

Copyright 2010, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2010.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autores.

Adequação e cuidados de qualidade no reúso de águas como reposição em sistemas de resfriamento abertos com recirculação

César Augusto Pereira¹, Sérgio Machado Correa²

Abstract

Make up water in open recirculating cooling systems is the main responsible for the water demand in most industries. In general, the most used source of reuse water for these systems is the overflow stream from the secondary treatment from the Industrial Wastewater Treatment Station, due to its large availability. However, the feasibility of a reuse process is directly related with its applicability for the required conditions for the user system and its technical, economical and environmental demands. This technical work intends to do a study about the reuse possibilities of a typical wastewater of an organic chemical industry as make up water for its cooling towers, analyzing several forms of reuse (total or partial, with or without treatment) to avoid operational damages on the cooling system. So, the water reuse in open recirculating systems should not generate development of corrosive process, deposits formation and microbial developments, where its controls present a high difficulty level, high risks or difficult management conditions.

Resumo

A reposição de água em sistemas de resfriamento abertos com recirculação é a principal responsável pela demanda de água na maioria das indústrias. Normalmente, a fonte de reúso mais empregada nesses sistemas, devido a sua maior disponibilidade, é a corrente sobrenadante proveniente do tratamento secundário de uma Estação de Tratamento de Efluentes. Entretanto, a viabilidade de um reúso está diretamente relacionada com sua adequação às necessidades do sistema usuário e às exigências de ordem técnica, econômica e ambiental. Este trabalho procura fazer um estudo técnico de aproveitamento de um efluente típico de uma indústria química de produtos orgânicos, para fins de reúso em suas torres de resfriamento, analisando as possibilidades de reúso total e parcial, bruto e com tratamento prévio, para que essas ações não provoquem danos operacionais ao sistema. Assim, o reúso nos sistemas abertos com recirculação não deve contribuir para o desenvolvimento de processos corrosivos, para a formação de depósitos ou para desenvolvimentos microbianos, cujos controles apresentem elevados graus de dificuldade, altos riscos ou difícil gerenciamento.

Palavras-chaves: água, resfriamento, reúso, qualidade, tratamento.

¹Mestre, Engenheiro Químico – Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

²Doutor, Licenciado em Química – Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

Introdução

Um sistema de resfriamento aberto com recirculação (SRAR) de água tem como parte central um trocador de calor evaporativo, geralmente uma torre de resfriamento. Devido à perda de água pela evaporação, as concentrações de sólidos na circulação ficam, de modo geral, entre três e doze vezes maiores que as da corrente de reposição. Nesse cenário, o sistema deve operar em condições satisfatórias para que haja uma efetiva inibição dos problemas normalmente ocorrentes e relacionados com a composição do meio aquoso: corrosão, formação de depósitos e desenvolvimento microbiano.

Por outro lado, corrente aquosa sobrenadante proveniente do tratamento secundário de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) apresenta, normalmente, concentrações de sólidos elevadas, inviabilizando, na maioria das vezes, sua utilização como reposição em um SRAR, quando na forma bruta ou sem tratamento prévio.

O objetivo deste trabalho é o de realizar, de forma lógica, um estudo da viabilidade técnica do reúso de água nas torres de resfriamento, a partir da corrente sobrenadante do tratamento secundário de uma ETE de uma indústria de processos químicos orgânicos.

Para consecução desse objetivo, são feitas, inicialmente, algumas considerações referentes ao consumo de água na indústria, seguidas de um estudo dos balanços materiais em um SRAR, com ênfase no conceito de ciclo de concentração e nos consumos de água de reposição e de produtos químicos de tratamento.

Em seguida, são abordados, de maneira sucinta, alguns problemas ocorrentes em um SRAR e que exigem tratamento da água para sua solução, com uma breve discussão referente ao ciclo de concentração ideal a ser empregado.

Com base na composição das águas de uma Estação de Tratamento de Água (ETA) para fins industriais e do tratamento secundário de uma ETE são feitos estudos técnicos referentes às possibilidades de reúso bruto parcial e reúso com tratamento prévio da água da ETE.

