

Proposição de sistema de indicadores de desempenho operacional de estações de tratamento de água à luz do prestador de serviço: aplicação a cinco estações de ciclo completo

Proposition of operational performance indicators system applied for water treatment plants focusing on service provider: application for five conventional water treatment plants

Luciano Gomes Pereira¹ , Gilmore Antônia da Silva¹ , Marcelo Libânio^{2*} 

RESUMO

O principal objetivo desta pesquisa consistiu em desenvolver e aplicar um sistema de indicadores de desempenho direcionado a estações convencionais de tratamento de água com base na visão do prestador de serviço. A metodologia abrangeu três etapas principais: (i) definição dos indicadores e justificativa; (ii) formulação e aplicação do sistema de indicadores a um conjunto de cinco estações de pequeno porte (vazões nominais de 20 a 60 L.s⁻¹) operadas pelo mesmo prestador; (iii) análise estatística a partir dos resultados de cálculo dos indicadores visando identificar eventuais sobreposições. O sistema proposto abarcou 13 indicadores de desempenho, calcados em parâmetros comumente inseridos na rotina operacional das estações de tratamento brasileiras.

Palavras-chave: indicadores de desempenho; avaliação de estações de tratamento de água; tratamento de água.

ABSTRACT

The main objective of this research was to develop and apply a performance indicator system focusing on conventional water treatment plants, based on the service provider's point of view. The methodology comprised three principal steps: (i) definition of indicators and justification; (ii) development and application of the indicator system to five small plants (flow rate from 20 to 60 L.s⁻¹) operated for same provider; (iii) statistical analysis of the results, aiming to identify overlapping among the proposed performance indicators. The system comprised 13 performance indicators whose application is based on parameters usually monitored in the vast majority of Brazilian plants.

Keywords: performance indicators; water treatment plant evaluation; water treatment.

INTRODUÇÃO E RELEVÂNCIA

O desempenho de estações de tratamento de água deve ser avaliado segundo três premissas que se inter-relacionam — robustez, resiliência e confiabilidade — pelo maior período de tempo possível. A primeira pode ser definida como a capacidade da estação de manter a produção de água tratada com qualidade estável, independente das variações que possam ocorrer nas características da água bruta. Já a resiliência expressa a velocidade com que a estação retorna ao seu desempenho normal após algum distúrbio, geralmente causado pela deterioração da qualidade da água bruta ou por problemas operacionais, como interrupção da adição de coagulante. Por fim, a análise de confiabilidade avalia a probabilidade

de que a estação atinja as metas de qualidade em determinado período de tempo, metas impostas pela legislação vigente ou definidas pelo próprio prestador de serviço de abastecimento de água (ZHANG *et al.*, 2012).

Diversos fatores intervêm no desempenho das estações de tratamento de água, destacando-se as características da água bruta, os parâmetros hidráulicos relacionados aos processos e às operações unitárias inerentes à potabilização, a acurácia na dosagem de produtos químicos e as mencionadas metas de qualidade da água tratada. Entretanto, a avaliação do desempenho das estações pelos prestadores tem comumente ocorrido de forma reducionista, restringindo-se quase que tão somente ao atendimento dos padrões estabelecidos pela Portaria

¹Universidade Federal de Ouro Preto - Ouro Preto (MG), Brasil.

²Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte (MG), Brasil.

*Autor correspondente: marcelo.libanio@gmail.com

Recebido: 06/09/2016 - Aceito: 04/09/2017 - Reg. ABES: 168875

nº 2.914 (BRASIL, 2011). Nesse viés, emergem o desenvolvimento e a aplicação de indicadores de desempenho a fim de tornar o monitoramento das estações e a avaliação de desempenho mais abrangente e objetiva, contemplando ampla gama de fatores.

Provavelmente, a forma mais inteligível de conceituar os indicadores consiste em defini-los como variáveis aptas a sintetizar informações relevantes, comumente em um número, descrevendo o estado de um fenômeno ou de um ambiente no qual tais informações se inserem. Interessante salientar que, frequentemente, indicadores qualitativos acabam por se tornar a conversão de indicadores e/ou variáveis quantitativas.

