



São Paulo - Brazil - May - 22<sup>nd</sup> to 24<sup>th</sup> - 2013

# Acc4<sup>th</sup>emmic

## INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION

“INTEGRATING CLEANER PRODUCTION INTO SUSTAINABILITY STRATEGIES”

### **P+ÁGUA: Um Modelo para Seleção de Oportunidades Sustentáveis de Reúso de Efluentes Industriais a partir da Integração de Processos**

MIRRE, R. C. <sup>a\*</sup>, YOKOYAMA, L. <sup>a</sup>, PESSOA, F. L. P. <sup>a</sup>

*a. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro*

*\*Autor correspondente, reinaldomirre@hotmail.com*

#### **Resumo**

A tendência de aumento de custos relativos ao consumo e tratamento de água, bem como ao descarte de efluentes, tem incentivado o desenvolvimento de metodologias que visam à identificação de oportunidades de reúso no meio industrial. As técnicas de Integração de Processos, campo proveniente da Engenharia de Processos e Sistemas, têm sido bastante estudadas no sentido da minimização de efluentes aquosos. Uma das ferramentas é o Diagrama de Fontes de Água (DFA), procedimento algorítmico que utiliza regras heurísticas que buscam conexões ótimas entre fontes e sumidouros de água no processo industrial. Permite ainda a síntese de redes de transferência de contaminantes entre as correntes de processos hídricos, voltadas para máximo reúso, incluindo regeneração e reciclo. Neste sentido, o DFA pode ser aplicado como parte de um programa de Produção mais Limpa. Este trabalho tem como objetivo apresentar um procedimento que visa à seleção de alternativas promissoras para a posterior implementação de reúso/reciclo de correntes hídricas a partir da aplicação do DFA. Este procedimento é parte de uma proposta de modelo de gerenciamento sustentável do reúso de águas e efluentes industriais, denominado P+ÁGUA, e que se apoia no tripé P+L / DFA / Valoração de impactos ambientais negativos. Um estudo de caso foi conduzido a partir de diferentes cenários obtidos pela aplicação do DFA a dados representativos de uma refinaria de petróleo; as redes de água foram então avaliadas por um mecanismo de seleção prévia, com base na estatística descritiva e em critérios de custo e de realinhamento de correntes. Neste caso, foi possível identificar dois cenários considerados promissores, de um conjunto inicial de sete oportunidades geradas. Os resultados evidenciaram a proposta como um instrumento alternativo de avaliação preliminar de oportunidades sustentáveis de reúso. Esta avaliação é importante para os próximos passos do modelo P+ÁGUA, na medida em que orienta a tomada de decisão no estudo da viabilidade de cenários numerosos e complexos.

**Palavras-chave:** *Estratégias sustentáveis; Reúso de águas e efluentes; Tomada de decisão; Integração de Processos*

#### **1. Introdução**

A água é um recurso essencial em grande parte dos processos industriais, onde as características de qualidade e quantidade variam de acordo com as necessidades operacionais. O aumento nos custos de produção é um reflexo da atribuição de valor econômico da água. O consumo de água e a geração de efluentes podem ser minimizados a partir de medidas de prevenção na fonte e, normalmente, a prática adequada do máximo reúso de água reduz a necessidade de tratamento final de tubo.

“INTEGRATING CLEANER PRODUCTION INTO SUSTAINABILITY STRATEGIES”

São Paulo - Brazil - May 22<sup>nd</sup> to 24<sup>th</sup> - 2013

A Integração de Processos é uma abordagem holística voltada para o projeto e a operação de processos, levando em conta a unidade dos processos, sob a perspectiva de sistemas (Dunn e El-Halwagi, 2003). Em geral, abordam duas categorias principais (Bagajewicz, 2000): (i) métodos gráficos, heurísticos ou algorítmicos, e (ii) técnicas de programação matemática. O uso de programação matemática, importante para problemas complexos, leva a soluções rigorosas, porém demanda esforço computacional, e nem sempre é possível alcançar o ótimo global. Já um procedimento heurístico induz a diferentes ótimos locais, sendo necessário selecionar o melhor (ou o mais viável), sem qualquer garantia de alcance do ótimo global; normalmente está associado à praticidade de implementação e resolução, auxiliando o engenheiro de processos na busca de soluções rápidas e eventualmente próximas do ótimo global. Em casos mais complexos, como nos sistemas de correntes aquosas envolvendo múltiplos contaminantes, a flexibilidade de regras heurísticas deve contemplar a viabilidade das opções.

Uma importante ferramenta para o uso racional da água na indústria é o Diagrama de Fontes de Água (DFA) (Gomes et al., 2007; Gomes et al., 2013), procedimento algorítmico baseado em equações de balanço material e em regras heurísticas que procuram estabelecer conexões ótimas entre fontes e sumidouros de água nos processos hídricos industriais; em paralelo, permite a síntese simultânea de fluxogramas alternativos, em diferentes situações de reúso e tratamento, e incorporando as restrições presentes nos processos industriais. Uma das vantagens está na facilidade de realização de cálculos rápidos e manuais. No entanto, vale ressaltar que, a exemplo de outras ferramentas, o DFA não constitui a solução de todos os problemas, pois nem sempre haverá necessidade de empregá-lo, como em processos menos complexos e onde o uso (ou o reúso) da água já esteja delimitado.

