
AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA NO ESTADO DE SÃO PAULO

Adonai Guimarães Pinto¹, Ricardo de Lima Isaac²
**(Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Rua Saturnino de Brito, 224 – Cidade
Universitária, Campinas, São Paulo, 13083-889, ¹Autor de correspondência:
adonai.pinto@gmail.com)**

INTRODUÇÃO

Estações de tratamento de água (ETAs) são indústrias que convertem água bruta em tratada, com a utilização de produtos químicos e a geração de resíduos, sendo necessário o controle das fontes de poluição tal qual processos industriais (Oliveira & Rondon 2016). A concepção de sistema de abastecimento de água mais comum em áreas urbanas brasileiras é composta por captação superficial seguida de tratamento convencional (ou de ciclo completo) que inclui etapas de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção. O potencial poluidor de ETAs pode ser agravado pela sua localização, usualmente próxima dos mananciais, o que requer proteção para que não sejam prejudicados os usuários à jusante.

O sucesso de serviços de abastecimento de água, além do fornecimento de água potável, depende de questões econômicas, uma vez que os sistemas de água demandam altos investimentos e os custos operacionais estão aumentando ao longo do tempo (Marques *et al.* 2015). Ginley & Ralston (2010) verificaram que otimizar recursos é uma das principais preocupações de gestores de serviços de água, havendo na maioria das ETAs esforços para melhoria da eficiência por meio de conservação de água e energia, análise de custo-benefício e aperfeiçoamento de processos. Conforme a Norma NBR ISO 24512 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT 2012) convém que o prestador de serviços de água: implemente práticas de gestão sustentável dos recursos hídricos; promova o uso eficiente e o reúso da água; monitore e minimize os impactos ambientais adversos causados por ele e remedie seus efeitos; contribua para a proteção dos mananciais e do corpo receptor de seus efluentes e tenha a gestão ambiental como parte essencial do seu planejamento e funcionamento.

Os dados sobre os sistemas de saneamento divulgados pelos órgãos oficiais são limitados à qualidade dos serviços, sendo necessário estabelecer parâmetros de qualidade ambiental e índices de eficiência para avaliar o cumprimento das metas relacionadas aos custos econômicos e ambientais envolvidos e orientar as ações a serem tomadas. Como principal ferramenta reguladora do controle das fontes de poluição, a exigência de licenciamento ambiental para ETAs começou no Brasil em 1997, mas apenas em 2002 no Estado de São Paulo. Isso levou a uma intensificação do monitoramento ambiental das ETAs, resultando em um processo de adequação dos sistemas de controle de poluição ainda em curso.

A Norma NBR ISO 14045 (ABNT 2014) estabelece procedimentos para a avaliação da ecoeficiência de sistemas de produtos, que é desempenho ambiental em relação ao seu valor. O *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) introduziu o termo ecoeficiência em 1992, o qual é definido como a relação entre a produção de bens ou serviços e os respectivos impactos ecológicos ou consumo de recursos ao longo de seu ciclo de vida (Lehni 2000). A ecoeficiência é um conceito mais restrito que a sustentabilidade, focando nos impactos ambientais diretos e na eficiência econômica, que é fundamental para a viabilidade de melhorias ambientais. Lehni (2000) propôs as seguintes metas de ecoeficiência: reduzir o consumo de materiais e energia; reduzir a dispersão de substâncias tóxicas; aprimorar a reciclagem; maximizar o uso sustentável dos recursos naturais e melhorar a qualidade dos produtos e serviços. A adoção dos princípios da ecoeficiência pode melhorar o desempenho

ambiental das empresas, desde que haja a incorporação da filosofia de gestão ambiental, a definição de metas e meios para sua mensuração e realização, a responsabilidade pelo ciclo de vida do produto e a ênfase em medidas preventivas (Achon 2008).

