

REDUÇÃO DA EMISSÃO DE EFLUENTES LÍQUIDOS E MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA EM PLANTA INDUSTRIAL PELO MÉTODO DO DIAGRAMA DE FONTES DE ÁGUA

José João Ramon Oliveira Cunha¹

George de Souza Mustafa²

Resumo

A partir do moderno sistema de gestão dos recursos hídricos que destaca a preocupação e preservação ambiental, a área de integração de processos cita tecnologias capazes de otimizar a produção industrial de forma a alcançar a minimização do consumo hídrico e dos impactos causados pela geração de efluentes. Dessa forma, este trabalho se propõe a apresentar o método do Diagrama de Fontes de Água (DFA) como uma ferramenta para produção mais limpa e demonstrar a aplicação em estudo de caso da literatura. A análise do problema e resolução do DFA resultou na configuração de uma nova rede de transferência de massa de um processo petroquímico que se traduz na redução de 32,54% no consumo de água bruta, quando a captação desta passa de 133 t/h para 89,72 t/h. A solução proposta representa a configuração mais favorável se comparada com outros trabalhos que abordaram o mesmo problema.

Palavras-chave: Redução do consumo de água bruta; Minimização de efluentes; Diagrama de fontes de água; Síntese de rede de transferência de massa.

Abstract

From the modern system of management of water resources that highlights the concern and environmental preservation, the area of integration of processes cites technologies capable of optimizing the industrial production in such a way as to achieve the minimization of water consumption and the impacts caused by effluent generation. Thus, this study aims to present the method of Diagram of Water Sources (DFA) as a tool for cleaner production and demonstrate the application in a case study of the literature. The problem analysis and resolution of DFA resulted in setting up a new network of mass transfer of a petrochemical process as reflected in the reduction of 32,54% in the consumption of raw water, when capturing changes from 133 t/h to 89,72 t/h. The proposed solution represents the configuration more favorable if compared with other studies that have discussed the same problem.

Keywords: Reduction in the consumption of raw water; Wastewater minimization; Diagram of water sources; Synthesis of network mass transfer.

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo Geral

Aplicar a metodologia do diagrama de fontes de água (DFA) no processo de uma planta industrial com a finalidade de alcançar a redução dos efluentes líquidos e a minimização do consumo de água bruta. Estudo relativo à otimização de processos, destina-se à definição de oportunidades de melhorias economicamente atrativas e redução de impactos ambientais.

¹Universidade Salvador – UNIFACS, Escola de Engenharia e TI

E-mail para contato: ramon_cunh@hotmail.com

² Prof. Orientador, titular da Universidade Salvador – UNIFACS (BA). george.mustafa@unifacs.br

1.2 Objetivos Específicos

- Definir o processo de uma determinada planta industrial, empreendimento de grande consumo de água e geração de efluentes, como centro do estudo;
- Estudar opções de reuso e reciclo da água no processo segundo o DFA e representar o novo sistema de transferência de massa graficamente; e
- Avaliar a taxa de redução do consumo de água da solução proposta em relação à configuração original e a outros estudos.

2 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural de grande importância e amplamente empregado na sociedade moderna, de forma que se tornou indispensável para o homem e a vida social. Contudo, durante décadas este recurso foi mal administrado segundo o pensamento de que suas fontes seriam continuamente puras e abundantes e com potencial de absorver rejeitos sem lhes causarem grandes danos.

É fundamental o aproveitamento dos recursos hídricos naturais, haja vista que as águas naturais são empregadas em diversos fins, tais como o abastecimento da população, aplicação industrial, navegação e fins agropecuários. Dito isto, é importante um planejamento da aplicação desse recurso a fim de atender à toda essa demanda, além de proteger os mananciais contra a poluição.

O acelerado crescimento da população, a urbanização das cidades, o desenvolvimento industrial e tecnológico e a expansão das áreas agrícolas contribuíram para o cenário atual da oferta hídrica no Brasil, onde as poucas fontes disponíveis estão comprometidas ou correndo riscos (MACHADO, 2007). Dessa forma, tem se instalado uma preocupação da população com a preservação dos recursos hídricos em conjunto com a recuperação do atual quadro de degradação.

O ramo industrial é um dos grandes consumidores de água doce mundial (BERNARDIS, 2002); além de ser um dos maiores responsáveis pelas degradações destes recursos.

No setor industrial, a primeira iniciativa de controle da degradação dos recursos hídricos ficou conhecida como o tratamento “fim de tubo”. Entretanto, uma visão moderna relativa aos efluentes industriais não deve estar fundamentada no tratamento do efluente final (tecnologia “end of pipe”) e sim na busca constante da minimização dos resíduos gerados

através de tecnologias limpas, ou seja, o foco deve se voltar para a fonte do efluente dentro da fábrica e não somente no problema após a sua geração.