O método DFA pode ser integrado às práticas de P+L (Mirre et al., 2009; Mirre, 2012). O procedimento já foi aplicado com sucesso a distintos setores industriais (Marques, 2008; Ulson de Souza et al., 2009; Ulson de Souza et al., 2010), e utilizado em combinação ou comparação com modelos de programação matemática (Kumaraprasad e Muthukumar, 2009; Karthick et al., 2010; Guelli U. de Souza et al., 2011), sendo uma valiosa alternativa e mesmo um suporte inicial a estes métodos. A implementação automática do DFA levou à criação do *software* MINEA (Santos, 2007), contemplando a rapidez da aplicação a problemas complexos, próximos da realidade industrial.

Diante das soluções alternativas que o DFA apresenta, e em função da eventual complexidade dos processos hídricos, é importante adotar um mecanismo que permita o julgamento adequado das propostas consideradas promissoras para estudos de implementação. Normalmente utilizam-se critérios de mínima vazão de água captada e mínimo custo operacional; no entanto, também é oportuno considerar a influência do eventual realinhamento de correntes, de investimentos adicionais, e de impactos ambientais negativos, pois nem sempre o critério de menor custo operacional levará ao menor dano ambiental sobre os recursos hídricos.

Este trabalho propõe uma metodologia que incorpore o DFA ao modelo de P+L, direcionado à racionalização do consumo de água e da geração de efluentes industriais. O modelo, denominado P+ÁGUA, considera um conjunto de procedimentos que preveem como parâmetro final de seleção de cenários de reúso a valoração de danos sobre os recursos hídricos (externalidades negativas); tais danos são influenciados pela alteração de qualidade do corpo receptor com o descarte de efluentes. Aqui, a metodologia é aplicada a partir de dados representativos de uma refinaria de petróleo, sendo abordada a etapa de “filtragem” preliminar de cenários promissores.

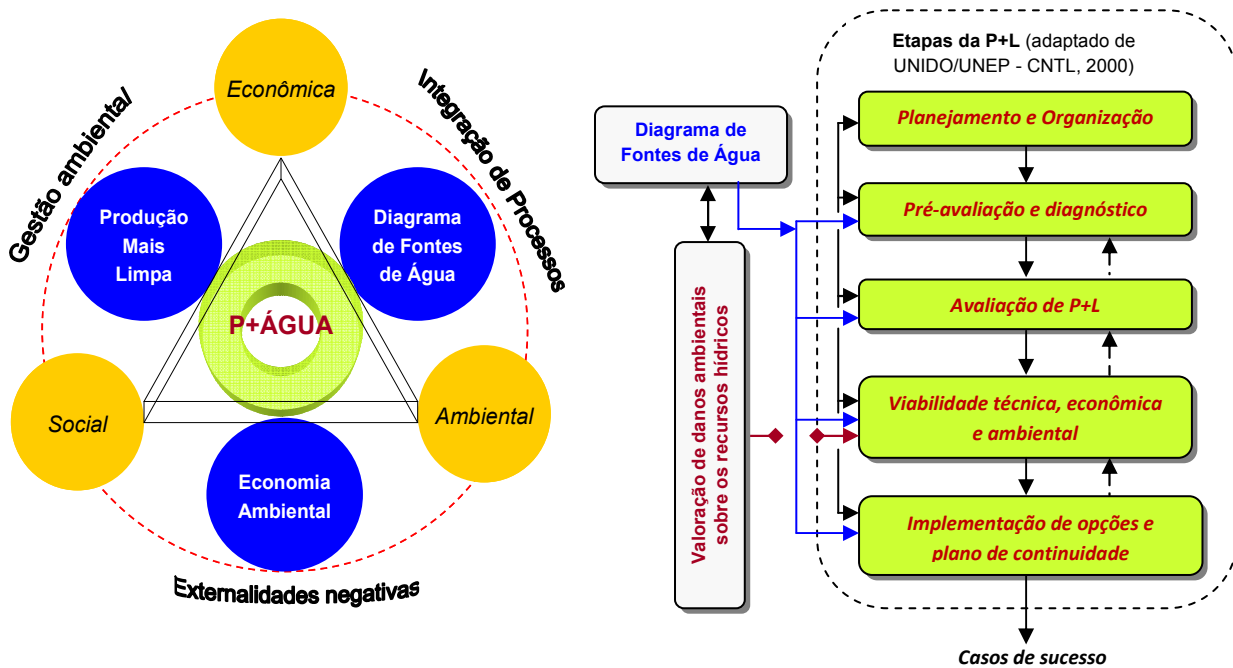
## 2. Metodologia

A resolução do DFA segue um conjunto de regras heurísticas cujo objetivo é transferir a máxima quantidade de contaminante possível dentro dos intervalos de concentração, utilizando a menor vazão da fonte de água externa mais limpa, priorizando o uso de fontes internas nos intervalos, e sem dividir correntes de operações presentes em mais de um intervalo. Com isso, reduz-se a vazão de consumo e também do efluente gerado. O procedimento do DFA encontra-se descrito no trabalho de Gomes et al. (2007). Em problemas com múltiplos contaminantes, considera-se que sua transferência ocorra simultaneamente (Gomes et al., 2013). Nestes casos, deve ser considerada a possibilidade de violação

da concentração de entrada dos demais contaminantes.