Um número incipiente de estudos avaliou a eficiência de sistemas urbanos de água e esgoto como um todo (Loubet *et al.* 2014), mas existem poucos estudos que abordam diretamente os aspectos ambientais e o controle de poluição especificamente em ETAs, sendo mais frequentes aqueles que lidam com eficiência de forma geral e os que discutem metodologias de avaliação ambiental em nível conceitual (Marques *et al.* 2015; Stanchev & Ribarova 2016). Essas abordagens apresentam dificuldades de aplicação no contexto dos países em desenvolvimento, onde os dados e os recursos financeiros são escassos. Devido às limitações encontradas na literatura disponível, há uma lacuna em termos de metodologia consolidada para avaliação ambiental de ETAs, bem como parâmetros para comparação. Marques *et al.* (2015) apontam que não existe um método consolidado para avaliar a sustentabilidade dos serviços de água, mesmo reconhecendo alguns esforços encontrados na produção acadêmica. De acordo com Stanchev & Ribarova (2016), embora a ISO 14045 padronize a avaliação da ecoeficiência, é necessário um aprimoramento da metodologia para sua aplicação bem-sucedida em sistemas urbanos de água. Metodologias de análise de sustentabilidade de sistemas urbanos de água, tais como a proposta por Marques *et al.* (2015) podem perder o foco na compreensão dos impactos ambientais de uma ETA por simplificar a avaliação da eficiência, deixando os aspectos ambientais em segundo plano. Assim, é necessário estabelecer um arcabouço mais pragmático e detalhado para avaliar os impactos ambientais das ETAs, incorporando aspectos de eficiência econômica e ferramentas regulatórias, uma vez que esses fatores são determinantes na viabilidade de ações que promovam a sustentabilidade ambiental. Embora o embasamento da análise na atual legislação federal e estadual possa, num primeiro momento, limitar o alcance dos resultados, o controle dos impactos ambientais é impulsionado principalmente pela regulação governamental (juntamente com exigências de mercado), e a contextualização regional não impede que as conclusões sejam extrapoladas para outros cenários, uma vez que os aspectos ambientais relevantes das ETA convencionais tendem a ser semelhantes.

Os objetivos principais da pesquisa foram: descrever os aspectos ambientais da operação de ETAs convencionais, definindo os respectivos critérios de avaliação; avaliar o funcionamento de ETAs de acordo com os princípios da ecoeficiência, desenvolvendo e adaptando a metodologia apropriada para o contexto de estudo. Este trabalho pode trazer contribuições em termos do estabelecimento de uma metodologia detalhada de avaliação ambiental para ETAs e da disponibilização de dados de referência para futuras pesquisas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Na primeira etapa do trabalho os principais aspectos ambientais e de eficiência no consumo de recursos relacionados ao funcionamento das ETAs e suas captações foram identificados e descritos por meio de uma revisão da literatura acadêmica disponível. Os critérios de avaliação foram definidos de forma a atingir os objetivos de ecoeficiência propostos pelo WBCSD (Lehni 2000) quanto à operação das ETAs, considerando as recomendações trazidas por ABNT (2012 e 2014), Achon (2008), Alegre *et al.* (2006) e Verfaillie *et al.* (2000), bem como o contexto da área de estudo. As seguintes características desejáveis podem ser destacadas nos indicadores: relevância e eficácia para a avaliação; possibilidade de comparação entre objetos; facilidade de medição, usando informações de baixo custo disponíveis; clareza e objetividade; capacidade de síntese.

A segunda etapa consistiu em um estudo de caso realizado como uma análise de ciclo de vida baseada na NBR ISO 14045 (ABNT 2014), sendo os sistemas de produtos avaliados três sistemas públicos de abastecimento de água localizados na bacia do rio Capivari, no Estado de São Paulo, considerando apenas as etapas de captação e tratamento de água. Assim, o produto definido foi a água potável e a unidade funcional seu volume, o que favorece a comparação entre sistemas de diferentes tamanhos. Foi utilizada uma análise parcial do ciclo de vida, uma vez que a inclusão das outras etapas do sistema de abastecimento de água, como distribuição, consumo e pós-consumo, bem como outras relacionados aos componentes do sistema, inviabilizaria uma avaliação suficientemente detalhada para permitir a compreensão dos impactos ambientais associados ao produto.

Os casos estudados foram descritos e os aspectos ambientais e de consumo de recursos analisados de acordo com os critérios definidos, com a avaliação das ecoeficiências. Para o inventário ambiental das ETAs foram utilizados dados fornecidos pelos serviços de água, as constatações de vistoriais realizadas nos locais nos meses de junho e julho de 2018, bem como as informações disponíveis nos planos municipais de saneamento e nos processos de licenciamento da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), além das fontes especificadas nos resultados. A análise foi realizada com base em dados médios atuais, de modo a obter um retrato presente da situação ambiental e da ecoeficiência das ETAs, não sendo realizada uma avaliação temporal, em virtude da falta de dados históricos consistentes. Posteriormente, foi feita uma comparação entre as ETAs considerando os resultados obtidos para os indicadores propostos, bem como um paralelo com os dados da literatura.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aspectos ambientais do tratamento de água

A seguir, é apresentada uma descrição das principais questões ambientais relacionadas à operação de ETAs obtida por meio de revisão bibliográfica. O uso de produtos químicos é necessário para a remoção de impurezas da água em processos físico-químicos em ETAs convencionais, com a demanda variando de acordo com a qualidade da água bruta (Ribeiro 2003). Os produtos químicos adicionados resultam na produção de sólidos (lodo) no final do tratamento, com a massa de polímeros e carvão ativado em pó sendo inteiramente convertida em sólidos, enquanto os coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico seguem a relação estequiométrica de 25 e 66%, respectivamente. A escolha correta do coagulante e de sua dosagem ótima, com a realização de ensaios de laboratório, contribuem para a eficiência do processo de tratamento e a minimização da geração de lodo (Reali 1999). Embora a qualidade da água do manancial seja determinante para a demanda de produtos químicos, a operação adequada com sua aplicação controlada também é um fator relevante no tratamento.

