

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

PROPOSTA DE VALORAÇÃO DE IMPACTO DO REÚSO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS A PARTIR DA INTEGRAÇÃO DE PROCESSOS QUÍMICOS

AUTORES:

D. J. S. A. AUDEH^{a*}, M. S. SANTOS^a, R. C. MIRRE^b, F. L. P. PESSOA^a

INSTITUIÇÃO:

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

b. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ

*Autor Correspondente: dalal_audeh@yahoo.com.br

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 8º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 20 a 22 de outubro de 2015, em Curitiba-PR. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 8ºPDPETRO.

PROPOSTA DE VALORAÇÃO DE IMPACTO DO REÚSO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS A PARTIR DA INTEGRAÇÃO DE PROCESSOS QUÍMICOS

Abstract

The use of metric for the additional assessment of water reuse options in the industry based on the negative impact of contaminants in the discharge of effluents is an opportunity to select promising proposals. This work aims to evaluate water networks in petroleum refinery through a complementary analysis related to negative impact of discharge of wastewater. It is an alternative way to support decision making of best networks obtained from the application of heuristic algorithmic procedure called Water Sources Diagram (WSD). A study of oil refinery case was used to assess the applicability of the proposal in the context of a model that aids in the sustainable management of the rational use of water in industrial processes. There is a difficulty in associating the environmental impacts (pollution effect on water) to the wastewater quality parameters with reuse proposals (discharge) generated by WSD application. The proposal seeks to weigh the contaminant concentrations in the effluent relative to the contribution of its effects on the water body. In terms of potential of discharge impact a set of seven scenarios were analyzed. It was possible to point out those where the value of reducing water consumption and effluent generation, associated with potential of discharge impact, can support decision making regarding the practice of industrial water reuse.

Introdução

O uso racional da água na indústria tem despertado grande atenção nos últimos anos, principalmente diante da iminente realidade de crise de abastecimento observada nas grandes cidades. Fatores como crescimento populacional, urbanização crescente e dependência de regularidade do regime de chuvas, aliados à ausência de um planejamento adequado, à poluição de mananciais e ao próprio desperdício da água, levam a um cenário de aumento de demanda, o que afeta a disponibilidade do recurso pela sobrecarga das fontes de captação. Neste cenário, enquanto a prioridade do abastecimento se volta para o consumo humano, o ambiente industrial deve encontrar meios para ajustar seu padrão de uso da água nas atividades produtivas.

A racionalização do consumo de água na indústria pode ser realizada pelo emprego de métodos sistemáticos orientam a otimização dos sistemas. A área da Integração de Processos Químicos dispõe de ferramentas para resolver o problema de alocação de água em processos industriais (DUNN e EL-HALWAGI, 2003). Tais métodos têm como objetivo gerar novas redes de água (fluxogramas) ou aprimorar as já existentes, sendo, em geral, classificados em métodos gráficos, heurísticos ou algorítmicos, e de programação matemática (BAGAJEWICZ, 2000). Embora esta última ofereça vantagens em termos de resultados, a classe dos procedimentos algorítmicos tem grande utilidade quando se deseja alcançar soluções eventualmente viáveis com maior rapidez e praticidade para o engenheiro de processos.

Um importante método algorítmico-heurístico é o Diagrama de Fontes de Água (DFA) (GOMES et al., 2007, 2013), que identifica oportunidades de realinhamento alternativo de correntes de água voltados para máximo reúso, a partir do conceito de assimilação de carga mássica de contaminantes e alocação de vazão de água entre fontes e sumidouros. Com isso, são gerados simultaneamente fluxogramas alternativos com distintas situações envolvendo reúso, reciclo e/ou

tratamento de efluentes. Diferentes aplicações do método demonstram sua adaptabilidade aos setores industriais (MIRRE et al., 2009; ULSON de SOUZA et al., 2010).