Da mesma forma que a filosofia básica de P+L está voltada para a eliminação ou redução de resíduos na fonte, ao invés de empregar tecnologias de controle e tratamento dos resíduos gerados, o modelo P+ÁGUA considera o uso do DFA como instrumento para reduzir a necessidade de investimento imediato em tais tecnologias de tratamento, priorizando a maximização do reúso nos processos; isto sem mudanças fundamentais no processo, porém promovendo um eventual realinhamento de correntes em relação à configuração do cenário base.

A Fig. 1 apresenta a estrutura do modelo P+ÁGUA para o gerenciamento integrado do reúso sustentável, vinculado ao tripé econômico, ambiental e social, e auxiliar para as etapas de P+L.



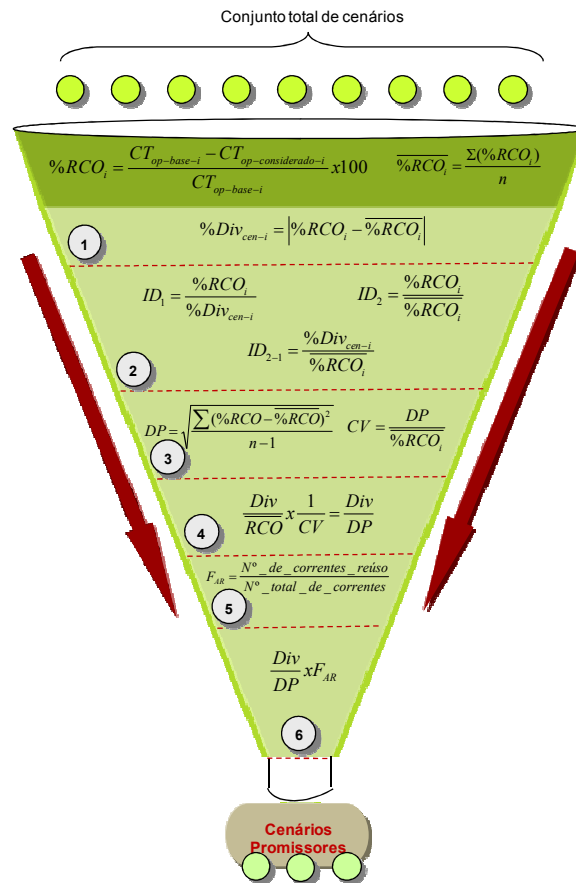
**Fig. 1.** Representação do modelo para o gerenciamento integrado sustentável para o reúso de águas e efluentes industriais (P+ÁGUA).

O modelo P+ÁGUA tem como base um conjunto de etapas que direcionam para a avaliação do cenário com potencial para implementação prática, observando aspectos econômico, ambiental e social. A realização de todas as etapas depende das características e dimensão dos processos hídricos analisados. As etapas do modelo são: (1) DFA – geração de cenários para redução do consumo de água; (2) seleção de cenários promissores a partir de índices relacionados a custos, e/ou estabilidade da água (corrosão e incrustação, em presença de sistema de água de resfriamento; melhorias de condições operacionais nos ciclos de concentração das torres de resfriamento); (3) Filtragem: seleção de cenários promissores de reúso (novos índices com base na Estatística Descritiva, e em realinhamento de correntes de reúso); (4) Tratamento: identificação de correntes a serem tratadas visando redução da captação de água; (5) Cálculo do custo adicional de impacto por meio de índices de qualidade da água e de vida aquática; (6) Avaliação econômica: critérios de valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR) e tempo de retorno (*Payback period*).

Este trabalho desenvolve a etapa relativa à aplicação do DFA para a filtragem de cenários de reúso com potencial para real implementação na planta (promissores), como parte do modelo P+ÁGUA.

### 2.1 Procedimento para seleção de cenários promissores de reutilização hídrica

A cada etapa da análise um conjunto de cenários é descartado, em processo eliminatório cujo objetivo é identificar e selecionar aquelas configurações hídricas mais promissoras. Trata-se de um mecanismo que visa auxiliar a tomada de decisão quando diversas alternativas estão presentes como oportunidades de reúso. Identificar aquela com maior potencial torna-se uma decisão bastante útil. Este mecanismo de seleção pode ser materializado ao formato de um funil, no qual os melhores cenários são aqueles que, após as etapas de análise, conseguem então atravessar o fundo vazado do “utensílio” cônico, enquanto os demais ficam retidos (e eliminados) durante o processo. A Fig. 2 ilustra o procedimento por meio de um conjunto de equações que auxiliam a análise em cada uma das seis etapas que deslizam pelo funil.



**Fig. 2.** Procedimento de cálculo para seleção de cenários com oportunidades de reúso.

O procedimento de cálculo para seleção de cenários de reúso proposto neste trabalho sugere o uso de recursos estatísticos, tais como medidas de tendência central (média) e de dispersão (desvio médio, variância, desvio-padrão e coeficiente de variação) para encontrar alternativas de investimento em cenários com o maior retorno, ou seja, menor custo operacional, e ao menor risco, dado pela menor variabilidade em relação ao retorno esperado. As etapas são apresentadas a seguir:

**1.** Inicialmente, a análise requer o cálculo dos custos operacionais dos respectivos cenários. Com tais valores, efetua-se o cálculo da redução percentual nos custos operacionais ( $\%RCO_i$ ) do cenário  $i$ .  $CT_{op-base}$  é o custo total operacional do cenário base, e  $CT_{op-considerado}$  é o custo total operacional do cenário considerado. Em seguida, calcula-se a média aritmética entre os percentuais de redução dos  $n$  cenários envolvidos na análise ( $\overline{\%RCO_i}$ ). Com a redução percentual operacional dos custos de operação e a média dos percentuais, obtém-se a divergência entre a média de cada cenário  $i$  ( $\%Div_{cen-i}$ ).