Os metais presentes na água durante o tratamento provém da água bruta e da adição de produtos químicos nas ETAs, sendo removidos pela incorporação nos flocos e posteriormente acumulados no lodo dos decantadores e na água de lavagem dos filtros. Os coagulantes de alumínio pré-polimerizados, como o cloreto de polialumínio (PAC), têm baixos teores de impurezas quando comparados ao sulfato de alumínio e resultam em níveis residuais de alumínio mais baixos na água tratada. Os sais de fosfato, como os ortopolifosfatos, atuam como agentes quelantes e são usados para controlar a concentração de íons metálicos livres na água, evitando problemas de corrosão nas redes de distribuição, porém pode haver quantidades significativas de impurezas nesses sais (Barroso 2002). O potencial poluidor dos produtos químicos em ETAs também pode estar relacionado ao transporte e ao armazenamento destes, que podem gerar grandes impactos em situações de derrames ou vazamentos (Ribeiro 2003). O emprego de produtos tais como o cloro gasoso, para os quais há risco significativo associado,

requer a existência de procedimentos de prevenção e ação emergencial em acidentes. Para avaliação do potencial incomodativo das atividades da ETA e dos riscos da utilização de produtos químicos deve ser considerada a ocupação existente na vizinhança.

Os principais resíduos gerados nas ETAs convencionais são o lodo dos decantadores, resultante da sedimentação de flocos, contendo a maior parte dos sólidos da água bruta, e a água de lavagem dos filtros, que é gerada em grande volume e tem menor teor de sólidos (Achon 2008). O lodo dos decantadores representa cerca de 0,1 a 1,5% do volume de água tratada, enquanto a água de lavagem dos filtros varia de 2 a 5% desse valor. O lodo resultante da mistura desses resíduos apresenta um teor de sólidos de 0,1 a 2%, sendo necessário reduzir seu volume por desidratação, diminuindo assim os custos de transporte e destino final, com um teor mínimo recomendado de sólidos de 25% para envio para aterros, por exemplo. As características e quantidades dos lodos gerado nas ETAs, bem como os efeitos de seu lançamento em corpos hídricos, variam em função das condições da água bruta, da dosagem e qualidade dos produtos químicos, da eficiência do tratamento e da operação da ETA (Reali 1999). Os metais podem conferir toxicidade ao lodo, resultando em restrições para sua reutilização ou disposição final. O lançamento de resíduos de ETAs em corpos hídricos contribui para o acúmulo de metais nos sedimentos, o aumento da turbidez da água e outros efeitos adversos à biota (Barroso 2002).

Um dos princípios a serem considerados na prestação de serviços de saneamento no Brasil é o controle de perdas de água, com o estímulo à racionalização do consumo pelos usuários e o fomento à eficiência energética (Brasil 2007). As perdas de águas mais significativas em ETAs são decorrentes do descarte da água de lavagem dos filtros e decantadores, havendo ainda o uso nos demais processos e utilidades, as perdas em vazamentos nas tubulações e estruturas e o extravasamento em canais e tanques subdimensionados ou mal operados. As perdas podem ser minimizadas com o devido controle operacional da adição de produtos químicos e das etapas de coagulação e floculação, visto que a má formação dos flocos ocasiona na redução das carreiras de filtração, aumentando o número de lavagens necessário e o volume de água consumido (Conejo *et al.* 1999). A recuperação de águas de lavagem é uma alternativa para o aumento da produção de água tratada, o que é relevante em regiões com escassez de mananciais em termos quantitativos e qualitativos, onde pode ser necessária a captação em locais distantes dos centros consumidores ou em corpos hídricos com qualidade comprometida (Ribeiro 2003). Sendo o bombeamento o principal fator de consumo de energia nas ETAs, a diminuição das perdas de água também reflete no consumo energético, pois reduz a demanda pela adução de água bruta desde a captação (Tsutiya 2006).

O consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água é significativo, sendo função da topografia e das distâncias de captação e distribuição, podendo a implantação de automação gerar uma economia de até 25% (Ribeiro 2003; Tsutiya 2006). Em 2003 foi instituído pela Eletrobras (2019) o PROCEL SANEAR – Programa de Eficiência Energética em Saneamento Ambiental, com objetivo de promover o uso eficiente de energia elétrica e água em sistemas de saneamento, incentivar o uso racional dos recursos hídricos e contribuir para a universalização dos serviços de saneamento, por meio da redução dos seus custos, tendo sido estabelecida a meta inicial de redução de 20% no consumo de energia. Amores *et al.* (2013) consideram o consumo de energia no bombeamento como o principal fator de impacto ambiental dos sistemas de abastecimento de água, embora isso dependa da fonte de eletricidade. Aspectos como a emissão de gases de efeito estufa não foram considerados, pois no contexto da presente pesquisa estes não seriam significativos sendo a energia de origem hidrelétrica.

