

II-001 - PERSPECTIVAS TECNOLÓGICAS PARA REDUZIR O CONSUMO DE ÁGUA EM REFINARIAS DE PETRÓLEO

Felipe Ramalho Pombo⁽¹⁾

Engenheiro Metalúrgico pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela COPPE/UFRJ. Doutor em Planejamento Energético pela COPPE/UFRJ. Pós-doutorando em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal de Minas Gerais.

Endereço⁽¹⁾: Avenida Antônio Carlos 6627 - Pampulha - Belo Horizonte - Minas Gerais - CEP: 31270-901 - Brasil - Tel: +55 (31) 3409-1827 - e-mail: pombo@desa.ufmg.br.

RESUMO

Devido ao grande consumo hídrico existente em refinarias de petróleo, torna-se muito importante estudar métodos para minimizar a necessidade de água em refinarias, incluindo o reúso e outras técnicas de racionalização. A conservação de água requer os menores esforços e custos de investimento. O reciclo (com regeneração) refere-se ao uso do efluente tratado no local onde o mesmo foi gerado. E o reúso de água pode ser direto, quando o nível de contaminação não interfere no processo seguinte, e após regeneração, quando o efluente deve ser tratado antes do uso em outro processo. Este artigo tem como objetivo avaliar estas formas de reduzir o consumo hídrico em refinarias, analisando também a viabilidade econômica de sua implementação. Considerando o reúso de água, existem tecnologias promissoras que podem ser utilizadas substituindo ou auxiliando aquelas comumente usadas no presente (o uso de biorreator a membrana seguido por osmose inversa ou eletrodiálise reversa), tais como a nanofiltração, a troca iônica e os processos oxidativos avançados. Várias refinarias no mundo usam efluente doméstico tratado. Iniciativas de conservação e reciclo de água também são promissoras, incluindo a substituição de torres de resfriamento por unidades menores e o reciclo de *blowdown* em torres de resfriamento e em sistemas de geração de vapor. A técnica *Pinch* reduz a necessidade de captação hídrica e seus custos associados. No Brasil, a aplicação de *water pinch* em algumas refinarias existentes reduz o consumo de água de 53,8 até 79,1% para reúso com regeneração. Desta forma, é técnica e economicamente viável reduzir o consumo hídrico em refinarias aplicando-se as melhores técnicas disponíveis de racionalização do uso da água.

PALAVRAS-CHAVE: Racionalização do Uso da Água, Reúso de Água, *Water Pinch*, Refinarias de Petróleo.

INTRODUÇÃO

As plantas de refino de petróleo são grandes consumidoras de água. Requerem, portanto, estudos para garantir o desenvolvimento de medidas de conservação e reúso da mesma. As refinarias da Petrobras processaram, durante o ano de 2011, 226.042 m³ de petróleo/dia no Brasil (ANP, 2012). Dado o Índice de Consumo de Água médio das refinarias da Petrobras, de 0,9 m³ de água/m³ de petróleo processado (AMORIM, 2005), chega-se à estimativa de consumo hídrico de 203.438 m³ de água/dia pelas refinarias brasileiras, que é utilizado em unidades de processo, em sistemas de geração de vapor, em torres de resfriamento, no combate ao incêndio e com fins potáveis.

No tocante à expansão do parque brasileiro de refino de petróleo, a EPE prevê a instalação de sete novas refinarias até 2030, o que significa um aumento em 79% da capacidade de refino atualmente existente no Brasil (EPE, 2007). Dentre estas, destacam-se o COMPERJ (situado no Rio de Janeiro, com capacidade de processamento de 330.00 barris de petróleo/dia) e as refinarias de Pernambuco (RNEST, com capacidade para processar 230.000 barris/dia), do Maranhão (Refinaria Premium I, com capacidade para processar 600.000 barris/dia), e do Ceará (Refinaria Premium II, com capacidade para processar 300.000 barris/dia), situadas na região Nordeste, que apresenta problemas de escassez de água.

Com a construção das novas refinarias, mencionadas no parágrafo anterior, que representa o aumento da capacidade nominal instalada em 1,46 milhão de barris de petróleo/ano (PETROBRAS, 2011), o aumento do

consumo hídrico será 232.140 m³ de água/dia. Ou seja, o consumo hídrico dobrará em relação ao consumo atual.

O Brasil é um país privilegiado em termos de disponibilidade de recursos hídricos, possuindo aproximadamente 13% de toda a reserva de água doce do Planeta (MIERZWA & HESPAHOL, 2005). Entretanto, em território nacional, há regiões com abundância e outras com escassez de água (regiões áridas e semi-áridas). Além disso, em regiões altamente urbanizadas, como as regiões metropolitanas do Rio de Janeiro e de São Paulo, observam-se diversos problemas relacionados à escassez de água e à qualidade da mesma devido à grande demanda por esse recurso (HESPAHOL, 2003), causando conflitos entre os diversos usuários da bacia hidrográfica local. Diante desse cenário, torna-se fundamental a procura por novas fontes hídricas e a racionalização de seu uso.

