



INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION

"KEY ELEMENTS FOR A SUSTAINABLE WORLD: ENERGY, WATER AND CLIMATE CHANGE"

Diagrama de Fontes de Água: Uma Ferramenta Sustentável para a P+L na Minimização de Águas e Efluentes Industriais

R. C. Mirre ^a, L. Yokoyama ^b, F. L. P. Pessoa ^c

a. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, reinaldomirre@hotmail.com

b. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, lidia@eq.ufrj.br

c. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, pessoa@eq.ufrj.br

Resumo

A prática de Produção mais Limpa (P+L) no ambiente industrial requer a perfeita compreensão das características dos processos produtivos. Quando o foco está voltado para a minimização do consumo hídrico e dos impactos ocasionados pela geração de efluentes, torna-se importante rever os processos hídricos de modo a prover o sistema com ações sustentáveis, como o reúso de águas e efluentes. O desenvolvimento de tecnologias como suporte para uma bem planejada gestão dos recursos hídricos tem sido motivado pela maior necessidade de se estabelecer programas de reúso de água nos diversos setores, principalmente no meio industrial. O campo da Engenharia de Processos Químicos, particularmente da Integração de Processos, vem contribuindo para o desenvolvimento de ferramentas voltadas para a sistematização desta prática. Uma importante ferramenta é o Diagrama de Fontes de Água (DFA), que procura otimizar a destinação de correntes aquosas, por meio de regras heurísticas, estabelecendo uma adequada configuração de reúso e regeneração de correntes. Este trabalho tem como objetivo adotar o procedimento algorítmico DFA como um importante instrumento para a avaliação de práticas voltadas para a redução do consumo de água e da geração de efluentes, no contexto da P+L. É mostrado um estudo de caso para ilustrar a aplicabilidade do procedimento, indicando o cenário de realocação das correntes, bem como a redução de vazão alcançada. Sua vantagem está na realização de cálculos rápidos e a geração simultânea de fluxogramas alternativos sem modificações substanciais do processo, facilitando a sistematização da prática de reúso.

Palavras-Chave: Reúso de águas e efluentes industriais; estratégias ambientalmente amigáveis; minimização de efluentes aquosos.

1 Introdução

A gestão dos recursos hídricos tem sido fortemente influenciada pelo problema de uma real escassez de água doce no mundo. No meio industrial, o aumento dos custos com o tratamento de efluentes reflete essa tendência. Paralelamente, a possibilidade de se institucionalizar a cobrança pelo uso da água irradia um cenário de aumento nos custos de produção e, sendo assim, um novo paradigma quanto à racionalização do seu uso, à adequação de tratamento e à aplicabilidade crescente

KEY ELEMENTS FOR A SUSTAINABLE WORLD: ENERGY, WATER AND CLIMATE CHANGE

São Paulo – Brazil – May 20th-22nd - 2009

de técnicas de reúso se faz cada vez mais influente. É neste sentido que se torna imperioso promover a criação e a implantação de estratégias que viabilizem a racionalização do uso da água, contrapondo a equivocada tendência de se tratar este recurso natural como abundante e, desse modo, disponível infinitamente.

O campo da Engenharia de Processos Químicos, particularmente da Integração de Processos, assume a perspectiva de contribuir para o desenvolvimento de ferramentas visando à redução do consumo de água e da geração de efluentes aquosos na indústria. Dunn e Bush (2001) demonstraram a importância do uso das tecnologias de Integração de Processos inseridos nas práticas de Produção mais Limpa (P+L). Uma importante ferramenta é o Diagrama de Fontes de Água (DFA) (Gomes et al., 2007), que busca as melhores configurações possíveis, incluindo a redirecionamento de correntes aquosas, visando o máximo reúso e, se necessário, a regeneração de correntes. Trata-se de um procedimento algorítmico 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. Adicionalmente, permite sintetizar redes de transferência de massa em situações de múltiplas fontes de água, perdas no processo, restrição de vazão, regeneração com reúso e regeneração com reciclo. Oferece como vantagens a facilidade de realização de cálculos rápidos e manuais e a geração simultânea de fluxogramas alternativos para o processo, em diferentes situações de reúso e regeneração.