O pouco incentivo ao uso de técnicas e ferramentas sistemáticas tem sido uma limitação ao gerenciamento dos projetos de prevenção da poluição industrial (CAGNO et al., 2005). Neste caso, uma solução seria integrar uma ferramenta sistemática a um modelo de gestão industrial. Deste modo, foi criado um modelo voltado para o gerenciamento integrado de recursos hídricos, denominado P+ÁGUA (MIRRE, 2012). Sua aplicação considera a seleção de redes promissoras de reúso geradas com o DFA e voltadas para estudos posteriores que viabilizem sua implantação na prática (MIRRE et al., 2013). Os critérios para seleção de cenários promissores normalmente levam em conta a mínima vazão de água captada e o mínimo custo operacional. No entanto, é importante considerar a influência de realinhamentos de correntes, de tratamento de efluentes no processo, e de impactos ambientais negativos, uma vez que somente o menor custo operacional não contempla necessariamente a redução de dano ambiental sobre os recursos hídricos. Uma das utilidades do modelo está na perspectiva de facilitar a assimilação de procedimentos sistemáticos pelos tomadores de decisão, permitindo a seleção de redes alternativas com menor impacto negativo para o descarte de efluentes sobre os corpos d'água; por esta razão, favorece a disponibilidade de água para uso prioritário de abastecimento público, por exemplo.

Como um mecanismo complementar para seleção de oportunidades de reúso, a valoração do impacto do descarte de efluentes sobre a qualidade do corpo hídrico torna-se uma interessante ferramenta para fundamentar a importância do reúso no processo industrial, proporcionando uma decisão adicional de impacto da externalidade ambiental negativa (dano não internalizado). No entanto, existe uma dificuldade de se associar as concentrações de contaminantes relevantes dos cenários gerados com o DFA aos seus respectivos impactos influenciados pela potencial alteração de qualidade do corpo receptor com o descarte de efluentes. O conceito de balanço de poluição do algoritmo denominado Waste Reduction Algorithm (WAR), introduzido por Hilaly e Sikdar (1994), e aperfeiçoado por Cabezas et al. (1999), bem como o conceito de potencial ambiental, abordado por D'Agostini et al. (2013), podem ser utilizados na tentativa de corresponder os dados da ferramenta sistemática aos respectivos processos poluidores, particularmente definidos neste trabalho para os casos de acidificação e eutrofização.

Diante desta necessidade, o objetivo deste trabalho volta-se para o aprimoramento da avaliação complementar da parcela de atribuição de valor do potencial de impacto dos efluentes pelo do modelo P+ÁGUA. Para tanto, propõe um mecanismo alternativo de valoração que permita avaliar o prejuízo ambiental do efluente, incorporando a influência dos respectivos processos poluidores (acidificação e eutrofização), a partir da concentração dos contaminantes no efluente. Assim, realiza-se a avaliação complementar do estudo de caso relativo aos processos hídricos de uma refinaria de petróleo, em continuidade à aplicação do modelo de gerenciamento pela Integração de Processos (MIRRE et al., 2013).

Metodologia

O procedimento DFA é dado por um conjunto de etapas que objetivam sintetizar redes de água com mínimo consumo de água em processos industriais. Assim, a partir de uma tabela de oportunidades, incluindo dados de vazão e concentração de contaminantes representativos, cria-se um diagrama de intervalos de concentração que tem como objetivo alocar vazão para assimilar a carga mássica de contaminantes; a partir disso, são geradas redes (ou cenários) alternativas de água com oportunidades de reúso, reciclo e/ou tratamento de correntes. Detalhes deste procedimento podem ser obtidos no estudo de Gomes et al. (2007). A partir da geração de cenários alternativos do DFA, o modelo denominado P+ÁGUA, voltado para o gerenciamento integrado de recursos hídricos em

processos industriais, permite selecionar aqueles cenários considerados promissores em termos de valor econômico, ambiental e/ou social. A Figura 1 esquematiza sucintamente o modelo P+ÁGUA para o gerenciamento integrado do reúso sustentável, vinculado ao tripé econômico, ambiental e social, e auxiliar para as etapas de Produção mais Limpa (P+L). A seleção do modelo utiliza critérios de estatística descritiva, incluindo a análise de custos operacionais, investimento adicional em tratamento de efluentes e realinhamento de correntes com o reúso, para cada cenário estudado. Na etapa final, os cenários incorporam conceitos de valoração ambiental como triagem adicional de impactos de contaminantes no descarte de efluentes.

