

SINTESE DE REDES DE TRATAMENTO DE EFLUENTES APLICADA A UM MODELO DE GERENCIAMENTO DE REÚSO DE ÁGUA

P. C. LION¹, M. S. SANTOS², F. S. FRANCISCO², D. J. S. A. AUDEH², R. C. MIRRE², F. L. P. PESSOA²

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica

² Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Departamento de Engenharia Química
E-mail para contato: patyclion@poli.ufrj.br e mariissantos11@gmail.com

RESUMO - A necessidade de se atuar em um cenário de baixa disponibilidade de água doce e de elevação de custos com tratamento de água e efluentes industriais incentiva a aplicação de técnicas sistemáticas para conservação e uso racional da água em processos. Um importante método é o Diagrama de Fontes de Efluentes (DFE), cuja proposta é gerar redes de tratamento final do tipo centralizada e distribuída, a fim de reduzir a vazão de efluente a ser tratado e, por conseguinte, os custos a ele relacionados. Este trabalho teve como objetivo aplicar o método DFE, e propor sua utilização no contexto de um modelo de gerenciamento do uso da água na indústria. Um estudo de caso foi realizado utilizando cenários de reúso obtidos a partir de um conjunto de dados representativos de uma refinaria de petróleo. Os resultados apontam a vantagem do tratamento distribuído em relação ao centralizado. Enquanto este último gerou cerca de 940 t/h de vazão tratada, o tratamento distribuído necessitou de somente 440 t/h do efluente, apresentando um custo em torno de metade daquele alcançado pela configuração centralizada. Neste caso, o método sugere a importância da síntese de sistemas de tratamento visando à redução do consumo de água, da geração e de impactos de efluentes sobre o corpo hídrico, destacando-se como um suporte ao processo de gerenciamento de recursos hídricos na indústria.

1. INTRODUÇÃO

O gerenciamento do uso da água vem recebendo grande atenção atualmente, influenciado pelo aumento da demanda, e fatores que contribuem para a escassez de oferta do recurso. A legislação estabelece taxas para captação e consumo de fontes superficiais ou subterrâneas, bem como o descarte de efluentes industriais. O gerenciamento de recursos hídricos na indústria pode ser auxiliado por meio da aplicação de técnicas sistemáticas voltadas para o aproveitamento racional da água em processos. Um destes métodos é o chamado Diagrama de Fontes de Água (DFA) (Gomes *et al.*, 2007), procedimento algorítmico-heurístico que permite gerar redes (ou fluxogramas) de água com máximo reaproveitamento (reúso e/ou reciclo), incluindo a análise de restrições de processo e regeneração de contaminantes.

Para sistematizar o gerenciamento integrado do uso da água em processos industriais, foi criado o modelo denominado P+ÁGUA (Mirre, 2012), cuja proposta está em auxiliar a

tomada de decisão quanto à identificação de cenários promissores de reúso sustentável após a aplicação do DFA. O modelo incorpora o DFA às etapas da estratégia de gestão ambiental Produção mais Limpa (P+L), focado no uso racional da água e redução de efluentes gerados. Além disso, o modelo prevê como critério final de seleção a valoração de danos potenciais sobre a qualidade dos corpos hídricos com o descarte. Uma importante análise, não contemplada pelo P+ÁGUA, refere-se ao tipo de tratamento final de efluentes, o qual pode ser realizado por duas vertentes: (i) configuração centralizada, na qual os efluentes são unificados para serem tratados por uma sequência de técnicas em uma central, e a (ii) distribuída, onde as correntes são tratadas em série/paralelo, de modo individualizado ou por correntes unificadas pelas características afins; ao contrário da centralizada, a configuração distribuída tem como vantagem a possibilidade de diminuir a vazão de efluente a ser tratado, viabilizando a redução de custos operacionais e de investimento.