O setor de refino do petróleo é uma das subáreas industriais que estão intimamente envolvidas com a problemática dos efluentes líquidos, o que tem feito as refinarias buscarem soluções otimizadas para os processos. Estes empreendimentos normalmente exigem um elevado volume de água bruta por volume de petróleo processado, e conseqüentemente, elevados custos com o tratamento da água captada e com efluentes descartados.

Uma alternativa para superar estas dificuldades se trata do reciclo ou reuso de correntes atualmente enviadas para as estações de tratamento de efluentes da refinaria. Como pontos favoráveis desta alternativa se destacam a geração de menor volume de efluentes, além de redução da captação de água bruta, o que por sua vez, acarreta na diminuição de custos na estação de tratamento de água.

Vale ressaltar que estas iniciativas estão de acordo com as boas práticas em favor do controle de poluição, e conseqüentemente, com a preservação ambiental. Assim, reduzem-se os riscos com as penalidades ambientais, melhora a imagem da indústria diante das comunidades, clientes e órgãos de controle ambiental, bem como favorece a obtenção de selos e certificações ambientais como, por exemplo, a ISO-14000 (MUSTAFA, 1998).

Para que haja a identificação e implementação das opções de reuso/reciclo de forma eficaz, com a melhor alocação dos recursos e menores custos, tecnologias de otimização são utilizadas. As principais ferramentas para a otimização dos sistemas de água são: a tecnologia Pinch, redes de transferência de massa e otimização via programação matemática (MANN, 2003).

A tecnologia Pinch quando usada para redução do consumo de água de processo em plantas industriais está normalmente vinculada à metodologia conhecida como Diagramas de Fontes de água (DFA).

O método do DFA, apresentado por Gomes (2002) e baseado nos trabalhos de Castro et al. (1999) e de Wang e Smith (1994), visa auxiliar engenheiros de processos a desenvolver de forma mais prática e eficiente os projetos para minimização de água e efluentes aquosos. O algoritmo efetua simultaneamente a especificação de metas de consumo e a síntese da rede e pode ser aplicado na solução de problemas com um ou mais contaminantes para os casos de reuso, regeneração com reuso e regeneração com reciclo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Efluentes Líquidos

Segundo uma visão geral dos processos industriais, depois do uso da água em operações, caso esta não seja incorporada ao produto final, ou mesmo a partir dos meios de tratamentos da água para se obter o grau de qualidade ideal para aplicação industrial, são gerados efluentes que, a depender de sua origem, podem conter várias substâncias dentre aquelas as quais teve contato. Nenhum processo produtivo pode ser considerado 100% eficiente, dessa forma, é inevitável a geração de efluentes. Mesmo que fosse, comumente se notam correntes secundárias as quais não podem ser aproveitadas por questões econômicas ou técnicas.

Para a identificação de efluentes, uma análise mais detalhada dos processos industriais deve ser desenvolvida, lançando-se mão de recursos como os documentos de engenharia disponíveis e visitas de campo. Em algumas situações, principalmente em industriais já em operação, além das medidas supracitadas, podem ser necessária as caracterizações física, química e biológica dos efluentes que estão sendo gerados, de forma a se obter informações mais precisas sobre sua composição, o que implica em dispor dos meios que possibilitem essa caracterização.

Entretanto, considerando a grande variedade de indústrias, a diversidade de tecnologias utilizadas para o desenvolvimento dos processos produtivos e o modo de operação da instalação, a composição e qualidade dos efluentes gerados são consideravelmente variáveis, inclusive em indústrias do mesmo ramo de atividade. Isto torna pouco confiáveis os dados obtidos em literatura, embora estas fontes ainda sejam úteis para obter informações iniciais sobre consumo de água e geração de efluentes líquidos.

Como mencionado no início da seção, os principais meios geradores de efluentes líquidos são os sistemas de tratamento de água e as operações onde esta é empregada.

Dentre as técnicas de tratamento da água que geram efluentes incluem-se: sistemas tradicionais de tratamento (aeração, floculação, decantação etc., conjunto conhecido como clarificação), processos de abrandamento (abrandamento com cal, por exemplo), processos de troca iônica e de osmose reversa.

Os efluentes líquidos gerados pela indústria petroquímica podem ser classificados em Inorgânicos e Orgânicos, de acordo com as suas características físico-químicas. Comumente, o sistema de efluentes não contaminados (por compostos orgânicos) recebe correntes com

características inorgânicas, como por exemplo: purgas dos sistemas de água de resfriamento e de geração de vapor. Ao passo que o sistema orgânico recebe efluentes contaminados com compostos orgânicos, como a drenagem de água de processo e drenagem de tanque (MUSTAFA, 1998).

Até pouco tempo atrás, a grande preocupação das indústrias com relação aos seus efluentes referia-se, apenas, ao atendimento aos padrões estabelecidos nas normas de controle ambiental. Atualmente, devido ao crescente risco de escassez de água e incorporação, por parte das indústrias, dos Sistemas de Gestão Ambiental, começam a surgir algumas iniciativas relacionadas ao reuso da água, que ao contrário do conceito de tratamento para lançamento, leva em consideração os requisitos mínimos de qualidade da água para aproveitamento nos processos industriais.