A partir dos resultados obtidos é possível se chegar a algumas importantes conclusões relativas aos cuidados para que a água de reúso esteja efetivamente adequada para emprego como corrente de reposição em um SRAR.

Finalmente, são feitas algumas sugestões objetivando o desenvolvimento de eventuais trabalhos futuros.

Revisão bibliográfica, resultados e discussão

1. Consumo de água na indústria

A demanda de água para reposição nas torres de resfriamento é responsável, em média, por mais de 50% do consumo total de água em uma indústria.

Alguns dados de demanda, por segmento industrial, são mostrados na Tabela 1 (1).

2. Balanços materiais em um SRAR

A Figura 1 mostra esquematicamente as principais vazões das correntes envolvidas em um SRAR.

Tabela 1 – Consumo de água em algumas indústrias.

Segmento Industrial	Demanda de Água de Resfriamento (%)
Produtos Químicos Orgânicos	91
Produtos Químicos Inorgânicos	83
Refino de Petróleo	95
Aço	56
Materiais Plásticos e Resinas	93
Indústria Têxtil	57
Cimento	82
Gases Industriais	86
Alumínio	72
Automobilística	28
Celulose e Papel	18

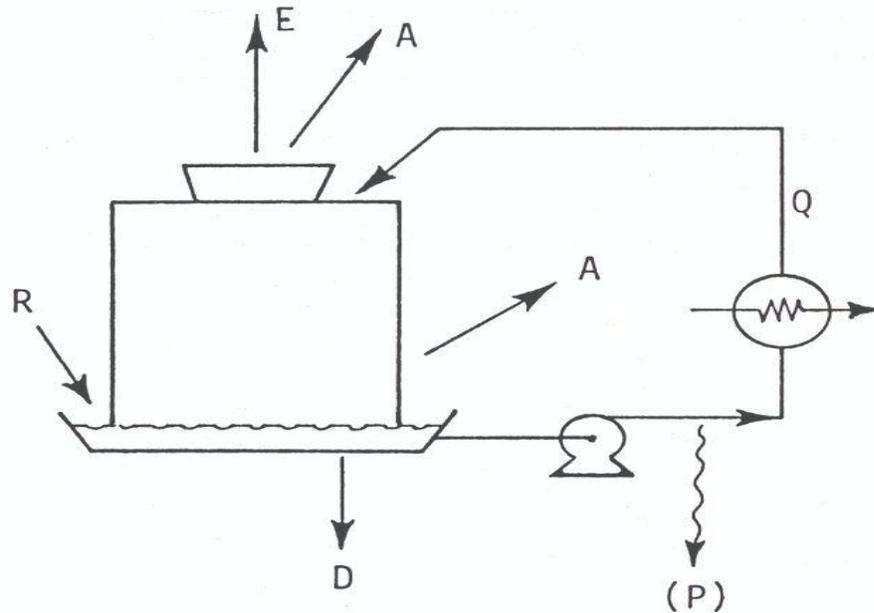


Figura 1 – Vazões em um sistema de resfriamento aberto com recirculação de água (4).

Onde:

Q – vazão de circulação

E – vazão de perda por evaporação

A – vazão de perda por arraste de gotículas

D – vazão de descarga de fundo

P – vazão de outras perdas (indesejáveis) de água em fase líquida

R – vazão de reposição

Assim, a vazão correspondente às perdas totais de água líquida (L) pode ser traduzida pela Equação 1:

$$L = A + D + P \quad \text{Equação 1}$$

Consequentemente, a vazão de reposição (R), necessária à compensação de todas as perdas, pode ser expressa pela Equação 2:

$$R = E + L \quad \text{Equação 2}$$

A vazão de perda por evaporação (E) pode ser dada pela Equação 3:

$$E = f_E \cdot Q \cdot \Delta T \quad \text{Equação 3}$$

Onde: $1,5 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} < f_E < 1,8 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (2).