O método DFA foi apresentado por Gomes (2002) como uma evolução dos trabalhos de Wang e Smith (1994; 1995) e Castro et al. (1999), aplicando-o a soluções de problemas com um contaminante e múltiplos contaminantes, nas condições de máximo reúso, restrição de vazão, múltiplas fontes, perda de água no processo e regeneração para reúso ou reciclo. Constatou-se que os menores custos totais foram obtidos nas condições de máximo reúso e quando combinadas ao reciclo. Na sequência, outros trabalhos estenderam contribuições ao método, como os de Delgado (2003; 2008), Mirre (2007), Santos (2007), Marques (2008) e Ulson de Souza et al. (2008). Como fruto deste amadurecimento técnico, a metodologia já foi aplicada com sucesso a casos reais de refinarias de petróleo brasileiras, assim como a distintos setores industriais (Moreira, 2008; Melo, 2008). Adicionalmente, Mirre et al. (2007) apresentaram o DFA como uma valiosa ferramenta para a gestão e o reúso de água na indústria.

Neste contexto, o trabalho em questão tem como objetivo aplicar o DFA como ferramenta para a definição de propostas de reúso de efluentes hídricos no meio industrial, tendo como meta o consumo mínimo de água, considerando máximo reúso e a presença de um contaminante nas correntes. Foi utilizado um exemplo encontrado na literatura.

2 Metodologia

A implementação de P+L nos processos produtivos das empresas através da metodologia desenvolvida e apoiada pela UNIDO (Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial) faz uso de técnicas que resultem na minimização de resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões atmosféricas, eficiência no uso da energia e racionalização no emprego da água. As etapas para a implementação incluem o balanço material e energético dos processos, de modo que se permita identificar e quantificar possíveis perdas ao longo dos processos produtivos. Nesta fase, o DFA, o qual já compreende a necessidade do mapeamento do ciclo hídrico dos processos, constitui uma importante ferramenta para estabelecer as configurações adequadas de máximo reúso. Além disso, possibilita indicar sistematicamente uma eventual necessidade de tratamento de

correntes para o enquadramento das concentrações aos padrões permitidos, tanto para as operações do processo como para o descarte final das correntes aquosas.

A Tab. 1 apresenta as etapas de implementação de P+L considerando a inclusão do DFA, o qual permeia as ações propostas como uma ferramenta adicional de suporte técnico. Neste caso, as etapas 2, 3, 4 e 5, onde se realizam os balanços materiais, avaliam e implementam as ações, constituem norteadores potenciais do posicionamento da aplicação da tecnologia; tal fato permite vislumbrar sistematicamente novas oportunidades de alinhamento de correntes de processo com máximo reúso, relativamente à configuração original. Vale destacar que esta contribuição apenas se torna oportuna no caso de empresas cujos processos produtivos indiquem a variedade de alternativas de reúso para as correntes, bem como assegurem sua viabilidade por uma vazão mínima aceitável para as modificações propostas.

Tab. 1. Etapas para a implementação da P+L, utilizando a ferramenta DFA

AÇÕES	ETAPAS				
	(E.1) Planejamento e Organização	(E.2) Pré-Avaliação e diagnóstico (DFA)	(E.3) Avaliação de P+L (DFA)	(E.4) Estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental (DFA)	(E.5) Implementação de opções e plano de continuidade (DFA)
(A.1)	Obter comprometimento e envolvimento da alta direção	Desenvolver o fluxograma do processo	Originar um balanço material e de energia	Avaliação preliminar	Preparar plano de implementação de P+L
(A.2)	Estabelecer a equipe do projeto (ecotime)	Avaliar as entradas e saídas	Conduzir uma avaliação de P+L	Avaliação técnica	Implementar as opções de P+L
(A.3)	Estabelecer a abrangência das P+L	Selecionar o foco da avaliação da P+L	Gerar opções de P+L	Avaliação econômica	Monitorar e avaliar
(A.4)	Identificar barreiras e soluções		Selecionar opções de P+L	Avaliação ambiental	Sustentar atividades de P+L
(A.5)				Selecionar as opções a serem implementadas	

A resolução do DFA segue um conjunto de regras heurísticas cujo objetivo é atender a transferência de massa nos intervalos de concentração, utilizando a menor vazão da fonte de água externa mais limpa; desse modo, reduz-se a vazão de consumo desta e também do efluente gerado. O procedimento do diagrama de fontes de água encontra-se descrito no trabalho de Gomes et al. (2007), onde cada restrição (vazão fixa, múltiplas fontes de água, ganhos e perdas de vazão) é demonstrada separadamente. Para garantir o mínimo consumo de água, devem ser seguidas três regras mínimas na seleção da fonte de água: (i) usar fonte de água externa apenas quando fontes de água interna não estão disponíveis; (ii) transferir a máxima quantidade de contaminante possível dentro do intervalo de concentração; e (iii) 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.