Assim, o reúso de água surge como uma alternativa interessante, tanto no sentido de minimizar a utilização dos corpor hídricos como no de reduzir a sua poluição. Além disso, com a implementação dos mecanismos de outorga e cobrança pela utilização dos recursos hídricos no Brasil (Política Nacional de Recursos Hídricos, Lei N°. 9.433, de 8 de janeiro de 1997), o reúso de efluentes nas indústrias passou a ser sinônimo de ganhos econômicos diretos, além de ser responsável por uma melhoria na imagem das empresas (MIERZWA & HESPAHOL, 2005).

Dentre as formas de racionalização do uso da água, a conservação requer os menores esforços e custos de investimento. Envolve o uso racional da água pela indústria, incorporando medidas para evitar perdas físicas e melhorar operações (MATSUMURA & MIERZWA, 2008). O reciclo (com regeneração) refere-se ao uso de efluente tratado no local de origem.

O reúso de água pode ocorrer das seguintes formas: (a) reúso direto de efluente, quando o nível de contaminação não interfere no processo seguinte; e (b) reúso com regeneração, que é o reúso de efluente tratado em um outro processo (WANG & SMITH, 1994).

As tecnologias comumente usadas para o reúso de água em refinarias de petróleo são os biorreatores a membrana (MBRs) seguidos pelos processos de osmose inversa ou de eletrodiálise reversa, após terem passado por tecnologias de tratamento convencionais tais como a separação óleo/água (separadores API) e a flotação a ar dissolvido.

O MBR é uma combinação do processo de lodo ativado convencional com o processo de separação por membrana. Esta tecnologia visa remover a maior parte da matéria orgânica do efluente. A eletrodiálise reversa, que apresenta vantagens em relação à osmose inversa, pois é menos suscetível ao *fouling* (incrustação) das membranas, ocorre com a movimentação de íons em um campo elétrico. As membranas de troca de cátions (CEM) e de ânion (AEM) controlam esta movimentação: as primeiras permitem a passagem dos cátions enquanto os ânions ficam retidos, e as segundas apresentam o comportamento oposto. Como resultado, tem-se um compartimento diluído (efluente tratado) e um compartimento concentrado. Cabe mencionar que a osmose inversa e a eletrodiálise reversa apresentam custos operacionais similares.

O *water pinch* é uma técnica de integração mássica e baseia-se no princípio de que a água é utilizada para absorver contaminantes: uma corrente de água passará pelo processo e carreará os contaminantes presentes no mesmo (MIERZWA & HESPAHOL, 2005).

A técnica *water pinch* foi iniciada com WANG & SMITH (1994), que extenderam a tecnologia do ponto de estrangulamento para a integração mássica usando o conceito de curva composta limite, estimando o mínimo consumo de água para um e para múltiplos contaminantes. Posteriormente, os mesmos autores (WANG & SMITH, 1995) extenderam a metodologia, considerando restrições e perdas de vazão e fontes múltiplas de água. Outros trabalhos vieram como aperfeiçoamento da técnica. Dentre estes, pode-se citar o artigo de ALVA-ARGÁEZ *et al.* (2007), que apresentaram uma abordagem sistemática baseada na tecnologia *pinch* que contempla Programação Não-linear de Números Inteiros. Estes autores obtiveram uma redução de consumo hídrico de mais de 10% com mínimo investimento de capital.

O presente artigo objetiva avaliar as formas que visam reduzir o consumo hídrico em refinarias, analisando também a viabilidade econômica de sua implementação. Dentre os objetivos deste trabalho estão os mecanismos de racionalização do uso da água (conservação, reciclo e reúso de água) e a análise dos principais impactos da aplicação da técnica *water pinch* em refinarias brasileiras.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho se baseia nas experiências de racionalização do uso da água que vêm sendo desenvolvidas em torno do mundo, para que sejam analisadas, tanto em termos operacionais quanto econômicos, as perspectivas tecnológicas que visem a redução do consumo hídrico em refinarias de petróleo.

Além disso, propõe outras tecnologias que ainda não são aplicadas em larga escala para o reúso de água em refinarias, com base nas próprias características destas tecnologias e em suas viabilidades econômicas.

A técnica *water pinch* será aplicada em dois conjuntos básicos de dados (TAKAMA *et al.*, 1980 e WANG & SMITH, 1994), que representam bem as unidades de processo encontradas em algumas das importantes refinarias brasileiras. Estes dados estão relacionados à destilação, à hidrodessulfurização e à dessalgação.

