

Reuso de efluentes em torres de resfriamento - estudo conceitual: Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro

Denize Dias de Carvalho* e Bernardo José Farah Machado

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Pedro Calmon, 550, 21941-901, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
*Autor para correspondência. E-mail: denize@eq.ufrj.br

RESUMO. O reuso de água é ferramenta valiosa na gestão da água, que promove a otimização da utilização do recurso desta, que reduz e, muitas vezes, até elimina os impactos no meio ambiente. Neste trabalho foi investigada a composição do efluente secundário da estação de tratamento de efluentes (ETE APOIO) do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, com o objetivo de propor o processo adequado à reutilização deste efluente como água de reposição nas torres de resfriamento desse Aeroporto. Com base nas análises de cátions, ânions, DBO e DQO, verificou-se o parâmetro SDT - Cl como crítico para processamento do efluente. Foi proposta uma sequência para reutilização do efluente que continha o tratamento de osmose inversa, o custo do m³ produzido por essa sequência foi estimado em R\$ 2,90 m⁻³.

Palavras chave: reuso, efluente secundário, torre de resfriamento.

ABSTRACT. Water reuse for cooling towers – conceptual study: Rio de Janeiro International Airport. Water reuse is an important tool in water management; it is a concept that promotes optimization of the water resource, reducing and often even eliminating environmental impacts. In this work, the composition of a secondary effluent (from the effluent treatment station (ETE APOIO) at Rio de Janeiro International Airport) was analyzed, with the aim of determining an adequate process for the reutilization of this effluent as replacement cooling water. Chemical analyses such as cation and anion analysis, BOD and COD were performed. Based on these analyses, it was found that TDS - Cl⁻ was the critical parameter for effluent processing. A treatment system was proposed for effluent reuse including reverse osmosis; the cost estimate per m³ produced by this system was R\$ 2.90 m⁻³.

Key words: reuse, secondary effluent, cooling tower.

Introdução

Estima-se que 97,5% do total de água estão nos oceanos, 2,5% da massa líquida são compostos de água doce, e há menos de 0,01% de água potável. Para tornar a situação ainda mais preocupante, menos de 1% dela é acessível (SILVA et al., 2003). Agrava essa situação o fato de que a água encontra-se desigualmente distribuída. No Brasil, 80% da reserva de água doce encontram-se na região Amazônica, de baixa densidade demográfica, enquanto que 95% da população nacional localizam-se em regiões que possuem 20% da reserva total de água doce nacional (MANCUSO; SANTOS, 2003). Esse panorama aponta a necessidade de se focar a água como insumo estratégico e recurso natural limitado, embora classificado como renovável.

Com o crescimento populacional e a diversificação das atividades antrópicas, aumenta-se a pressão sobre os recursos hídricos, tornando-se os dias mais escassos e inapropriados ao abastecimento humano, que desencadeiam a busca por alternativas

para gerenciamento desses recursos (MANCUSO; SANTOS, 2003).

O uso do reuso de águas, como uma ferramenta valiosa em um modelo de gerenciamento de águas e efluentes, pode reduzir a demanda sobre os mananciais em função da substituição da água potável por uma de qualidade inferior; desta forma, volumes significativos de água potável podem ser poupados pelo reuso quando se utiliza água de qualidade inferior (geralmente efluentes pós-tratados) (SILVA et al., 2003).

No Brasil, o reuso na área urbana, industrial, agrícola e o associado à recarga artificial de aquíferos representam os mais significativos. Uma das alternativas para o reuso industrial é o uso de efluentes secundários tratados como água de reposição em torres de resfriamento. Os sistemas de tratamento para reuso em unidades de resfriamento semiabertos são relativamente simples. Este tipo de reuso é relativamente fácil e praticado em muitos locais nos EUA; os Estados da Califórnia, Arizona, Texas, Flórida e Nevada possuem as maiores

unidades industriais que utilizam água de reuso (METCALF AND EDDY, 1991; EPA, 2004).

No Brasil, o uso de efluentes secundários, tratados em sistemas de resfriamento, corresponde a apenas 17% da demanda de água não-potável industrial (HESPANHOL, 2007).

Os sistemas de resfriamento constituem a maior demanda de água da indústria e geralmente não requerem água de alta qualidade. Os sistemas de reuso utilizam técnicas tradicionais de tratamento de água e tecnologias mais avançadas, em arranjos variados, que dependem das qualidades do efluente a ser tratado e da qualidade desejada para o reuso.

Epa (2004) recomenda, para o reuso industrial, para a reposição em sistemas abertos com recirculação, a partir de efluentes predominantemente domésticos, a utilização (a partir do tratamento secundário) do processo de desinfecção, podendo ser necessários os tratamentos de coagulação e filtração. A filtração pode variar desde a filtração com areia até a utilização de membranas.