Em problemas multicontaminantes, considera-se que sua transferência ocorra simultaneamente. Assim, deve ser considerada a possibilidade de violação da concentração de entrada dos demais contaminantes. Para garantir o máximo reúso de água no processo, um deles deve ser sua concentração estabelecida como limite do processo. Este contaminante é então chamado de referência e todos os cálculos são realizados com base neste, com os demais contaminantes apresentando a mesma vazão para atender às restrições do processo.

3 Resultados e Discussão

3.1 Estudo de Caso: Refinaria de Petróleo

Para verificar a possibilidade de incorporação do procedimento DFA como um suporte às etapas de P+L, é apresentado um estudo de caso envolvendo dados de uma refinaria de petróleo, obtida da literatura. O problema foi estabelecido a partir do problema originalmente concebido para um *retrofit* de uma refinaria, abordado por Huang et al. (1999), e adaptado por Ullmer et al. (2005) para a síntese de processos regenerativos. Considera-se a presença de três contaminantes nas correntes aquosas: Sais (A), Orgânicos (B) e H₂S (C). A água primária é disponibilizada em dois graus distintos de qualidade: fresca (AF) e purificada (AP). A representação da planta de refino inclui diversas unidades operacionais. O efluente coletado dessas operações pode ser tratado como uma fonte secundária (interna) para o sistema de tratamento de efluentes. Os dados de concentração máxima de entrada e saída das operações identificadas, bem como das respectivas vazões limites, são apresentados na Tab. 2.

Tab. 2. Concentrações de entrada e saída nas condições máximas e de vazão limite

Operação	Componente	Quantidade de contaminante transferido (g/h)	Concentração de entrada máxima (ppm)	Concentração de saída máxima (ppm)	Vazão limite (t/h)
Dessalgação (1)	Sais (A)	120.000	200	1.800	
	Orgânicos (B)	480.000	100	6.500	75
	H ₂ S (C)	1.875	20	45	
Lavagem de amônia (2)	Sais (A)	7.485	10	601	
	Orgânicos (B)	81.750	50	6.500	12,67
	H ₂ S (C)	3.200	50	303	
Torre fracionadora (3)	Sais (A)	3.610	10	200	
	Orgânicos (B)	104.481	1	5.500	19
	H ₂ S (C)	2.500	0	132	

Tab. 2. Valores de concentração de entrada e saída nas condições máximas pelo atendimento da vazão limite (continuação)

Operação	Componente	Quantidade de contaminante transferido (g/h)	Concentração de entrada máxima (ppm)	Concentração de saída máxima (ppm)	Vazão limite (t/h)
Caldeira (4)	Sais (A)	420	10	150	3
	Orgânicos (B)	147	1	50	
	H ₂ S (C)	135	0	45	
Caldeira perda (4)	Sais (A)	-	10	-	18
	Orgânicos (B)	-	1	-	
	H ₂ S (C)	-	0	-	
Lavagem de H ₂ S (5)	Sais (A)	200	300	375	2,67
	Orgânicos (B)	1.200	50	500	
	H ₂ S (C)	1.750	5.000	5.655	
Uso geral (6)	Sais (A)	7.100	300	1.250	7,5
	Orgânicos (B)	52.500	50	7.050	
	H ₂ S (C)	221	0	29,5	
Torre de resfriamento (7)	Sais (A)	135.300	2.500	3.115	220
	Orgânicos (B)	0	220	220	
	H ₂ S (C)	0	45	45	
Torre de resfriamento perda (7)	Sais (A)	-	2.500	-	405
	Orgânicos (B)	-	220	-	
	H ₂ S (C)	-	45	-	

Os valores correspondentes à saída (máximos) são obtidos com base nas eficiências de remoção da Tab. 3, definidas por Huang et al. (1999).