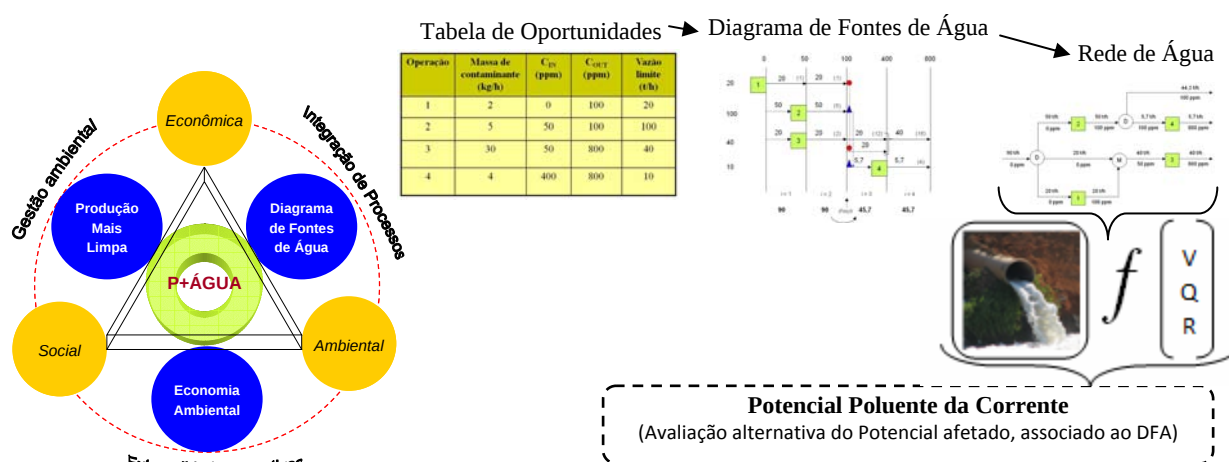


Figura 1 – Representação do modelo para o gerenciamento integrado sustentável para o reúso de águas e efluentes industriais (P+ÁGUA) (adaptado de MIRRE et al., 2013).

O modelo P+ÁGUA originalmente considera que a valoração possa ser realizada com base em índices de qualidade da água, gerando um custo adicional de impacto, a ser acrescentado ao custo operacional. Entretanto, este não associa a adversidade ambiental causada pela concentração de um contaminante, de modo a representar os impactos ambientais negativos decorrentes da perda de qualidade do efluente no corpo receptor. Na proposta aqui apresentada, pretende-se associar a adversidade ambiental aos dados obtidos na aplicação do método DFA. A magnitude de potenciais ambientais é sempre em função do produto entre V (quantidade), Q (qualidade), R (regularidade) (D'AGOSTINI et al., 2013). Em contraposição, a proposta tem o intuito de mensurar o potencial que se dissipou, ou seja, a externalidade negativa, em relação a todas as possibilidades existentes num corpo hídrico com qualidade padrão. A relação sugere que o potencial de um determinado corpo de água não decorre somente das características da água, como uma parcela de potencial envolvida no uso, mas também daquilo que pode ser promovido a partir dele, ou seja, fatores de poluição que se dissipam na forma de potencial ambiental negativo. Inicialmente foram considerados os valores legislados pela Resolução Conama 357/2005 (complementada pela Conama 430/2011), referentes à classe de água doce. A Tabela 1 apresenta os valores adotados para a análise dos parâmetros ou contaminantes presentes nas correntes do estudo de caso.