Segundo Teodosiu et al. (1999), a análise da possibilidade de reciclagem de efluentes industriais para reposição em torres de resfriamento deve considerar múltiplos fatores, tais como: qualidade e quantidade do efluente, padrão para reposição, avaliação de diferentes esquemas de tratamento e análise de custo.

O uso de efluentes secundários, tratados em sistemas de resfriamento, além de ser experiência bem sucedida tanto no exterior quanto no Brasil, apresenta a possibilidade de ser concretizada em curto prazo e com reduzido volume de investimentos (DIAS, 2005).

O Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro (AIRJ), administrado pela Infraero (Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária), possui uma estação de tratamento secundário de efluentes, conhecida como ETE Apoio (ETE A). Próximo à ETE A, a cerca de 200 m, situam-se duas torres de resfriamento, torres A e B, que fazem parte do sistema de refrigeração do Aeroporto.

Este trabalho teve como objetivos avaliar as características do efluente secundário clorado (ESC) da ETE A, de modo a propor uma sequência de processos para reutilização deste nas torres de resfriamento do AIRJ e estimar o custo do m³ de água produzido pelo sistema proposto.

Material e métodos

O desenvolvimento deste trabalho consistiu nas seguintes etapas: 1 – levantamento junto à Infraero das características físico-químicas do ESC e dos

dados de projeto das torres de resfriamento A e B; 2 – levantamento a partir da literatura de padrão de água para reposição em sistema de resfriamento aberto com recirculação, índice de estabilidade de água, dados sobre custos de investimento em sistemas de tratamento para reuso e indicador para análise de investimento; 3 – coletas adicionais do efluente estudado, de modo a complementar a caracterização deste a fim de atender aos parâmetros recomendados pela literatura; 4 – definição da metodologia para cálculo dos limites do padrão para água de reposição no sistema e 5 – comparação das características do ESC com o padrão definido, proposta de sistema para reuso do ESC e estimativa econômica do sistema de reuso proposto.

Características da ETE A e do efluente secundário

A ETE A recebe os efluentes de todos os terminais de passageiros, da área industrial e das áreas administrativas. Ela é composta por duas linhas de operação, e cada linha possui um decantador primário, um tanque de aeração e um decantador secundário. A capacidade de projeto do sistema é de 55 L s⁻¹ (198 m³ h⁻¹). Na Figura 1 está apresentado o diagrama simplificado da ETE A.

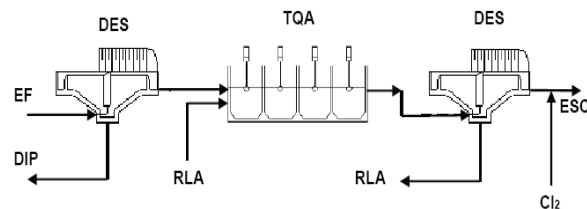


Figura 1. Diagrama esquemático da ETE A (EF= Efluente Bruto; DES= Decantador; DIP= Digestor Primário; RLA= Recirculação de Lodo Ativado; TQA= Tanque de Aeração; CL₂= Cloração; ESC= Efluente Secundário Clorado).

A Tabela 1 apresenta os valores médios dos parâmetros analisados no período de dois anos de janeiro 2003 a fevereiro 2005; as análises foram realizadas pelo Laboratório da Infraero no ESC.

Tabela 1. Características do efluente secundário clorado (ESC).

Parâmetro ^a	ESC
Temperatura (°C)	24,9
pH	7,0
Resíduos Filtráveis Totais	826
DQO	171
Nitrogênio Amoniacal	20,6
Cloreto	335
Alcalinidade	149

a - Todas as substâncias em mg L⁻¹, exceto: os parâmetros alcalinidade em mg L⁻¹ de CaCO₃, e pH.

Dados das torres de resfriamento

As torres A e B são do tipo tiragem forçada, fornecem água fria para o sistema de refrigeração de

ar do Aeroporto. Atualmente, a Infraero alimenta o sistema aberto com recirculação dessas torres com água fornecida pela Companhia de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE), ao preço de R\$ 10,6 R\$ m⁻³. A vazão máxima de água de reposição, 1.100 m³ dia⁻¹ (45,8 m³ h⁻¹), ocorre no verão, quando são operados quatro do total de seis células (número máximo de células operando simultaneamente). O casco e o espelho dos trocadores de calor do sistema de resfriamento, assim como as tubulações, são compostas de aço carbono, enquanto que o feixe de tubos dos trocadores é composto de cobre. Os dados do projeto das torres estão ilustrados na Tabela 2.