A Tab. 4 apresenta as eficiências de remoção relativa aos principais processos representativos da Estação de Tratamento de Despejos Industriais (ETDI) envolvidos neste estudo de caso, para a parcela de efluentes líquidos para cada contaminante presente. O cálculo dos limites permitidos para cada operação é realizado com base nos valores de entrada na ETDI, através de balanço material, resultante da combinação dos efluentes originários dos diferentes processos que os geraram, nas condições máximas de concentração. Com isso, assume-se que os limites operacionais dos processos regenerativos estejam vinculados aos limites estabelecidos pelos processos hídricos da atividade de refino. Já a vazão máxima atrela-se ao valor limite permitido para operar na ETDI (400 t/h). No caso da flotação a ar dissolvido, ocorre perda de água, levando à concentração de sais. Como este valor de perda é muito baixo (0,5%, de acordo com o problema tratado

por Ullmer et al., 2005), admite-se, para simplificação do problema, que sua taxa de remoção seja nula, não sendo, portanto, afetada.

Tab. 3. Dados de processo de uma unidade de tratamento de efluentes da refinaria

Unidade de tratamento	Componente	Taxa de remoção do componente	Vazão limite (t/h)
Stripper (8)	Sais (A)	0	150
	Orgânicos (B)	0,25	
	H ₂ S (C)	0,95	

Tab. 4. Dados de eficiência de remoção de contaminantes dos processos da ETDI

Operação	Componente	Eficiência de remoção	Vazão máxima (t/h)
(9) Separador API	Sais (A)	0 ³	400
	Orgânicos (B)	0,55 ¹	
	H ₂ S (C)	0 ¹	
(10) Flotação a ar dissolvido	Sais (A)	0 ³	400
	Orgânicos (B)	0 ²	
	H ₂ S (C)	0,90 ²	
(11) Lodo ativado	Sais (A)	0 ³	400
	Orgânicos (B)	0,80 ³	
	H ₂ S (C)	0,90 ⁴	

¹ Huang et al. (1999); ² Ullmer et al. (2005); ³ Valor estimado a partir de informações técnicas da PETROBRAS, refletindo a realidade do processo no ambiente industrial; ⁴ Gunaratnam et al. (2005)

A Tab. 5 apresenta os valores das eficiências de remoção do processo de osmose inversa, de acordo com Ullmer et al. (2005), bem como a vazão máxima permitida para a operação.

Tab. 5. Dados de eficiência de remoção do processo de osmose inversa

Operação	Componente	Eficiência de remoção	Vazão máxima (t/h)
(12) Osmose inversa	Sais (A)	0,99	400
	Orgânicos (B)	0,60	
	H ₂ S (C)	0,20	

A partir dos dados de processo e da configuração inicial do problema, foram adaptadas as vazões e concentrações máximas, tornando mais prática a aplicação do procedimento algorítmico DFA para a consideração simultânea dos contaminantes presentes, na busca de um máximo reúso. Os resultados são obtidos

KEY ELEMENTS FOR A SUSTAINABLE WORLD: ENERGY, WATER AND CLIMATE CHANGE

com o auxílio do programa computacional MINEA, desenvolvido no DEQ/EQ/UFRJ (Santos, 2007), em base Microsoft Excel[®], que tem implementado o algoritmo DFA e atende à sugestão advinda do trabalho de Gomes (2002) para inclusão de procedimento automático que permita agilizar os cálculos. São utilizadas as informações definidas na Tab. 2, com as fontes inicialmente atribuídas às qualidades de água limpa, purificada e ao dreno do tanque de petróleo.

A Fig. 1 apresenta a configuração do balanço hídrico da rede proposta, nas condições operacionais, obtida a partir das informações do processo. A água captada é enviada para a Estação de Tratamento de Água (ETA) e distribuída às diversas operações de acordo com sua qualidade requerida. O dreno do tanque de petróleo é representado por TQ no fluxograma. Os valores das concentrações de descarte alcançados após o processo de osmose inversa atendem aos limites estabelecidos pela legislação. A vazão de água captada neste caso base é de 762,84 t/h, enquanto que a vazão de descarte do efluente para o corpo hídrico é de 354,84 t/h.