O software “Water Design”, desenvolvido por Blocher, Dibicarri, Mann, Tran e Woodson, do Instituto Politécnico da Universidade de Virgínia (EUA) será utilizado para o traçado das curvas compostas de concentração e para a aplicação do método tabular.

Conforme já mencionado, a hipótese para a determinação do ponto de mínimo consumo de água é que a água é utilizada para absorver contaminantes. As Equações (1) e (2) indicam os balanços de massa relacionados (MIERZWA & HESPAHOL, 2005):

$$Q_p \times (C_i^P_{\text{entra}} - C_i^P_{\text{sai}}) = Q_{H2O} \times (C_i^{H2O}_{\text{sai}} - C_i^{H2O}_{\text{entra}}) \quad (1)$$

$$\Delta m_{i,\text{total}} (\text{kg/h}) = Q_{H2O} (\text{t/h}) \times (C_i^{H2O}_{\text{sai}} - C_i^{H2O}_{\text{entra}}) (\text{ppm}), \quad (2)$$

onde Q_p é a vazão da corrente mais concentrada, Q_{H2O} é a vazão da corrente menos concentrada, $C_i^P_{\text{entra}}$ e $C_i^P_{\text{sai}}$ são as concentrações dos contaminantes que entram e deixam a corrente mais concentrada, respectivamente, e $C_i^{H2O}_{\text{sai}}$ e $C_i^{H2O}_{\text{entra}}$ são as concentrações que deixam e entram pela corrente menos concentrada, respectivamente.

A curva composta relaciona a variação da concentração do contaminante na água com a massa do mesmo contaminante transferida para a água. Com múltiplos contaminantes, escolhe-se um como referência e pode ser necessário fazer mudanças nas concentrações daquele contaminante. Contaminantes de “não-referência” podem determinar aquelas mudanças com o objetivo de tornar o reúso viável. A Equação (3) é usada para calcular a vazão mínima de água.

$$F_{\min} = \left(\frac{\Delta m_{i,\min}}{C_{i,\min}} \right) \times 10^3, \quad (3)$$

onde F_{\min} é a vazão mínima, $\Delta m_{i,\min}$ é a variação mássica do contaminante de referência na concentração *pinch* e $C_{i,\min}$ é a concentração *pinch*.

O método tabular utiliza os intervalos de concentração. Estes são determinados a partir das concentrações limites de cada processo e organizados em uma tabela indicativa dos processos desenvolvidos com as respectivas demandas de água. À direita das colunas relacionadas aos processos (operações) desenvolvidos, são inseridas mais três colunas: uma para indicar a carga de contaminantes do intervalo, outra para a carga de contaminante acumulada e outra para a vazão de água necessária para assimilar a carga de contaminante para o intervalo de concentração associado.

A carga de contaminante em cada intervalo de concentração, a carga acumulada e a vazão de água necessária são calculados a partir das Equações de (4) a (6). A linha da Tabela correspondente a maior vazão de água limpa corresponde ao ponto de mínimo consumo de água (MIERZWA & HESPAHOL, 2005).

$$\Delta_{m,n} = \frac{C_{n+1}^* - C_n^*}{10^3} \cdot \sum_{i=1}^n f_i^{lim}, \quad (4)$$

$$\Delta_{m,acumulada} = \sum_I \Delta_{m,n}, \quad (5)$$

$$f_n^{lim} = \frac{\sum \Delta_{m,acumulada}}{C_n^*} \cdot 10^3, \quad (6)$$

onde $\Delta_{m,n}$ é a carga mássica do intervalo de concentração n , $\Delta_{m,acumulada}$ é a carga mássica acumulada relacionada à concentração n do contaminante de referência e f_n^{lim} é a vazão de água necessária relacionada à concentração n do contaminante.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

MÉTODOS PARA RACIONALIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA EM REFINARIAS DE PETRÓLEO

Esta seção descreve alguns casos de aplicação de técnicas de racionalização do uso da água em refinarias de petróleo em torno do mundo para, a partir disso, analisar as perspectivas tecnológicas visando a redução do consumo hídrico neste tipo de indústria.

A refinaria de Rotterdam, da Esso e localizada na Holanda, realizou um projeto de reúso de efluente no qual alimentou a planta de desmineralização com efluente do sistema de tratamento. Observou-se que o reúso de efluente era limitado pela presença de sólidos em suspensão e pela condutividade relativamente alta causada pela presença de íons cloreto. Os seguintes processos foram testados em escala piloto: (a) filtração com areia para remoção de sólidos em suspensão e pré-tratamento da ultrafiltração (UF); (b) UF para a remoção de contaminantes biológicos e pré-tratamento da osmose inversa (OI); e (c) OI para a remoção de sais dissolvidos (DUYVSTEIJN, 1998).