**Critério:** Para todos os cenários, relacionar a redução nos custos e a divergência entre a média. Selecionar as alternativas em duas vertentes: as de maior redução nos custos e as de menor divergência entre a média.

2. Após a análise preliminar, determina-se, dentre os cenários previamente selecionados, os índices de desempenho de divergência ( $ID_1$ ) e de média ( $ID_2$ ), os quais são relacionados pelo índice  $ID_{2-1}$ , com a divergência pela redução média dos custos operacionais dos cenários.

3. A etapa seguinte requer o cálculo do desvio-padrão relativo à amostra de dados não agrupados (DP). O coeficiente de variação ou de dispersão (CV) é usado para avaliar o grau de dispersão dos dados, estendendo a análise do desvio-padrão, sendo empregado para comparar dispersões relativas de duas amostras, independente de suas médias ou grandezas serem diferentes.

4. Na próxima etapa deve-se calcular a divergência em relação ao desvio-padrão ( $Div/DP$ ), como um parâmetro dado pelo produto da divergência em relação à média pelo inverso do coeficiente de variação.

**Critério:** Selecionar os cenários que apresentem o menor valor da relação entre os índices de desempenho de divergência e média ( $ID_1$  e  $ID_2$ , respectivamente), assim como os de menor valor da relação Média/Divergência.

5. Nesta etapa calcula-se o chamado “Fator Adicional de Reúso” ( $F_{AR}$ ), um índice que tem como objetivo ponderar o efeito das correntes que sofreram um novo direcionamento estrutural após a aplicação do DFA, em relação à configuração do cenário base. O fator adicional de reúso é obtido pela razão entre o número de correntes que participam diretamente do reúso, com o novo alinhamento na entrada das operações receptoras, e o número total de correntes do processo hídrico considerado.

6. Na etapa final, a relação entre a divergência e o desvio-padrão é então ponderada pela multiplicação do valor correspondente ao fator adicional de reúso ( $\frac{Div}{DP} \times F_{AR}$ ) de cada alternativa de processo (cenário).

**Critério:** Selecionar o(s) cenário(s) de menor valor.

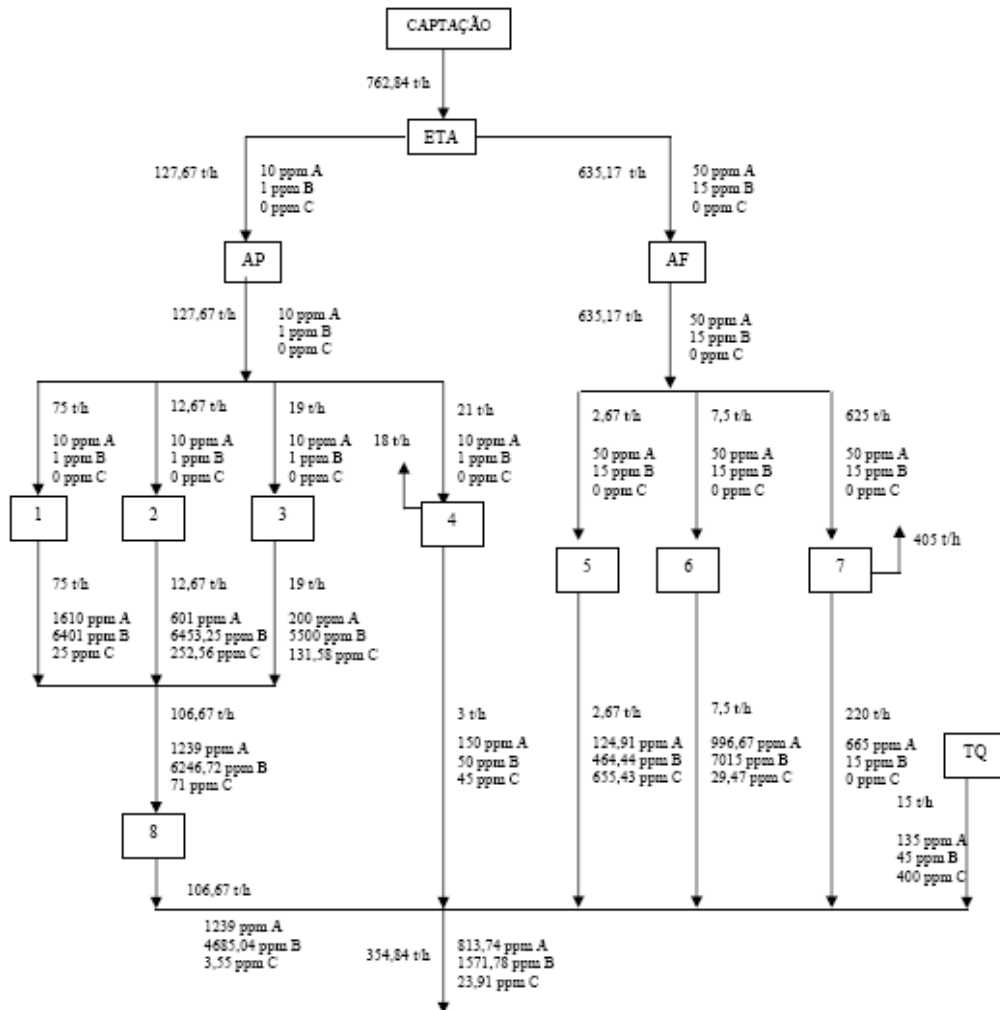
O procedimento descrito pode ser empregado para avaliar oportunidades promissoras de reúso identificadas por meio da aplicação do DFA, que tem a vantagem de indicar diferentes possibilidades de fluxogramas de processos hídricos. No entanto, pela base estatística que o constitui, torna-se indicado apenas quando se tem um conjunto variado de cenários, sendo importante uma sistemática que aponte para a seleção daqueles mais promissores quanto à viabilidade de implementação. De qualquer forma, vale colocar que o processo de filtragem aqui proposto não tem por objetivo reduzir o numeroso conjunto de cenários a uma única alternativa; ao contrário, deve tão somente limitar a sua quantidade a ser tratada nas etapas posteriores, uma vez que aqueles remanescentes deverão ser analisados quanto à possibilidade adicional de regeneração de correntes e sob a ótica da valoração de efeitos adversos sobre os recursos hídricos.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Estudo de Caso: Refinaria de Petróleo