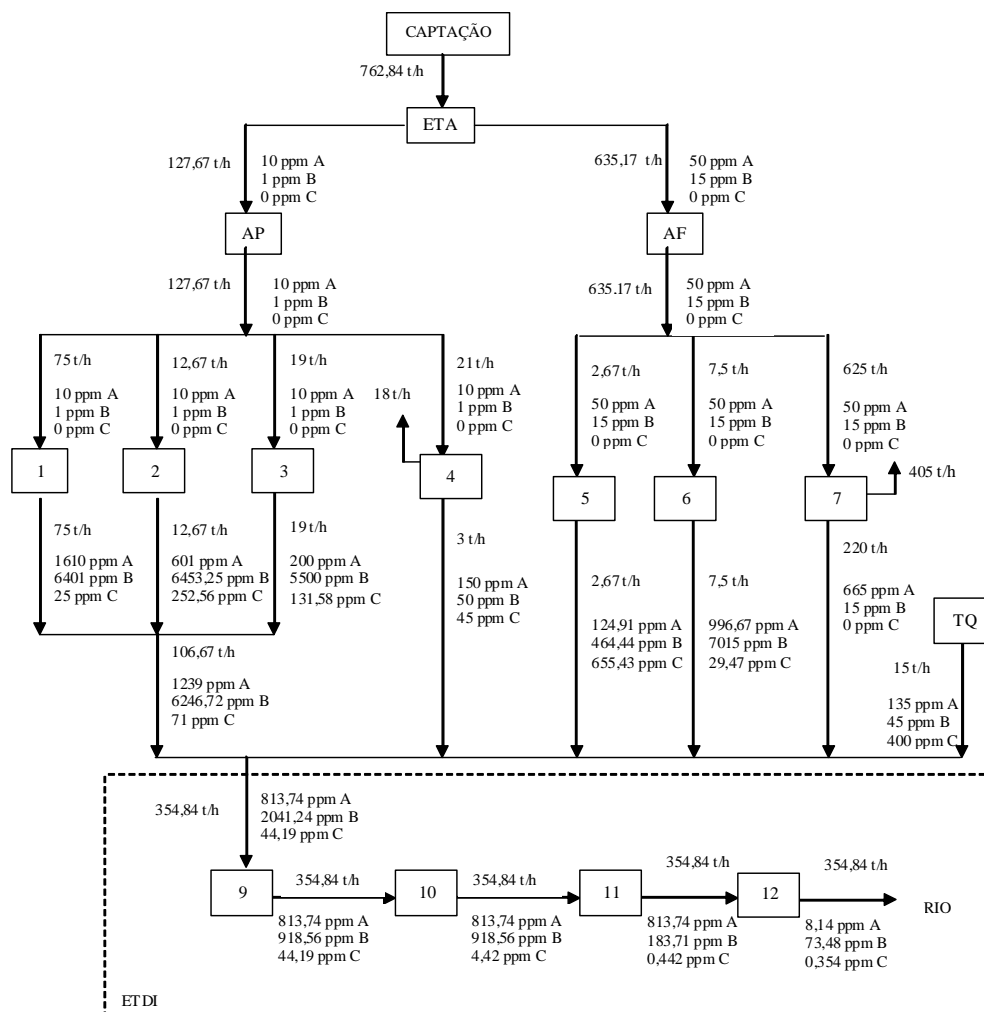


Fig. 1. Esquema geral dos processos do estudo de caso, incluindo a ETDI

A aplicação do procedimento gerou o cenário de reutilização hídrica das correntes, conforme a estrutura apresentada na Fig. 2. As linhas com coloração vermelha representam o novo alinhamento físico das correntes. A redução na captação de água para o processo foi de 5%, passando a necessitar de 725,26 t/h, cuja reutilização permitiu um descarte de 317,26 t/h de efluente. Os valores em vermelho (entrada das operações 1 e 2) representam os contaminantes cujas

concentrações foram excedidas para a operação subsequente, o que pode ser resolvido com o aumento da quantidade de água captada, ou mesmo uma redistribuição das correntes. Outra possibilidade seria estabelecer regenerações locais para um determinado contaminante. Cabe salientar que este cenário constitui apenas uma das possíveis alternativas geradas pelo DFA. As diferentes possibilidades, no entanto, são passíveis de análise para a real implementação na indústria, uma vez que não considera investimento com tubulação e bombeamento adicional de correntes.