Para torres de resfriamento industriais, a vazão de perda por arraste de gotículas (A) pode ser expressa por meio da Equação 4:

$$A = f_A \cdot Q \quad \text{Equação 4}$$

Onde: $0,2 \times 10^{-3} < f_A < 2,0 \times 10^{-3}$ (3).

O ciclo de concentração (X) representa a relação entre as concentrações de uma dada espécie solúvel e não volátil, respectivamente, na água de circulação (C_L) e na água de reposição (C_R).

$$X = (C_L / C_R) \quad \text{Equação 5}$$

Como o sistema é concentrador da água, como decorrência da perda por evaporação, tem-se: $X > 1$. De modo geral, em um SRAR, opera-se com $3 < X < 12$, desde que as perdas indesejáveis de água líquida (P) não sejam extremamente exageradas.

Para uma espécie solúvel e não volátil, como o íon cloreto, o seguinte balanço pode ser estabelecido (4):

$$C_R \cdot R = C_L \cdot L \rightarrow X = (R / L) \rightarrow X = [(E + L) / L] \rightarrow L = E / (X - 1) \quad \text{Equação 6}$$

Como decorrência da Equação 6, podem ser deduzidas duas outras expressões importantes:

$$D = [E / (X - 1)] - A - P \quad \text{Equação 7}$$

$$R = E \cdot [X / (X - 1)] \quad \text{Equação 8}$$

A Equação 7 mostra que a vazão de descarga de fundo (D) pode ser utilizada, dentro de certos limites, para controle do ciclo de concentração (X).

A Equação 8 indica que o aumento do ciclo de concentração produz economia de água de reposição, para uma carga térmica constante. Entretanto, a economia, em termos relativos, é cada vez menor, quando o ciclo de concentração vai assumindo valores mais elevados.

Por outro lado, a dosagem (d) de um produto de tratamento solúvel e não volátil, adicionado de forma contínua, de modo a se obter uma dada concentração (C) na água de circulação, pode ser expressa pela Equação 9, evidenciando que o consumo de produto pode ser drasticamente reduzido pelo aumento do ciclo de concentração:

$$d = C \cdot L \quad \rightarrow \quad d = C \cdot E / (X - 1) \quad \text{Equação 9}$$

3. Ciclos de concentração limitantes

O ciclo de concentração em um SRAR não pode ou não deve exceder determinados valores críticos.

Assim, o ciclo de concentração não poderá ser superior ao ciclo operacional máximo ou ciclo teórico que corresponde à situação do sistema operando com a descarga fechada e cujo valor pode ser estimado por meio da Equação 10:

$$X_{\text{teórico}} = (E + A + P) / (A + P) \quad \text{Equação 10}$$

Por outro lado, o ciclo de concentração não deve ultrapassar valores que façam com que os produtos de solubilidade dos principais sais formadores de incrustações verdadeiras (*'true scales'*) ou de depósitos tipo incrustação (*'scalelike deposits'*) sejam ultrapassados, mesmo contando com a ação dos modernos agentes dispersantes e inibidores da formação de depósitos.

Para se evitar as formações de incrustações silicatadas (silicatos de íons de dureza) e de sulfato de cálcio, os respectivos ciclos máximos poderiam ser calculados com auxílio das equações 11 e 12, com boa margem de segurança (5):

$$X (\text{SiO}_2)_{\text{máximo}} = 180 / C(\text{SiO}_2)_R \quad \text{Equação 11}$$

$$X (\text{CaSO}_4)_{\text{máximo}} = 480 / [C(\text{Ca}^*)_R \cdot C(\text{SO}_4)_R] \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

$C(\text{SiO}_2)_R$ – concentração de sílica na água de reposição, em ppm SiO_2 ;

$C(\text{Ca}^*)_R$ – concentração de cálcio na água de reposição, em ppm CaCO_3 ;

$C(\text{SO}_4)_R$ – concentração de sulfato na água de reposição, em ppm SO_4^{2-} .