O quadro que se configura para um futuro próximo, com relação ao gerenciamento de efluentes industriais, indica uma forte tendência para o uso racional e para o reuso da água. Isto se justifica, principalmente para as regiões altamente urbanizadas e industrializadas, pelo fato de as normas de controle ambiental estarem se tornando cada vez mais restritivas, o que pode ser verificado ao se analisar a lei nº 9.605 de 12/02/98, que define como crime, as condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, incluindo nesse contexto o lançamento de efluentes, e a lei nº 9.433, de 08/01/97, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, estabelecendo, ainda, a cobrança pelo uso dos recursos hídricos, introduzindo o conceito de poluidor pagador.

3.2 Usos da Água na Indústria

A água é um fluido bastante importante e presente nos processos industriais, para algumas de suas aplicações se torna insubstituível, por consequência, altamente demandada. Segundo Mustafa (1998), a água é de tal forma aplicada industrialmente por apresentar, seja no estado vapor ou líquido, uma boa capacidade de troca térmica e excelente solvência, além de ser uma substância não tóxica e relativamente abundante na natureza. As suas principais aplicações são destacadas a seguir:

No estado vapor:

- a) aquecimento de fluidos de processo em refulvedores de torres de destilação e pré-aquecedores de carga;

- b) acionamento de turbina a vapor para funcionamento de equipamentos rotativos (bombas, compressores e turbogeradores de energia elétrica);
- c) redução de pressão parcial de compostos leves para evitar degradação e auxiliar na destilação;
- d) selagem de equipamentos rotativos;
- e) sopragem de fuligem em fornos e caldeiras; e
- f) atomização de combustíveis líquidos em fornos e caldeiras.

No estado líquido:

- a) resfriamento de produtos intermediários e finais, através de trocadores de calor ou por contato direto;
- b) diluição de produtos químicos utilizados nos processos;
- c) absorção e extração de compostos polares;
- d) participação como reagente em reações químicas;
- e) verificação de estanqueidade de equipamentos (teste hidrostático);
- f) selagem de equipamentos rotativos;
- g) lavagem de equipamentos e sistemas durante a liberação para manutenção;
- h) hidrojateamento para limpeza de trocadores de calor e tanques;
- i) funcionamento de chuveiros e lava-olhos de emergência;
- j) combate a incêndio; e
- k) água potável para consumo humano.

A justificativa para o desenvolvimento de estudos e aplicações de tecnologias como a que serve de fundamento nesta publicação é justamente o alto consumo da água na indústria. O presente trabalho por ser baseado no Diagrama de Fontes de Água considera que a água assume o papel de agente extrator ou solvente em operações de transferência de massa (extração líquido-líquido ou absorção).

3.3 A metodologia do Diagrama de Fontes de Água (DFA)

Esta metodologia é empregada em processos industriais para minimização da vazão de água global onde são aplicadas operações de transferência de massa com a participação da água. O DFA pode ser aplicado para casos com um ou múltiplos contaminantes segundo as abordagens: máximo reuso, múltiplas fontes, regeneração com reuso e restrição de vazão.

O procedimento pode considerar diferentes fontes de águas, como a alimentação de uma determinada operação com água bruta ou primária (fontes externas) e ainda, quando se tem mais de uma operação envolvida, o abastecimento desta operação por uma parcela do efluente (fontes internas) de outra operação. A possibilidade de reutilização de efluentes é determinada pela máxima concentração de entrada da corrente de água nas diversas operações.

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

Para garantir o mínimo consumo de água, devem ser seguidas três regras mínimas na seleção da fonte de água:

- a) utilizar fontes externas somente quando não houver fonte interna disponível, tanto em quantidade quanto em qualidade. Na disponibilidade de fonte interna, usar preferencialmente a oriunda da mesma operação;
- b) transferir a máxima quantidade de contaminante possível dentro do intervalo de concentração; e
- c) para operações que estão presentes em mais de um intervalo, quando mudar o intervalo, a corrente deve continuar através da operação até o final; esta heurística evita dividir operações.