Com abordagem semelhante ao DFA, o método chamado Diagrama de Fontes de Rejeitos (DFR), proposto por Delgado (2008), ou Diagrama de Fontes de Efluentes (DFE), conforme Pacheco (2014), permite reduzir a vazão de efluentes a ser tratado e, por conseguinte, os custos a ele relacionados. Assim, a partir de informações como vazão do efluente, concentração final do contaminante em uma unidade de tratamento, concentração do efluente tratado, concentração limite para descarte e eficiência de remoção de contaminante no regenerador, o método gera intervalos de concentração visando obter fluxogramas para sistemas de tratamento, com a menor vazão de efluente tratado possível.

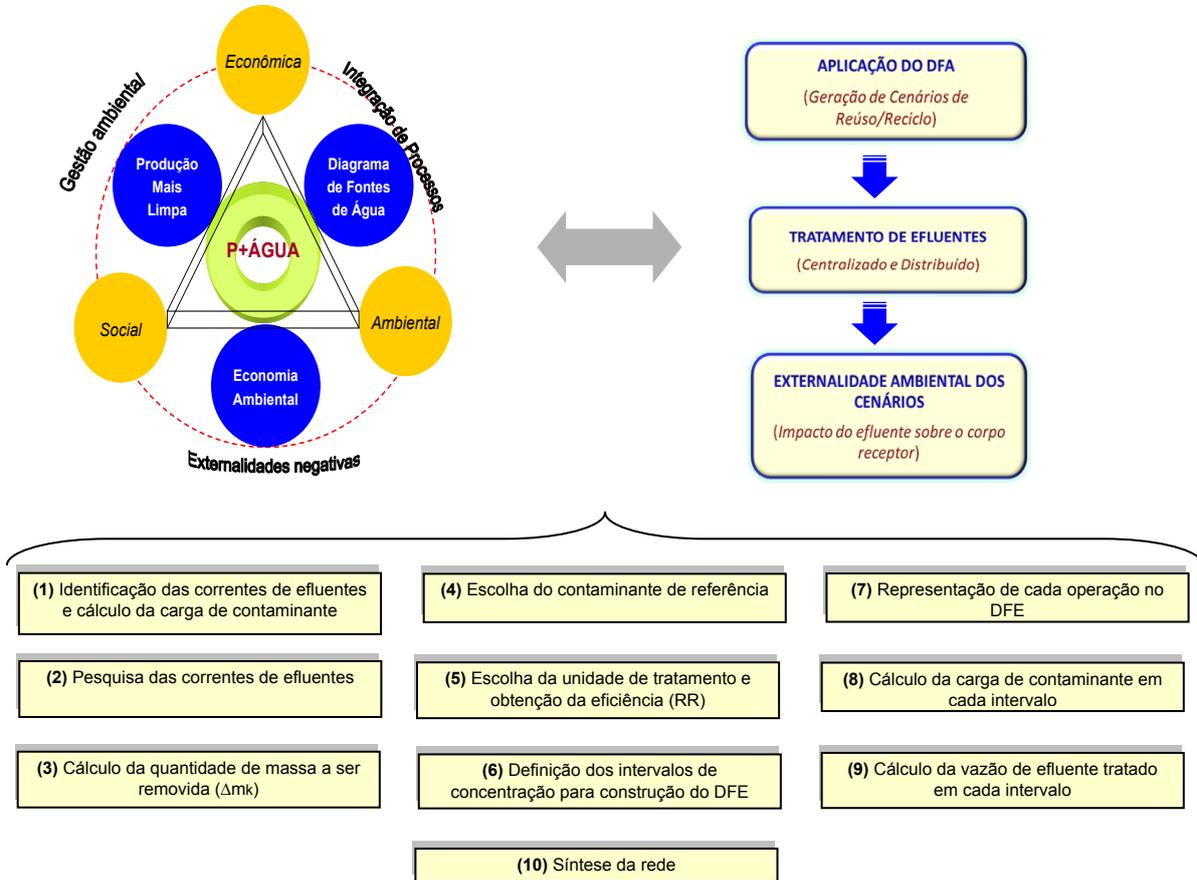
Nesta linha, vale ressaltar a contribuição de Hungaro (2005), que desenvolveu um procedimento para seleção da sequência de tratamento para um conjunto de correntes de efluentes, em função da eficiência de remoção. O algoritmo gerou a menor vazão para o tratamento distribuído, relativamente à configuração centralizada. As heurísticas apresentadas por Hungaro (2005) constituíram a base para o desenvolvimento do DFE (Delgado, 2008), que, por sua vez, adaptou a síntese de sistemas de regeneração diferenciada e tratamento final distribuído de efluentes, para determinar a sequência de técnicas de tratamento. Mirre *et al.* (2011) utilizaram o procedimento de Hungaro (2005) para comparar as configurações centralizada e distribuída em um estudo de caso de refinaria de petróleo, posterior à aplicação do DFA. Já Pacheco (2014) empregou o DFA e o DFE a dados típicos de refinarias de petróleo, demonstrando a aplicabilidade dos métodos.