Os ciclos máximos em sílica e em sulfato de cálcio apresentam, em geral, valores elevados e superiores ao do ciclo teórico, não sendo limitantes, para a maior parte das reposições provenientes de águas superficiais, no Brasil. Entretanto, eles deverão ser seriamente considerados em casos onde a água de reposição é parcialmente constituída de água residuária, cujo reaproveitamento esteja sendo cogitado.

Para prevenção da corrosão, sobretudo a intergranular em aços inoxidáveis 304, o ciclo máximo em cloreto pode ser estimado com base na Equação 13 (6):

$$X(\text{Cl}^-)_{\text{máximo}} = 500 / C(\text{Cl}^-)_R \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

$C(\text{Cl}^-)_R$ – concentração de cloreto na reposição, em ppm Cl^- .

Outros valores máximos para alguns parâmetros na água de circulação podem ser considerados, tais como: sólidos em suspensão e matéria orgânica (6).

Entretanto, esses casos devem ser considerados levando-se em conta suas características específicas, isto é: a composição da matéria orgânica e os tipos de sólidos em suspensão presentes. Por outro lado, a concentração de sólidos em suspensão não depende apenas de sua presença na água de reposição, tendo em vista que a torre de resfriamento é um sistema lavador do ar de suas vizinhanças (7).

A concentração de sólidos suspensos na água de circulação de um SRAR pode ser substancialmente reduzida com o emprego de filtração lateral (“*side stream filtration*”).

4. Ciclo de concentração ideal

Um critério largamente praticado e utilizado como referência para o estabelecimento de um programa de tratamento de água em um SRAR é aquele em que se pretende que a água de circulação seja estável, isto é: não produza processo corrosivo generalizado expressivo em relação ao ferro ou ao aço comum, nem seja geradora de incrustação de carbonato de cálcio.

Assim, a água de circulação seria naturalmente pouco agressiva, em termos de corrosão ao ferro e à formação de depósitos calcários, permitindo que o sistema operasse com ciclos mais adequados e reduzindo o emprego de produtos químicos inibidores de corrosão e de formação de incrustações.

O cálculo do índice de Puckorius (IP) consiste na versão mais aperfeiçoada na busca dessa situação de estabilidade, por ser aplicável ao meio aquoso (2) em um SRAR, podendo ser determinado por meio da Equação 14:

$$IP = 2 \text{ pH}_S - \text{pH}_{\text{eq}} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

pH_S – pH de saturação para o carbonato de cálcio;

pH_{eq} – pH equivalente (calculado com base na alcalinidade do meio aquoso).

O pH de saturação para o carbonato de cálcio, a 25°C, pode ser calculado por intermédio da Equação 15 (4):

$$\text{pH}_S = 11,6 - \log C(\text{Ca}^*) - \log C(\text{A}^*) \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

$C(\text{Ca}^*)$ – concentração de cálcio no meio aquoso, em ppm CaCO_3 ;

$C(\text{A}^*)$ – concentração de alcalinidade natural (HCO_3^-) no meio aquoso, em ppm CaCO_3 .

O pH equivalente pode ser determinado por meio da Equação 16 (2):

$$\text{pH}_{\text{eq}} = 1,5 \log C(\text{A}^*) + 4,5 \quad \text{Equação 16}$$

Substituindo os valores de pH_S da Equação 15 e de pH_{eq} da Equação 16 na Equação 14, tem-se:

$$IP = 18,7 - 2 \log C(\text{Ca}^*) - 3,5 \log C(\text{A}^*) \quad \text{Equação 17}$$

O índice de Puckorius quando situado no intervalo de 6,0 a 7,0 caracteriza um meio aquoso em faixa estável (8). Portanto, adotando o valor médio ($IP = 6,5$), substituindo-o na Equação 17 e considerando o conceito de ciclo de concentração, tem-se:

$$6,5 = 18,7 - 2 \log [X \cdot C(\text{Ca}^*)_{\text{R}}] - 3,5 \log [X \cdot C(\text{A}^*)_{\text{R}}]$$

Ou, finalmente:

$$\log X = [12,2 - 2 \log C(\text{Ca}^*)_{\text{R}} - 3,5 \log C(\text{A}^*)_{\text{R}}] / 5,5 \quad \text{Equação 18}$$

Assim, o ciclo de concentração ideal poderia ser determinado pela Equação 18, a partir dos valores de dureza de cálcio ($C(\text{Ca}^*)_{\text{R}}$) e de alcalinidade de bicarbonato ($C(\text{A}^*)_{\text{R}}$) na água de reposição.

