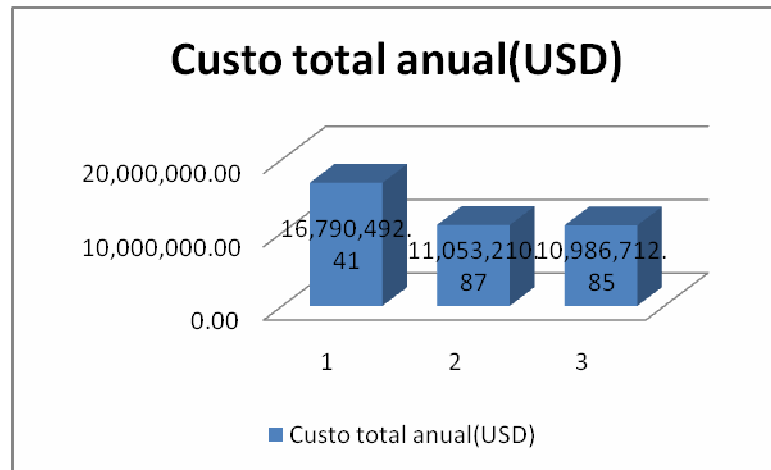


Figura 6.3 - Resultados da Aval. Econômica – Caso 2 – Batelada

A partir da Tabela 6.7 e da Figura 6.3, nota-se que a utilização do DFA reduziria significativamente os custos nesse processo, especialmente se fosse utilizado um único tanque de estocagem para toda a unidade. O método aqui neste caso é altamente recomendável.

7 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES

A quantidade de água limpa vem diminuindo cada vez mais. Desta forma, o consumo de água precisa ser minimizado sempre que possível, através da elaboração de processos que reutilizem este recurso de maneira eficaz.

Este trabalho tem por objetivo minimizar o consumo de água limpa e geração de efluentes em processos contínuos e em batelada, através do Diagrama de Fontes de Água, propor opções de redes de água e analisar os custos envolvidos nos cenários estudados.

Para os casos de processos contínuos com multicontaminantes, o DFA apresentou opções que reduzem os custos de água limpa, porém gerou a necessidade da implantação de equipamentos como regeneradores, a fim de almejar custos ainda menores.

Para os processos em batelada, o DFA atingiu uma redução considerável no consumo de água, tal qual de custos para um dos casos em estudo. Para o outro, a quantidade de água consumida e os custos envolvidos foram os mesmos, porém o DFA apresenta uma metodologia de mais simples aplicação do que o caso base.

Trabalhos futuros poderão tentar desenvolver uma ferramenta, como o MINEA, para abordar processos em bateladas, já que estes até o momento só podem ser aplicados manualmente. Outra sugestão seria o desenvolvimento de metodologias para a definição de operação e contaminante de referência.

O programa MINEA, contudo, precisa ser aprimorado em alguns aspectos, visto que apresentou algumas inconsistências ao longo dos estudos de caso desenvolvidos neste trabalho.

Para os casos estudados, foi realizada uma análise preliminar de custos. É desejável realizar uma avaliação econômica mais detalhada, para determinar qual sistema é mais viável economicamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMATÓ, M., SANMARTÍ, E., ESPUÑA, A., PUIGJANER, L., “Rationalizing the Water Use in the Batch Process Industry”, **Computers and Chemical Engineering**, 21, Suppl., S971-S976, 1997.

ANA (Agência Nacional de Águas), **Caderno de Recursos Hídricos – Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil**, 2005. Disponível em: http://www.ana.gov.br/pnrh_novo/documentos/01%20Disponibilidade%20e%20Demandas/VF%20DisponibilidadeDemanda.pdf. Acesso em: 24 de setembro de 2010.

BAETENS, Danielle. **Water pinch analysis: minimization of water and wastewater in the process industry**. In: LENS, Piet et al. (Comp.). **Water Recycling and Resource Recovery in Industry: Analysis, Technologies and Implementation**. London: Iwa Publishing, 2002. Cap. , p. 205-206.

BORGES, Allan; SARDINHA, Larissa. **Influência do Custo de Bombeamento em Cenários de Reutilização Hídrica na Indústria: Estudo de Caso de uma Refinaria de Petróleo**. Projeto Final de Curso, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.123 p

BROOKE, A., KENDRICK, D. MEERRAUS, A., RAMAN, R., **GAMS: A users Guide**, Washington, DC: Gams Development Corporation, 2005.