A previsão de procedimentos de emergência é necessária para que seja evitada a captação de água contaminada em casos de comprometimento da qualidade do manancial ou o lançamento de poluentes no ambiente quando da falha dos sistemas de controle. A proteção dos

mananciais de captação, seja com restrições de uso e ocupação do solo na bacia ou com barreiras físicas nas imediações, contribui para a melhoria da qualidade da água a ser tratada, reduzindo assim o consumo de produtos químicos e energia elétrica, bem como a geração de resíduos. Os critérios de avaliação selecionados para abordar os aspectos ambientais apontados, bem como os descritores de caracterização relevantes, são apresentados juntamente na próxima seção.

Avaliação ambiental e da ecoeficiência das ETAs

As ETAs estudadas operam com captações superficiais, sendo a ETA 1 localizada mais à montante na bacia e a ETA 3 mais à jusante. A Tabela 1 apresenta a descrição geral dos objetos de estudo. Com relação às vazões operacionais, há condições de sobrecarga na ETA 2 e as vazões máximas atuais das ETAs 1 e 3 já atingiram 90% da capacidade instalada. A operação em vazões superiores às projetadas pode prejudicar a eficiência da ETA e dos sistemas de controle de poluição existentes, exigindo ampliações. Para a ETA 2 há previsão de redução de sua vazão no curto prazo, uma vez que uma nova ETA está sendo implementada para atender parte de sua demanda. Deve-se notar que para a ETA 1 a vazão máxima de captação atual é maior que a outorgada pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE), o que pode resultar em impactos na disponibilidade de água à jusante.

Tabela 1 - Descrição geral

Característica	1	2	3
Início das atividades	2016	1967	1988
Ampliações (ano)	NA ¹	1990 e 2013	2017 e 2018
Vazão máxima projetada (L/s)	220	161	380
Vazão média atual (L/s)	120	181	200
Vazão máxima atual (L/s)	200	206	360
Vazão de captação outorgada (L/s)	113 ²	259,7 a 287,5 (sazonal) ²	400 ²
População atendida (hab)	43.174 ³	56.130 ³	85.000
População máxima projetada (hab)	57.417	40.462	89.722
População do município (hab)	47.236 ⁴	76.178 ⁴	1.167.192 ⁴
Área do terreno (m ²)	8.500	7.361	20.861
Área construída (m ²)	1.488	2.606	8.760

1 – Não se aplica. 2 – Fonte: DAEE (2019). 3 - Fonte: Brasil (2019). 4 - Fonte: Fundação Seade (2019).

A concepção de tratamento das três ETAs estudadas é a convencional, havendo entre elas diferenças em etapas específicas do tratamento. Em todas são utilizados floculadores com agitação mecânica e filtros rápidos com dupla camada (areia e antracito), sendo realizada a fluoretação com ácido fluossilícico. Na ETA 1 o coagulante utilizado é o sulfato de alumínio ferroso, sendo realizada pré-cloração com hipoclorito de sódio visando à oxidação da matéria orgânica e a remoção de metais, o que, segundo informado, diminui a geração de lodo e melhora a vida útil do decantador, que é do tipo lamelar (alta taxa). A eventual correção do pH é realizada com aplicação de hidróxido de sódio. Para desinfecção é utilizado hipoclorito de sódio, havendo ainda aplicação de ortopolifosfato na água tratada para remoção de Fe e Mn. A ETA 2 utiliza PAC como coagulante e decantadores simples, havendo correção do pH com cal quando necessário. A desinfecção é feita com cloro gasoso, sendo que posteriormente há aplicação de ortopolifosfato. Na ETA 3 há pré-cloração com cloro gasoso, com o objetivo de oxidar a amônia, a matéria orgânica e os metais (principalmente Fe e Mn), seguida pela pré-alcalinização com cal hidratada para corrigir a acidificação provocada pelo cloro. Na sequência há adição do coagulante PAC e de carvão ativado em pó (remoção de odor e sabor). São utilizados decantadores de alta taxa com placas paralelas. Para desinfecção é aplicado cloro

gasoso, seguido pelo hidróxido de amônio, visando à formação de cloro combinado para garantir o residual necessário na rede de distribuição.