A empresa estatal mexicana (Pemex) realizou projeto de reúso de efluentes na refinaria de Manatitlán, tendo como principal objetivo o abastecimento de torres de resfriamento. A filtração com membrana após tratamento biológico foi utilizada como tratamento secundário, seguida pelo processo de osmose inversa como tratamento terciário. Outro projeto ocorreu na refinaria *Marathon Ashland Petroleum* (MAP), localizada em Kentucky (EUA). O sistema de tratamento utilizado foi o MBR e o efluente tratado descarregado no sistema de tratamento municipal de Ashland (PEETERS & THEODOLOU, 2005). A Tabela 1 apresenta as percentagens de remoção de DBO, DQO, óleos & graxas e sólidos em suspensão totais (SST) pelos sistemas de tratamento das refinarias mencionadas.

Tabela 1: Remoções de DBO, DQO, óleos & graxas e SST, pelos sistemas de tratamento das refinarias Lázaro Cárdenas e Marathon Ashland Petroleum (MAP).

Refinaria	Remoção (%)			
	DBO	DQO	Óleos & graxas	SST
Lázaro Cárdenas	50	54,6	87,5	97,5
MAP	99,7	95,0	97,0	89,4

Nota: O sistema de tratamento da refinaria MAP não é com fins de reúso de efluentes.

Como pode ser observado, o sistema de tratamento da MAP, que usou MBR, removeu uma quantidade de DBO e DQO consideravelmente alta quando comparado ao sistema de tratamento da refinaria Lázaro Cárdenas, que utilizou membrana seguida de OI. Entretanto, comparando-se as taxas de remoção de óleos &

graxas e de SST pelos dois sistemas de tratamento, pode ser observado que os valores são muito próximos, o que mostra que ambos os sistemas de tratamento são eficientes para estes dois parâmetros.

Efluente municipal tratado, comumente chamado de *reclaimed water*, é frequentemente utilizado por indústrias, dentre elas refinarias de petróleo, que requer água de resfriamento com baixos níveis de fosfato, de amônia e de sólidos em suspensão. Os processos usados para alcançar estes requisitos incluem amolecimento com cal, osmose inversa e nitrificação. Tratamento adicional é necessário para geração de vapor, e tratamento maior que o anterior é requerido para o uso da água em sistemas de combate ao incêndio e em outros processos (PUCKORIUS *et al.*, 1998).

Em Virgínia (EUA) um esforço cooperativo entre o *Hampton Roads Sanitation District* e a refinaria Yorktown forneceu 500.000 galões por dia de efluente altamente tratado para uso em torres de resfriamento e em outros processos da refinaria. Um outro exemplo é a refinaria de Gold Bar, da Petro-Canada em Edmonton. Este projeto envolve o uso de tratamento terciário com membranas (UF e OI) para utilização nas correntes de hidrogênio e de vapor do processo de dessulfurização.

Um projeto importante ocorreu na refinaria Yanshan, em Beijing (China). O projeto foi realizado devido às restrições ambientais rigorosas impostas pelo governo chinês. Nesta refinaria, a alimentação da unidade de tratamento para reúso contém óleo residual (1,2 mg/L) e alta DQO (20-30 mg/L). A condutividade (1.400-1.900 uS/cm) e a dureza (300-500 mg/L) são muito altas para reúso direto. O sistema inclui uma combinação de UF e OI para reduzir o nível de óleo/DQO, remover sólidos em suspensão e desmineralizar a água. O sistema de UF tem capacidade total de 560 m³/h (10 unidades com capacidade de 56 m³/h). O sistema tem três unidades de OI, cada uma com capacidade de 103 m³/h (TONG & AERTS, 2009).

Dois outros projetos relevantes foram implementados na refinaria Mobil Altona, da Esso e localizada em Victoria (Austrália) e no complexo de refino Petromidia, da Rompetrol e localizada em Ravidari (Romênia). Estudos preliminares na refinaria australiana (MOBIL ALTONA REFINERY, 2006) e no complexo romeno identificaram a economia de água, a minimização de descarte de efluentes e o uso de efluentes tratados no combate ao incêndio como os principais objetivos. Além disso, o complexo de Petromidia adotou como medidas de conservação de água a substituição de torres de resfriamento por unidades menores (resultando também em economia de energia) e a modificação e o reparo do sistema de tratamento de efluentes, e como medida de reciclo de água a reutilização de *blowdown* nos sistemas de geração de vapor.

TECNOLOGIAS PROMISSORAS PARA O REÚSO DE ÁGUA

Os custos das principais tecnologias para o reúso de efluentes em refinarias de petróleo são geralmente altos, tais como as membranas para micro e ultrafiltração. A tecnologia MBR tem custo similar, já que faz uso das membranas mencionadas. A osmose inversa e a eletrodiálise reversa, que são tecnologias competidoras, tem custos operacionais similares (CHAO & LIANG, 2008; OAS, 2010). Como mencionado anteriormente, estas tecnologias são usadas na etapa final do tratamento visando o reúso em refinarias de petróleo, com o objetivo de remover os íons cloreto.