Tabela 2. Dados de projeto das torres de resfriamento do AIRJ.

Dados de projeto	Torre A/B
Nº de células	3
Vazão de água de circulação ^{a,b}	2020
Perda por evaporação (m ³ h ⁻¹) ^b	27,5
Perdas por arraste ou respingos (m ³ h ⁻¹) ^b	3,0
Nº de ciclos de concentração	7,0
Temperatura da água quente ^c	37,8
Temperatura da água fria ^c	30,0

a – vazão total de água de circulação do sistema de resfriamento; b - (m³ h⁻¹); c - °C

Definição do padrão de água para reposição no sistema de resfriamento das torres A e B (PRTAB)

Na Tabela 3, estão apresentados os parâmetros e respectivos limites recomendados pelo EPA (1992), para água de reposição em torres de resfriamento, bem como os limites máximos estabelecidos, pela Infraero, para controle da água de recirculação das torres A e B.

Tabela 3. Padrões de água em torres de resfriamento.

Parâmetro ^a	EPA (1992) ^b	Infraero
Cloretos	500	200
SDT (*)	500	---
Dureza	650	250
Alcalinidade	350	200
pH ^d	6,0 – 9,0	6,5 – 8,0
DQO (*)	75	---
SST (*)	100	---
Turbidez	50	---
DBO	25	---
MBAS ^e	1,0	---
Nitrogênio amoniacal	1,0	---
Fosfatos	4,0	---
Sílica	50	150
Alumínio	0,1	---
Ferro	0,5	2,0
Manganês	0,5	---
Cálcio	50	---
Magnésio	0,5	---
Bicarbonatos	24	---
Sulfatos	200	---

a - Todas as substâncias em mg L⁻¹, exceto: os parâmetros dureza, alcalinidade e bicarbonatos, em mg L⁻¹ de CaCO₃, turbidez em UNT (Unidade nefelométrica de turbidez), e pH; b - *Water Pollution Control Federation*, 1989; c - Substâncias ativas ao azul de metileno; as siglas (*) representam: SDT – sólidos totais dissolvidos; DQO – demanda química de oxigênio; DBO – demanda bioquímica de oxigênio.

Metodologia para cálculo do padrão de água de reposição

O padrão para água de reposição é função dos limites máximos de concentração de cada componente e do número de ciclos de concentração. O número de ciclos em que a água é concentrada na torre de resfriamento é conhecido como ciclos de concentração (C). C é usualmente determinado pela comparação da concentração de alguns íons muito solúveis, tais como cloreto ou magnésio, na água de reposição (AR) com a água de circulação (AC), conforme Equação I. As Equações II e III representam o balanço de água em sistemas de resfriamento abertos com recirculação (BUECKER, 1997).

$$C \approx \frac{\left[\text{Cl}^- \right] \text{ ou } \left[\text{Mg}^{++} \right] \text{ AC}}{\left[\text{Cl}^- \right] \text{ ou } \left[\text{Mg}^{++} \right] \text{ AR}} \quad (\text{I})$$

$$\text{BD} + \text{D} = \frac{\text{E}}{(\text{C} - 1)} \quad (\text{II})$$

$$\text{AR} = \text{E} + \text{BD} + \text{D} \quad (\text{III})$$

BD = purga e D = perdas por arraste ou respingos.

Análises adicionais

Com base nos dados obtidos a partir das análises do ESC, realizadas pela Infraero (Tabela 1), e comparando-se com os parâmetros recomendados para reposição em torres (EPA, 1992), Tabela 3, e com os parâmetros controlados pela Infraero nas torres de resfriamento do AIRJ (Tabela 3), verificou-se a necessidade de análises adicionais para a completa caracterização do efluente.

Foram realizadas duas amostras adicionais no ESC. Os parâmetros avaliados na primeira amostra foram: DQO, DBO, SDT, cálcio, magnésio, alumínio, ferro, manganês, sulfato, fosfato e sílica. Os parâmetros avaliados na segunda análise complementar foram os mesmos da primeira, além de dureza e bicarbonatos, cujos dados estão apresentados em resultados obtidos na Tabela 5.