Para as ETAs 1 e 3 há controle da qualidade dos produtos químicos utilizados, com a análise realizada pelo fornecedor na ETA 1 e a avaliação no local na ETA 3. O procedimento adotado na ETA 3 é recomendável por permitir um controle mais rigoroso da presença de contaminantes e dos teores mínimos das substâncias de interesse. A automatização da aplicação e a realização de testes para dosagem, conforme ocorre na ETA 1, evitam o consumo excessivo de produtos químicos, bem como os custos e demais aspectos negativos decorrentes. Para a ETA 2 não foram obtidas informações relativas ao controle de qualidade e à dosagem dos produtos químicos, sendo que a aplicação não é automatizada. Na ETA 3 também não há automatização, com a dosagem dos produtos sendo determinada com base nos residuais. Em estudo realizado por Parsekian (1998) foi verificado que em 56% das ETAs avaliadas é realizado controle da qualidade dos produtos químicos, 27% controlam a dosagem de coagulante com a realização de ensaios, 45% usam tabelas baseadas em resultados de ensaios antigos e o restante realiza o controle visual ou com base na experiência do operador.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da ecoeficiência em relação ao consumo de produtos químicos. Em nenhuma das captações de água das ETAs avaliadas é realizada aplicação de algicidas ou outros produtos químicos nos mananciais. O emprego de diferentes produtos químicos em cada uma das ETAs, bem como variações nas concepções de tratamento, dificultaram a comparação dos dados de ecoeficiência. Para o ácido fluossilícico, único caso em que foi possível a comparação direta, verificou-se resultados semelhantes para o consumo do produto, o que possivelmente se deve ao fato de a dosagem não depender da qualidade da água afluyente à ETA ou das tecnologias de tratamento. Os maiores consumos de coagulante (PAC) e de cloro na ETA 3 em comparação com a ETA 2 podem decorrer da pior qualidade da água do manancial, embora a realização de pré-cloração na ETA 3 limite a comparação. Foi verificado consumo de ortopolifosfato de sódio aproximadamente 8 vezes superior na ETA 1 em comparação com a ETA 2, porém nesse caso é recomendável uma reavaliação dos valores informados, visto que é improvável que para uma ETA que trata água bruta de melhor qualidade e realiza pré-cloração a demanda por remoção de metais seja maior. Não foram informados os consumos de polímeros nas ETAs.

Tabela 2 - Ecoeficiência em relação ao consumo de produtos químicos

Água produzida por consumo médio de produtos químicos (m ³ /kg)	1	2	3
Hidróxido de amônio	NA ¹	NA ¹	162,92
PAC	NA ¹	16,27	7,28
Cal hidratada	NA ¹	NI ²	18,08
Cloro gasoso	NA ¹	296,64	19,85
Carvão ativado em pó	NA ¹	NA ¹	99,85
Ácido fluossilícico	270,86	284,77	305,84
Hipoclorito de sódio	34,04	NA ¹	NA ¹
Ortopolifosfato de sódio	123,86	949,23	NA ¹
Hidróxido de sódio	66,39	NA ¹	NA ¹
Sulfato de alumínio ferroso	12,45	NA ¹	NA ¹

1 – Não se aplica. 2 – Não informado.

Parsekian (1998) obteve valores médios de produção de água por consumo de produtos químicos iguais a 20,72 m³/kg para coagulantes (não especificados), 277,01 m³/kg para cloro e 46,86 m³/kg para cal. No caso dos coagulantes o consumo informado pela autora é da mesma ordem de grandeza dos verificados no presente trabalho, porém a comparação é prejudicada pela diferença entre os tipos de coagulantes usados em cada ETA. Em relação aos demais resultados obtidos pela autora, tem-se que o consumo de cloro foi semelhante ao verificado na ETA 2, enquanto que o de cal representa um terço do informado para a ETA 3, que tem maior

demanda por neutralização da água em função da pré-cloração. Amores *et al.* (2013) reportaram uma produção de água por consumo de cloro de 432,90 m³/kg, mas os autores não especificaram se havia a utilização de outras substâncias na desinfecção.

Constam na Tabela 3 os resultados da avaliação das perdas de água. Nas ETAs avaliadas é utilizada água tratada para lavagem dos decantadores e filtros, com exceção da ETA 3, que também utiliza água filtrada nos filtros. Para as ETAs 1 e 3 foram verificados consumos de água semelhantes na lavagem dos decantadores, que segue procedimentos análogos. As ETAs 1 e 3, que realizam a pré-cloração, apresentaram durações superiores das carreiras de filtração, sendo que na ETA 1 o valor chega a ser três vezes maior, o que possivelmente é consequência da melhor qualidade da água captada. Em relação à lavagem dos filtros, o consumo da ETA 1 é significativamente menor, o que pode ter sido propiciado pelo uso conjunto de ar na lavagem. A fração total de água consumida na ETA 3 se aproxima do valor usual de 5% citado por Barroso (2002), sendo o resultado da ETA 1 inferior a 1%. As águas de descarga e lavagem dos decantadores e filtros são tratadas ou retornam ao início do processo, exceto na ETA 3, onde a água de lavagem dos filtros é lançada no curso d'água, enquanto seria preferível seu tratamento e reutilização, promovendo economia de água. Nas vistorias realizadas não foram observados extravasamentos significativos, não sendo possível a avaliação de perdas decorrentes de vazamentos, para as quais as medidas de controle seriam as manutenções das instalações.