Algumas tecnologias importantes ainda não aplicadas em larga escala para tratar efluentes de refinarias visando o reúso são promissoras e deveriam ser testadas. Neste caso podem ser citadas as tecnologias de nanofiltração, de troca iônica, que seria útil para o polimento da osmose inversa, e de processos oxidativos avançados, que são eficientes para o tratamento de água ácida.

A nanofiltração (NF) é uma tecnologia promissora porque sua eficiência de remoção se situa entre a ultrafiltração e a osmose inversa. Portanto, a NF poderia ser utilizada como uma técnica imediatamente anterior à osmose inversa ou possivelmente a substituindo. Embora as membranas de nanofiltração sejam mais caras devido a seu menor tamanho de poro, seu custo deve diminuir mais rapidamente que o de outros tipos de membrana, possivelmente melhorando sua competitividade, pois a nanofiltração é uma tecnologia de concepção recente.

A troca iônica poderia ser usada como um polimento do processo de osmose inversa, já que para baixas

concentrações de sal é uma tecnologia economicamente atrativa em relação à OI (RAUTENBACH & MELIN, 2003). A troca iônica poderia ser usada após os processos de osmose inversa ou de eletrodiálise reversa, possivelmente reduzindo o custo da última etapa do tratamento para remoção de cloreto dos efluentes.

Os processos oxidativos avançados (POAs) são úteis para tratar água ácida de refinarias. Este tipo de efluente tem características complexas, contendo óleo emulsificado, fenóis, sulfetos, mercaptanas e cianetas. Desta forma, tem que ser segregado e tratado separadamente. POAs, tais como os processos Fenton, Fenton-like e Foto-Fenton poderiam ser utilizados neste caso, porque a água ácida não pode ser tratada através de sistemas de tratamento biológico convencionais. POAs contribuem para a degradação de substâncias tóxicas ou refratárias através da produção de radicais hidroxila.

APLICAÇÃO DE WATER PINCH E SEU POTENCIAL IMPACTO NAS REFINARIAS BRASILEIRAS

A Tabela 2 apresenta dados operacionais de duas refinarias, relacionados aos seguintes processos: destilação, hidrodessulfurização e dessalgação. Tais processos se ajustam bem à realidade de algumas refinarias brasileiras existentes, embora hajam refinarias com uma maior complexidade.

A Figura 1 apresenta a curva composta de concentração a partir dos dados de TAKAMA *et al.* (1980) utilizando os sólidos em suspensão como contaminantes de referência. A Figura 2 representa a curva composta de concentração a partir dos dados de WANG & SMITH (1994) utilizando o H₂S como contaminante de referência. Os valores de vazão mínima de água necessária para os processos foi igual a 99,41 te/h para o primeiro caso e 106,7 te/h para o segundo.

Tabela 2: Dados limites de processos para dois casos de refinarias de petróleo (Adaptado de TAKAMA *et al.* (1980) e WANG & SMITH (1994)).

Processo	Dados de Takama <i>et al.</i> (1980)				Dados de Wang & Smith (1994)			
	Vazão (te/h)	Cont.	C _{entra} (ppm)	C _{sai} (ppm)	Vazão (te/h)	Cont.	C _{entra} (ppm)	C _{sai} (ppm)
1	45,8	SS	0	25	45,0	HC	0	15
		H ₂ S	0	390		H ₂ S	0	400
		Óleo	0	10		Sal	0	35
2	32,7	SS	50	65	34,0	HC	20	120
		H ₂ S	500	16.890		H ₂ S	300	12.500
		Óleo	20	120		Sal	45	180
3	56,5	SS	50	85	56,0	HC	120	220
		H ₂ S	20	43		H ₂ S	20	45
		Óleo	120	220		Sal	200	9.500

Notas: 1) Processo 1 - Destilação, Processo 2 - Hidrodessulfurização (HDS), Processo 3 - Dessalgação; 2) SS - Sólidos em Suspensão, Cont. - Contaminante, HC - Hidrocarboneto.