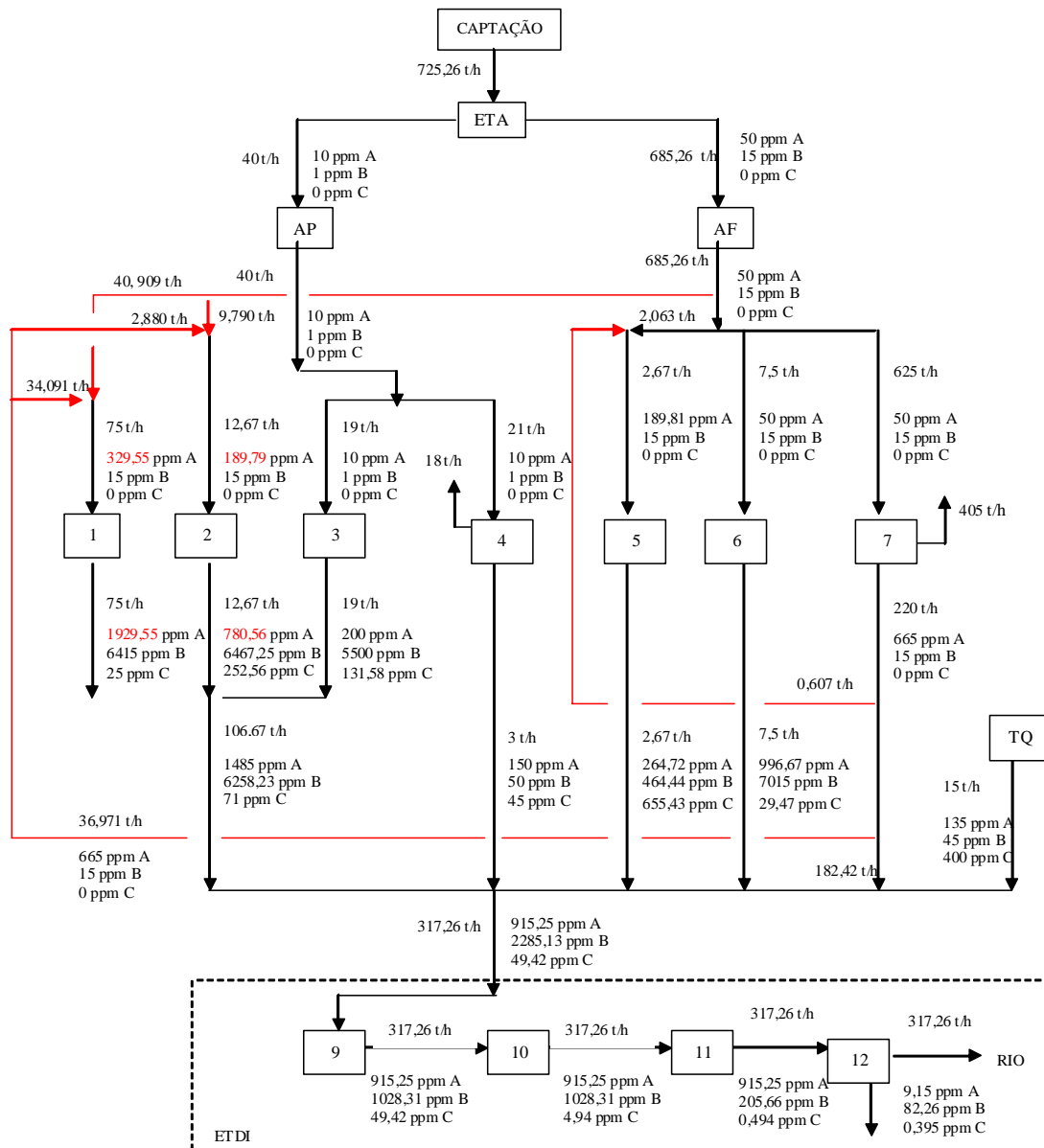


Fig. 2. Configuração de processo para o cenário de reutilização de correntes considerado, com base na estrutura original da Fig. 1.

Diversos cenários podem ser gerados com o procedimento DFA, partindo do mesmo problema original, de modo que se possa evoluir na configuração da rede à medida que a análise do engenheiro de processo permita uma aproximação com a realidade industrial. Outros cenários para o estudo de caso aqui abordado podem ser encontrados em Mirre (2007), os quais alcançam reduções nos custos totais anuais (investimento e operacional) em torno de 20%. Assim, é importante que todas as configurações geradas levem em conta o valor econômico das alternativas, de

forma que se estabeleça o custo-benefício da implementação das oportunidades de reutilização.