Os metais foram analisados por espectrometria de absorção atômica enquanto que os ânions foram analisados por cromatografia de íons. Todas as análises foram executadas, segundo metodologia preconizada pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th ed. (APHA, 1995)

Índices para análise da tendência à corrosão ou à incrustação

O índice de estabilidade (IE) de uma água é uma medida de sua tendência corrosiva em relação ao ferro ou ao aço carbono e de sua tendência

incrustante em relação à formação do depósito de CaCO_3 . O índice de estabilidade de Puckorius (IEP) é específico para se prever incrustações em sistemas de resfriamento (GENTIL, 2003). O IEP, na faixa estável, situa-se na faixa de 6,0 a 7,0. Abaixo de 6,0, a tendência da água é incrustante, acima de 7,0, a tendência é corrosiva.

$$\text{IEP} = 18,1 - 3,5\log(c_{\text{HCO}_3}) - 2,0\log(C_{\text{CA}}) \quad (\text{IV})$$

C_{HCO_3} = concentração de HCO_3^- em ppm de CaCO_3 e C_{CA} = concentração de CA^{2+} em ppm de CaCO_3 .

Custo de investimento em Estações de Condicionamento para Reuso (ECR)

Richard (1998) apud Santos (2007) apresentou os custos de investimentos na construção civil e na operação e manutenção de instalações para 12 tipos de Estações de Condicionamento para Reuso (ECR). Ele uniformizou os custos de construção para o mês de junho de 1996 por meio do *Engineering News Record Construction Cost Index* (ENRCCI). A Tabela 4 apresenta os custos de investimento na construção e de operação e manutenção (O&M) de duas ECR, as ECR, Lodo ativado convencional (LAC) e Tratamento Secundário - filtração por contato - adsorção por carvão ativado - osmose inversa (TSOI).

Tabela 4. Custo de investimento na construção e na O&M das ECR***.

	Custo de O&M**			Custo de Construção*		
	44 ^a	219 ^a	438 ^a	44 ^a	219 ^a	438 ^a
ECR	270	930	1,730	6,100	14,400	24,900
TSOI	1,240	4,960	9,600	13,450	43,800	84,150

a - l s⁻¹; * US\$1000; **US\$1000 ano⁻¹; ***Preços de Junho de 2006 (ENRCCI = 5600); Fonte: adaptada de Richard (1998) apud Santos (2007).

Investimento em função da escala

Segundo Clemente (1998), a correção de custos de investimento e de operação e manutenção em função da escala do sistema pode ser obtida pela Equação VI.

$$\left(\frac{I}{I_0}\right) = \left(\frac{T}{T_0}\right)^\alpha \quad (\text{V})$$

Em que: I = representa o valor de investimento; T = a capacidade instalada, o subscrito zero; a situação de referência e α = o fator de escala.

Segundo Clemente (1998), embora seja muito conhecida a regra do 0,6, segundo a qual o fator de escala seria, em geral, aproximadamente igual a 0,6

para a indústria, deve-se ressaltar que o fator α pode apresentar variações acentuadas de um ramo de atividade para outro e que tende a aumentar à medida que escalas maiores são consideradas.

Indicador para análise do investimento

O Período de Recuperação do Investimento (PRI) ou *payback* é um indicador utilizado para análise de retorno de investimentos, isto é, o tempo necessário para se recuperar o investimento realizado (CLEMENTE, 1998).

O cálculo desse indicador é muito simples. Para se calcular o PRI, acumula-se, período a período, o valor presente de cada benefício, até que a soma se iguale ao valor do investimento inicial. O período correspondente à última parcela da soma será o PRI.

$$\text{PRI} = \frac{\text{TCC}}{\text{EA}} \quad (\text{VI})$$

TCC = Custo de investimento e EA = Economia anual (benefício).

Resultados e discussão

O padrão para água de reposição nas torres A e B do AIRJ (PRTAB) foi definido, utilizando-se todos os parâmetros recomendados pela literatura (EPA, 1992). Para os parâmetros não-controlados pela Infraero, serão utilizados os valores recomendados por EPA (1992). Para os parâmetros controlados pela Infraero, os limites para água de reposição foram calculados por meio da Equação I, considerando-se o número de ciclos de concentração de operação das torres do AIRJ, 7,0 (Tabela 2) e os limites controlados pela Infraero na água de recirculação (Tabela 3).

A Tabela 5 apresenta o PRTAB (padrão para água de reposição nas torres A e B do AIRJ) e as características do ESC, resultado das análises adicionais e dados da Tabela 1.

Observa-se, a partir das Tabelas 3 e 5, que todos os limites dos parâmetros controlados pela Infraero na água de recirculação são também recomendados por Epa (1992) para controle na água de reposição. Comparando-se os valores do PRTAB, definidos a partir dos limites da Infraero (Tabela 3), com os valores recomendados por Epa (1992) (Tabela 3), verifica-se que todos os limites praticados pela Infraero são mais restritivos.

Observando-se a Tabela 5, verifica-se que os parâmetros turbidez, pH, DBO, sílica, ferro, manganês, cálcio e sulfatos estão conforme o limite definido para o PRTAB.