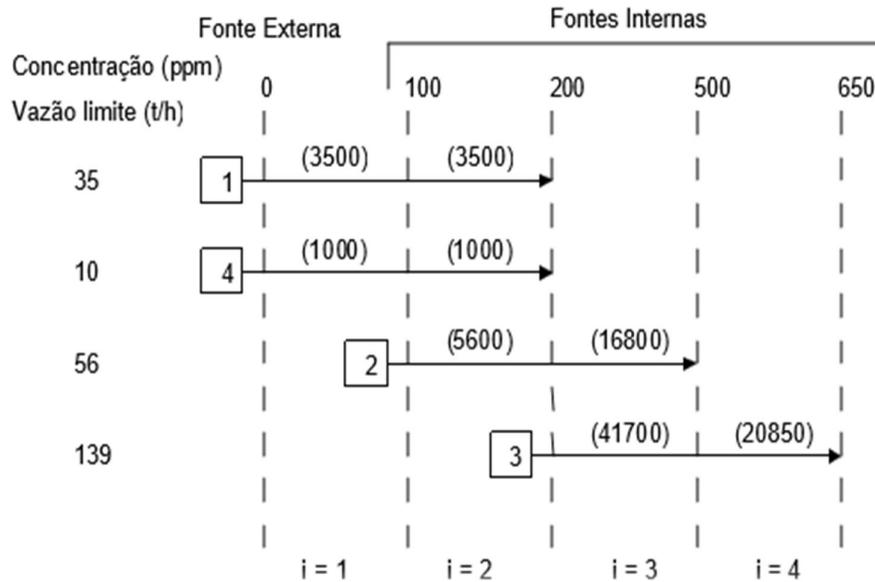
De acordo com Melo (2008), o tratamento do problema é dividido em intervalos de concentração, limitados pela fonte de água primária e as fontes de água com concentrações iguais às de entrada e de saída das operações. As fontes são colocadas em ordem crescente de concentração, definindo os intervalos de concentração, e por consequência, o diagrama de fontes de água.

As operações de transferência de massa são representadas por setas, cuja origem é uma caixa de identificação da operação, posicionada na respectiva concentração máxima de entrada; e a ponta, corresponde à concentração máxima de saída. As vazões limites das operações, f_k , são escritas no lado esquerdo do diagrama. Para facilitar a visualização,

recomenda-se ainda que as operações sejam colocadas no diagrama, de cima para baixo, em função da ordem crescente das concentrações de entrada.

Na Figura 1, é ilustrado o DFA apresentado por Melo (2008) e baseado em Yang et al. (2000).

Figura 1 – DFA estudado em Yang et al. (2000)



Fonte: Melo (2008)

A quantidade de massa transferida por cada operação k em cada intervalo i é calculada pela Equação 1.

$$\Delta m_{ki} = f_k \times (C_{fi} - C_{ii}) \quad (1)$$

Onde C_{fi} é a concentração final do intervalo i , C_{ii} é a concentração inicial do intervalo i e f_k é a vazão mássica limite da corrente da operação k . As quantidades de massa transferidas (em g/h) no exemplo ilustrativo são apresentadas entre parênteses sobre as setas.

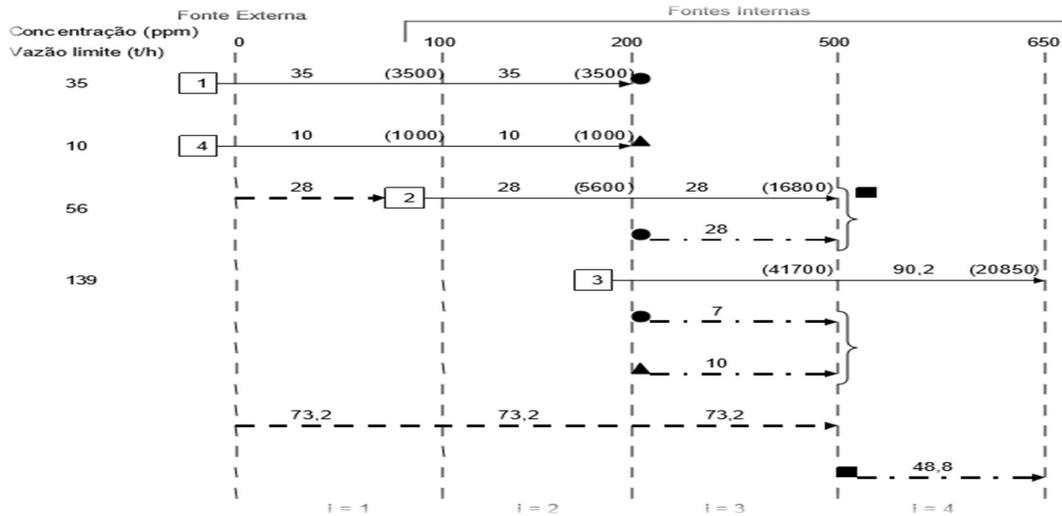
Como o objetivo é minimizar a utilização de água primária ($C_{ik} = 0$) deve-se maximizar a composição de saída da corrente de água (C_{fk}) de modo a se necessitar de sua menor vazão. Para assegurar que a mínima vazão de água primária será utilizada, o procedimento para a construção da rede de transferência de massa inicia-se no intervalo de menor concentração.

Parte-se então para o cálculo da vazão necessária de água em cada operação com o uso da Equação 1. Devem ser analisadas as fontes internas e externas disponíveis para

servirem a cada operação e determinar as vazões necessárias das fontes selecionadas em função das regras heurísticas.

Dessa forma, é configurado o Diagrama de Fontes de Água resolvido para um sistema sob estudo. Na Figura 2 é ilustrado como exemplo o DFA resolvido elaborado por Melo (2008) com base em Yang et al. (2000).