4 Conclusão

Este trabalho teve como proposta demonstrar a possibilidade de incorporação do procedimento algorítmico DFA às etapas de desenvolvimento de um programa de Produção mais Limpa. Para tanto, utilizou-se como exemplo um estudo de caso envolvendo dados representativos de uma refinaria de petróleo. Com isso, foi possível gerar um cenário, dentre as várias alternativas que o procedimento permite, ocasionando uma redução tanto na captação de água bruta quanto de efluente descartado. Visando estabelecer a possibilidade de implementação do cenário no processo real, é necessário que se faça um estudo econômico, em que se constate o efeito do reúso na redução nos custos totais, incluindo o tratamento de efluentes. Em todo caso, torna-se evidente o potencial da metodologia aqui apresentada, sendo uma importante ferramenta quando se pretende definir novas alternativas de reutilização hídrica de modo sistemático e eficiente, dada a sua facilidade de adoção dentro de um programa de gerenciamento de recursos hídricos na indústria.

5 Agradecimentos

Ao CNPq e ao Cenpes/Petrobras, pelo auxílio financeiro e interesse no desenvolvimento do projeto.

6 Referências

Castro, P., Matos, H., Fernandes, M.C., Pedro Nunes, C., 1999. Improvements for mass-exchange networks design. *Chemical Engineering Science*, 54, 1649-1665.

Delgado, B.E.P.C., 2003. 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, RJ.

Delgado, B.E.P.C., 2008. Síntese de sistemas de regeneração e tratamento final de efluentes. Tese de D.Sc., TPQBq, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

Dunn, R.F., Bush, G.E., 2001. Using process integration technology for cleaner production. *Journal of Cleaner Production*, 9, 1-23.

Gomes, J.F.S., 2002. Procedimento para minimização de efluentes aquosos. Dissertação de M.Sc., TPQBq, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

Gomes, J.F.S., Queiroz, E.M., Pessoa, F.L.P., 2007. Design procedure for water/wastewater minimization: single contaminant. *Journal of Cleaner Production*, 15, 474-485.

Gunaratnam, M., Alva-Argáez, A., Kokossis, A., Kim, J.-K., Smith, R., 2005. Automated design of total water systems. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44, 588-599.

Huang, C-H., Chang, C-T., Ling, H-C., 1999. A mathematical programming model for water usage and treatment network design. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 38, 2666-2679.

Marques, S.V., 2008. Minimização do consumo de água e da geração de efluentes aquosos – estudos de casos. Dissertação de M.Sc., TPOBq, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

Melo, A.R., 2008. Uso integrado e eficiente da água nas indústrias têxteis catarinenses. Tese de D.Sc., PPEQ/UFSC, Florianópolis, SC.

Mirre, R.C., 2007. Recuperação e reúso de água na indústria de petróleo: síntese de redes de transferência de massa. Dissertação de M.Sc., TPOBq, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

Mirre, R.C., Delgado, B.E.P.C., Yokoyama, L., Queiroz, E.M., Pessoa, F.L.P., 2007. Diagrama de fontes de água: uma ferramenta para gestão e reúso de água na indústria. Anais do III Workshop sobre Gestão e Reúso de Água na Indústria, 1-6, Florianópolis, SC.

Moreira, R.C., 2008. Minimização de efluentes em uma unidade de tratamento de água industrial. Dissertação de M.Sc., Gerenciamento e Tecnologia Ambiental no Processo Produtivo. EP/UFBA, Salvador, BA.

Santos, R.P., 2007. Extensão e automatização do diagrama de fontes de água usado no gerenciamento e redução do consumo de água em plantas industriais. Dissertação de M.Sc., TPQBq, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

Ullmer, C., Kunde, N., Lassahn, A., Gruhn, G., Schulz, K., 2005. WADOTM: Water design optimization – methodology and software for the synthesis of process water systems. *Journal of Cleaner Production*, 13, 485-494.

Ulson de Souza, A.A., Forgiarini, E., Brandão, H.L., Xavier, M.F., Pessoa, F.L.P., Guelli U. Souza, S.M.A., 2008. Application of water source diagram (WSD) method for the reduction of water consumption in petroleum refineries. *Resources, Conservation and Recycling*. 1-6. No prelo.

Wang, Y.P., Smith, R., 1994. Wastewater minimisation. *Chemical Engineering Science*, 49 (7), 981-1006.

Wang, Y.P., Smith, R., 1995. Wastewater minimization with flowrate constraints. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 73(A), 889-904.