O estudo de caso foi conduzido a partir de dados de uma refinaria de petróleo, obtidos da literatura e abordados por Mirre (2007) e Mirre et al. (2009; 2011). O fluxograma do cenário base é apresentado na Fig. 3. Considera-se a presença de três contaminantes nas correntes aquosas: Sais (A), Orgânicos (B) e  $H_2S$  (C). A água primária é disponibilizada em dois graus distintos de qualidade: AF (água potável) e AP (água tratada para atender a uma determinada demanda de qualidade). Uma operação de *stripping* a vapor (8) é incorporada visando essencialmente a regeneração de orgânicos e  $H_2S$  (taxa de remoção de 0,25 e 0,95, respectivamente) da corrente resultante das operações 1, 2 e 3 (dessalinização, lavagem de amônia e torre fracionadora, respectivamente). Neste problema, não se considera o sistema de tratamento final de efluentes. As demais operações são: (4) caldeira; (5) Lavagem de  $H_2S$ ; (6) Uso geral; (7) Torre de resfriamento; TQ, dreno do tanque de petróleo. A água

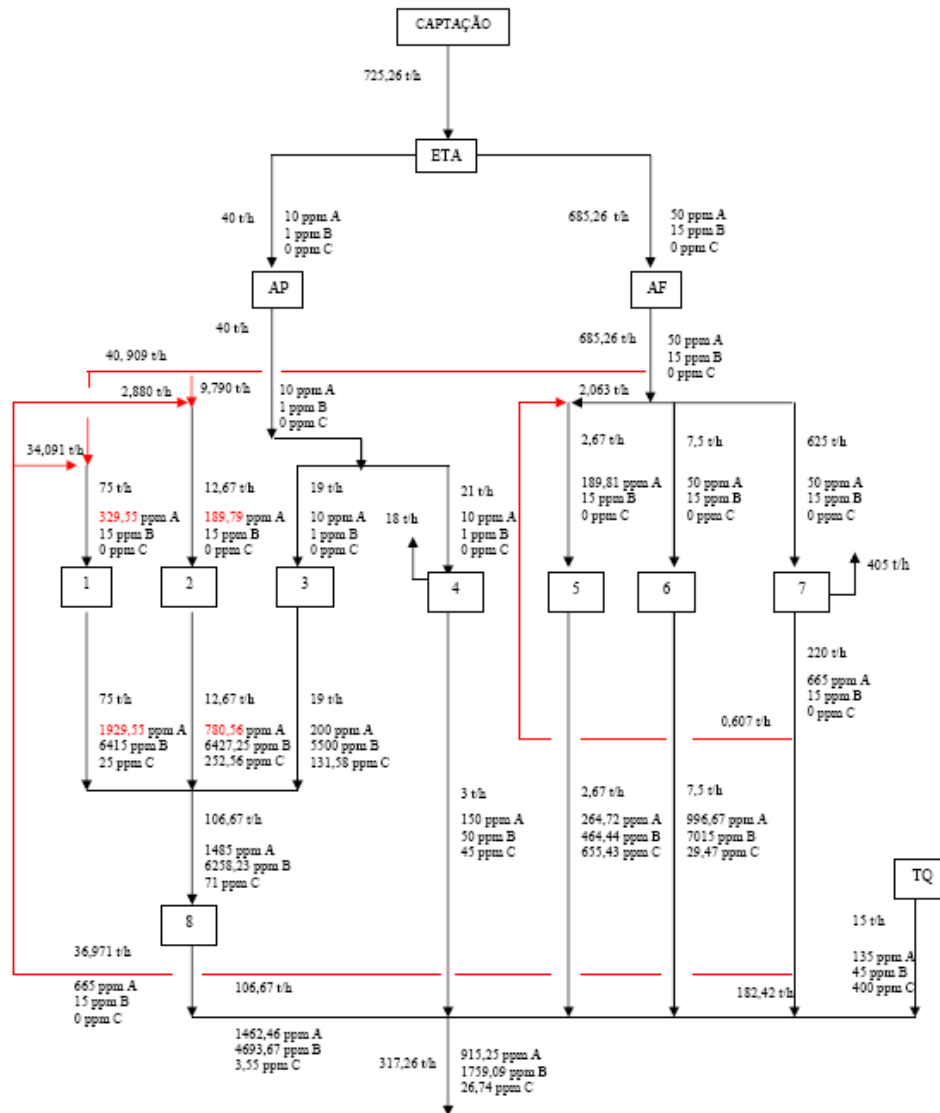
captada é enviada para a Estação de Tratamento de Água (ETA) e distribuída às diversas operações de acordo com sua qualidade requerida. Por simplificação e ajuste do problema, não se considera a concentração dos componentes B e C na torre de resfriamento.