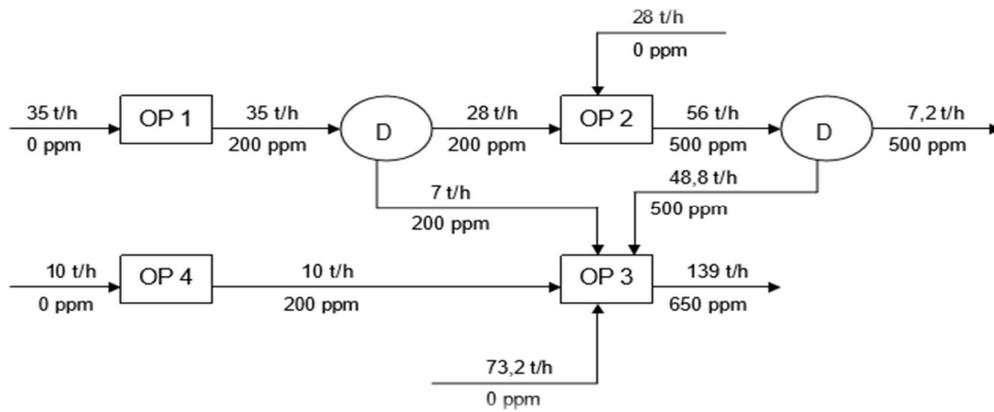
Figura 2 – DFA estudado em Yang et al. (2000) com as vazões calculadas



Fonte: Melo (2008)

A partir dos resultados obtidos e representados na Figura 2, a Rede de Transferência de Massa (RTM) para o mínimo consumo de água primária é montada, conforme mostrado na Figura 3 para o caso exemplo.

Figura 3 – DFA estudado em Yang et al. (2000) com as vazões calculadas



Fonte: Melo (2008)

4 ESTUDO DE CASO

Uma refinaria de petróleo gera um grande volume de efluentes aquosos que necessitam ser tratados e descartados ao meio ambiente. Visando exemplificar a minimização desses efluentes gerados, será apresentado o exemplo da literatura (Wang e Smith, 1994) considerando três operações presentes em uma refinaria de petróleo: dessalinização, hidrodessulfurização (HDS) e destilação a vapor. Os dados limites de processo referentes aos três contaminantes estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados das operações de transferência de massa do estudo de caso

Operação k	f_k (t/h)	Contaminante	$C_{i k, Max}$ (ppm)	$C_{fk, Max}$ (ppm)	Δm_k (kg/h)
1 (destilação a vapor)	45	A - Hidrocarboneto	0	15	0,675
		B – H ₂ S	0	400	18
		C - Sal	0	35	1,575
2 (HDS)	34	A - Hidrocarboneto	20	120	3,4
		B – H ₂ S	300	12500	414,8
		C - Sal	45	180	4,59
3 (Dessalinização)	56	A - Hidrocarboneto	120	220	5,6
		B – H ₂ S	20	45	1,4
		C - Sal	200	9500	520,8

Fonte: Wang e Smith (1994)

4.1 Resolução do DFA

Em problemas com múltiplos contaminantes a transferência dos contaminantes ocorre simultaneamente. No presente trabalho considera-se que as relações entre as transferências dos contaminantes são lineares nas operações e devem ser preservadas em cada operação. Isto é, considerando um processo qualquer com duas operações e dois contaminantes, o contaminante A irá ser transferido na mesma proporção que o contaminante B, ou seja:

$$\frac{\Delta C_{B,k}}{\Delta C_{A,k}} = cte \quad (2)$$

Dessa forma, para o estudo de caso tem-se que:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta C_{A,1}}{\Delta C_{B,1}} &= \frac{15 - 0}{400 - 0} = 0,0375 & \frac{\Delta C_{A,2}}{\Delta C_{B,2}} &= \frac{120 - 20}{12500 - 300} = 0,008 & \frac{\Delta C_{A,3}}{\Delta C_{B,3}} &= \frac{220 - 120}{45 - 20} = 4,0 \\ \frac{\Delta C_{A,1}}{\Delta C_{C,1}} &= \frac{15 - 0}{35 - 0} = 0,429 & \frac{\Delta C_{A,2}}{\Delta C_{C,2}} &= \frac{120 - 20}{180 - 45} = 0,741 & \frac{\Delta C_{A,3}}{\Delta C_{C,3}} &= \frac{220 - 120}{9500 - 200} = 0,011 \\ \frac{\Delta C_{B,1}}{\Delta C_{C,1}} &= \frac{400 - 0}{35 - 0} = 11,429 & \frac{\Delta C_{B,2}}{\Delta C_{C,2}} &= \frac{12500 - 300}{180 - 45} = 90,370 & \frac{\Delta C_{B,3}}{\Delta C_{C,3}} &= \frac{45 - 20}{9500 - 200} = 0,003 \end{aligned}$$

O contaminante A é tal que exige as menores concentrações para seu reuso e por essa razão será tomado como elemento de referência.