CASTRO, P., MATOS, H., FERNANDES, M.C., PEDRO NUNES, C., “Improvements for Mass-Exchange Networks Design”, **Chemical Engineering Science**, 54, 1649-1665, 1999.

CHEN C., HUNG S., LEE., “Design of inter-plant water network with central and decentralized water mains”, **Computers and Chemical Engineering**, 34, 1522-1531, 2010.

CHEN, C., LEE, J., “A graphical technique for the design of water-using networks in batch processes”, **Chemical Engineering Science**, 63, 3740-3754, 2008.

CLARKE, Robin e KING, Jannet. **O Atlas da Água**. São Paulo: Publifolha, 2005. 128 p.

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 M.Sc., TPQBq, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

DELGADO, B.E.P.C., **Síntese de Sistemas de Regeneração e Tratamento Final de Efluentes**, Dissertação de D.Sc., TPQBq, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

DOMINGOS, J.C., RAMOS, L.O., BASTOS, L.G., **Redução de Captação de Água em um Complexo Petroquímico**, Projeto Final de Curso, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro 2009.

DUNN, Russel F.; WENZEL, Henrik. **Process Integration: Design Methods for Water Conservation and Wastewater Reduction in Industry - Part 1: Design for Single Contaminants**. Clean Prod Processes, Springer, v. 3, p.307-318, 2001.

EL-HALWAGI, M.M., GABRIEL,, F., HARELL, D., **Rigorous Graphical Targeting for Resource Conservation via Material Recycle/Reuse Networks, Industrial and Engineering Chemistry Research**, 42, 4319-4328, 2003.

FOO, C.Y., MANAN, Z.A., YUNUS, R.M., AZIZ, R.A., **Synthesis of Mass Exchange Network for Batch Processes – Part I: Utility Targeting**, Chemical Engineering Science, 59, 1009-1026, 2004.

FOO, C.Y., MANAN, Z.A., YUNUS, R.M., AZIZ, R.A., **Synthesis of Mass Exchange Network for Batch Processes – Part II: Minimum Units Target and Batch Network Design**, Chemical Engineering Science, 60, 1349-1362, 2005.

FOO, D.C.Y., MANAN, Z.A., TAN, Y.L., **Synthesis of Maximum Water Recovery Network for Batch Process Systems**, Journal of Cleaner Production, 13, 1381-1394, 2005.

Gestão da água: CETESB. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 20 setembro 2010.

GOMES, J.F.S., **Procedimento para Minimização de Efluentes Aquosos**, Dissertação de M.Sc., TPQBq/EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 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.

GOMEZ J, SAVELSKY MJ, BAGAJEWICZ MJ. **.On a systematic design procedure for single component water utilization systems in process plants..** Chemical Engineering Communications. 186: 183-203 2001.

HALLALE, N., **Burning Bright Trends in Process Integration**, Chemical Engineering Progress, 30-41, 2001. (www.aiche.org/cep - July 2001)

HESPANHOL, I., **Um novo paradigma para gestão de recursos hídricos**, Estudos Avançados, 22 (63), 131-158, 2008

HIGA, C. M.; PENHA, N. P. **Minimização de Efluentes Aquosos: O Caso de uma Refinaria de Petróleo**. Projeto Final de Curso, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

IMMICH, A.P.S., GUSATTI, M., MELLO, J.M.M., **Aplicação do Diagrama de Fonte de Água (DFA) para Minimização de Água e Efluente de um Processo em Batelada**, In: Relatório da disciplina **Tópicos Especiais em Engenharia Química: Minimização de Efluentes Aquosos em Processos Químicos**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, UFSC, Florianópolis, SC, 2006.

JÖDICKE, G., FISCHER, U., HUNGERBÜHLER, K., **Wastewater Reuse: a New Approach to Screen for Designs with Minimal Total Costs**, Computers and Chemical Engineering, 25, 203-215, 2005.

KIM JK, SMITH R. **Automated design of discontinuous water systems**. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B, Process Safety and Environmental Protection 2004; 82 (B3): 238 - 248

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

MAJOZI, T., **Wastewater Minimisation Using Central Reusable Water Storage in Batch Plants**, Computers and Chemical Engineering, 29, 1631-1646, 2005.