Tabela 1 – Concentrações padrões (Conama 357/2005 / Conama 430/2011)

Parâmetro	Valores da Legislação
Cianeto livre	0,005 mg/L CN / 1,0
Cloreto total	250 mg/L Cl /
Sulfeto (H ₂ S) não dissociado	0,002 mg/L S/ 1,0
Fenóis totais	0,01 mg/L C ₆ H ₅ OH/ 0,5
Nitrogênio amoniacal total	0,70 mg/L N/ 20
Cálcio	Não Informado
Sílica	Não Informado

O cálculo do potencial poluente do cenário (PPC) é uma tentativa de mensurar o potencial dissipado em função da falta de regularidade, da indisponibilidade de quantidade, com a qualidade necessária para não degradar o meio receptor, sendo representado pela Equação 1.

$$PPC = \frac{R \times V_s \times C.I.}{V_c} \quad (1)$$

onde:

$$R = \frac{(C_c - P_c)}{P_c} ;$$

C_c é a saída da Estação de Tratamento de Resíduos Industriais (ETDI), referente à concentração das substâncias que contêm elementos contaminantes que causam impactos em relação aos fenômenos poluidores de águas, definidos por Von Sperling (1995); P_c é o padrão previsto pela legislação para despejos em corpos receptores (Classe 2); V_s é a vazão de saída da ETDI, em t/h; V_c é a vazão de água captada, em t/h; C.I. é definida como Categoria de impacto, dada pelo produto do número de substâncias que provocam acidificação (N) pelo potencial (P), que é determinado conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Potencial dos fenômenos poluidores de águas

Valor atribuído para P	Número de substâncias que potencializam os processos poluidores de águas (PPA): Eutrofização e Acidificação
0	Nenhuma substância encontra-se fora do padrão legislado.
1	Substância fora do padrão que potencialize apenas um PPA
2	Substâncias fora do padrão que potencializam os dois PPA

Para não haver problemas de dimensões, ao se obter os resultados, a interpretação deve respeitar a escala de potencial adimensional. Deste modo, os resultados obtidos variam de negativos a positivos, de forma infinita, sendo necessário interpretar dentro de um conjunto de cenários, comparando-os. A métrica serve como um tomador de decisão sob a ótica restrita de dois significativos processos poluidores de água: eutrofização e acidificação. Os valores mais próximos de zero ou ainda negativos são os cenários de menor potencial para causar eutrofização e ou acidificação.

Resultados e Discussão

3.1 Estudo de caso: refinaria de petróleo

O modelo de gerenciamento integrado foi aplicado aos dados de uma refinaria de petróleo, abordado por Mirre et al. (2009; 2011; 2013), gerando cenários de reúso de águas a partir do método DFA, os quais foram selecionados pela etapa de filtragem preliminar de cenários do modelo (MIRRE et al., 2013). O fluxograma do cenário base é apresentado na Figura 2, bem como um cenário promissor de reúso levantado. Considera-se a presença de três contaminantes nas correntes aquosas: (A), (B) e (C), e a água primária é disponibilizada em dois graus distintos de qualidade. A água captada é enviada para a Estação de Tratamento de Água (ETA) e distribuída às diversas operações de acordo com sua qualidade requerida. Não se considera aqui o sistema de tratamento de efluentes.