Percebe-se que apesar de o reuso para os contaminantes A e C ser possível, o contaminante B apresenta restrições, uma vez que a concentração de entrada da operação seguinte (OP2 e OP3) não é maior ou igual à concentração da corrente a ser reaproveitada. Essa análise é mais claramente apresentada pela Tabela 2 em função do contaminante de referência.

Tabela 2 – Concentrações dos contaminantes em função do contaminante A para todas as operações

Contaminantes	Concentrações (ppm)					
	A	B	C	A	B	C
A (OP's 1,2 e 3)	0	15	20	120	120	220
B (OP1)	0	400	-	-	-	-
B (OP2)	-	-	300	12500	-	-
B (OP3)	-	-	-	-	20	45
C (OP1)	0	35	-	-	-	-
C (OP2)	-	-	45	180	-	-
C (OP3)	-	-	-	-	200	9500

Fonte: Elaboração própria

Dessa forma, cálculos de novos valores para concentrações de A na corrente de entrada das operações 2 e 3 são necessários para possibilitar o reuso de B.

A taxa de transferência de massa entre A e B apresentada anteriormente (igual a 0,0375 na OP1 será considerada para todas operações) é utilizada para estes cálculos. Foi determinado que 11,25 ppm de A corresponde a 300 ppm de B e 0,75 ppm de A corresponde a 20 ppm de B, relativas às concentrações (ajustadas) de entrada das operações 2 e 3, respectivamente.

As concentrações de saída da substância A foram calculadas com a Equação 1, considerando que as vazões limites das operações e suas relativas taxas de transferência de massa sejam mantidas nos valores apresentados na Tabela 1.

Os valores calculados e demais concentrações dos contaminantes nas operações são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados de concentrações ajustadas das operações de transferência de massa do estudo de caso baseadas no contaminante A

Operação k	f_k (t/h)	Contaminante	$C_{i k, Max}$ (ppm)	$C_{f k, Max}$ (ppm)	Δm_k (kg/h)
1 (destilação a vapor)	45	A - Hidrocarboneto	0	15	0,675
		B – H ₂ S	0	400	18
		C - Sal	0	35	1,575
2 (HDS)	34	A - Hidrocarboneto	11,25	111,25	3,4
		B – H ₂ S	300	12500	414,8
		C - Sal	45	180	4,59
3 (Dessalinização)	56	A - Hidrocarboneto	0,75	100,75	5,6
		B – H ₂ S	20	45	1,4
		C - Sal	200	9500	520,8

Fonte: Elaboração própria

Com base nos dados de concentrações limites de entrada e saída e nas taxas de transferência de massa do contaminante de referência (A) em cada operação, apresentados na Tabela 3 – dados fixados – e com o uso da Equação 1, são determinadas as vazões necessárias para alcançar cada taxa de transferência de massa fixada.

Os cálculos das vazões e das taxas de transferência são feitos por intervalos e em ordem crescente. Em cada intervalo são avaliadas apenas as operações as quais ocorrem transferência de massa no referido intervalo. Quando a vazão disponível em uma determinada operação leva à uma taxa de transferência de massa abaixo da requerida, será oportuna a alocação de uma corrente de reuso de fonte interna ou uma corrente proveniente de uma regeneração, afim de completar a transferência de massa da operação.

- Operação 1: ocorre transferência de massa nos intervalos 1,2 e 3.

Utilizando a vazão total de água bruta da configuração original, $f_1 = 45$ t/h.

$$\Delta m_{1,1} = \frac{45 \times (0,75 - 0)}{1000} = 0,03375 \text{ kg/h}$$

$$\Delta m_{1,2} = \frac{45 \times (11,25 - 0,75)}{1000} = 0,472 \text{ kg/h}$$

$$\Delta m_{1,3} = \frac{45 \times (15 - 11,25)}{1000} = 0,168 \text{ kg/h}$$

$$\Delta m_1 = 0,033 + 0,472 + 0,168 = 0,673 \text{ kg/h}$$

- Operação 2: ocorre transferência de massa nos intervalos 3, 4 e 5.

Utilizando a vazão total de água bruta da configuração original, $f_2 = 8,5 \text{ t/h}$.

$$\Delta m_{2,3} = \frac{8,5 \times (15 - 11,25)}{1000} = 0,127 \text{ kg/h}$$

$$\Delta m_{2,4} = \frac{8,5 \times (100,75 - 15)}{1000} = 0,728 \text{ kg/h}$$

Reuso (Re) de parte da corrente da operação 1 para a operação 2:

$$\Delta m_{Re,4} = \frac{25,5 \times (100,75 - 15)}{1000} = 2,186 \text{ kg/h}$$

$$\Delta m_{2,5} = \frac{(25,5 + 8,5) \times (111,25 - 100,75)}{1000} = 0,357 \text{ kg/h}$$

$$\Delta m_2 = 0,127 + 0,728 + 2,168 + 0,356 = 3,4 \text{ kg/h}$$

- Operação 3: ocorre transferência de massa nos intervalos 2, 3 e 4.