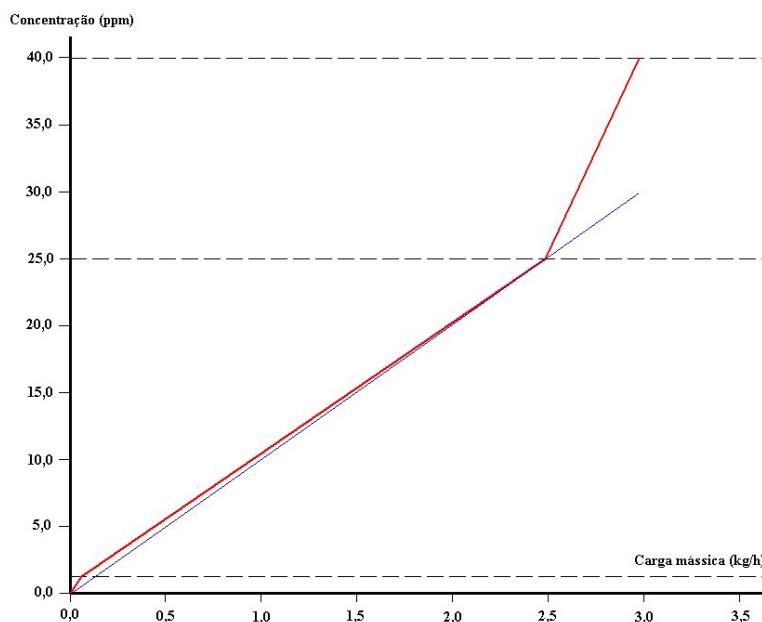


Figura 1: Curva composta de concentração para a obtenção da vazão mínima de água para reúso sem regeneração, a partir dos dados de TAKAMA *et al.* (1980) e com o auxílio do “Water Design”.

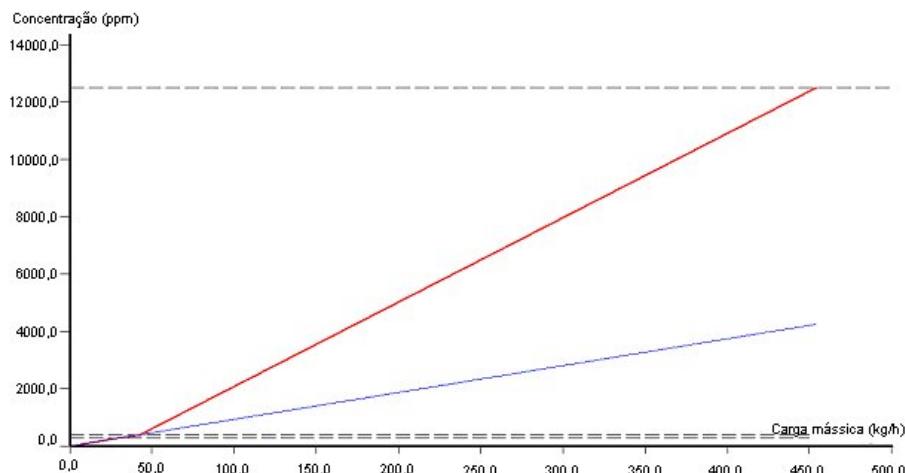


Figura 2: Curva composta de concentração para a obtenção da vazão mínima de água para reúso sem regeneração, a partir dos dados de WANG & SMITH (1994) e com o auxílio do “Water Design”.

A Figura 3 apresenta o método tabular para reúso de água sem regeneração, após as mudanças de variáveis necessárias e a partir dos dados de WANG & SMITH (1994). Como pode ser observado, o valor de vazão mínima de água necessária para os processos confirma aquele obtido com a curva composta de concentração. Se este método fosse realizado com os dados de TAKAMA *et al.* (1980), os dados de concentração utilizados no software seriam: processo 1, conc. inicial = 0 ppm e conc. final = 25 ppm; processo 2, conc. inicial = 25 ppm e conc. final = 40 ppm; processo 3, conc. inicial = 1,28 ppm e conc. final = 25 ppm. Maiores informações sobre as mudanças de variáveis podem ser encontradas no trabalho de WANG & SMITH (1994).

Cabe mencionar que se o método da curva composta de concentração fosse utilizado para reúso com regeneração e utilizando *foulwater stripper* para a regeneração da água, o valor de vazão mínima a partir dos dados de WANG & SMITH (1994) seria 54,20 te/h. A Figura 4 representa as redes ótimas de distribuição de água para reúso sem regeneração, mostrando o reúso de água da destilação na hidrodesulfurização. As linhas

azuis são as ofertas de água fresca aos processos, as linhas vermelhas são os efluentes industriais e as linhas verdes mostram o reúso de efluentes.

Concentração (ppm)	Operação 1 45.00 te/hr	Operação 2 34.00 te/hr	Operação 3 56.00 te/hr	Carga mássica (kg/lhr)	Carga mássica acumulada (kg/lhr)	Vazão (te/hr)
0.00					0.00	0.00
20.00				0.90		
300.00				28.28	0.90	45.00
400.00				13.50	29.18	97.27
12500.00				411.40	454.08	36.33

Figura 3: Método tabular para a obtenção da vazão mínima de água para reúso sem regeneração, a partir dos dados de WANG & SMITH (1994) e com o auxílio do “Water Design”.

