

II-211 - RISCOS QUÍMICOS, MICROBIOLÓGICOS E PRÉ-AVALIAÇÃO ECONÔMICA NO REÚSO DE ÁGUA. ESTUDO DE CASO: LAVAGEM DE VEÍCULOS

Rafael Newton Zaneti⁽¹⁾

Engenheiro Civil. Doutorando no Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Ramiro Gonçalves Etchepare

Engenheiro Ambiental. Mestrando no Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Renato Gustavo Mota Monteiro de Oliveira

Graduando em Engenharia Química na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Jorge Rubio

Químico. Ph.D. pelo Imperial College de Londres. Prof. do DEMIN e do PPGE3M da UFRGS.

Endereço⁽¹⁾: Av. Bento Gonçalves, 9500 – Bairro Agronomia – Porto Alegre - RS - CEP: 91501-970 - Brasil - Tel: +55 (51) 33089479 - Fax: +55 (51) 33089977 - e-mail: jrubio@ufrgs.br

RESUMO

A reciclagem de água na lavagem de veículos é uma prática que começa a ser empregada principalmente em países do primeiro mundo motivada por exigências legais. O presente trabalho apresenta em escala real uma nova tecnologia (Floculação-Flotação em Coluna - FFC) para tratamento e reciclo destes efluentes. A caracterização do efluente da lavagem e da água de reúso, e a estimativa dos riscos químico e microbiológico da prática são realizadas. Ainda, uma pré-avaliação econômica (24 meses para amortização do investimento) para cenários em Porto Alegre e São Paulo é desenvolvida. Os resultados mostram o potencial poluidor deste efluente (surfactantes MBAS > 19 mg.L⁻¹), a viabilidade de reciclagem de aproximadamente 70 % da água e um limite aceitável para E. Coli (200 NMP.100 mL⁻¹) na água de reúso é proposto. Acredita-se que os resultados devem auxiliar novas legislações, específicas para esta modalidade.

PALAVRAS-CHAVE: Reúso de água, floculação-flotação, risco microbiológico, lavagem de veículos.

INTRODUÇÃO

A lavagem de veículos é uma atividade que emprega elevados volumes de água (Al-Odwani et al., 2007). A prática de reciclagem desta água vem se destacando principalmente em países desenvolvidos (Europa, Austrália e Estados Unidos), motivada por legislações que restringem o uso de água potável (60-70 L por carro - na Holanda e região escandinava), ou impõem percentuais de reciclagem (80% em países como Alemanha e Áustria). No Brasil, esta modalidade de reúso é pouco empregada, mas motivada pelo elevado custo da água.

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH, na sua resolução nº 54 de 2005, regulamenta e estimula o reúso direto não potável de água na modalidade de lavagem de veículos. Segundo esta resolução, água de reúso é a água residuária que se encontra dentro dos padrões exigidos para utilização nas modalidades pretendidas. Os padrões específicos para as diversas modalidades devem ser estabelecidos pelos órgãos competentes.

Na modalidade de lavagem de veículos ainda não existem critérios bem definidos para a qualidade da água de reúso. De acordo com Brown (2002), neste tipo de atividade, a qualidade da água deve ser suficiente para que os veículos e equipamentos de lavagem não sejam danificados, que o risco à saúde dos operadores e usuários seja mínimo, e que as condições estéticas (cor e odor) sejam aceitáveis. Jefferson et al. (2004) e Friedler et al. (2006) pesquisaram a aceitação do público na Inglaterra e em Israel, respectivamente, ao reúso de água em modalidades urbanas. Os resultados mostraram uma aceitação superior a 75 %, quando aspectos estéticos (baixa turbidez) e microbiológicos (baixo risco a saúde) são controlados.

De acordo com Morelli (2005), somente na última década surgiram os primeiros trabalhos sobre a prática de reúso de água na lavagem de veículos. Estes estudos avaliaram diferentes processos (biológicos, sedimentação,

flotação e filtração) no tratamento para reúso da água, mas não incluíram processos de desinfecção e/ou avaliação do risco microbiológico.

O Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental (LTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) vem empregando a floculação-flotação no tratamento visando o reciclo da água gerada na lavagem de veículos desde o final dos anos 90 (Rubio et al., 2007) e Rubio e Zaneti (2009) desenvolveram a técnica de Floculação-Flotação em Coluna - FFC, apontando para uma alta taxa de aplicação ($> 15 \text{ m.h}^{-1}$), além de apresentar eficiência na redução de turbidez ($> 90 \%$), cor ($> 75 \%$) e facilidades de operacionais.

O objetivo do presente trabalho foi aplicar o processo FFC em conjunto com a filtração em areia e a cloração (FFC-AC) no tratamento e reúso de água na lavagem de veículos. Foram aplicados tratamentos matemáticos aos dados de qualidade da água (de reúso e efluente); os riscos químicos e microbiológicos foram estimados e uma pré-avaliação econômica foi realizada.

MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 1 mostra as principais características construtivas e hidráulicas do processo de tratamento de efluentes proposto e instalado em um lava-rápido de Porto Alegre. Os locais de instalação de dispositivos de controle (válvulas, hidrômetros e pontos de coleta de amostra de água) no sistema de reciclagem de água proposto podem ser visualizados na Figura 2. No processo de lavagem foram empregados detergentes neutros e alcalinos comerciais.

O reagente químico empregado em campo na floculação foi o Tanfloc SL, em concentrações que variaram entre $80\text{-}350 \text{ mg.L}^{-1}$, dependendo das características do efluente. Uma solução de hipoclorito de sódio, contendo 4-6% de cloro livre, foi utilizada como desinfetante, sendo padronizada semanalmente e dosada após o filtro de areia. Em bancada, foram utilizados o cloreto de polialumínio (PAC) e o polieletrólito (floculante) catiônico de alto peso molecular e densidade de carga Flonex 9045.