O ciclo de concentração (X) pode ser aumentado com a acidulação do meio, por intermédio da diminuição do valor de $C(\text{A}^*)_{\text{R}}$ na água de reposição, de acordo com a equação química: $\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

É importante lembrar que a Equação 18 foi deduzida para um meio aquoso nas condições-padrão (25°; 1,0 atm) e que a temperatura da água varia ao longo de um SRAR, resultando na existência de índices de estabilidade diferentes para as diversas regiões do sistema, além da ocorrência de eventuais conversões químicas sofridas pelo íon bicarbonato (HCO_3^-) em função das variações de temperatura (4).

Entretanto, o cálculo do ciclo de concentração por intermédio da Equação 18 serve como uma boa referência inicial, tendo em vista que eventuais desvios para a faixa incrustante, relativos à possibilidade de formação de carbonato de cálcio sólido, poderiam ser corrigidos com o emprego de produtos inibidores de incrustação de efeito limiar (“*threshold effect*”) e agentes dispersantes.

5. Estudo de caso e metodologia utilizada

O presente trabalho se propõe a fazer um estudo técnico das possibilidades de reúso de água para reposição nas torres de resfriamento, a partir da corrente sobrenadante do decantador secundário da ETE em uma indústria de processos químicos orgânicos, localizada na região do Médio Paraíba do Sul, no estado do Rio de Janeiro.

A vazão média de efluente do tratamento secundário na ETE é igual a $50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

A água de reposição das torres de resfriamento é proveniente da ETA industrial. A soma das vazões de reposição nas torres de resfriamento é igual a $30 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, para um valor de ciclo de concentração médio igual a 6,0.

A Tabela 2 apresenta dados correspondentes às análises da água da ETA e da corrente sobrenadante do tratamento secundário da ETE.

Para maior simplicidade, as vazões e os resultados analíticos apresentados foram aproximados para valores inteiros.

Foram analisadas as situações de reúso bruto (sem tratamento) e com regeneração (com tratamento prévio) da água da ETE, considerando os casos de mistura da água da ETA (p) e da ETE ($1 - p$), onde p representa a fração percentual da água da ETA na mistura.

Tabela 2 – Análises de águas da ETA e ETE (tratamento secundário)

Parâmetro	ETA	ETE
Ph	7,0	8,0
Alcalinidade (ppm CaCO ₃)	40	400
Cálcio (ppm CaCO ₃)	20	100
Cloreto (ppm Cl ⁻)	15	400
Sulfato (ppm SO ₄ ²⁻)	13	64
Sílica (ppm SiO ₂)	10	45
Sólidos dissolvidos (SD) (ppm)	150	2500
Sólidos em suspensão (SS) (ppm)	0	40
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO) (mg O ₂ L ⁻¹)	0	40
Demanda química de oxigênio (DQO) (mg O ₂ L ⁻¹)	0	200

Assim, para $p = 1$, tem-se a totalidade da água de reposição proveniente da ETA e para $p = 0$, tem-se a situação de reúso total (bruto ou com regeneração). Nos casos intermediários ($0 < p < 1$), estão as situações de reúso parcial.