Tabela 3 - Perdas de água

Característica	1	2	3
Origem da água de lavagem dos decantadores	Tratada	Tratada	Tratada
Procedimento de limpeza dos decantadores	Jateamento com água	NI ¹	Jateamento com água
Período entre as lavagens dos decantadores (d)	30	NI ¹	30
Fração da água tratada consumida na lavagem dos decantadores (%)	0,23	NI ¹	0,29
Destino da água de descarga e lavagem dos decantadores	Tratamento externo	Tratamento de lodo	Tratamento de lodo
Origem da água de lavagem dos filtros	Tratada	Tratada	Tratada (superficial) e filtrada (retrolavagem)
Procedimento de limpeza dos filtros	Retrolavagem automatizada com ar e água	NI ¹	Retrolavagem automatizada com água
Duração das carreiras de filtração (h)	96 (estiagem)/48 (chuva)	24	35
Fração da água tratada consumida na lavagem dos filtros (%)	0,24 (estiagem)/0,48 (chuva)	NI ¹	4,76 ²
Destino da água de lavagem dos filtros	Lançamento em curso d'água	Decantação e retorno ao início do tratamento	Tratamento de lodo

1 – Não informado. 2 - No cálculo a água filtrada consumida foi considerada como água tratada.

A Tabela 4 apresenta os resultados relativos à geração de resíduos, ao consumo de energia e aos aspectos econômicos e ambientais. Para as ETAs 2 e 3 foram obtidos resultados semelhantes para a ecoeficiência relativa à geração de lodo seco. Segundo Reali (1999) essa relação vai de 56 a 83 m³/kg para ETAs que tratam água de reservatório com boa qualidade, e de 19 a 24 m³/kg quando a captação se dá em rios com qualidade comprometida. Barroso (2002) obteve resultado médio de 45 m³/kg e Amores *et al.* (2013) 24,45 m³/kg para o mesmo cálculo de ecoeficiência. A discrepância entre os valores encontrados na literatura e os obtidos para as ETAs 2 e 3 pode ser função de diferença no teor de sólidos do lodo, que pode levar a uma superestimativa da geração de lodo. Nas ETAs 2 e 3 é realizado tratamento do lodo para

posterior destinação a aterro externo, com retorno da água recuperada ao início do tratamento, enquanto na ETA 1 o lodo é destinado diretamente para tratamento externo. Os dados de composição química dos lodos das ETAs 2 e 3 não indicaram presença significativa de metais e outras substâncias de interesse ambiental. Em estudos realizados por Oliveira & Rondon (2016), Achon *et al.* (2013) e Achon & Cordeiro (2015) os autores verificaram que a maior parte das ETAs avaliadas lançam o lodo em cursos d'água sem tratamento prévio, sendo que no restante das ETAs a destinação mais frequente é o envio para aterros após tratamento.

Tabela 4 - Geração de resíduos, consumo de energia e aspectos econômicos e ambientais

Característica	1	2	3
Tipo de tratamento de lodo	Sem tratamento	Adensamento com polímero e desaguamento em centrífuga	Condicionamento com polímero e desaguamento em <i>bags</i>
Água produzida por geração média de lodo seco (m ³ /kg)	NI ¹	2,48	2,59
Recuperação da água do lodo (%)	0	NI ¹	22
Destino da água recuperada do lodo	NA ²	Início do tratamento	Início do tratamento
Destino final do lodo	Estação de tratamento de esgoto externa	Aterro externo	Aterro externo
Distância entre as captações e a ETA (km)	0/1,5	5/3,4/3,5	0
Água produzida por energia consumida na adução da captação (m ³ /kWh)	1,81	NI ¹	NI ¹
Água produzida por energia consumida no tratamento (m ³ /kWh)	1,57	NI ¹	NI ¹
Água produzida por custo de captação e tratamento (m ³ /R\$)	0,35	NI ¹	0,59
Fração do custo operacional referente aos produtos químicos (%)	4	NI ¹	26
Fração do custo operacional referente à energia elétrica (%)	31	20	14
Uso do solo na vizinhança	Rodovia, residências, serviços e vegetação	Residências e serviços	Rodovia e vegetação
Armazenamento de produtos com risco significativo		Não	Sim, com gerenciamento de risco
Existência de procedimento para situações de emergência		Não	Sim
Existência de restrições de uso e ocupação do solo na bacia	Áreas de proteção e recuperação de mananciais	Zonas de conservação ambiental	Área rural sem restrições específicas
Medidas para proteção do manancial na captação	Vegetação ciliar (parcial)	Vegetação ciliar (parcial)	Vegetação ciliar

1 – Não informado. 2 – Não se aplica.