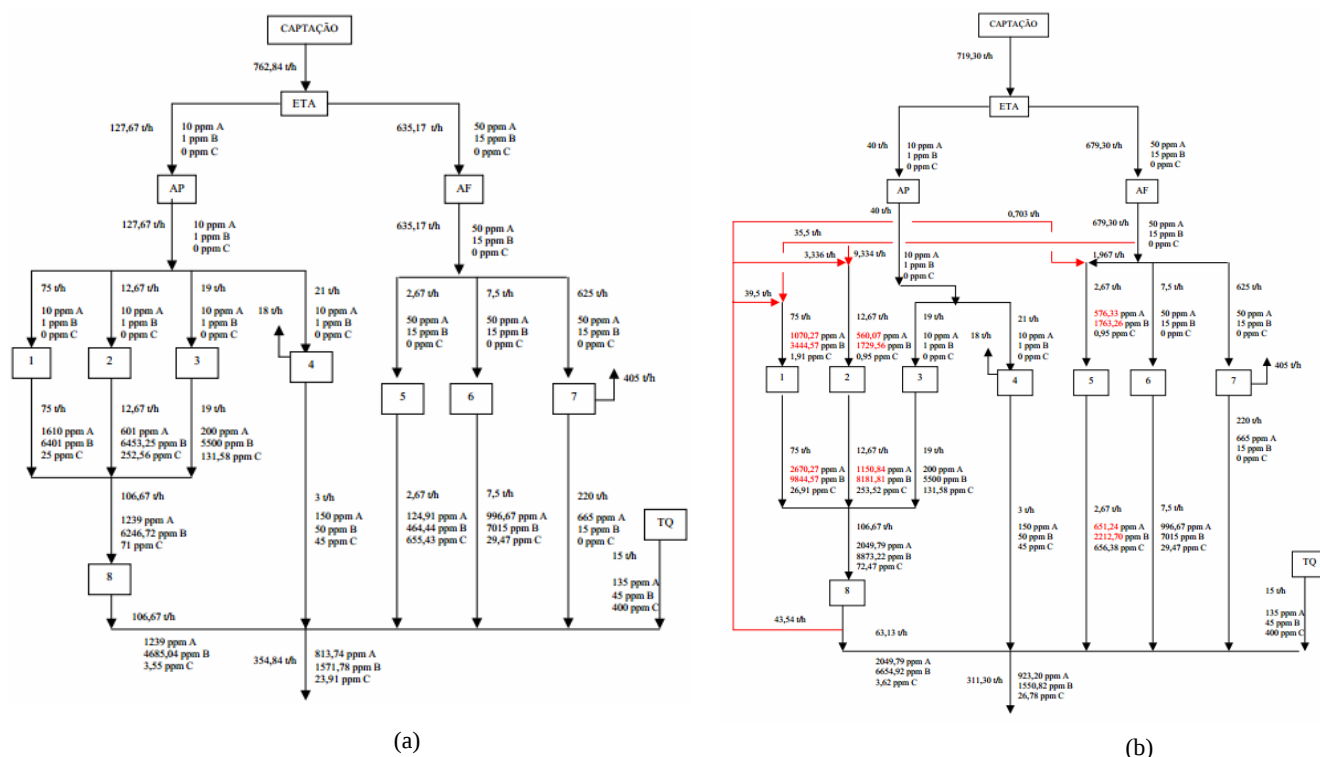


Figura 2 – Rede de águas do caso base (a) e de um cenário de reúso (b) (MIRRE et al., 2009)

Na Figura 2, as setas em vermelho indicam o reúso/reciclo dos efluentes para a rede promissora obtida pela aplicação do DFA; já os valores destacados em vermelho representam violações de concentrações de contaminantes nas operações, o que, em primeiro momento, indicaria a necessidade de investimento em tratamento adicional. No estudo, foram gerados sete cenários de reúso, além do caso base; o cenário de reúso da Figura 2 corresponde à oportunidade de número 4. Um dos cenários analisados no estudo original alcançou redução na captação referente a 11,84%, com relação ao cenário base. O cenário se mostrou vantajoso em termos de menores probabilidades de poluição; seu valor de concentração de contaminante ligado ao processo poluente está dentro do padrão legislado, mostrando que o cenário com menor potencial negativo ambiental é na verdade um cenário que continha contaminante dentro da menor possibilidade de afetar o córrego.

A Tabela 3 traz uma síntese dos resultados após a aplicação de uma seleção prévia de cenários promissores. Os cenários 6 e 7 são assinalados como promissores, pois apresentam maiores reduções

em termos de vazão de água captada. O cenário 6 é próspero na relação de custos, sem levar em conta o tratamento de final de linha.