Para cada cenário considerado foram estimados os seguintes parâmetros:

- pH – calculado com base na Equação 16;
- Ciclo teórico – determinado a partir da média ponderada das análises de cloreto em cada SRAR ($X_{\text{teórico}} = C(\text{Cl}^-)_{\text{sistema}} / C(\text{Cl}^-)_{\text{R}}$), com a descarga fechada;
- Ciclo de sílica – calculado com apoio da Equação 11;
- Ciclo de sulfato de cálcio – determinado com auxílio da Equação 12;
- Ciclo de cloreto – determinado com apoio da Equação 13;
- Ciclo ideal – calculado com base na Equação 18;
- Vazão de perda por evaporação – determinada com auxílio da Equação 8, com base em dados levantados na empresa:
 $R = 30 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$; $X = 6,0 \rightarrow E = 30 \cdot [(6,0 - 1) / 6,0] \rightarrow E = 25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$;
- Dosagem média de produto de tratamento – calculada pela Equação 9, considerando uma concentração média de produto igual a 80 ppm (g m^{-3}), na água de circulação.

6. Resultados obtidos e discussão das hipóteses de reúso bruto

A Tabela 3 exibe os valores dos principais parâmetros envolvidos nos diferentes cenários de reúso bruto.

Como a torre de resfriamento é um trocador de calor evaporativo, um sistema concentrador de água ($X > 1$), as hipóteses que resultaram em $X_{\text{ideal}} < 1$ devem ser desconsideradas, independentemente da existência de quaisquer outros parâmetros com valores desfavoráveis.

As hipóteses que resultaram em ciclos de concentração superiores a dez ($X > 10$) foram abandonadas, pois não é possível se trabalhar com nível de concentração maior que o ciclo operacional máximo ou teórico.

Mesmo considerando a condição mais satisfatória de reúso bruto parcial ($p = 0,80$), observa-se que a vazão de reposição passa a ser de $45,8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Como 80% dessa vazão são de água da ETA, tem-se: $0,80 \times 45,8 = 36,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, ou seja: a demanda de água da Estação de Tratamento passa a ser maior com o emprego de reúso bruto parcial ($36,6 > 31,1$).

Por outro lado, há um aumento considerável no consumo de produto de tratamento, admitindo que sua concentração na água de circulação seja constante (80 ppm), o que seria pouco provável, considerando as condições adversas do meio aquoso.

Tabela 3 – Valores paramétricos para os diferentes casos de reúso bruto

Parâmetro	ETA	ETE	P					
			1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,0
Alcalinidade (ppm CaCO ₃)	40	400	40	112	184	256	328	400
Cálcio (ppm CaCO ₃)	20	100	20	36	52	68	84	100
Cloreto (ppm Cl ⁻)	15	400	15	92	169	246	323	400
Sulfato (ppm SO ₄ ²⁻)	13	64	13	23	33	44	54	64
Sílica (ppm SiO ₂)	10	45	10	17	24	31	38	45
SD (ppm)	150	2500	150	620	1090	1560	2030	2500
SS (ppm)	0	40	0	8,0	16	24	32	40
DBO (mg O ₂ L ⁻¹)	0	40	0	8,0	16	24	32	40
DQO (mg O ₂ L ⁻¹)	0	200	0	40	80	120	160	200
pH _{eq}	6,9	8,4	6,9	7,6	7,9	8,1	8,3	8,4
X (teórico)	10	10	10	10	10	10	10	10
X (SiO ₂)	18	4,0	> 10	> 10	7,5	5,8	4,7	4,0
X (CaSO ₄)	30	6,0	> 10	> 10	> 10	8,8	7,1	6,0
X (Cl ⁻)	33	1,25	> 10	5,4	3,0	2,0	1,5	1,25
X (ideal)	5,1	< 1	5,1	2,2	1,4	< 1	< 1	< 1
R (m ³ h ⁻¹)	31,1	---	31,1	45,8	87,5	---	---	---
d (kg h ⁻¹)	0,40	---	0,40	1,67	5,00	---	---	---

Ainda que fosse considerada a possibilidade de acidificação da água a ser reutilizada, para redução de sua alcalinidade e consequente aumento do ciclo de concentração ideal, as altas concentrações de cloreto, DBO e DQO na água de reposição tornariam o tratamento de água do SRAR de difícil execução.

7. Resultados obtidos e discussão das hipóteses de reúso com tratamento

As altas concentrações de DBO e DQO exigiriam, por si só, a execução de tratamento terciário para lançamento do efluente em um corpo receptor, segundo o previsto pela DZ – 205 R.6 (9).