MAJOZI, T., BROUCKAERT, C.J., BUCKLEY, C.A., **A Graphical Technique for Wastewater Minimisation in Batch Processes**, Journal of Environmental Management, 78 (4), 317-329, 2006.

MANN, James G.; LIU, Y. A.. **Introduction to Industrial Water Reuse and Wastewater Minimization**. In: MANN, James G.; LIU, Y. A.. **Industrial Water Reuse and Wastewater Minimization**. United States of America: McGraw-Hill, 1999. Cap. 1, p. 13-28.

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

MIERZWA, J.C., HESPANHOL, I., **Água na Indústria: Uso racional e reúso**, São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, **CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) - Resolução N°357**, 2005. Disponível em:
<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>. Acesso: 24 de setembro de 2010.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, **CNRH (Conselho Nacional de Recursos Hídricos) - Resolução N°54**, 2005. Disponível em:
http://www.enge.com.br/RES_CNRH_10-25.pdf. Acesso: 24 de setembro de 2009.

MIRRE, R.C., SANTOS, R.P., DELGADO, B.E.P.C., PESSOA, F.L.P., **Application of WSD procedure to petroleum industry**, In: Proceedings of the 17th International Congress of Chemical and Process Engineering (CHISA 2006), 9th Conference “Process Integration,

modeling and optimization of energy saving and pollution reduction”, CD-ROM, Prague, Czech Republic, 1-16, 2006.

MIRRE, R.C., **Recuperação e Reúso de Água na Indústria de Petróleo: Síntese de Redes de Transferência de Massa**, Dissertação de M.Sc., TPQBq, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007

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

PEREIRA, J.A., **Estado da Arte das Metodologias para Uso Racional de Água e Minimização de Efluentes Líquidos na Indústria**, Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Engenharia de Processamento Petroquímico, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2007.

PERLINGEIRO, C.A.G., **Engenharia de Processos: Análise, Simulação, Otimização e Síntese de Processos químicos**, São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 2005.

PUIGJANER, L., ESPUÑA, A., ALMATÓ, M., **A Software Tool for Helping in Decision-Making About Water Management in Batch Process Industries**, Waste Management, 20, 645-649, 2000.

QUEIROZ, E.M., PESSOA, F.L.P., **Minimização de Efluentes Aquosos em Processos Químicos: Diagrama de Fontes de Água**, Rio de Janeiro, 2004.

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.; BRAGA, B. & TUNDISI, J.G. **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. São Paulo, Acad. Bras. Cien./IEA-USP, 1999. 717 p

SANTOS, H.F., **Custos dos sistemas de reúso de água**, MANCUSO, P.C.S., SANTOS H.F (Editores), **Reúso de Água**, Barueri, SP: Manole, 433-468, 2003.

SMITH, Robin. Water System Design. In: SMITH, Robin. **Chemical Process Design and Integration**. Manchester: John Wiley & Sons Ltd, 2005. p. 581-624.

STELLING, R. J., **Síntese Combinada de Redes de Equipamentos de Transferência de Massa e de Trocadores de Calor**, Dissertação de M.Sc., TPQBq, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

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

TOKOS, H., PINTARIC, Z.N., **Synthesis of batch water network for a brewery plant**, Journal of Cleaner Production, 17, 1465-1479, 2009.

UNESCO. **Programa hidrológico internacional**. Paris, Relatório técnico, 1998, 240 p.

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

WANG, Y.P., SMITH, R., **Desing of Distriduted Effluent Treatment Systems**; Chemical Engineering Science, 49 (18), 3127-3145, 1994b.

WANG, Y.P., SMITH, R., **Wastewater Minimization with Flowrate Constraints**, Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 73 (A), 889-904, 1995.

WENZEL, Henrik et al. **Process Integration: Design Methods for Water Conservation and Wastewater Reduction in Industry - Part 3: Experience of Industrial Application**. Clean Techn Environ Policy, Springer, v. 4, p.16-25, 2002.

YOO, C.K., HEO, S.K., YOO, D.J., SHIN, J.N., CHUN, H.D., MOON, J.K. and LEE, I.B., **Review: Eco-industrial park (EIP) development and key technologies for clean production**, Korean Chemical Engineering Research, 43(4), pp.549-559 (2005).

M.M. EL-HALWAGI AND V. MANOUSIOUTHAKIS , **Synthesis of Mass-Exchange Networks**. A.I.Ch.E. J. 35 8 (1989), pp. 1233–1244.