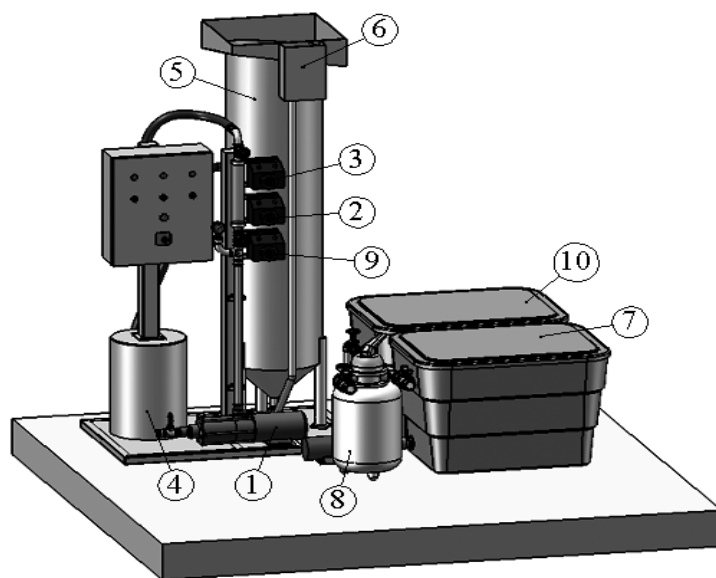


Figura 1: Sistema de floculação-flotação em coluna-FFC: 1 – Bomba centrífuga multifase (BCM – unidade de geração de bolhas); 2 – Bomba de diafragma (dosagem de Tanfloc SL); 3 – Bomba de diafragma (dosagem eventual de regulador de pH); 4 – Unidade de floculação (RGF); 5 – Coluna de flotação; 6 – Controle de nível da coluna de flotação; 7 – Reservatório de água de reciclo; 8 – Filtro de areia; 9 – Bomba de diafragma (dosagem de hipoclorito de sódio); 10 – Leito de secagem de lodo.

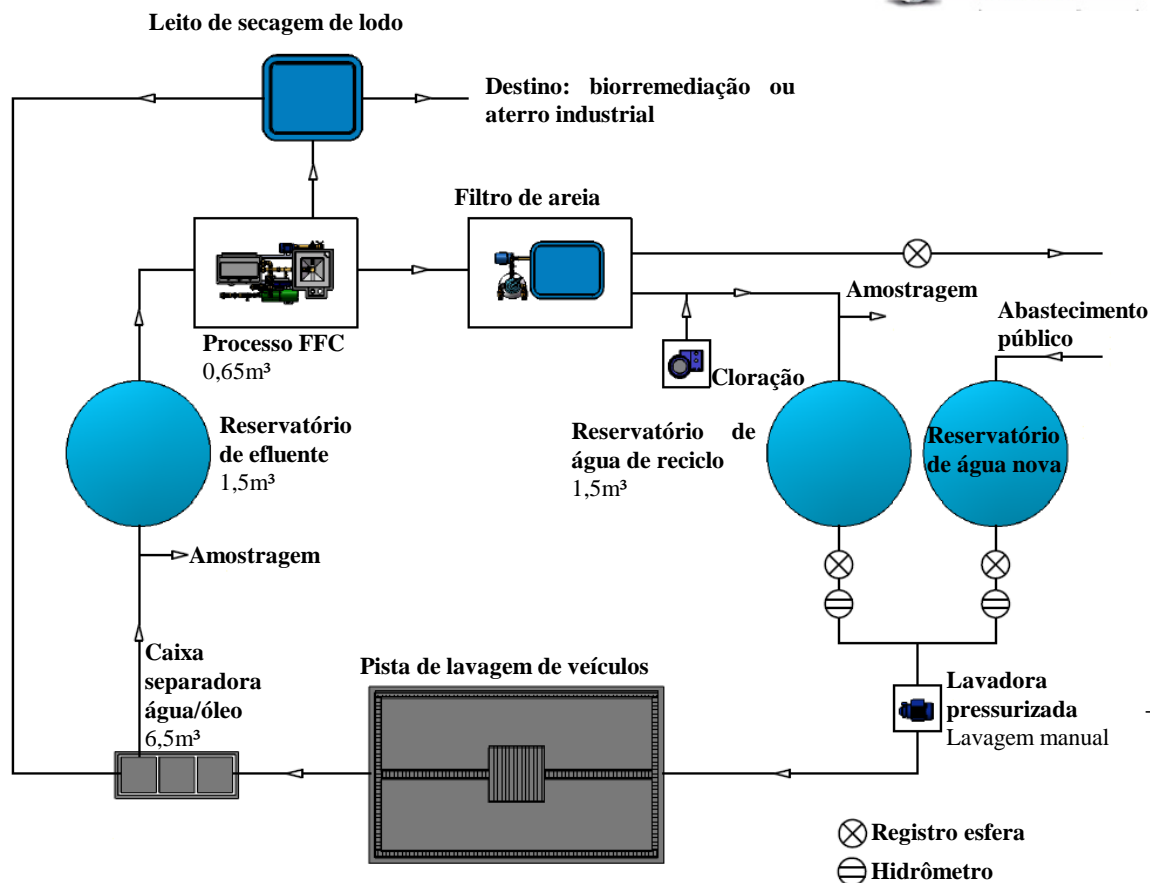


Figura 1: Unidades componentes do sistema de tratamento e de reúso de água de lavagem de carros e suas capacidades de armazenagem (volume útil) - Capacidade de armazenagem total do sistema – 10m³.

Foram realizados estudos de coagulação-floculação em bancada (testes de jarros) com alíquotas de 1 L de efluente (amostras coletadas após a SAO) para determinar condições ideais de clarificação. Nestas condições, foram realizados ensaios de cloração ($1 - 25 \text{ mgCl}_2\text{L}^{-1}$ e tempo de contato de 24 horas) com o líquido sobrenadante clarificado. As amostras dos ensaios de cloração foram analisadas em função da concentração de sólidos dissolvidos totais e cloreto.

Estudos de desativação de microrganismos foram conduzidos de acordo com metodologia proposta por Telles (2004) e Winward (2007). 500 mL de amostra (água de reúso disponibilizada pelo processo FFC-A) foram cloradas em bancada com concentrações iniciais variando de $1 - 40 \text{ mgCl}_2\text{L}^{-1}$ sob diferentes tempos de contato (30 – 240 min). Após a cloração, tiosulfato de sódio foi adicionado para neutralizar a ação do cloro livre (Winward et al., 2007). As amostras neutralizadas eram conservadas imediatamente a temperatura de $4 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ e a contagem de microrganismos (E. Coli) realizada dentro de 24 horas.