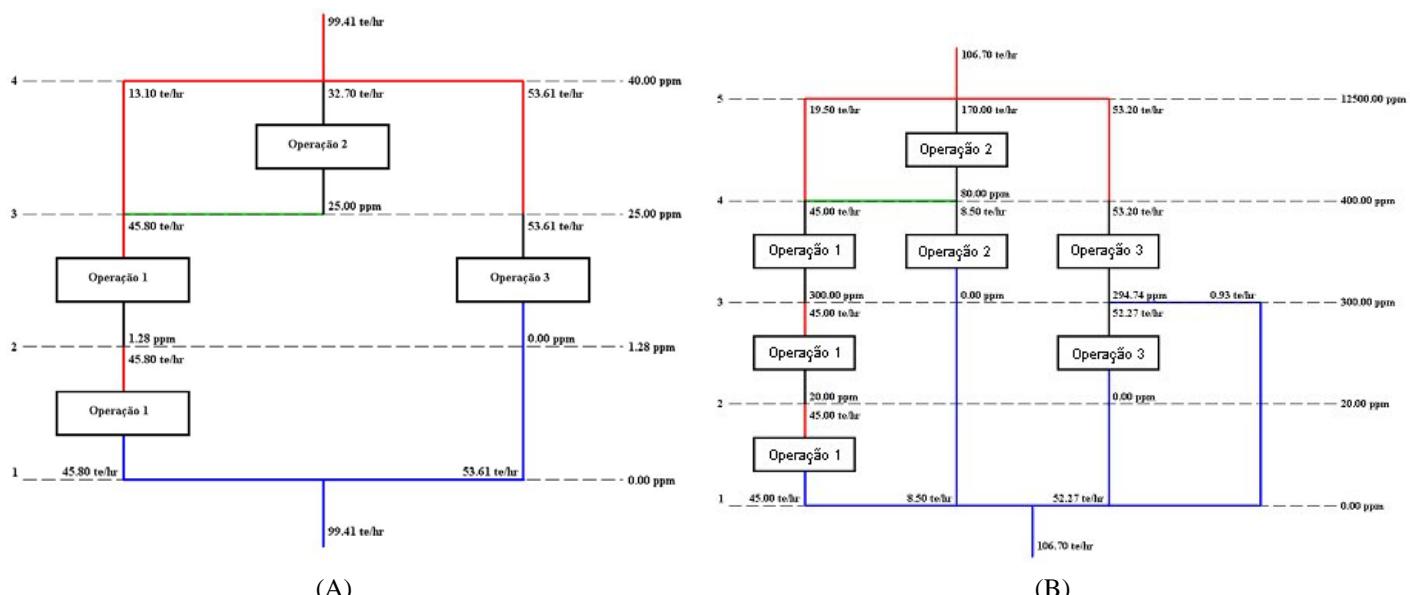


Figura 4: Redes ótimas de distribuição de água. (A) Dados de TAKAMA *et al.* (1980). (B) Dados de WANG & SMITH (1994).

A Tabela 3 apresenta as economias de água que podem ser obtidas pelas refinarias brasileiras REMAN (capacidade instalada igual a 46.000 barris de petróleo/dia), RECAP (capacidade instalada igual a 53.000 barris de petróleo/dia), REFAP (capacidade instalada igual a 189.000 barris de petróleo/dia), REPAR (capacidade instalada igual a 189.000 barris de petróleo/dia) e REVAP (capacidade instalada igual a 252.000 barris de petróleo/dia) com a aplicação da técnica *water pinch*. Estes cálculos foram realizados a partir de dados da quantidade de água utilizada pelos processos que fizeram parte da aplicação do *Pinch* e da vazão

mínima de água obtida com as aplicações. Notam-se substanciais economias hídricas (53,8 a 79,1 %) para reúso com regeneração.

Cabe ressaltar que se outras unidades de processo fossem incorporadas nas aplicações de *water pinch*, tais como o hidrotratamento e o craqueamento catalítico, os valores de vazão mínima de água seriam maiores e, portanto, as economias hídricas menores.

Tabela 3: Economias hídricas que podem ser obtidas por algumas refinarias brasileiras existentes, a partir da aplicação da técnica *water pinch*.

Refinaria	REMAN	RECAP	REFAP	REPAR	REVAP
Reúso sem regeneração	15,2 %	60,1 %	56,9 %	61,6 %	18,2 %
Reúso com regeneração	53,8 %	77,6 %	76,5 %	79,1 %	55,4 %

Com relação às refinarias *greenfield*, que são aquelas que ainda serão instaladas no Brasil, é de grande relevância a resposta da seguinte pergunta: as novas refinarias deveriam ser projetadas prevendo a minimização do consumo de água e a maximização do reúso de efluentes (refinarias em fase de projeto), ou as refinarias deveriam ser modificadas, após sua instalação, com o objetivo de minimizar o consumo hídrico?

De acordo com o obtido com as aplicações de *water pinch*, as novas refinarias brasileiras poderiam ser planejadas já incorporando a transferência de massa otimizada entre contaminantes e corrente d'água. Isto traria maiores ganhos em termos de economia hídrica para as novas refinarias se comparadas com aquelas existentes.