Regeneração (R) do restante da corrente da operação 1 com reciclo para a operação 3:

$$f_{Re\ 1} = 45 - 25,5 = 19,5 \text{ t/h}$$

$$\Delta m_R = \frac{19,5 \times (100,75 - 0,75)}{1000} = 1,95 \text{ kg/h}$$

$$\Delta m \text{ total req } 3 = \Delta m_3 + \Delta m_R = 5,6 \text{ kg/h}$$

Logo,

$$\Delta m_3 = 5,6 - 1,95 = 3,65 \text{ kg/h}$$

Então, tem-se que:

$$f_3 = \frac{3,65}{(100,75 - 0)} \times 1000 = 36,228 \text{ t/h}$$

Percebe-se que as restrições de taxas de transferência de massa das operações foram atendidas e concordam com os valores da Tabela 3.

$$\Delta m_1 = 0,033 + 0,472 + 0,168 = 0,673 \text{ kg/h}$$

$$\Delta m_2 = 0,127 + 0,728 + 2,168 + 0,356 = 3,4 \text{ kg/h}$$

$$\Delta m_3 = 0,407 + 0,135 + 3,106 + 0,204 + 0,073 + 1,672 = 5,6 \text{ kg/h}$$

- Consumo total de água bruta.

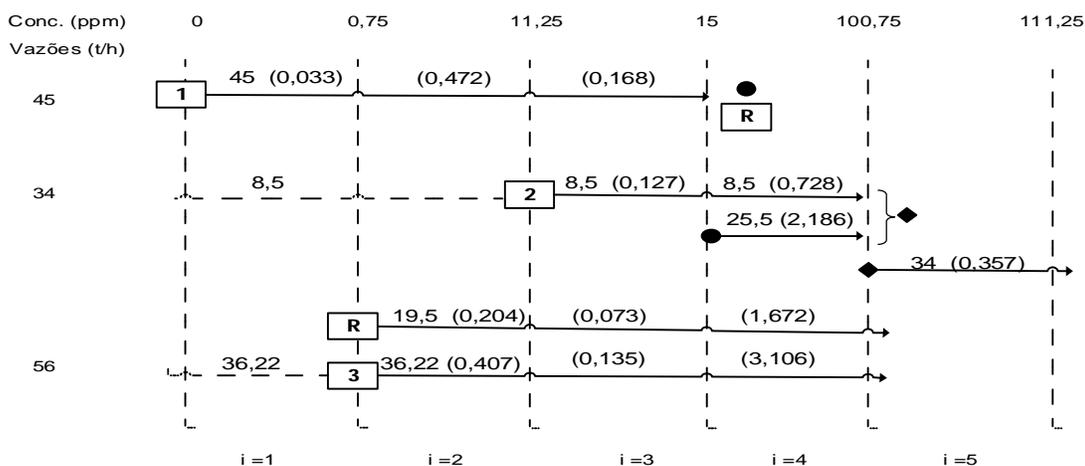
$$f_A = 8,5 + 36,228 + 45 = 89,72 \text{ t/h}$$

- Redução percentual do consumo de água bruta em relação ao problema original.

$$f_A = \frac{133 - 89,72}{133} \times 100 = 32,54 \%$$

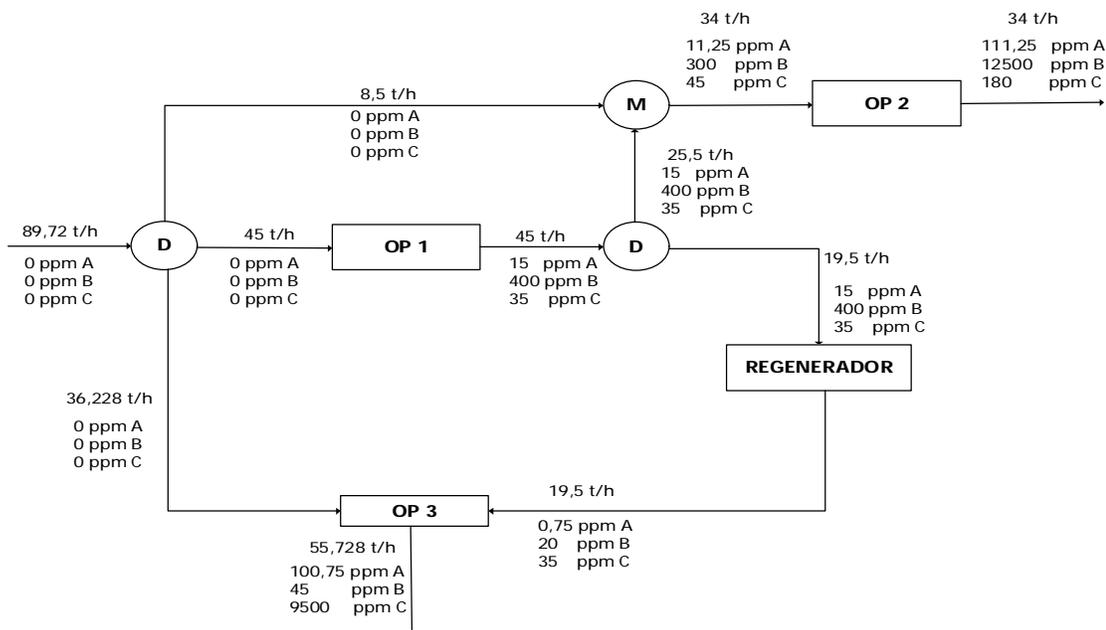
Desta maneira, obtém-se a configuração do Diagrama de Fontes de Água apresentado na Figura 4, bem como a rede de transferência de massa (RTM), conforme ilustrado na Figura 5 para o estudo de caso desenvolvido neste trabalho.