No sistema de reciclagem de água em escala real, a água de reúso foi empregada nas seguintes etapas do processo de lavagem de carros: pré-enxágue, lavagem e primeiro enxágue. Água nova foi utilizada apenas no enxágue final, antes da secagem dos carros. O sistema teve funcionamento em dois turnos (10 horas) por dia, ao longo de 22 semanas. O processo FFC-AC foi operado de forma semi-automática, com o nível de água nos reservatórios sendo monitorado por controladores de nível (chave-bóia) e acionamento automatizado das bombas.

O efluente e a água de reúso tiveram 21 parâmetros analisados (APHA, 2005) ao longo de 22 semanas. As amostras do efluente foram coletadas após o dispositivo de separação água/óleo, e as de água de reúso, após o filtro de areia ou cloração (Figura 2). Amostras simples e compostas (quatro alíquotas em 2 horas) foram coletadas semanalmente.

O risco químico foi avaliado pela estimativa da concentração de parâmetros de interesse na água de reúso (aplicação de balanço de massa – Equações 1, 2 e 3) em função dos ciclos de água no sistema (Morelli, 2005). Os parâmetros avaliados foram sólidos dissolvidos totais (SDT) e cloreto (Cl⁻), considerados críticos em sistemas de reciclagem de água em lavagem de veículos, uma vez que o incremento em seus valores (aumento de concentração) pode provocar manchas nos veículos e contribuir para processo de corrosão.

Foram assumidas as seguintes hipóteses: a carga de sais ao sistema é constante em função dos ciclos (Equação 2) e não ocorrem perdas de água (Equação 3). Um ciclo de água no sistema é equivalente a utilização de 10 m³ (volume de água armazenado no sistema) de água. As Equações (1) e (2) relacionam a concentração dos parâmetros de interesse com os ciclos de água no sistema:

$$C_{Ri+1} = \frac{CS + (F \cdot V_{Li} \cdot C_{Ri} + (1-F) \cdot V_{Li} \cdot C_N)}{V_{Li}} \quad \text{Equação (1)}$$

$$CS = V_{Li} \cdot (C_1 - C_N) \quad \text{Equação (2)}$$

$$V_{Ei} = V_{Li} = F \cdot V_{Ri} + (1-F) \cdot V_{Ni} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

C_{Ri} e C_{Ri+1} (mg.L⁻¹) = Concentrações do parâmetro de interesse na água de reúso no ciclo Ri e Ri+1, i = 1,..., n;
CS (mg) = Carga de entrada do parâmetro de interesse devido a adição de reagentes de lavagem (detergente-xampu, desengraxante, etc.) e de tratamento de água (coagulante/floculante e soda);

F = fator de reciclagem de água (entre 0 e 1);

V_{Li} (L) = Volume de água utilizado na lavagem;

V_{Ei} (L) = Volume de efluente gerado na lavagem;

V_{Ni} (L) = Volume de água nova;

C_N (mg.L⁻¹) = Concentração do parâmetro de interesse na água nova.

As concentrações de SDT e cloreto utilizadas na avaliação do risco químico foram obtidas no estudo em bancada – testes de jarros (análise do líquido clarificado sobrenadante) em condições otimizadas de processo para os dois reagentes (PAC e Tanfloc SL) e em campo (monitoramento semanal). Nas simulações a partir dos estudos de bancada foram propostos percentuais de reciclagem de água de 70 e 80 % (F = 0,7 e 0,8, respectivamente).

O risco microbiológico foi calculado utilizando um modelo que estima a probabilidade de um indivíduo ser infectado em função de um agente etiológico, da frequência e rota de exposição e do volume ingerido por exposição. O agente etiológico escolhido foi o E. Coli e as rotas dos aerossóis e da ingestão consideradas para operadores e usuários de lava-rápidos comerciais no Brasil.

A Tabela 1 mostra o modelo de probabilidade para infecção por E. Coli, e a dose ingerida em função da rota e da atividade de uso da água. Na falta de dados específicos para atividade de lavagem de veículos, são considerados os volumes ingeridos na atividade de irrigação.

Tabela 1. Cálculo de risco microbiológico: modelo e parâmetros.

Organismo	Modelo ^a	Parâmetros
E. coli	$P_1^* = 1 - (1 + N/\beta)^{-\alpha}$ (Beta poisson)	$\alpha = 0.1705$ $\beta = 1.61 \times 10^6$ N=Número de organismos ingeridos
Atividade	Rota de exposição	Dose ^b (mL)
Irrigação	Aerosol	$T^{**}(0,01;0,1;0,5)$
Irrigação	Ingestão (exposição rotineira)	$T(0,1;1;2)$
Extrapolção para risco anual ^c		
$P_n^{***} = 1 - (1 - P_1)^n \approx n \times P_1$		Simplificação válida para $P_1 \ll 1$

^a (Huertas et al., 2008);^b (Ashbolt et al., 2005);^c (Dufour, 2003);

* Probabilidade de exposição depois de uma única exposição;

** Distribuição triangular (mínimo, moda, máximo);

*** Probabilidade de infecção depois de repetidas exposições (n exposições).

Uma pré-análise econômica do sistema de reciclagem de água proposto foi realizada considerando os dados de consumo de água e custos de tratamento (reagentes químicos, energia elétrica e disposição final de lodo) observados no presente trabalho. Foram considerados cenários dos municípios de Porto Alegre (custo da água de R\$ 4,30 – 9,30.m³) e São Paulo (custos de água conforme Tabela 2).

Tabela 2: Custo da água na região Metropolitana de São Paulo (atividades industriais e comerciais).