A dependência da posição geográfica da ETA em relação à captação dificulta a definição de valores de referência para o consumo de energia elétrica, que pode computar ou não a captação e a distribuição (Ribeiro 2003). Os resultados de produção de água por consumo de energia no tratamento encontrados na literatura foram 3,85±4,76 m³/kWh (Loubet *et al.* 2014), 14,08 m³/kWh (Amores *et al.* 2013), 4,76 m³/kWh incluindo a captação (Parsekian 1998), 1,67 m³/kWh somando a captação e a distribuição (Tsutiya 2006), e 3,40 m³/kWh somente para a

captação (Amores *et al.* 2013). Em todos os casos a ecoeficiência foi superior à calculada para a ETA 1, o que pode resultar de diferenças entre as tecnologias de tratamento, de demandas de bombeamento ou da qualidade da água bruta. A fração do custo operacional correspondente aos produtos químicos é maior na ETA 3 do que na ETA 1, o que já é um resultado esperado, visto que a água captada na ETA 3 é de pior qualidade. A porção referente à energia elétrica nos custos da ETA 1 é a maior entre os três casos de estudo, embora conforme Tsutiya (2006) fosse esperado que a automatização resultasse em redução do consumo. Já na comparação entre as ETAs 2 e 3, a fração maior referente à energia na ETA 2 pode ser decorrente da captação, que é realizada em vários locais e com distâncias maiores. Para uma ETA com vazão nominal de 33 m³/s Tsutiya (2006) relatou as frações de custo de 49,5% para produtos químicos e 8,2% para energia elétrica, o que diverge dos resultados das ETAs estudadas, que são de menor porte.

Para as ETAs avaliadas que usam cloro gasoso (2 e 3) foi verificada gestão de riscos adequada na utilização de produtos químicos. Com base nas vistorias realizadas e no histórico dos processos de licenciamento da CETESB, verificou-se que as ETAs não apresentam potencial incomodativo à população vizinha em termos de emissões de ruídos e odores. Para as ETAs 2 e 3 foram estabelecidos procedimentos de emergência, ainda que estes sejam simplificados. Embora para a ETA 1 não haja esse recurso, a operação automatizada (presente somente nesta ETA) pode agilizar a resposta em situações emergenciais. Nos casos em análise não foi verificada a existência de gerador ou outro sistema de emergência para casos de falta de energia. Para as três ETAs há condições que favorecem a proteção dos mananciais, ainda que para as ETAs 1 e 2 seja recomendável o adensamento da vegetação existente e/ou a implantação de outros tipos de barreiras complementares nos mananciais inseridos em áreas urbanas, de modo a atender à NBR ISO 24512 (ABNT 2012).

CONCLUSÃO

A revisão de literatura e a base metodológica fornecida pela NBR ISO 14045 permitiram estabelecer um arcabouço para uma avaliação ambiental e de consumo de recursos detalhada das ETAs consistente com o contexto de países em desenvolvimento como o Brasil, possibilitando o cálculo de parâmetros de ecoeficiência. A adequação ambiental das ETAs foi verificada no aspecto de maior relevância, que é o tratamento e destinação do lodo gerado, enquanto os relatos da literatura indicam a destinação inadequada de resíduos na maioria das ETAs reportadas. Os avanços ambientais observados podem ser consequências da exigência legal de licenciamento das ETAs, bem como da crescente percepção das ETAs como fontes de poluição, o que pôde ser verificado na literatura. Como também apontado por Ribeiro (2003), após superar as demandas básicas relacionadas ao tratamento e destinação de lodo, os serviços de água também devem buscar outras melhorias ambientais, como a recuperação de água e novas alternativas de destinação ou a reutilização do lodo.

A obtenção de dados junto aos serviços de água se mostrou uma das principais dificuldades na realização do trabalho, pois o controle de muitos dos parâmetros avaliados não faz parte da rotina dessas entidades, havendo ainda entraves na disponibilização de dados existentes, problemas também relatados por Achon (2008), Achon *et al.* (2013), Parsekian (1998) e Oliveira & Rondon (2016), indicando a necessidade de melhoria do conhecimento dos sistemas de tratamento de água para que possa haver avanços na pesquisa em ecoeficiência. Em relação aos dados fornecidos é necessário avaliar sua consistência, pois podem ter sido determinados por diferentes metodologias ou até por estimativas. A falta de dados operacionais, juntamente com as diferenças entre as concepções das ETAs, dificultam a comparação direta entre as suas ecoeficiências. Em trabalhos futuros em que haja maior disponibilidade e confiabilidade dos dados, os autores recomendam a avaliação de metodologias para agregação

dos resultados de ecoeficiência que permitam a comparação e a classificação mais claras das ETAs, fornecendo dados mais abrangentes e conclusivos para o governo e o público.