Figura 4 – DFA proposto para estudo de caso com as vazões calculadas



Fonte: Elaboração própria

Figura 5 – Rede de transferência de massa (RTM) da solução proposta



Fonte: Elaboração própria

4.2 Análise Geral

A partir dos resultados obtidos na abordagem do DFA deste estudo, é feita uma análise comparativa apresentada na Tabela 4, entre publicações baseadas nesta metodologia e que apresentam o mesmo problema como estudo de caso.

Tabela 4 – Análise comparativa para o estudo de caso entre resultados encontrados com os da literatura

	Resultados encontrados	Referência 1	Referência 2
Vazão original (t/h)	133,0	133,0	133,0
Vazão definida pelo DFA (t/h)	89,72	105,70	106,70
Abordagem do DFA	Reuso e regeneração com reciclo	Reuso máximo	Reuso máximo

Fonte: Elaboração própria

Onde,

Referência 1: Wang e Smith, 1994, estudo de caso; e

Referência 2: Gomes, Queiroz e Pessoa, Procedimentos para minimização da vazão de efluentes aquosos – Aplicação em refinarias, Tabela 4.

5 CONCLUSÕES

Tendo esclarecido que o setor industrial é notadamente um grande consumidor de água doce e gerador de efluentes líquidos, e aliado ao moderno sistema de gestão dos recursos hídricos que destaca a preocupação e preservação ambiental, este estudo apresenta a metodologia do Diagrama de Fontes de Água (DFA), útil na reconfiguração de um processo buscando a minimização do consumo de água a partir, por exemplo, da definição de opções de reuso. O recurso do DFA se traduz em grandes vantagens se comparadas com outros algoritmos encontrados na literatura para a mesma finalidade, tais como, emprego de cálculos simples, não propõe divisão das operações, possibilita a geração do fluxograma do processo reconfigurado etc. As diversas abordagens oferecidas como solução torna a metodologia uma importante aliada dos engenheiros de processo em otimizações de redes hídricas, já que o DFA é de fácil aplicação e não depende de softwares comerciais.

Desta forma, o DFA foi aplicado em um estudo de caso da literatura, tendo resultado em uma solução particular e otimizada. Os resultados mostraram que a abordagem proposta alcança uma redução de 32,54% no consumo de água bruta, quando a captação desta passa de 133 t/h para 89,72 t/h. O fluxograma da rede de transferência de massa foi construído junto com o balanço material das operações. Em uma comparação entre a resolução proposta e as de outras referências com o mesmo estudo de caso, foi mostrado que a abordagem com regeneração deste trabalho representa a solução mais satisfatória em redução do consumo de água.

Por fim, observa-se que outros trabalhos investigativos podem ser feitos a fim de complementar e qualificar a resolução proposta. Julga-se adequado fazer o estudo de viabilidade econômico da implantação da configuração da solução apresentada, além da análise e escolha da melhor alternativa de método de regeneração.

REFERÊNCIAS

BERNARDIS, R. **Novos conceitos em tratamento e reúso da água**. Latin Chemical, 2002.

CASTRO, P. et al. Improvements for mass-exchange networks design. **Chemical Engineering Science**. 1649-1665, 1999.

GOMES, J. F. S. **Procedimento para a minimização de efluentes aquosos**. Rio de Janeiro: EQ/UFRJ. Tese de Mestrado, 2002.

GOMES, J. F. S., PESSOA, F. L. P., QUEIROZ, E. M. Procedimentos para minimização da vazão de efluentes aquosos – Aplicação em refinarias. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETROLEO & GÁS, 2., 2002, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2002. p. 2-7.

MACHADO, J. A Importância do uso racional dos recursos hídricos. 2007. Disponível em: <http://www.amchamrio.com.br/publicacoes/bb/2007/07_bb_jul_07/capa05.htm>. Acesso em: 05 abr. 2015.

MANN, J. G. Cultural changes and water-asset realignment to support water-reuse projects. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 37, p. 175-180, 2003.

Melo, A. R. Uso integrado e eficiente da água nas indústrias têxteis catarinenses. Florianópolis, Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

MUSTAFA, G. S. **Reutilização de efluentes líquidos em indústria petroquímica**. 1998. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Química) – Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal da Bahia, 1998.

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