**Fig. 3.** Rede de águas do caso base apresentado.

Os resultados foram obtidos com o auxílio do programa computacional MINEA, a partir de dados de vazão de água e concentração de entrada e saída de contaminantes nas respectivas operações.

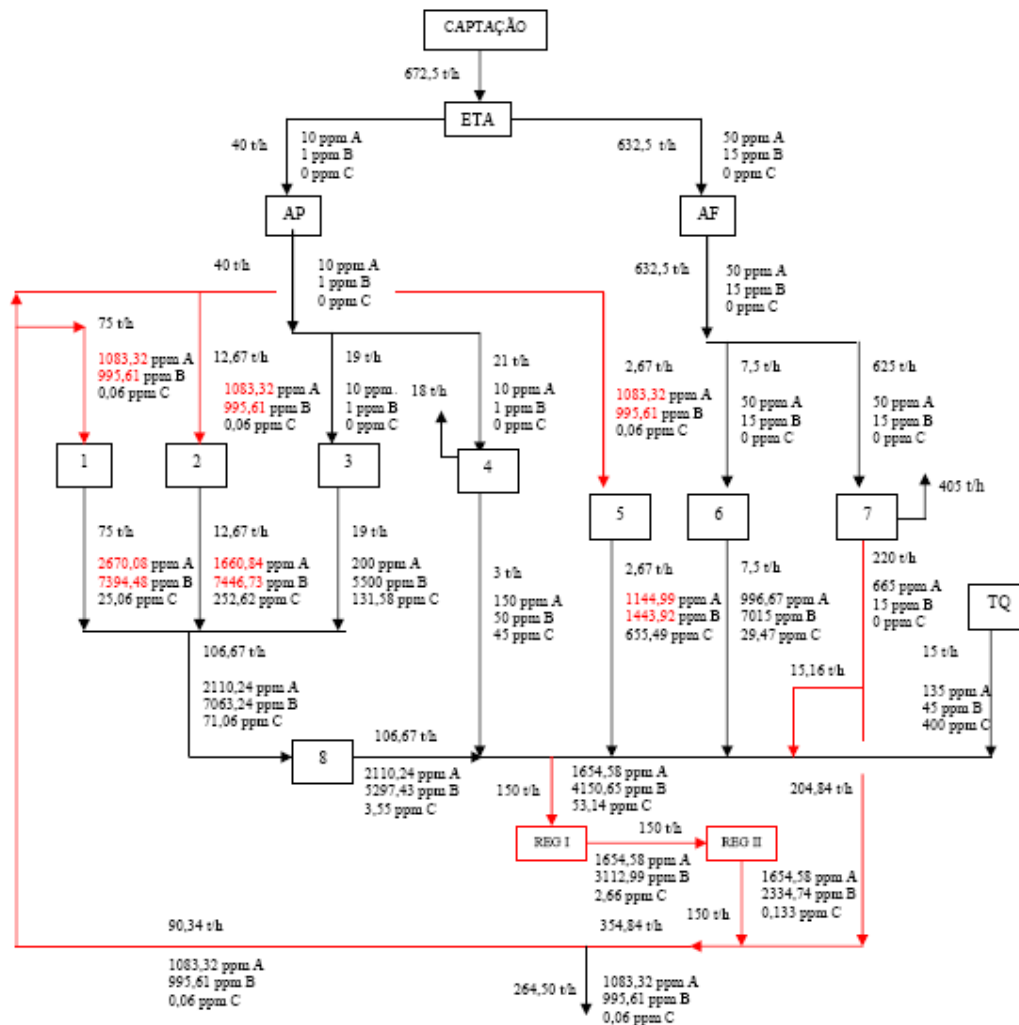
As Figs. 4 e 5 apresentam os resultados das redes obtidas pela aplicação do DFA para máximo reúso e múltiplos contaminantes, para os cenários 1 e 7, respectivamente. O cenário 1 levou a uma redução na captação de água de 762,84 t/h para 725,26 t/h (4,93%). Os valores marcados em vermelho indicam que os limites de concentrações de entrada e saída das operações 1 e 2 foram ultrapassados, para o componente A, sendo necessário proceder ao ajuste de concentrações por aumento da vazão de água limpa, ao ajuste de vazões das correntes a montante das operações, ou ao tratamento intermediário (local). Já no cenário 7, foram observados investimentos na instalação adicional de dois *strippers* sequenciais (REG I e REG II), como forma de desonerar o tratamento final para descarte. Este cenário alcançou uma redução na captação correspondente a 11,84%, em relação ao caso base. No entanto, esta alternativa estabelece um investimento adicional em tratamento para reciclo e descarte de efluentes, não sendo vantajoso do ponto de vista operacional, mesmo porque não eliminou a violação de concentrações de contaminantes na entrada das operações 1 e 2, em relação ao cenário 1, e ainda ocasionou violação nas concentrações dos contaminantes na corrente a montante da operação 5. Esta análise também é válida para os cenários 5 e 6, obtidos considerando a inclusão de regeneradores locais a montante do descarte, onde a possibilidade de redução de investimento em sistemas de tratamento final de efluentes não é avaliada neste trabalho.