REFERÊNCIAS

- ABNT (2012) NBR ISO 24512: Atividades relacionadas aos serviços de água potável e de esgoto - Diretrizes para a gestão dos prestadores de serviços de água e para a avaliação dos serviços de água potável. Rio de Janeiro: ABNT. 61 p.
- ABNT (2014) NBR ISO 14045: Gestão ambiental - Avaliação da ecoeficiência de sistemas de produto - Princípios, requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT. 41 p.
- Achon, CL (2008) Ecoeficiência de sistemas de tratamento de água à luz dos conceitos da ISO 14.001. Tese de doutorado em engenharia hidráulica e saneamento. Universidade de São Paulo. São Carlos.
- Achon CL, Barroso MM, Cordeiro JS (2013) Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro. *Engenharia Sanitária e Ambiental* 18(2): 115-122.
- Achon CL, Cordeiro JS (2015) Destinação e disposição final de lodo gerado em ETA – Lei 12.305/2010. In: Assembleia nacional da ASSEMAE, 45., Poços de Caldas. Anais eletrônicos... Brasília: ASSEMAE.
- Alegre H, Baptista JM, Cabrera Jr. E, Cubillo F, Duarte P, Hirner W, Merkel W, Parena R (2006) Performance indicators for water supply services. Londres: IWA Publishing. 289 p.
- Amores MJ, Meneses M, Pasqualino J, Antón A, Castells F (2013) Environmental assessment of urban water cycle on Mediterranean conditions by LCA approach. *Journal of Cleaner Production* 43: 84-92.
- Barroso, MM (2002). Problemática dos metais e sólidos no tratamento de água (estação convencional de ciclo completo) e nos resíduos gerados. Dissertação de mestrado em engenharia hidráulica e saneamento. Universidade de São Paulo. São Carlos.
- Brasil (2007) Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Brasília: Presidência da República.
- Brasil (2019). Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Brasília: Ministério das Cidades.
- Conejo JGL, Lopes ARG, Marcka E (1999) Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água: documento técnico de apoio C1: recomendações gerais e normas de referência para controle de perdas nos sistemas públicos de abastecimento do programa. Brasília: Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano. 30 p.
- DAEE (2019) Relatório de Recursos Hídricos cadastrados e outorgados pelo DAEE. São Paulo: DAEE.
- Eletrobras (2019) PROCEL SANEAR - Eficiência Energética no Saneamento Ambiental. Brasília: Eletrobras.
- Fundação SEADE (2019). Perfil dos Municípios Paulistas. São Paulo: Fundação SEADE.
- Ginley J, Ralston SA (2010) A conversation with water utility managers. *Journal AWWA* 102(5): 117-122.
- Lehni M (2000) Eco-efficiency: creating more with less impact. Genebra: WBCSD. 32 p.
- Loubet P, Roux P, Loiseau E, Bellon-Maurel V (2014) Life cycle assessments of urban water systems: a comparative analysis of selected peer-reviewed literature. *Water Research* 67: 187-202.
- Marques RC, Cruz NF, Pires J (2015). Measuring the sustainability of urban water services. *Environmental Science & Policy* 54: 142-151.
- Oliveira IYQ, Rondon OC (2016) Diagnóstico da gestão de lodo de estação de tratamento de água em Mato Grosso do Sul. *Interações* 17(4): 687-698.
- Parsekian, MPS (1998) Análise e proposta de formas de gerenciamento de estações de tratamento de águas de abastecimento completo em cidades de porte médio do estado de São Paulo. Dissertação de mestrado em engenharia hidráulica e saneamento. Universidade de São Paulo. São Carlos.
- Reali MAP (1999) Principais características quantitativas e qualitativas do lodo das ETAs. In: Reali MAP, Editor. Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água. Rio de Janeiro: ABES. pp. 21.
- Ribeiro HKSS (2003) Avaliação de desempenho ambiental em estações de tratamento de água. Dissertação de mestrado em tecnologia ambiental e recursos hídricos. Universidade de Brasília. Brasília.
- Stanchev P, Ribarova I (2016) Complexity, assumptions and solutions for eco-efficiency assessment of urban water systems. *Journal of Cleaner Production* 138: 229-236.
- Tsutiya MT (2006) Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. São Paulo: ABES. 376 p.
- Verfaillie, HA, R Bidwell, R Cowe (2000). Measuring eco-efficiency: a guide to reporting company performance. London: WBCSD.