Faixa de consumo	Custo
0 – 10 m ³	54,60 R\$.mês ⁻¹
10 – 20 m ³	10,60 R\$.m ⁻³
21 – 50 m ³	20,40 R\$.m ⁻³
Acima de 50 m ³	21,30 R\$.m ⁻³

O preço de mercado de uma estação FFC-AC com capacidade de tratamento de 500 L.h⁻¹ foi estimado em R\$13.900,00 (valor cotado junto a uma empresa nacional).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os principais dados operacionais e características construtivas do processo FFC-AC foram apresentados por Zaneti et al. (2011). O lodo removido da coluna de flotação foi acumulado em leito de secagem e disposto adequadamente. O volume total de lodo seco gerado durante o estudo (22 semanas) foi de 0,5 m³. A Figura 3 mostra fotografias da estação FFC-AC, do lodo gerado e de um veículo lavado.

	
<p>Ponto de lavagem – Efluente coletado na canaleta</p>	<p>Equipamento FFC</p>
	
<p>Imagem do topo da coluna de flotação – Acúmulo e transbordamento do lodo</p>	<p>Leito de secagem do lodo</p>
	
<p>Ramais de alimentação da máquina lavadora – Jogo de válvulas água nova/água de reúso</p>	

Figura 2: Fotografias ilustrativas do equipamento FFC e de um veículo lavado.

A Tabela 3 mostra a auditoria do consumo e o percentual de reciclagem de água. Mais de 2000 carros foram lavados e o volume médio de água utilizado foi 131 L.carro⁻¹. O volume total de água utilizado superou pelo menos 27 vezes a capacidade de armazenagem (10 m³ - ver Figura 2), configurando 27 ciclos de água. Na Tabela 4, o número de ciclos de água e o tempo decorrido (em semanas) são associados.

O consumo de água por lavagem (131 L – Tabela 3) manteve-se no intervalo reportado na literatura. Ghisi et al. (2009) avaliaram o potencial de reaproveitamento de água de chuva na lavagem comercial de carros em postos de combustível em Brasília e consideraram uma demanda de água de 150 – 250 L.veículo⁻¹. Al-Odwani et al. (2007) e Boussu et al. (2007) reportaram um consumo de, respectivamente, 185-370 L.veículo⁻¹ em lavagens automáticas no Kuwait e 400 L.veículo⁻¹ na Bélgica.

O percentual de água reciclada no processo de lavagem se aproximou a 70 % (Tabela 3) e acredita-se que utilizando lavagem automática, ao invés de manual, este percentual aumentará. Boussu et al. (2007) reporta que na Bélgica, utilizando processos convencionais de tratamento, um percentual de 55 % de água é reciclado nos lava-rápidos comerciais. Por outro lado, Brown (2002) monitorou mais de 30 lava-rápidos comerciais nos Estados Unidos, nas cidades de Boston, Orlando e Phoenix, e mostrou um percentual de 9 – 80 % de reciclagem, que variou em função da tecnologia de tratamento de utilizada.

Não foi observado qualquer excesso de água no sistema, sugerindo que as perdas de água por carregamento (filme líquido carregado com o veículo para fora da pista de lavagem) e evaporação foram da ordem de 30%. Brown (2002) reporta perdas tão altas quanto 35 % em seu relatório.

Tabela 3: Sistema de reciclagem de água de lavagem de veículos via FFC-AC: consumo de água em função do tempo (semanas).

Semanas	Volume total de água, m ³	Número de ciclos de água	Número de lavagens	Volume médio total, L.carro ⁻¹	Volume médio de água potável, L.carro ⁻¹	Reciclagem, %
1	0	0	0	0	0	0
2	10,1	1	91	111	48	57
3	14,6	2,5	137	107	59	45
4	14,8	4	125	118	42	64
5	16,3	5,6	152	107	39	64
6	7,9	6,4	63	125	40	68
7	11,6	7,5	113	103	29	72
8	10,4	8,6	89	117	35	70
9	11,7	9,7	112	104	36	66
10	11,8	10,9	93	127	33	74
11	15,1	12,4	127	119	30	75
12	9,7	13,4	86	113	37	67
13	16,5	15,1	133	124	30	76
14	7,2	15,9	59	122	35	71
15	11,8	17,0	84	140	38	73
16	19,7	18,9	141	140	34	76
17	17	20,6	99	172	33	81
18	10,1	21,6	68	149	39	74
20	13,5	23,0	80	169	69	59
21	20,1	25,0	107	188	101	46
22	23,6	27,4	136	174	75	57
Médias e totais	274	-	2095	131	44	66

A Tabela 4 apresenta a caracterização do efluente e da água de reúso. Os dados são apresentados como média das observações geradas semanalmente ($\pm 1/2$ desvio padrão) em confronto à Resolução Conesma-RS 128/2006. Os parâmetros surfactantes-MBAS e óleos e graxas do efluente encontram-se, na média, fora de padrões de emissão. A concentração de surfactantes é muitas vezes (> 10 x) superior ao padrão de emissão, conferindo riscos a comunidade, vida aquática e corpos hídricos.

Tabela 4: Caracterização do efluente e água de reúso disponibilizada pelo processo FFC-AC (valores médios $\pm 1/2$ desvio padrão).

Parâmetros	Efluente	Água de reúso	CONSEMA-RS 128/2006
pH	7,4 \pm 0,4	7,2 \pm 0,2	-
DBO ₅ , mg.L ⁻¹	90 \pm 10,3	40 \pm 12,5	180
DQO, mg.L ⁻¹	199 \pm 22,9	90 \pm 19,7	400
SST, mg.L ⁻¹	90 \pm 23,7	10 \pm 3,4	180
SDT, mg.L ⁻¹	428 \pm 50,7	504 \pm 85,3	-
Condutividade, μ S.cm ⁻¹	360 \pm 29	405 \pm 45,6	-
Turbidez, NTU	107 \pm 25,3	10 \pm 1,9	-
Surfactantes, mgMBAS.L ⁻¹	23 \pm 3,1	12 \pm 1,6	2
Coliformes totais, NMP.100mL ⁻¹	4,7E + 5	2,1E + 4	-
Coliformes fecais, NMP.100mL ⁻¹	1,7E + 4	1,2E + 2	E+5
Tanino, mg.L ⁻¹	11 \pm 1,9	7 \pm 1	-
Óleos e Graxas, mg.L ⁻¹	14,5 \pm 6,2	10,3 \pm 1,75	10
Fenóis, mg.L ⁻¹	0,01 \pm 0,00	0,01 \pm 0,00	0,1
Fósforo Total, mg.L ⁻¹	0,95 \pm 0,23	0,44 \pm 0,17	4
Nitrogênio Total Kjeldahl, mg.L ⁻¹	10 \pm 1,6	9,4 \pm 1,4	20
Sulfeto de hidrogênio, mg.L ⁻¹	0,18 \pm 0,06	0,04 \pm 0,02	0,2
Cálcio, mg.L ⁻¹	16 \pm 2	14 \pm 3	-
Magnésio mg.L ⁻¹	2,2 \pm 1	1,4 \pm 1	-
Sulfato, mg.L ⁻¹	25 \pm 3,3	26,5 \pm 3,5	-
Cloreto, mg.L ⁻¹	29,9 \pm 4	56,2 \pm 13,3	-
Sódio, mg.L ⁻¹	76,7 \pm 11,5	91 \pm 15,1	-