**Fig. 4.** Rede de águas para o cenário 1.

Normalmente deseja-se que ocorra a máxima redução na vazão com a mínima mudança estrutural resultante da proposta de realinhamento de correntes. No entanto, deve-se considerar a hipótese de que há uma tendência de maior redução na vazão captada com o aumento do número de correntes realinhadas. Por outro lado, a busca de um realinhamento mínimo de correntes torna-se importante neste caso, pois a possibilidade de regeneração de correntes deve ser levantada, uma vez que há maior tendência a ocorrer violação de concentrações de contaminantes nas operações que envolvem a recepção de correntes de reúso.

Os resultados da aplicação do procedimento para seleção prévia de cenários promissores, apresentado neste trabalho, encontram-se sintetizados na Tab. 1. Em princípio, nota-se que as maiores reduções em termos de vazão de água captada referem-se aos cenários 6 e 7; já em relação aos custos, as maiores reduções referem-se aos cenários 1, 4, 5 e 6, sem levar em conta o investimento em tratamento fim de tubo. Por esta análise, o cenário 6 poderia ser uma opção promissora, mas os critérios incorporados pela aplicação do procedimento de "filtragem" podem indicar outros cenários potenciais. Assim, optou-se por selecionar os três maiores valores de redução nos custos, cenários 4, 6 e 1; paralelamente, optou-se por selecionar os três menores valores de divergência entre a média, cenários 7, 5 e 1. Conforme comentado, os cenários 5, 6 e 7 são eliminados em razão de incorporarem regeneradores locais a montante do sistema de tratamento final, não avaliado neste estudo. Com isso, os cenários 1 e 4 tornam-se candidatos a estudos posteriores de identificação da proposta promissora.



**Fig. 5.** Rede de águas para o cenário 7.

Na Tab. 1, as parcelas correspondentes aos custos operacionais e de investimento totalizam os custos totais anuais. Nos cenários, o *stripper* (regenerador específico no processo) já existente na planta (Operação 8) contribui com a parcela referente ao seu custo operacional. Já nos cenários 5, 6 e 7, onde são adotados *strippers* adicionais, incorporam-se as respectivas contribuições não apenas do custo operacional, como também de investimento nestes processos. Os custos de investimento e operacional na regeneração adicional com *stripping* foram obtidos de correlações de Takama et al. (1980). Considera-se uma operação anual do sistema de 8.600 horas/ano, e um fator de anualização para o custo de investimento de 0,1. A captação de água é composta pelas qualidades de água purificada e fresca, geradas na estação de tratamento de água, ao custo de 0,3 \$/t e 0,1 \$/t, respectivamente. O efluente descartado no corpo receptor é tributado em 0,03 \$/t, sendo a vazão o principal parâmetro analisado, embora se exija o atendimento aos limites permitidos pela legislação. Entretanto, o objetivo aqui é analisar a influência do reaproveitamento das correntes no processo.

Embora o procedimento de filtragem de cenários tenha maior utilidade quando aplicado a problemas com número maior de cenários (com cerca de vinte, por exemplo), os resultados sugerem que nem sempre o método de integração de processos é suficiente para alcançar as propostas mais promissoras. Em tais casos, o procedimento de seleção pode ser um instrumento adequado para auxiliar na busca de praticidade, já que não leva em conta somente o efeito da redução de água captada para os processos, mas também o realinhamento de correntes.



**Tab. 1.** Determinação de cenários potenciais com base no critério de análise seqüencial.

	Cenário							
	Base	1	2	3	4	5	6	7
Vazão de água captada (t/h)	762,84	725,26	762,84	732,82	719,30	717,56	672,50	672,50
Vazão de descarte (t/h)	354,84	317,26	354,84	324,82	311,30	327,24	264,50	264,50
Redução na captação (%)		4,93	0	3,94	5,70	5,93	11,84	11,84
Custo total anual (\$/ano)	967.290,19	774.483,35	967.290,19	892.637,03	767.820,07	795.556,00	771.697,35	827.897,04
Redução nos custos (%)	-	19,9327	0	7,7178	20,6215	17,7542	20,2207	14,4107
Média entre os percentuais de redução dos cenários 1 a 7 (%)		14,38						
Divergência entre a média dos cenários (%)		5,5530	14,3796	6,6619	6,2419	3,3745	5,8411	0,0310
Maior redução nos custos		Cenário 1			Cenário 4		Cenário 6	
Menor divergência entre a média		Cenário 1				Cenário 5		Cenário 7
(1) Redução/Divergência		3,5895			3,3037	5,2613	3,4618	464,2605
(2) Redução/Média		1,3862			1,4341	1,2347	1,4062	1,0022
(2) / (1)		0,3862			0,4341	0,2347	0,4062	0,0022
Desvio médio (DM) (%)		6,01						
Desvio padrão (DP)		7,82						
Coefficiente de variação (CV)		0,54						
[(2) / (1)] / CV		0,7105			0,7987	0,4318	0,7474	0,0040
Fator adicional de reuso (F <sub>AR</sub> )		0,2083 (=5/24)			0,2083 (=5/24)	0,3333 (=8/24)	0,25 (=6/24)	0,2917 (=7/24)
{[(2) / (1)] / CV} * F <sub>AR</sub>		0,1480			0,1664	0,1439	0,1868	0,0012
Cenário(s) promissor(es)		Cenário 1			Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7