Especificamente direcionado à avaliação de estação de tratamento em Taipei (Taiwan), a partir de 7 critérios delinear-se 20 indicadores de desempenho. Os critérios, e respectivo número de indicadores, contemplados foram proteção de manancial (6), qualidade de água tratada (3), modificação na estação (3), produção de água (2), redução de custos com produtos químicos (2), disponibilidade de equipamentos (2) e minimização de resíduos (2). Os autores concluíram sobre as parcelas que compõem a eficiência e eficácia da estação de tratamento dividindo sua perspectiva de análise entre objetivos econômicos e efetivos com relação ao enquadramento dos resultados de turbidez da água tratada, porém não discutiram a qualidade da água no decorrer do processo de tratamento. Os elementos fundamentais da proposta para avaliação de desempenho foram os custos e a turbidez da água tratada, intrínsecos aos indicadores propostos na pesquisa (CHANG *et al.*, 2007).

Em contexto mais abrangente, associações nacionais e internacionais têm proposto indicadores de desempenho aplicáveis aos sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário. Adquirem posição de relevo os indicadores propostos pelos pesquisadores do Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal em conjunto com a International Water Association. Eles desenvolveram 77 indicadores, distribuídos em 6 temas (VIEIRA *et al.*, 2008):

1. qualidade da água tratada (8);
2. eficiência e confiabilidade da estação de tratamento (35);
3. aplicação racional dos recursos naturais e materiais disponíveis, tais como água, energia elétrica, produtos químicos, entre outros (7);
4. gerenciamento dos subprodutos e resíduos gerados na potabilização (7);
5. uso racional dos recursos humanos, econômicos e tecnológicos disponíveis (17);
6. segurança (3).

A despeito da mais complexa aplicabilidade pelo elevado número de indicadores, o emprego deles para uma mesma estação de tratamento ao longo do tempo certamente permite identificar as consequências dos investimentos do prestador em termos, por exemplo, de infraestrutura e treinamento de pessoal.

A aplicação dos citados indicadores de desempenho a duas estações convencionais de tratamento de médio e grande porte em Portugal, que apresentam variabilidade quanto às características do afluente e à vazão afluente — em função da demanda dos respectivos sistemas de abastecimento —, pautou-se em relação à qualidade do efluente (i) e à eficiência da estação (ii), ambos vinculados às condições de operação. Para tal, foram estabelecidos, para cada indicador, intervalos de eficiência variando quase que linearmente de 0 a 300. Por exemplo, em termos de determinado contaminante (de um total de 70), o valor nulo remete ao fato de a estação não cumprir qualquer papel na sua remoção. Quanto ao desempenho da estação, atribuíram-se os seguintes valores: 100, para o mínimo aceitável; de 100 a 200, para aceitável; de 200 a 300, para bom; e 300, para excelente — valor igual ou inferior ao limite de quantificação de cada contaminante. Adotou-se decréscimo linear de 300 até 100. Especificamente para turbidez efluente, o valor limite (eficiência igual a 100) adotado é 1,0 uT, para limite de quantificação de 0,1 uT.

Desta forma, a partir dos registros de 2001 a 2007 de turbidez efluente, elaboraram-se gráficos de barras nos quais foi possível identificar a coincidência dos períodos de menor desempenho das estações com o início de operação ou com a afluência de água subterrânea decorrente de estiagem mais severa (VIEIRA *et al.*, 2010).

Mantendo-se os mesmos 6 tópicos listados e ampliando para 95 o número de indicadores de desempenho, os relacionados ao item (ii) passaram a ser 48; essa metodologia foi aplicada a 10 estações de tratamento portuguesas, cujas vazões afluentes variaram de 35 L.s⁻¹ a 4,6 m³.s⁻¹, com informações referentes ao período de 2006 a 2009. Embora na pesquisa não haja alusão às características da água bruta, a eficiência da estação de tratamento na produção de efluente de qualidade balizou-se nas concentrações de cloro residual — que, para algumas estações, superaram o máximo preconizado em Portugal (1,0 mg.L⁻¹) — e de trihalometanos e nas análises microbiológicas dos organismos indicadores.

Para cada indicador e cada ano amostrado, foram determinados o primeiro e o terceiro quartis, a mediana, a média aritmética e os valores máximo e mínimo. Concluiu-se que a relevância de cada indicador se vincula ao objetivo delineado, e os resultados preliminares confirmaram adequação da aplicabilidade do grupo de indicadores como ferramenta para contínuo aumento do desempenho das estações de tratamento (SILVA *et al.*, 2011).