A Tabela 5 mostra o risco microbiológico ao quais os usuários e operadores podem estar expostos em lava-rápidos comerciais que pratiquem reciclagem de água no Brasil. De acordo com Haas (1996), um padrão de risco igual a 10^{-4} (uma pessoa infectada a cada 10.000) é muito restritivo, uma vez que, nos Estados Unidos, doenças de veiculação hídrica causadas por água de abastecimento público infectam uma (1) a cada cem (100) pessoas. Assim, alguns autores (FDEP, 1998) defendem que um risco equivalente a 10^{-3} é aceitável. A Tabela 5 mostra que o risco de infecção para usuários é muito baixo – 10^{-5} , mesmo que o efluente da lavagem seja reciclado no processo de lavagem sem nenhum tratamento, entretanto, neste caso, os operadores estariam sujeitos a um risco igual a 10^{-1} , cem vezes maior que o risco considerado aceitável. Para que o risco seja aceitável, a água de reúso deve ter uma concentração máxima de E. Coli igual a 200 NMP.100mL⁻¹. Este limite é bastante inferior a concentração de E. Coli (1.000 NMP.100mL⁻¹) em águas consideradas aceitáveis para balneabilidade no Brasil (Resolução CONAMA n.º 274/2000). A proposição de um limite mais restritivo de E. Coli para água de reúso na lavagem de veículos do que para água sujeita a contato primário (balneabilidade) é função da maior frequência de exposição nesta primeira atividade.

Tabela 5: Cálculo do risco microbiológico para diferentes cenários e indivíduos e proposição de limite de contagem de E. Coli para água de reúso em lava-rápidos que pratiquem reciclagem de água no Brasil.

Indivíduo	Rota	Água	E. Coli (NMP.100mL ⁻¹)	Volume ingerido por exposição *	Frequência de exposição	N ^{**} (NMP ingerido.dia ⁻¹)	Risco anual ^{***}
Usuário	Aerosol	Efluente	2,1E+04	0,1	Uma vez por semana	3	1,7E-05
Usuário	Aerosol	Reúso	7,4E+02	0,1	Uma vez por semana	0	5,8E-07
Operador	Aerosol	Efluente	2,1E+04	0,1	15 vezes ao dia	315	1,0E-02
Operador	Aerosol	Reúso	7,4E+02	0,1	15 vezes ao dia	11	3,7E-04
Operador	Ingestão	Efluente	2,1E+04	1,0	15 vezes ao dia	3150	1,0E-01
Operador	ingestão	Reúso	7,4E+02	1,0	15 vezes ao dia	111	3,7E-03
Operador	Ingestão	Reúso	2,0E+02 (Limite)	1,0	15 vezes ao dia	30	1,0E-03

* Considerando a moda da atividade de irrigação;

** Estimado considerando a frequência de exposição, rota, dose ingerida e contagem de E. Coli;

*** Calculado com modelo apresentado na Tabela 2.

A Figura 4 mostra a curva de inativação de E. Coli em função da dosagem inicial de cloro e do tempo de reação. É revelada uma tendência de desativação do tipo “ombro” (*lag*) (Metcalf e Eddy, 2006), onde uma concentração inicial de cloro livre é consumida na estabilização de substâncias oxidáveis. A desativação de E. Coli a níveis inferiores a 200 NMP.100 mL⁻¹ é atingida a partir de uma dosagem inicial de 15 mgCl₂.L⁻¹ e tempo de contato igual ou superior a 2 h. A tendência de “cauda” (*tailing*), vinculada a presença de material particulado (Metcalf e Eddy, 2006), não é observada. Winward et al.(2007) estudaram a desativação de microorganismos e mostraram que mesmo uma concentração inicial de 80 mgCl₂.L⁻¹ não é suficiente para eliminar E. Coli de água cinza sem tratamento, devido à presença de partículas de até 760 µm.

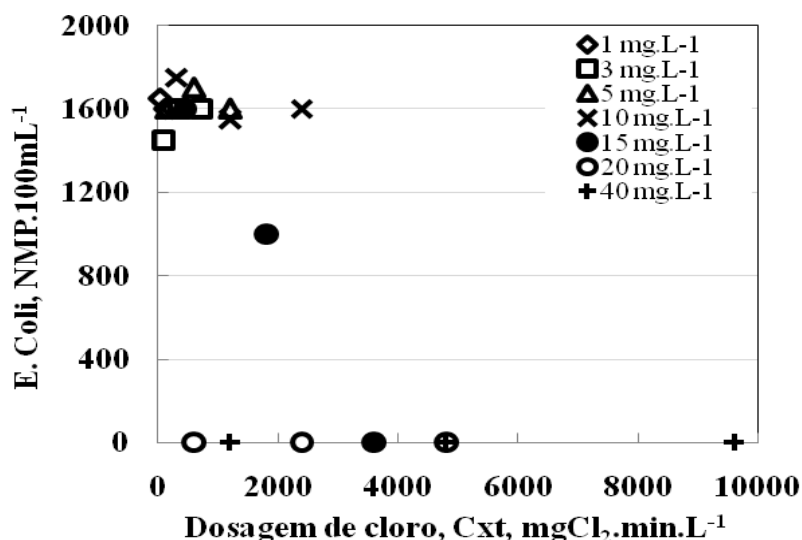


Figura 3: Desativação de E. Coli em função da dosagem inicial de cloro e do tempo de reação. Condições do ensaio - Água de reúso disponibilizada pelo FFC-AC: Turbidez = 9 NTU; SST = 38 $mg.L^{-1}$; DQO = 151 $mg.L^{-1}$; DBO = 41 $mg.L^{-1}$.