Além disso, o mencionado acima provavelmente seria menos custoso do que modificar os processos de uma refinaria existente. Portanto, as novas refinarias ganhariam duplamente com a aplicação de *water pinch*: tanto por conseguir levar maiores vantagens da técnica como por ser menos custoso capacitar o máximo reúso.

CONCLUSÕES

Diversos métodos são considerados promissores para a racionalização do uso da água em refinarias de petróleo. Dentre estes, pode-se citar o uso de efluente doméstico tratado e as técnicas de conservação e reciclo de água tais como a substituição de torres de resfriamento por unidades menores e o reciclo de *blowdown* em torres de resfriamento e em sistemas de geração de vapor.

Com relação ao reúso de água, as tecnologias de nanofiltração, de troca iônica e de processos oxidativos avançados têm se mostrado úteis, devido as suas características apresentadas neste trabalho.

As aplicações da técnica *water pinch* realizadas neste artigo mostrou ser de grande valia tanto para as refinarias existentes como para as refinarias que ainda serão instaladas, resultando em substanciais economias de água por parte das plantas industriais e em redução da captação hídrica e de seus custos associados.

Portanto, este trabalho mostrou que é técnica e economicamente viável reduzir o consumo hídrico das refinarias de petróleo no mundo, devido às técnicas apresentadas e aos custos de sua implementação.

AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer à COPPE/UFRJ, aonde o trabalho foi desenvolvido, e à FAPEMIG pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO - ANP. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acessado em: 2 de fevereiro de 2012.
2. ALVA-ARGÁEZ, A., KOKOSSIS, A.C., SMITH, R. The design of water-using systems in petroleum refining using a water-pinch decomposition. *Chemical Engineering Journal*, v. 8, p.33-46, 2007.
3. AMORIM, R.S. Abastecimento de água de uma refinaria de petróleo - Caso REPLAN. Niterói, 2005. Dissertação de mestrado-Sistema de Gestão-Universidade Federal Fluminense, 2005.
4. CHAO, Y., LIANG, T.M. A feasibility study of industrial wastewater recovery using electrodialysis reversal. *Desalination*, v. 221, p.433-439, 2008.
5. DUYVESTEIJN, C.P.T.M. Water re-use in an oil refinery. *Desalination*, v. 119, p.357-358, 1998.
6. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Plano Nacional de Energia 2030. EPE. Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
7. HESPAÑHOL, I. Potencial de reúso de água no Brasil: Agricultura, indústria, municípios e recarga de aquíferos. In: Mancuso, P., Santos, H. dos (orgs). Manole (USP). São Paulo, Brasil, 2003.
8. MATSUMURA, E.M., MIERZWA, J.C. Water conservation and reuse in poultry processing plant - A case study. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 52, p.835-842, 2008.
9. MIERZWA, J.C., HESPAÑHOL, I. Água na indústria - Uso racional e reúso. Oficina de Textos. São Paulo, Brasil, 2005.
10. MOBIL ALTONA REFINERY. Environment Improvement Plan 2004-2006. Mobil Altona Refinery. Austrália, 2006.
11. ORGANIZATION OF AMERICAN STATES - OAS. Desalination by reverse osmosis. Disponível em: <http://www.oas.org/DSD/publications/Unit/oea59e/ch20.htm>. Acessado em: 31 de agosto de 2010.
12. PEETERS, J.G., THEODOULOU, S.L. Membrane technology treating oily wastewater for reuse. CORROSION/2005. NACE International, artigo N°. 05534. Anais. Houston, Texas, 2005.
13. PETROBRAS. Plano de negócios 2011-1015. Petrobras. Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
14. PUCKORIUS, P.R., LORETITSCH, G.A. TVEDT, T.J. Reuse water quality for chemical plants, refineries, utilities and air conditioning. CORROSION/98. NACE International, artigo N°. 573. San Diego, California, 1998.
15. RAUTENBACH, R. MELIN, T. Mebranverfahren (Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung). Segunda edição. Springer-Verlag. Berlim, Alemanha, 2003.
16. TAKAMA, N., KURIYAMA, T., SHIROKO K., UMEDA, T. Optimal water allocation in a petroleum refinery. *Comput. Chem. Eng.*, v. 4, p.251-258, 1980.
17. TONG, F., AERTS, P. RO & Petrochemicals. *Water & Wastes Digests*, p.26-27, setembro de 2009.
18. WANG, Y.P., SMITH, R. Wastewater minimization, *Chemical Engineering Science*, v. 49, p.981-1006, 1994.
19. WANG, Y.P., SMITH, R. Wastewater minimization with flowrate constraints. *Chemical Engineering Resource and Design*, v. 73a, p.885-900, 1995.