No Brasil, iniciativas similares especificamente direcionadas à potabilização são ainda incipientes, usualmente restritas à predição da turbidez da água decantada para dada estação de tratamento. As alternativas aplicadas recaem para a expedita avaliação da eventual correlação entre a turbidez da água bruta ou do afluente aos filtros em relação à turbidez do efluente filtrado. Operação adequada e/ou adequação da tecnologia às características da água bruta aponta(m) para baixos

coeficientes de determinação (R^2) entre esses parâmetros, indicativo da salientada robustez da estação de tratamento.

Um dos esforços mais abrangentes consistiu na proposição de sistema de indicadores de desempenho de estações de tratamento de água sob a perspectiva das agências reguladoras. O sistema proposto exibiu 19 indicadores de desempenho, contemplando temas relacionados à saúde pública (17), à infraestrutura (1) e à economia (1). Como seria de se esperar, parcela significativa dos indicadores propostos vinculava-se aos requisitos de qualidade do efluente, consoante às premissas da Portaria nº 2.914 (BRASIL, 2011). Os dois indicadores de infraestrutura e economia prendiam-se à capacidade hidráulica da estação, como indicador da sobrecarga, e ao custo unitário da potabilização.

O sistema foi aplicado a seis estações de tratamento com distintas tecnologias de potabilização, vazões médias afluentes de $33 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ a $4,4 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ e dados operacionais referentes ao período de 2001 a 2012. Evidenciaram-se diferenças estaticamente significativas entre as estações para 13 indicadores — principalmente os vinculados à turbidez do efluente — e tendência, ao longo do período amostrado, de redução do custo unitário do tratamento, principalmente para as unidades de maior porte (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

A ausência de programas de avaliação sistemática de desempenho nas estações brasileiras — transcendendo o atendimento ao padrão de potabilidade — pode ser explicada pela premência da redução dos elevados índices de perdas para a quase totalidade dos sistemas de abastecimento de água do país. Tal tem relegado comumente a segundo plano a avaliação de eficiência das estações de tratamento nas ações de gerenciamento.

Por fim, a definição por indicadores de desempenho direcionados à operação de estações convencionais de tratamento de água se justificou inicialmente pela prevalência dessa tecnologia de potabilização no Brasil. Da vazão distribuída estimada à população abastecida brasileira, aproximadamente 69% advém de estações convencionais de tratamento — também denominadas de ciclo completo. Em 2008, tais estações faziam-se presentes em 2.817 dos 5.531 municípios brasileiros (IBGE, 2008), podendo-se estimar em mais de cinco mil unidades em operação no Brasil.

Em segunda vertente, a aplicação dos indicadores de desempenho respalda-se também na significativa relevância das companhias estaduais de saneamento como prestadoras dos serviços de abastecimento de água no país. De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, com representatividade amostral de 98% dos sistemas de abastecimento de água, as companhias estaduais respondem pelo atendimento a 78% dos municípios, abrangendo 74% da população brasileira (SNIS, 2014). Eventual aplicação ao conjunto de unidades de tratamento de determinado estado identificará com maior precisão as estações cujas ampliações e melhorias operacionais tornam-se mais prementes.

Nesse cenário, o objetivo principal da pesquisa consistiu na proposição de sistema de indicadores de desempenho operacional de estações convencionais de tratamento de água sob a ótica do prestador de serviço. Adicionalmente, a pesquisa intentou também identificar eventuais sobreposições entre os indicadores propostos.

METODOLOGIA

Definição dos indicadores de desempenho

Aliado à relevância estrita ao desempenho das estações de tratamento, a definição dos indicadores prendeu-se à qualidade do efluente, consoante à mencionada Portaria nº 2.914 (BRASIL, 2011), e aos parâmetros usuais de operação monitorados na significativa maioria das estações brasileiras. Sob esse prisma, o sistema de indicadores de desempenho proposto intentou contemplar as três etapas do tratamento convencional, abrangendo também o princípio de múltiplas barreiras — clarificação, filtração e desinfecção —, e os principais requisitos de qualidade da água tratada. Essa lógica pautou-se na relevância do prestador de serviço de conhecer o desempenho de cada uma das etapas integrantes de determinada estação de tratamento, a fim de identificar eventuais falhas e sobrecargas.