O risco químico do reúso de água na indústria é determinado principalmente pela concentração de sólidos dissolvidos, dureza e potencial de corrosão da água. Metcalf e Eddy (2006) reportam diversas metodologias para quantificação deste risco. Na lavagem de veículos é de interesse controlar a precipitação de sais (manchas – *spots*) na lataria e vidros dos veículos, assim como a aceleração da corrosão. A Figura 5 (a) mostra que a estimativa de concentração de SDT em função dos ciclos de água no sistema segue uma tendência similar à observada em campo. A concentração de SDT lida em campo superou a concentração estimada somente nas primeiras semanas, sugerindo um caráter conservador da metodologia proposta.

A Figura 5 (b) mostra que não existe apreciável diferença de concentração de SDT em função do tipo de reagente de coagulação-floculação utilizado. Para um percentual de 80 % de reciclo, o limite de 1.000 $mgSDT.L^{-1}$ (Morelli, 2005) é superado no 15º ciclo para o reagente PAC e no 18º ciclo para o reagente Tanfloc, mostrando que este percentual de reciclo é limitante para a prática nas condições avaliadas. Na Figura 2 (c), a concentração de cloreto não atinge 400 $mg.L^{-1}$ em nenhum momento. A considerar o limite proposto por Nace (1975) para aceleração da corrosão de veículos (400 $mgCl.L^{-1}$), pode-se dizer que a concentração de cloreto na água de reúso, nas condições avaliadas, não é um limitante para a prática, mesmo com uma dosagem de cloro 15 $mg.L^{-1}$ para desinfecção da água de reúso à níveis seguros (risco microbiológico controlado).

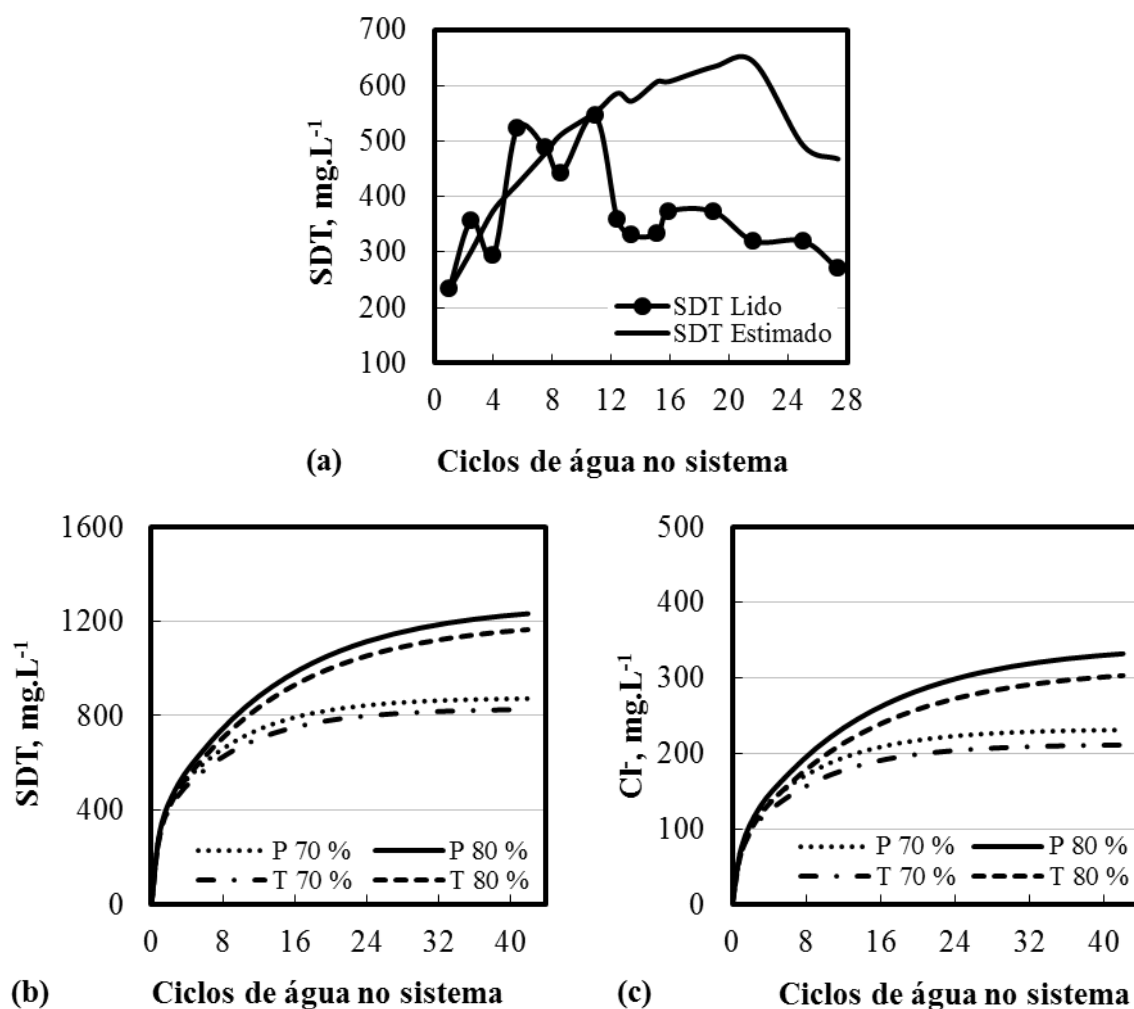


Figura 4: Concentrações de SDT e cloreto (Cl) em função do número de ciclos de água no sistema. (a) Concentração de SDT lida (escala real) e estimada (balanço de massas) para os dados de reúso (Tabela 3) e características da água do estudo em escala real. Dosagem inicial de cloro: $0,5 \text{ mgCl}_2\text{L}^{-1}$. (b) e (c) Concentrações de SDT e Cl estimadas para diferentes cenários. Reagentes de coagulação/floculação: P – PAC+polieletrólito; T – Tanfloc SL. Percentuais de reciclo: 70 e 80 %. Cloração: $15 \text{ mgCl}_2\text{L}^{-1}$.