A inclusão da análise de redes de tratamento final de efluentes pode ser útil na seleção de cenários alternativos e promissores de reúso. Assim, este trabalho tem como objetivo gerar redes de tratamento de efluentes com o método DFE, e propor sua incorporação aos estágios de aplicação do modelo integrado para gerenciamento do uso da água em processos industriais, denominado P+ÁGUA.

2. METODOLOGIA

O modelo P+ÁGUA adota o DFA como ferramenta para reduzir a necessidade de investimento imediato nas tecnologias de tratamento, priorizando o reúso máximo nos processos. A Figura 1 ilustra a junção tríade do P+ÁGUA, relacionada aos aspectos econômico, ambiental e social, e propõe a incorporação do método DFE.

Figura 1 - Representação do modelo P+ÁGUA, incluindo a proposta de incorporação da síntese de tratamento final de efluentes (adaptado de Mirre, 2012, e Pacheco, 2014).



O procedimento para aplicação do DFE está descrito em detalhes no trabalho de Pacheco (2014). Trata-se de uma ferramenta complementar para análise e seleção de cenários promissores de reúso e tem como objetivo determinar a vazão mínima de efluente a ser tratado e que atenda à concentração máxima de descarte dos contaminantes.

A quantidade do contaminante j a ser removida na operação k (Δm_k), em g/h, é dada pela Equação 1.

$$\Delta m_{jk} = f_k \times (C_{jk} - C_{desc,j}) \quad (1)$$

onde f_k é a vazão da corrente de efluente, em t/h; C_{jk} é a concentração do contaminante j na operação k , em ppm; e $C_{desc,j}$ é a concentração de descarte do contaminante j , em ppm.

Os intervalos de concentração do DFE são formados pelas concentrações originais de cada efluente, as concentrações de descarte do contaminante de referência e as concentrações de efluente tratado (C_{kt}^e), estas obtidas pela eficiência de remoção (RR) do efluente no regenerador, de acordo com a Equação 2.

$$C_{kt}^e = C_{kj} \times (1 - RR_j) \quad (2)$$

onde C_{kj} é a concentração final do contaminante j na operação k ; e RR_j é a eficiência do tratamento para a remoção do contaminante j .

Cada operação é representada no DFE por uma seta com a origem na concentração de descarte e o fim na concentração original do contaminante de referência do efluente, por ordem crescente de concentração. A vazão de cada corrente é alinhada às operações no diagrama. O cálculo da vazão tratada prioriza a mistura com efluente mais sujo disponível, iniciando no intervalo de menor concentração. Duas regras devem ser satisfeitas: (i) realizar o cálculo da vazão de efluente a ser tratado através de tratamento externo somente quando não houver efluente “interno” com concentração menor que a do efluente a ser tratado disponível para mistura. Na disponibilidade de efluente interno, usar preferencialmente o proveniente da mesma corrente; (ii) para uma determinada corrente de efluente, a vazão a ser tratada em um determinado intervalo deve remover a quantidade de massa do respectivo intervalo.