Tabela 3 – Síntese dos cenários considerados no estudo do potencial poluente

Cenário	Base	1	2	3	4	5	6	7
Vazão de água captada (t/h)	726,84	725,26	726,84	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 da captação (%)		4,93	0	3,94	5,7	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
Concentração Contaminante (ppm)	A	905,79	915,25	813,74	887,27	923,20	886,17	1083,32
	B	1560,10	1759,9	1571,78	1716,24	1550,82	1702,35	1377,51
	C	23,74	26,74	23,91	26,04	26,78	2,27	1,20

A Figura 3 relaciona o perfil dos cenários avaliados, em termos de sua potencialidade negativa. A avaliação se dá em um conjunto de valores de potencial ambiental, diagnosticando qual cenário pode levar ao menor prejuízo ambiental. No eixo da abscissa, o valor de potencial negativo é adimensional e não tem uma faixa preestabelecida, varia infinitamente, de forma que valores menores ou negativos identificam aqueles com menor potencial de afetar a qualidade do corpo receptor. O eixo da ordenada corresponde aos sete cenários de reúso considerados. O cenário 2 não foi levado em conta, uma vez que não apresenta significância na redução da captação de água. O cenário 6 mostra-se o mais promissor em termos de menor dissipação do potencial de uso da água, ou seja, é o que tem menos possibilidades de causar processos poluidores (eutrofização e acidificação). O segundo menor e melhor valor do potencial negativo pertence ao cenário 7. Como prioridade, os cenários 7, 6, 5, 1 e 4, são os mais otimistas em relação às maiores reduções de custo. Como o estudo não avalia cenários com regeneradores locais a montante do sistema de tratamento, os cenários 5, 6 e 7 são eliminados, justamente porque incorporam esta necessidade. A seleção das oportunidades promissoras passa então a levar em conta os cenários 1, 2, 3 e 4. Em termos de custos, podem ser apontados as opções 1 e 4; já em termos ambientais, o cenário 4 sugere um potencial negativo levemente menor que o cenário 1, e que, combinado ao valor de redução do consumo de água e da geração de efluentes, tende a ser identificado como mais promissor e propenso a absorver os efeitos da prática do reúso.

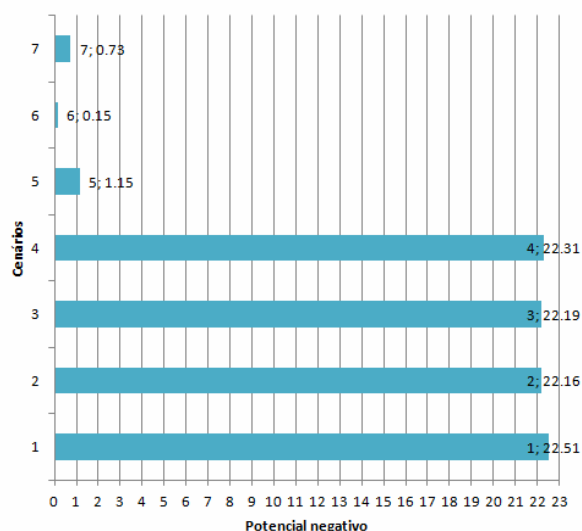


Figura 3 – Potencial de possibilidades dos corpos hídricos receptores

No conjunto de cenários avaliados, é notória a baixa potencialidade dos processos de poluição do cenário 6, e por esta análise, o cenário 1 é o que apresenta chances maiores de proporcionar externalidades negativas a partir de processos poluidores. A tomada de decisão foi baseada em critérios relativos a redução de vazão de água captada (em relação ao caso base), maior redução de custos, e potencial de degradação do corpo receptor. Dentre os cenários avaliados, o efluente gerado na proposta 4 possui menor possibilidade de indução a processos poluidores, embora, em termos gerais, ainda não se possa afirmar que este seja o mais adequado para sua implantação.