Os valores de dureza, alcalinidade, bicarbonatos e magnésio estão acima do limite estabelecido. A concentração de magnésio ($14,9 \text{ mg L}^{-1}$) está muito superior ao limite definido ($0,5 \text{ mg L}^{-1}$); importante ressaltar que este valor recomendado para alimentação é economicamente impossível de ser alcançado, pois quase todas as águas possuem concentrações mais elevadas que esse valor limite (NALCO, 1987).

Tabela 5. PRTAB (Padrão para Água de Reposição nas Torres A e B) e características do ESC (Efluente Secundário Clorado).

Parâmetro	PRTAB	ESC
Cloretos	29	335 ^a
SDT	500	720
Dureza	36	101
Alcalinidade	29	149 ^a
pH	6,5-8,0	7,0 ^a
DQO	75	171 ^a
SST	100	nr
Turbidez	50	10
DBO	25	15
MBAS	1,0	Nr
Nitrogênio amoniacal	1,0	20,6 ^a
Fosfatos	4,0	7,5
Sílica	21	3,3
Alumínio	0,1	0,2
Ferro	0,29	< 0,1
Manganês	0,5	0,5
Cálcio	50	26
Magnésio	0,5	14,9
Bicarbonatos	24	100
Sulfatos	200	38

a – média dos resultados da ETE A para o ESC, dados da Tabela 1; nr – análise não-realizada.

A precipitação de magnésio com sílica é uma significativa incrustação que pode ocorrer em sistemas de resfriamento, associada ao magnésio, formando silicato de magnésio, conforme Equação VII para pH 7,0. Considerando-se $C = 7$, o resultado dessa equação para o ESC será 8085, não representando grande risco de precipitação desse composto.

$$\text{Magnesium (ppmCaCO}_3) \times [\text{SiO}_2] < 500.000 \quad (\text{VII})$$

A alcalinidade representa carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos; para o pH de 4,4 a 8,3, a alcalinidade é somente por bicarbonatos (DI BERNARDO et al., 2002). Para o ESC, o parâmetro bicarbonatos (122 mg L^{-1}) é cinco vezes o limite definido no PRTAB (24 mg L^{-1}). Verifica-se que toda a dureza do ESC representa dureza temporária, ou carbonatada, que ocorre quando a alcalinidade total é maior que a dureza. Neste caso, os íons que conferem dureza à água estão associados ao ânion bicarbonato (HCO_3^-) (DREW PRODUTOS QUÍMICOS, 1979).

Para a DQO, o ESC (171 mg L^{-1}) contém quase três vezes o limite definido (75 mg L^{-1}). A relação

DQO/DBO, 11,4, indica que a maior parte da DQO está associada à matéria orgânica não-biodegradável, recalcitrante. A matéria orgânica pode estar na forma suspensa e/ou dissolvida.

O parâmetro nitrogênio amoniacal ($20,6 \text{ mg L}^{-1}$) encontra-se 20 vezes superior ao padrão definido ($1,0 \text{ mg L}^{-1}$). O nitrogênio amoniacal é a primeira forma inorgânica na cadeia de decomposição dos compostos orgânicos, seguidos por nitrito e nitrato.

A quantidade de cloreto no efluente secundário também está muito acima do limite requerido ($335 >>> 29 \text{ mg L}^{-1}$). Segundo Gentil (2003), o cloreto é um dos sais que mais influenciam a corrosão e seu efeito deve-se ao fato de este sal ser um eletrólito forte, ocasionando, portanto, aumento de condutividade, que é fundamental no mecanismo eletroquímico de corrosão.

O parâmetro SDT (720 mg L^{-1}) da amostra pontual está acima do valor definido no PRTAB (500 mg L^{-1}) e próximo da média da Infraero, resíduos filtráveis totais (826 mg L^{-1}) (Tabela 1). O SDT promove corrosão pelo aumento da condutividade elétrica da água. Segundo Epa (1992), em água de reuso, a partir de esgoto doméstico, a concentração de SDT fica em torno de duas a cinco vezes a concentração na água potável.

A concentração de fosfatos no ESC ($7,5 \text{ mg L}^{-1}$) é três vezes superior ao valor do PRTAB ($2,1 \text{ mg L}^{-1}$). A presença de fosfatos pode resultar na precipitação de fosfato de cálcio e nesta reação a concentração de cálcio é limitada pela Equação VII, quando a concentração de fosfatos é 10 mg L^{-1} ou maior (BUECKER, 1997). Verifica-se o valor de 298 como resultado da aplicação da Equação VII, para cálcio em CaCO_3 (65 mg L^{-1}), ou seja, a concentração de fosfato no ESC representa potencial risco de incrustação.

$$\text{CaCO}_3 < [105 \times (9.8 - \text{pH})] \quad (\text{VIII})$$

A concentração de alumínio no ESC apresenta o dobro ($0,2 \text{ mg L}^{-1}$) da concentração definida no padrão ($0,1 \text{ mg L}^{-1}$). Em geral, a literatura não associa o alumínio a problemas em sistemas abertos de resfriamento.