A pré-avaliação econômica considerou os seguintes dados: 131 L.car^{-1} , 70 % de reciclagem de água, custo de tratamento da água $\text{R\$ } 0,65.\text{m}^{-3}$, custo do equipamento FFC – $\text{R\$ } 13.900,00$.

A economia mensal com a conta de água e a consequente amortização do equipamento FFC-AC são mostrados na Figura 6, em função da demanda diária de lavagens. Considerando o município de Porto Alegre, e uma demanda diária de 35 lavagens, a amortização do equipamento pode ser atingida em 24 meses. Por outro lado, em São Paulo, devido ao alto custo da água, uma demanda de 10 lavagens diárias é suficiente para amortizar o equipamento no mesmo período de tempo. Por outro lado, com uma demanda diária de 33 lavagens, menos de 10 meses são necessários para amortizar o equipamento em São Paulo. Ghisi et al. (2009) avaliando a lavagem de carros em postos de combustíveis em Brasília considerou demanda de 15 – 45 lavagens. Nesta faixa, em São Paulo, o investimento no processo FFC-AC pode ser amortizado em um prazo inferior a 24 meses.

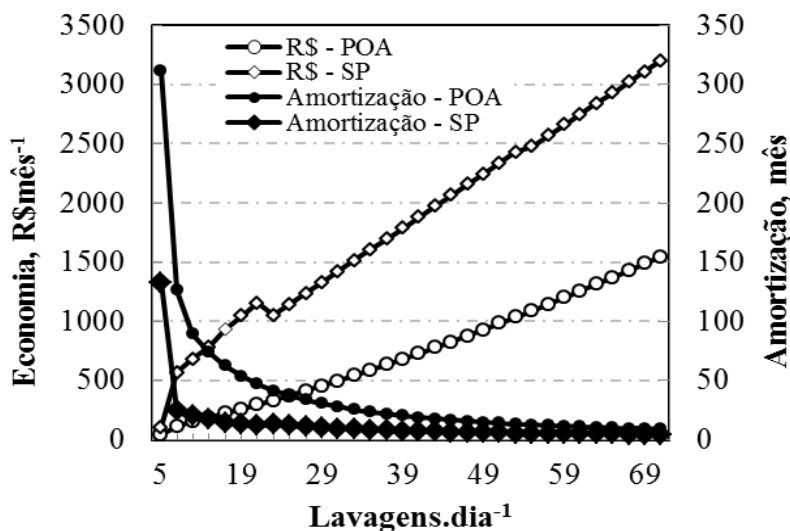


Figura 5: Avaliação econômica do sistema integrado para tratamento e reúso de água na lavagem de veículos via processo FFC-AC.

CONCLUSÕES

Uma nova tecnologia (FFC-AC) vem sendo aplicada em um sistema de reciclagem de água de lavagem de carros. O monitoramento das características do efluente de lavagem (após caixa separadora água/óleo) mostrou que alguns parâmetros estão acima dos limites para emissão no estado do Rio Grande do Sul, sendo a presença de surfactantes-MBAS a mais pronunciada. A água de reúso disponibilizada pelo processo FFC-AC (clarificada e livre de odor e cor) contabilizou, média, de 68 % do volume total utilizado. O risco de infecção com *E. Coli* foi calculado para operadores e usuários de lava-rápidos comerciais no Brasil. Uma contagem de 200 NMP.100mL⁻¹ representa um risco microbiológico aceitável internacionalmente. A desativação de *E. Coli* a este nível foi atingida com a dosagem inicial de 15 mgCl₂.L⁻¹. Quanto ao risco químico da água de reúso, a metodologia proposta mostrou ser apta a estimar as concentrações de SDT em função dos ciclos de água no sistema. Os resultados (em bancada) da estimativa de concentração de SDT e cloreto em função dos ciclos da água mostraram que um percentual de 70 % de reciclagem não é limitante para a prática (SDT < 1.000mg.L⁻¹ e Cl⁻ < 400 mg.L⁻¹ ao longo dos ciclos), nas condições simuladas. A avaliação econômica mostrou que, em São Paulo, em função do alto custo da água para atividades comerciais e industriais, a amortização dos investimentos pode ser atingida em menos de 10 meses.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, pelo apoio financeiro (MCT/CT-Hidro); aos alunos, professores e técnicos do Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental – LTM da UFRGS. Especiais agradecimentos à lavagem ecológica Ecoagua e à empresa Hidrocicle Ind. e Com. Ltda. que forneceram auxílio técnico e estrutura necessária ao trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AL-ODWANI A, AHMED M, BOU-HAMAD S. Carwash water reclamation in Kuwait. *Desalination* 2006;206(1-3):17-28.
2. ANDERSON J, ADIN A, CROOK J, DAVIS C, HULTQUIST R, JIMENEZ-CISNEROS. Climbing the ladder: a step by step approach to international guidelines for water recycling. *Water Science and Technology* 2001;43(10):1-8.
3. APHA. Standard Methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 21st ed. Washington, 2005.