Conclusão

Os resultados da aplicação da metodologia a dados representativos de uma refinaria de petróleo indicam que a avaliação complementar do impacto negativo para seleção de cenários de reúso ajusta-se aos objetivos de prevenção da poluição e de uso racional da água. Assim, o modelo para gerenciamento sustentável do reúso permite alcançar cenários alternativos com benefícios simultâneos de ordem econômica e redução de impactos ambientais. A definição da métrica alternativa preocupou-se com a simplicidade e adequação dos dados existentes nos cenários de reúso, considerando dois processos poluentes. Aliando a valoração adicional dos impactos a outras tomadas de decisões consideradas, o estudo sugere a possibilidade de se apontar cenários promissores pela ótica complementar do menor potencial de dissipação da qualidade de um corpo receptor. Espera-se que este enfoque se torne relevante à medida que favorece a internalização de externalidades ambientais negativas (custo da degradação) em cada proposta, demonstrando a importância do reúso como alternativa sustentável, e contribuindo para disponibilizar maior parcela do recurso para abastecimento público a jusante do ponto de lançamento de efluentes da unidade industrial.

Agradecimentos

Ao PRH-13/ANP, pelo suporte financeiro.

Referências Bibliográficas

BAGAJEWICZ, M.A. Review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants. *Computers and Chemical Engineering*, 24, 9-10, 2093-2113, 2000.

BRASIL. **Resolução Conama n°. 357, de 17 de março de 2005.** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

BRASIL. **Resolução Conama n°. 430, de 13 de maio de 2011.** Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama.

CABEZAS, H.; BARE, C. J.; MALLICK, S. K. Pollution prevention with chemical process simulators: the generalized waste (WAR) algorithm — full version. **Computers and Chemical Engineering**, 23, 4-5, 623-634, 1999.

CAGNO, E.; TRUCCO, P.; TARDINI, L. Cleaner production and profitability: analysis of 134 industrial pollution prevention (P2) project reports. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, 593-605, 2005.

D'AGOSTINI, L.R.; ALVES, J.M.; SOUZA, F.N.S. **AQUA** – Avaliação da qualidade do uso da água, Rio de Janeiro: Garamond, 2013.

DUNN, R.F.; EL-HALWAGI, M.M. Process integration technology review: background and applications in the chemical process industry. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, 78, 9, 1011-1021, 2003.

GOMES, J.F.S.; MIRRE, R.C.; DELGADO, B.E.P.C.; QUEIROZ, E.M.; PESSOA, F.L.P. Water sources diagram in multiple contaminant processes: maximum reuse. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 52, 4, 1667-1677, 2013.

GOMES, J.F.S.; QUEIROZ, E.M.; PESSOA, F.L.P. Design procedure for water/wastewater minimization: single contaminant. **Journal of Cleaner Production**, 15, 5, 474-485, 2007.

HILALY, A. K.; SIKDAR, S. K. Pollution balance: new methodology for minimizing waste production in manufacturing processes. **Journal of the Air and Waste Management Association**, 44, 11, 1303-1308, 1994.

MIRRE, R.C. **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, 2012.

MIRRE, R.C. YOKOYAMA, L., PESSOA, F.L.P., 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, SP, 2009.

MIRRE, R.C.; YOKOYAMA, L.; PESSOA, F.L.P. P+ÁGUA: um modelo para seleção de oportunidades sustentáveis de reúso de efluentes industriais a partir da Integração de Processos. In: **4th International Workshop Advances in Cleaner Production**, São Paulo, SP, 2013.

ULSON DE SOUZA, A.A.; MELO, A.R.; PESSOA, F.L.P.; GUELLI U. SOUZA, S.M.A. The modified water source diagram method applied to reuse of textil industry continuous washing water. **Resources, Conservation and Recycling**, 54, 12, 1405-1411, 2010.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias** – Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos, v.01, Minas Gerais: ABES, 1995.