A alcalinidade (bicarbonatos) e a concentração de cálcio estão associadas ao IEP. A partir da Equação V, aplicada com as concentrações na água de recirculação ($C = 7$), verificou-se que o IEP (2,8) do ESC está abaixo da faixa estável, isso representa tendência incrustante para o ESC. Para se evitar a precipitação de cálcio, uma providência a ser tomada é a acidificação do ESC para redução da alcalinidade. Esta acidificação pode ser feita nas bacias das torres.

Após comparação das características do ESC com o PRTAB, verifica-se a necessidade de utilização de um sistema para tratamento do ESC, evitando-se os principais problemas causados em sistemas abertos de resfriamento como recirculação, corrosão, incrustação, depósito e depósito microbiológico (BUECKER, 1997). Os constituintes do ESC a serem removidos são: alcalinidade total (bicarbonatos), DQO (Matéria orgânica) e sólidos dissolvidos (cloreto, magnésio, alumínio, fosfato e nitrogênio amoniacal).

Sugere-se que os parâmetros alcalinidade (HCO_3^-), fosfato, magnésio e alumínio, associados, respectivamente, à incrustação/corrosão, incrustação, incrustação e efeito não-definido (BUECKER, 1997) não representam grande risco à operação do sistema de resfriamento, visto que o tratamento químico da água de recirculação pode minimizar os efeitos desses componentes no sistema (BUECKER, 1997). O tratamento realizado pela Infraero consiste de controle e pH, inibido de corrosão à base de fosfonato de zinco, dispersante à base de poliácridato e biocida à base de hipoclorito de sódio.

Destacam-se, em função da elevada concentração em relação ao PRTAB e por seus efeitos nos sistemas abertos de resfriamento, DQO (matéria orgânica) e sólidos dissolvidos (nitrogênio amoniacal e cloreto). Para adequação do ESC ao PRTAB, considera-se crítica a remoção desses componentes. A essas impurezas estão associados os problemas em sistemas de resfriamento, como corrosão (nitrogênio amoniacal e cloreto) e DQO (depósito microbiológico) (BUECKER, 1997).

Adsorção com carvão ativado é um processo utilizado para remoção de material orgânico solúvel (TEODOSIU et al., 1999), onde se requer tratamento em alto grau (MANCUSO, 2007). Na teoria, não existem limites para a concentração do contaminante na corrente de alimentação, mas, na prática, a concentração máxima é da ordem de 10.000 mg L^{-1} de carbono orgânico total (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

A remoção do nitrogênio no ESC deve feita pelo processo de arraste com ar (*ammonia stripping*), método mais simples, ou cloração no ponto de ruptura, oxidação química do nitrogênio amoniacal até N_2 (MANCUSO, 2007).

Segundo Adin e Asano (1998), os principais processos, para tratamento terciário ou avançado de esgotos domésticos para reuso, geralmente incluem a sequência convencional de coagulação química, seguida de floculação, sedimentação, filtração em leito de areia e desinfecção. Para alguns casos, é necessária a utilização de carvão ativado para

remoção de cor ou matéria orgânica. Esses autores também indicam utilização de OI para o tratamento terciário.

Richard (1998) e Mancuso (2007), a partir de esgotos urbanos brutos de origem predominantemente doméstica, propõem sequências de processos que produzem efluentes de níveis de qualidade crescente para reutilizações diversas e estabelecem, para o menor nível de qualidade, o nível 1 e assim, sucessivamente, evoluindo para outros subseqüentes pelo acréscimo de processos unitários, até o nível 12, como nível máximo de acordo com o aumento da qualidade do efluente tratado.

Verificou-se que as duas únicas sequências aplicadas à reposição em torres de resfriamento são os dois níveis mais elevados, 11 e 12, únicos níveis que contêm o processo de osmose inversa.

Verifica-se que a remoção de matéria orgânica, nitrogênio amoniacal, pode ser realizada por métodos tradicionais de tratamento, enquanto que, para a remoção de cloreto (sal dissolvido), há a necessidade de utilização de processos com membranas, com capacidade para remoção de sólidos dissolvidos.