A carga orgânica total (DQO) é igual a 0,200 kg m⁻³ . 50 m³ h⁻¹, ou seja, igual a 240 kg por dia, superando o valor de 5,0 kg dia⁻¹ previsto pela DZ – 205 R.6.

A carga orgânica biodegradável (DBO) é igual a 0,040 kg m⁻³ . 50 m³ h⁻¹, isto é, igual a 48 kg por dia. A referida diretriz preconiza a remoção de 70% da DBO para valores situados entre 10 e 100 kg por dia.

A baixa relação DBO/DQO no efluente secundário, igual a 0,20, sugere a adoção de oxidação química para eliminação da matéria orgânica.

Outro fator preocupante é a elevada concentração de cloreto no efluente, geradora de processo corrosivo intergranular em aço inoxidável comum e aceleradora de corrosão puntiforme em pites pré-existentes. A remoção do íon cloreto pode ser realizada de modo eficiente por meio de resinas de troca aniônica ou por osmose inversa.

Assim, submetendo-se o efluente secundário a um processo oxidativo avançado (POA), gerador de radicais livres hidroxila (.OH), seguido de filtração convencional, microfiltração e de um processo de osmose inversa, o efluente seria transformado em uma água praticamente desmineralizada, com geração de uma corrente salina concentrada que seria enviada para a ETE.

O POA poderia ser executado por meio da ação combinada de peróxido de hidrogênio e ozônio, resultando em uma drástica redução dos teores de matéria orgânica a valores praticamente desprezíveis.

A filtração convencional seria responsável pela eliminação da maior parte dos sólidos em suspensão e a microfiltração promoveria a eliminação de sólidos suspensos de menor diâmetro, com objetivo maior de preservação da membrana de osmose inversa.

A Tabela 4 mostra os valores dos principais parâmetros envolvidos em diversas hipóteses de mistura de água da ETA com água desmineralizada (DM).

Tabela 4 – Valores paramétricos para os diferentes casos de reúso com regeneração

Parâmetro	p = 1,0	p = 0,8	p = 0,6	p = 0,4	p = 0,2
Alcalinidade (ppm CaCO ₃)	40	32	24	16	8,0
Cálcio (ppm CaCO ₃)	20	16	12	8,0	4,0
Cloreto (ppm Cl ⁻)	15	12	9,0	6,0	3,0
Sulfato (ppm SO ₄ ²⁻)	13	10,4	7,8	5,2	2,6
Sílica (ppm SiO ₂)	10	8,0	6,0	4,0	2,0
SD (ppm)	150	120	90	60	30
SS (ppm)	0	0	0	0	0
DBO (mg O ₂ L ⁻¹)	0	0	0	0	0
DQO (mg O ₂ L ⁻¹)	0	0	0	0	0
pH _{eq}	6,9	6,8	6,6	6,3	5,9
X (teórico)	10	10	10	10	10
X (SiO ₂)	> 10	> 10	> 10	> 10	> 10
X (CaSO ₄)	> 10	> 10	> 10	> 10	> 10
X (Cl ⁻)	> 10	> 10	> 10	> 10	> 10
X (ideal)	5,1	6,6	8,9	> 10	> 10
R (m ³ h ⁻¹)	31,1	29,5	28,2	---	---
d (kg h ⁻¹)	0,40	0,36	0,25	---	---

Foram desconsideradas as situações em que o ciclo de concentração é menor que um ($X < 1$) ou superior a dez ($X > 10$) pelos motivos já expostos no item anterior.

Merecem serem analisadas as hipóteses que resultam em ciclos ideais, respectivamente, iguais a 6,6 e 8,9.

Na primeira delas, a demanda de água da ETA seria: $0,80 \times 29,5 = 23,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, com economia de 21,3% em relação à atual, e o consumo de produtos de tratamento seria reduzido em 10%.