4. ASHBOLT, N.; PETTERSON, S. R.; STENSTRON, THOR-AXEL; SCHONNING, C.; WESTRELL, T.; OTTOSON, J. Microbial risk assessment (MRA) Tool. Urban Water Chalmers University of Technology. Sweden. 2005.
5. BOUSSU K, KINDTS K, VANDECASTEELE C, VAN DER BRUGGEN B. Applicability of nanofiltration in the carwash industry. Separation and Purification Technology 2007; 54:139-146.
6. BROWN C. Water Conservation in the Professional Car Wash Industry. 1ª edição. Washington: International Car Wash Association; 2000.
7. BROWN C. Water use in the Professional Car Wash Industry. 1st edition. Washington: International Car Wash Association; 2002.
8. CAPPONI F, SARTORI M, SOUZA ML, RUBIO J. Modified column flotation of adsorbing iron hydroxide colloidal precipitates. International Journal Mineral Processing 2006;79: 167-173.
9. CARISSIMI E, RUBIO J. The flocs generator reactor – FGR: a new basis for flocculation and solid-liquid separation. International Journal Mineral Processing 2005;75(3-4):237-247.
10. CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE-CONSEMA. Resolução Consema n.º128/2006: Dispõe sobre a fixação de Padrões de Emissão de Efluentes Líquidos para fontes de emissão que lancem seus efluentes em águas superficiais do Estado do Rio Grande do Sul. Secretaria do Meio Ambiente - Estado do Rio Grande do Sul, 2006.
11. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE-consema. Resolução Consema n.º 274/2000: define os critérios de balneabilidade em águas brasileiras. Ministério do Meio Ambiente – República federativa do Brasil, 2000.
12. CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS-CNRH. Resolução n.º 54, de 28 e novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água e dá outras providências. Ministério do Meio Ambiente – República federativa do Brasil, 2006.
13. DUFOUR A, SNOZZI M, KOSTER W, BARTRAM J, RONCHI E, FEWTRELL L. Assessing microbial safety of drinking water: Improving approaches and methods. World Health Organization and the Organisation for Economic Co-operation and Development: publicação IWA 2003, Londres.
14. FANG G. Evaluation and performance of a tannin-based polymer as a coagulant in water treatment. PhD. Thesis. London: Imperial College University of London; 2007.
15. FINCH JA. Column flotation: A selected review— part IV: Novel flotation devices Minerals Engineering 1995;8(6):587-602.
16. FLORIDA DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION – FDEP. Risk Impact Statement 1998, Florida/USA. Disponível em: <http://www.dep.state.fl.us/water/reuse/docs/risreuse.pdf>. Acesso: abril, 2011.
17. GREGORY J. Laminar dispersion and the monitoring of flocculation processes. Journal of Colloid and Interface Science 1987;118(2):397–409.
18. Haas C. Acceptable microbial risk. Journal AWWA 1996, 88 (12):8.
19. HAMADA T, MIYAZAKI Y. Reuse of carwash water with a cellulose acetate ultrafiltration membrane aided by flocculation and activated carbon treatments. Desalination 2004;169:257-267.
20. HESPANHOL I, PROST AME. WHO guidelines and national standards for reuse and water quality. Water Research 1994;28(1):119-124.
21. HUERTAS E, SALGOT M, HOLLENDER J, WEBER S, DOTT W, KHAN S, SCHÄFER A, MESSALEM R, BIS B, AHARONI A, CHIKUREL H. Key objectives for water reuse concepts. Desalination 2008;218:120-131.
22. JEFFERSON B, PALMER A, JEFFREY P, STUETZ R, JUDD S. Grey water characterisation and its impact on the selection and operation of technologies for urban reuse. Water Science and Technology 2004;50(2):157-164.
23. JÖNSSON C, JÖNSSON A. The influence of degreasing agents used at car washes on the performance of ultrafiltration membranes. Desalination 1995;100:115-123.
24. KIM K, PARK S. A comparative analysis of malodour samples between direct (olfactometry) and indirect (instrumental) methods. Atmospheric Environment 2008;42:5061-5070.
25. METCALF, EDDY. In: Tchobanoglous G, Burton, Franklin L, Stensel H. David. (eds.) Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4th edition. New York: McGraw-Hill; 2003.
26. METCALF, EDDY. In: Asano T, Burton FL, Leverenz HL, Tsuchihashi R, Tchobanoglous G. Water Reuse: Issues Technologies, and Applications. 1st Edition. New York: McGraw-Hill; 2006.
27. MORELLI, EB Reúso de água na lavagem de veículos. Dissertação de Mestrado, p. 92. Escola Politécnica da USP. Orientador: Ivanildo Hespanhol, 2005.
28. NACE. The corrosivity of recirculation car wash water. NACE publication 1975;3N275:9-10.

29. ODEGAARD H. The use of dissolved air flotation in municipal wastewater treatment. *Water Science and Technology* 2004;50(2):157-164.
30. PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE. Decreto n.º12961, de 23 de outubro de 2000 – Regulamenta a Lei Complementar n.º65, de 22-12-81, em relação ao controle de poluição hídrica no Município de Porto Alegre, revoga o Decreto n.º 9331, de 07-12-88 e dá outras providências. Secretaria Municipal de Meio Ambiente (Porto Alegre/RS), 2000.
31. QUEENSLAND WATER COMMISSION. Large Vehicle Washing Guideline. Brisbane: Queensland Water Commission; 2008^b.
32. QUEENSLAND WATER COMMISSION. STANDARD VEHICLE WASHING: FIXED COMMERCIAL PREMISES. BRISBANE: QUEENSLAND WATER COMMISSION; 2008^a.
33. RODRIGUES RT, RUBIO J. New Basis for measuring bubbles size distribution. *Minerals Engineering* 2003;16(8):757-765.
34. ROSA JJ, RUBIO J. The FF (Flocculation-Flotation) process. *Minerals Engineering* 2005;18:701-7.
35. RUBIO J, CARISSIMI E, ROSA J. Flotation in water and wastewater treatment and reuse: recent trends in Brazil. *International Journal of Environment and Pollution*, v. 30, n. 2, p. 193-208, 2007
36. RUBIO J, ZANETI RN. Treatment of washrack wastewater with water recycling by advanced flocculation–column flotation. *Desalination* 2009;8:146-153.
37. SILVEIRA ICT. Cloro e ozônio aplicados à desinfecção de efluente hospitalar tratado em contadores biológicos rotatórios, com avaliação de efeitos tóxicos em *Daphnia similis* . Tese de doutorado, p. 172. Instituto de Pesquisas Hidráulica – PPRHSA/IPH/UFRGS, 2004.
38. WINWARD. GP. Disinfection of grey water. Tese de doutorado, p. . Centre of water science/Cranfield University. Orientador: Tom Stephenson, 2007.
39. WINWARD, G.P., AVERY, L.M., STEPHENSON, T., JEFFERSON, B. Chlorine disinfection of grey water for reuse: Effect of organics and particles. *Water Research* 2008(42):483-491.