Uma alternativa para o uso de processos com membrana seria a utilização dos métodos tradicionais para remoção de matéria orgânica e nitrogênio amoniacal associada à redução do número de ciclos de concentração (C), para enquadramento da concentração de cloreto ao PRTAB, por meio do balanço de água das torres de resfriamento. Avaliando-se a vazão de projeto da ETE A, $198 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, verifica-se, pela aplicação das equações II e III, aos dados D e E apresentados na Tabela 2 (para quatro células operando, $E=1,33 \cdot 27,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e $D=1,33 \cdot 3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$), que o C obtido é 1,2.

Entretanto, a aplicação da Equação I para o cloreto, considerando-se a concentração máxima na água de recirculação (200 mg L^{-1}) e a concentração na água de reposição (335 mg L^{-1}), resulta em C igual a 0,6. O valor de C menor que 1 mostra que a diminuição no número de ciclos de concentração é inviável para se possibilitar a adequação do parâmetro cloreto do ESC ao PRTAB por meio do balanço de água das torres de resfriamento.

Verifica-se que os processos com membrana, por sua grande capacidade de remoção de SDT, representam a solução que satisfaz a adequação do ESC ao PRTAB.

Existem dois tipos de tecnologias que promovem a remoção de SDT por membranas: nanofiltração e osmose inversa (OI). A nanofiltração promove a separação somente de íons bivalentes, caso do magnésio, e não permite a remoção de

monovalentes, caso do cloreto. As membranas de OI possibilitam a separação de todos os tipos de íons, inclusive o íon cloreto (SCHNEIDER; TSUTIYA, 2001). Logo, o processo de OI representa uma solução para adequação do ESC ao PRTAB.

Propõe-se, para o sistema de reuso para processamento do ESC (SRESC), para atendimento ao PRTAB, a sequência do nível 11, apresentada por Richard (1998) apud Mancuso (2007). Logo, o SRESC deverá ser composto basicamente pelas seguintes etapas: filtração por contato para remoção de sólidos em suspensão, filtração em carvão ativado para remoção de matéria orgânica dissolvida e OI, para remoção de SDT.

A Tabela 4 não apresenta custo de construção para a sequência proposta, filtração direta, adsorção em carvão ativado e osmose inversa, mas apresenta custos para lodo ativado convencional (LAC) e para tratamento secundário seguido de filtração por contato, adsorção em carvão ativado e osmose inversa (TSOI). Sendo assim, o custo estimado para o sistema proposto será considerado como a diferença entre o custo do TSOI (US\$ 13.450.000) e o custo do LAC (US\$ 6.100.000), para 44 L s⁻¹ (158 m³ h⁻¹), igual a US\$ 7.350.000.

Considerando-se que os custos apresentados são para a vazão de 44 L s⁻¹ e a vazão do sistema proposto é de 12,7 L s⁻¹ (45,8 m³ h⁻¹), será utilizada a Equação V para determinar o custo de construção para a escala do sistema proposto (TCC). Sendo assim, TCC = US\$ 3.487.369.

Corrigindo-se os valores de TCC, a partir da atualização do fator ENRCCI, considerando-se o ENRCCI igual a US\$ 8.528,39 para abril de 2009 (ENR, 2009), e US\$ 5.600 para junho de 1996 (Tabela 4), ter-se-á o fator de correção (FC) igual a = 1,52 (8.528,39/5.600). Então, o TCC em dólares para abril de 2009 será o produto do FC pelo TCC, ou 5.311.008. Transformando-se o TCC para a moeda brasileira, considerando-se US\$ 1,0 equivalente a R\$ 2,1766 (BANCO CENTRAL, 2009), ter-se-á TCC = R\$ 11.559.940.

Para a estimativa do custo de operação e manutenção do sistema de reuso (TOM), considerou-se este igual a 10% do TCC, pois verificou-se que, para as três vazões apresentadas por Richard para o TSOI (Tabela 4), o TOM se situava próximo deste valor do TCC (44 L s⁻¹: 9%, 219 L s⁻¹: 11%, 438 L s⁻¹, 11%). Então, o TOM foi estimado em R\$ 1.155.994. As Equações VII, VIII e IX calculam, respectivamente, EA (economia de anual), TCE (economia de água de reposição) e PMA (preço do m³ de água produzida pelo sistema de reuso após o PRI). Em que, CE representa a vazão de consumo de água para reposição nas torres

(1.100 m³ dia⁻¹) e CM3, o Preço do m³ de água fornecido pela Cedae, R\$ 10,60.

$$EA = TCE - TOM \quad (IX)$$

$$TCE = CE \times CM3 \times 365 \quad (X)$$

$$PMA = \frac{TOM}{1100 \times 365} \quad (XI)$$

Aplicando-se as Equações VI, IX, X e XI, obtêm-se, para PRI e PMA, respectivamente, 3,73 anos e R\$ 2,88 m⁻³.