A síntese da rede de tratamento distribuído de efluentes inicia-se a partir do último intervalo de cada operação no DFE.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A proposta de incorporação do DFE aos estágios do modelo P+ÁGUA levou à realização de um estudo de caso na qual o DFA já tenha sido previamente aplicado. Assim, foram utilizados os dados representativos de uma refinaria de petróleo com os cenários de reúso obtidos pelo DFA no estudo de Mirre *et al.* (2011). O DFE foi aplicado tanto para a configuração centralizada, que utiliza uma única forma de tratamento para todo o efluente, como a distribuída, que separa as correntes de acordo com a forma de tratamento que cada uma necessita. Tais tabelas foram utilizadas para ambas as possibilidades.

O problema considera três contaminantes nas correntes: Sais (A), Orgânicos (B) e H_2S (C). A água primária é dada como água potável (AF) e água tratada para fins específicos (AP). Os limites de descarte no corpo receptor considerados são: 240,6 ppm (A), 194,9 ppm (B) e 0,42 ppm (C). A partir do cenário de reúso testado, optou-se por agregar correntes com características semelhantes, de modo a estabelecer um número menor de correntes na abordagem do DFE. As técnicas de regeneração são consideradas de forma geral, em termos de eficiência de remoção, apenas para ilustrar a aplicação do método, conforme Pacheco (2014) e Mirre *et al.* (2011).

A Figura 2 apresenta o resultado do diagrama de intervalos de concentração aplicado para o tratamento centralizado, e a respectiva rede encontra-se representada na Figura 3. Do mesmo modo, o método DFE foi aplicado considerando a possibilidade da configuração distribuída, com o diagrama da Figura 4 tendo sua rede representada pela Figura 5.

Figura 2 – Diagrama de intervalos de concentração.

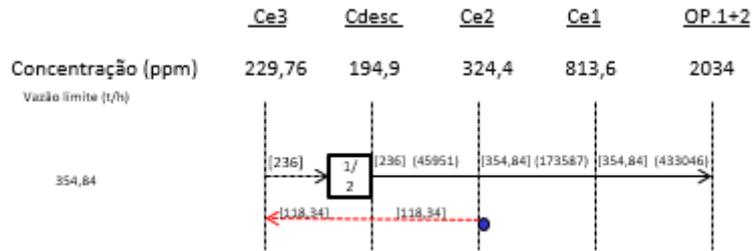


Figura 3 – Rede de tratamento centralizado.

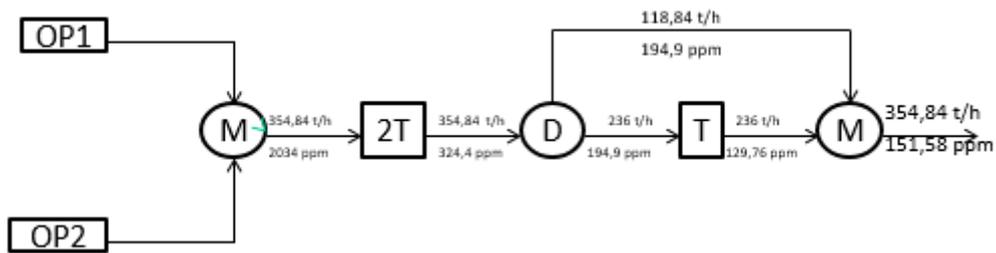


Figura 4 – Diagrama de intervalos de concentração.