Na segunda hipótese, a demanda de água na ETA seria: $0,60 \times 28,2 = 16,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, com uma economia de 43,7% diante da atual, com o consumo de produtos de tratamento sendo reduzido em aproximadamente 40%.

Em relação ao consumo de produtos de tratamento, os valores apresentados são apenas orientativos, considerando a elevação do ciclo de concentração. Valores mais exatos dependerão da filosofia de tratamento adotada e dos produtos recomendados.

Não foi cogitado o cenário de utilização total de água desmineralizada ($p = 0,0$) como fonte de reposição. A água seria altamente corrosiva, devido à presença de dióxido de carbono livre dissolvido. A ausência de dureza prejudicaria a atuação de alguns inibidores, como os fosfonatos, que poderiam se transformar em sequestrantes de íons, como o ferro (II), das partes metálicas.

Assim, em uma abordagem inicial, uma operação do SRAR com ciclo de concentração no intervalo de 6,5 a 9,0 poderia ser empregada, dependendo do percentual de reúso de água residuária tratada.

Conclusões e sugestões

O presente trabalho não tem a intenção de mostrar uma abordagem única para o problema do reúso de águas para fins de reposição em um SRAR. Outras soluções existem e são merecedoras de serem cogitadas, desde que apoiadas em dados concretos.

Evidentemente, deverão ser considerados os decisivos aspectos de ordem econômica referentes à implantação e operação dos eventuais tratamentos envolvidos nas etapas de preparação de uma água residuária para reúso e que não fizeram parte do escopo deste trabalho.

Entretanto, é possível se chegar a algumas importantes conclusões de ordem técnica. Uma delas é a de que a expectativa de total substituição da demanda de água em uma indústria pelo reúso de água residuária é frustrada na imensa maioria dos casos. Se boa parte da água demandada é evaporada, nas torres de resfriamento, como seria suprida essa perda com o emprego de água residuária da mesma indústria? A única alternativa seria uma futura possibilidade de condensação e reciclagem do vapor gerado nas torres.

Sem dúvida, o aspecto mais significativo a ser destacado é o de que uma água de reúso só deve ser designada como tal, quando estiver em condições de atender às condições da unidade usuária, no caso um SRAR.

Infelizmente, em muitos trabalhos publicados e amplamente divulgados, os sistemas de resfriamento têm sido encarados como unidades de menor importância, capazes de aceitar águas de reúso de qualidade inferior.

Se este trabalho for capaz de contribuir, de alguma forma, para enfatizar a importância da qualidade adequada que deve ter a água de alimentação dos sistemas resfriamento, com a mesma seriedade com que é considerada, por exemplo, a da água de alimentação nas caldeiras, seu objetivo terá sido alcançado. Certamente, serão menores os problemas de manutenção, operacionais e, até mesmo, alguns de ordem ambiental.

Referências Bibliográficas

- 1- FIESP, **Conservação e reúso de água. Manual de orientações para o setor industrial.** V.1. 2008.
- 2- DANTAS, E. **Tratamento de água de refrigeração e caldeiras.** Rio de Janeiro: JO/Ecolab, 1988. 303 p.

- 3- BETZ LABORATORIES. **Betz handbook of industrial water conditioning.** Trevoze/PA/USA. Betz, 1991. 391 p.
- 4- PEREIRA, C. A. **Tecnologia mais limpa aplicada ao tratamento de água em sistemas de resfriamento abertos com recirculação.** 2007. 76p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Química Ambiental) – Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- 5- ROQUES, H. **Chemical Water Treatment – Principles and Practice.** New York. VHC, 1996. 620 p.
- 6- CROOK, J. **Water reclamation and reuse – Water Resources Handbook (chapter 21) –** McGraw Hill, 1996. 886 p.
- 7- KEMMER, F.N. **The Nalco Water Handbook.** 2 ed. Singapore. McGraw Hill, 1998. 647 p.
- 8- GENTIL, V. **Corrosão.** 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 341 p.
- 9- INEA – DZ 205 R.6. **Diretriz de controle de carga orgânica em efluentes líquidos de origem industrial.** 1991.