A triagem de cenários permitiu a pré-seleção daqueles de maior redução nos custos e menor divergência entre a média, para as condições do problema, tornando-os aptos a estudos posteriores de implementação. As etapas subsequentes do P+ÁGUA refinam os cenários remanescentes considerando a viabilidade econômica de eventuais sistemas de tratamento e de danos sobre os recursos hídricos.

#### 4. Conclusão

Este trabalho teve como proposta um procedimento de seleção de alternativas promissoras de reúso obtidas pela aplicação do método DFA, como parte do modelo P+ÁGUA para gerenciamento de recursos hídricos industriais. Ao ser aplicado a um estudo de caso compacto, foi possível visualizar sua funcionalidade para a consolidação de oportunidades de reúso. O procedimento permite atender às características dos processos hídricos (flexibilidade), sendo útil para avaliar a viabilidade de problemas com alternativas numerosas e complexas, sem recorrer imediatamente à otimização matemática. Deste modo, o modelo pretende contribuir para o gerenciamento sustentável do reúso de efluentes industriais por meio de uma plataforma integrada de ferramentas tecnológicas e de gestão industrial, com a mitigação de impactos negativos de natureza ambiental, econômica e social.

#### 5. Agradecimentos

Ao CNPq, pelo suporte financeiro.

#### 6. Referências

- Bagajewicz, M.A., 2000. Review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants. *Computers and Chemical Engineering*, 24, 9-10, 2093-2113.
- CNTL (Centro Nacional de Tecnologias Limpas). 2000. Série manuais de produção mais limpa. Porto Alegre: UNIDO/UNEP/CNTL/SENAI-RS, vols. 1 a 15.
- Dunn, R.F., El-Halwagi, M.M., 2003. Process integration technology review: background and applications in the chemical process industry. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 78, 9, 1011-1021.
- Gomes, J.F.S., Mirre, R.C., Delgado, B.E.P.C., Queiroz, E.M., Pessoa, F.L.P., 2013. Water sources diagram in multiple contaminant processes: maximum reuse. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52, 4, 1667-1677.
- 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, 5, 474-485.
- Guelli U. Souza, S.M.A., Xavier, M.F., Silva, A., Ulson de Souza, A.A., 2011. Water reuse and wastewater minimization in chemical industries using differentiated regeneration of contaminants. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50, 12, 7428-7436.
- Karthick, R., Kumaraprasad, G., Sruti, B., 2010. Hybrid optimization approach for water allocation and mass exchange network. *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 11, 783-792.
- Kumaraprasad, G., Muthukumar, K., 2009. Design of mass exchange network and effluent distribution system for effective water management. *Journal of Cleaner Production*, 17, 17, 1580-1593.
- Marques, S.V., 2008. Minimização do consumo de água e da geração de efluentes aquosos – estudos de casos. Dissertação de M.Sc., TPQB, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Mirre, R.C., 2007. Recuperação e reúso de água na indústria de petróleo: síntese de redes de transferência de massa. Dissertação de M.Sc., TPQB, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Mirre, R.C., 2012. Metodologia para o gerenciamento sustentável do reúso de águas e efluentes industriais por meio da integração de processos. Tese de D.Sc., TPQB, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Mirre, R.C., Yokoyama, L., Pessoa, F.L.P., 2009. Diagrama de Fontes de Água: uma ferramenta sustentável para a P+L na minimização de águas e efluentes industriais. In: 2nd International Workshop Advances in Cleaner Production, São Paulo, Proceedings of the 2nd WACP, São Paulo, SP.
- Mirre, R.C., Yokoyama, L., Pessoa, F.L.P., 2011. Reúso de efluentes industriais em refinarias de petróleo usando o método DFA para sistemas regenerativos. *Revista Ambiente & Água*, Taubaté, SP, 6, 3, 127-151.
- 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., TPQB, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Takama, N., Kuriyama, T., Shiroko, K., Umeda, T., 1980. Optimal water allocation in a petroleum refinery. *Computers and Chemical Engineering*, 4, 4, 251-258.
- Ulson de Souza, A.A., Forgiarini, E., Brandão, H.L., Xavier, M.F., Pessoa, F.L.P., Guelli U. Souza, S.M.A., 2009. Application of water source diagram (WSD) method for the reduction of water consumption in petroleum refineries. *Resources, Conservation and Recycling*, 53, 3, 149-154.
- Ulson de Souza, A.A., Melo, A.R., Pessoa, F.L.P., Guelli U. Souza, S.M.A., 2010. The modified water source diagram method applied to reuse of textile industry continuous washing water. *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 12, 1405-1411.