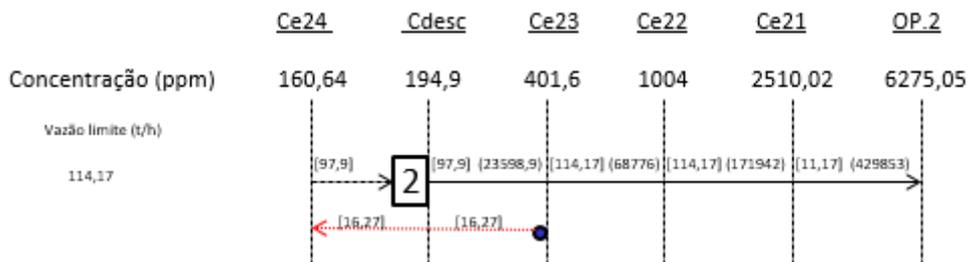
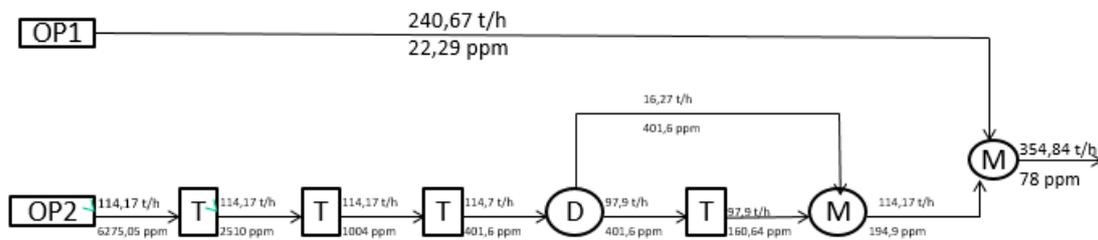


Figura 5 – Rede de tratamento distribuído



A partir dos valores de vazão a ser tratada em cada configuração, verifica-se que o tratamento centralizado gera 945,68 t/h, enquanto que o distribuído necessita apenas de 440,41 t/h do efluente. Embora a finalidade aqui não seja definir as técnicas de tratamento, o

custo para cada rede, dependente das respectivas vazões, foi gerado com base em informações relacionadas por Pacheco (2014). Para o centralizado, o custo foi de 2.532.471,90 \$/ano, enquanto que o distribuído ficou em 1.244.810,00 \$/ano, cerca de metade daquele apresentado pelo centralizado, sugerindo um incentivo para a implantação do tratamento distribuído.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo aplicar o procedimento algorítmico-heurístico DFE a um estudo de caso de refinaria de petróleo, voltado para reduzir a vazão de efluente a ser tratada por meio de sua configuração de tratamento. Adicionalmente, propôs-se a incorporação do DFE ao P+ÁGUA, para estender o gerenciamento de uso da água em processos. Foi possível constatar que o DFE direciona a configuração distribuída para a menor vazão de tratamento, com vantagem econômica e ambiental frente ao centralizado. Estudos amplos devem ser conduzidos de modo a avaliar outros sistemas multicomponentes, testar um conjunto maior de técnicas de tratamento, e inserir uma avaliação para o custo do impacto ambiental das redes.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, pelas bolsas concedidas.

6. REFERÊNCIAS

- DELGADO, B.E.P.C. Síntese de sistemas de regeneração e tratamento final de efluentes. Tese (D.Sc. em TPQB), UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.
- GOMES, J.F.S.; QUEIROZ, E.M.; PESSOA, F.L.P. Design procedure for water/wastewater minimization: single contaminant. *Journal of Cleaner Production*, v. 15, n. 5, p. 474-485, 2007.
- HUNGARO, L.M. Desenvolvimento de algoritmo para síntese de tratamento distribuído para efluentes líquidos. Dissertação (M.Sc. em EQ), UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- MIRRE, R.C., Metodologia para o gerenciamento sustentável do reúso de águas e efluentes industriais por meio da Integração de Processos. Tese (D.Sc. em TPQB), UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.
- MIRRE, R.C.; YOKOYAMA, L.; PESSOA, F.L.P. Reúso de efluentes industriais em refinarias de petróleo usando o método DFA para sistemas regenerativos. *Revista Ambiente & Água*, Taubaté, v. 6, n. 3, p. 127-151, 2011.
- PACHECO, L.C. Minimização do consumo de água e de geração de efluentes líquidos na indústria de petróleo. Dissertação (M.Sc. em TPQB), EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.