Conclusão

Dentre os diversos processos de tratamento apresentados pela literatura para remoção de contaminantes, observa-se que o sistema de membranas osmose inversa, em função de sua grande capacidade de remoção de SDT, possui importante papel nos sistemas de reuso de efluentes. Uma sequência de tratamento que contém esse processo representa solução satisfatória para reuso do efluente secundário da ETE APOIO para reposição nas torres do AIRJ.

Verifica-se que a reutilização do efluente secundário da ETE Apoio, para reposição nas torres do ARJ, pode trazer bom retorno financeiro para a Infraero. O reuso de água nas torres de resfriamento do AIRJ pode vir a possibilitar a redução da captação de água superficial, viabilizando até 33.000 m³ mês⁻¹ de água disponível para usos mais nobres (consumo humano etc.).

Agradecimentos

Os autores agradecem a toda a equipe da Infraero, Joelson D'Ávila, Rosana Gomes, Márcia Gomes e Mário Menezes, pelas informações prestadas e pela imensa cordialidade com que foram recebidos nas instalações.

Referências

- ADIN, A.; ASANO, T. The role of physical – chemical treatment in wastewater reclamation and reuse. **Water Science Technology**, v. 37, n. 10, p. 79-90, 1998.
- APHA-American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19th ed. Washington, D.C., 1995.
- BANCO CENTRAL. Disponível em: <<http://www.bacen.gov.br>>. Acesso em: 13 abr. 2009.
- BUECKER, B. **Power plant chemistry a practical guide**. 1st ed. Oklahoma: Pennwell Publishing Company, 1997.
- CLEMENTE, A. **Projetos empresariais e públicos**. 1. ed. São Paulo: Atlas, 1998.

- DIAS, B. A. C. **Utilização de efluentes sanitários tratados como água de reuso industrial na região metropolitana do Rio de Janeiro: uma avaliação preliminar.** Rio de Janeiro: Abes Rio, 2005.
- DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; FILHO, P. L. C. **Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água.** São Carlos, 2002.
- DREW PRODUTOS QUÍMICOS. **Princípios de tratamento de água industrial.** São Paulo, 1979.
- ENR-Engineering News Record. Disponível em: <www.enr.com>. Acesso em: 13 abr. 2009.
- EPA-Environmental Protection Agency. **Guidelines for water reuse.** Washington, D.C., 1992.
- EPA-Environmental Protection Agency. **Guidelines for water reuse.** Washington, D.C., 2004.
- GENTIL, V. **Corrosão.** 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- HESPANHOL, I. Potencial de reuso de água no Brasil: agricultura, indústria, município e recarga de aquíferos. In: SANTOS, H. F.; MANCUSO, P. C. S. (Ed.). **Reuso de água.** 1. ed. São Paulo: Manole, 2007. cap. 3, p. 37-96.
- MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. **Reuso de água.** 1. ed. São Paulo: Manole, 2003.
- MANCUSO, P. C. S. Tecnologia de reuso de água. In: SANTOS, H. F.; MANCUSO, P. C. S. (Ed.). **Reuso de água.** 1. ed. São Paulo: Manole, 2007. cap. 9, p. 291-338.
- METCALF AND EDDY. **Wastewater engineering – treatment, disposal and reuse.** 3rd ed. Singapura: McGraw-Hill, 1991.
- MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I. **Água na indústria uso racional e reuso.** 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.
- NALCO. **The nalco water handbook.** 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1987.
- RICHARD, D. The cost of wastewater reclamation and reuse. In: ASANO, T. (Ed.). **Wastewater reclamation and reuse.** Lancaster: Technomic Co. Inc., 1998. p. 1335-1395.
- SANTOS H. F. Custos dos sistemas de reuso de água. In: SANTOS, H. F.; MANCUSO, P. C. S. (Ed.). **Reuso de água.** 1. ed. São Paulo: Manole, 2007. cap. 12, p. 433-468.
- SCHNEIDER, R. P.; TSUTIYA, M. T. **Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso.** 1. ed. São Paulo: ABES, 2001.
- SILVA, A. K. P.; FLORES, L. C.; GALDEANO, M. M.; TRINDADE DO VAL, P. **Reuso de água e suas implicações jurídicas.** 1. ed. São Paulo: MF – Navegar, 2003.
- TEODOSIU, C. C.; KENNEDY, M. D.; STRATEN, H. A.; SCHIPPERS, J. C. Evaluation of secondary refinery effluent treatment using ultrafiltration membranes. **Water Research**, v. 33, n. 9, p. 2172-2180, 1999.

Received on February 18, 2008.

Accepted on August 11, 2009.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.