As possibilidades de definição de indicadores com essa finalidade podem ser diversas e, nesse caso, estabeleceu-se, de forma parcimoniosa, número de indicadores com base no conhecimento sobre a operação de estações convencionais de tratamento de água. Inicialmente, estabeleceu-se que os indicadores propostos não contemplariam aspectos econômicos ou ambientais, mas seriam verificadores da tratabilidade do afluente às estações e, por consequência, do atendimento aos padrões de potabilidade ou às metas de qualidade mais acuradas estabelecidas pelos próprios prestadores.

Nesse contexto, as diferenças entre as características das águas bruta, decantada e tratada, entre a vazão de operação (Q_o) e a vazão nominal (Q_n), entre o gasto de água de lavagem requerido e o verificado, além dos percentuais de atendimento aos padrões legais, constituíram informações operacionais essenciais para a definição dos indicadores de desempenho. Para alguns dos indicadores propostos, optou-se pela alusão à mediana como medida de tendência central por ser menos influenciada por valores extremos. Após a elaboração do sistema de indicadores, avaliou-se a interface com outros indicadores de desempenho elencados na literatura.

Aplicação do sistema de indicadores e análise dos dados operacionais das estações

O sistema de indicadores de desempenho proposto foi aplicado a cinco estações convencionais de pequeno porte operadas pelo mesmo prestador, construídas em concreto ou em polietileno com fibra de vidro.

Tais unidades potabilizam vazões médias de 20 a 60 L.s⁻¹, respondendo pelo abastecimento de população da ordem de 8.500 a 26 mil pessoas, respectivamente, operando durante 24 horas diárias. As principais características das estações para as quais se aplicou o sistema de indicadores estão apresentadas na Tabela 1.

As captações efetuam-se diretamente de cursos d'água ou por meio de barragens de nível. Para as cinco estações amostradas, verifica-se, ao longo do ano, alternância do emprego do sulfato de alumínio e do cloreto de polialumínio como coagulantes primários, em função das características da água bruta. Não há aplicação de polímeros orgânicos como auxiliares de coagulação.

Para aplicação do sistema de indicadores proposto, utilizaram-se dados operacionais diários, referentes a 2011 e 2012, para as cinco estações. Tais dados contemplavam turbidez, cor e coliformes totais da água tratada, turbidez da água bruta e da água decantada, vazão afluente e dispêndio de água de lavagem dos filtros. Cabe salientar que foram disponibilizados pelo prestador dados operacionais de 2009 a 2015, mas a ocorrência de inconsistências e/ou falhas no preenchimento dos relatórios diários concorreu para redução do universo amostral. Os efluentes das estações foram caracterizados utilizando métodos padrões (APHA; AWWA; WEF, 2005).

Embora identificadas algumas ausências de anotações nos relatórios, não se realizaram estimativas ou interpolações para preencher as lacunas. Analisaram-se os relatórios com as anotações tais como registradas pelos operadores, com posterior verificação dos dados atípicos ou anormais. As observações atípicas podem ser consideradas *outliers* ou dados inconsistentes. Esses dados apresentam valores atípicos, que podem indicar características peculiares da amostra ou constituir erros de medição que distorcem os resultados dos testes estatísticos.

Os dados tidos como inconsistentes por erros de medição ou de registro foram determinados com base nos limites da literatura e na identificação dos *outliers* realizada pelo método exploratório dos interquartis (análise interquartil — IQ): amplitude dos dados entre os

percentis 25 e 75%. Os dados cujos valores pertenciam ao intervalo $1,5 \times IQ$ e $3,0 \times IQ$ foram considerados *outliers* e aqueles cuja diferença foi maior que $3,0 \times IQ$, valores extremos.

Elaboraram-se gráficos da análise exploratória IQ dos dados correspondentes aos parâmetros cor e turbidez da água bruta, turbidez da água decantada e tratada e vazão afluente com o auxílio do Statistica 7.0 (STATSOFT, 2007). Esses dados consistiram na base de cálculo de 11 dos 13 indicadores propostos.

Os dados destacadamente inconsistentes devido a erro de registro ou de medição, depois de identificados, foram censurados. Contudo, na consolidação dos dados de cor e turbidez da água tratada, turbidez da água decantada e de vazão afluente, foram considerados os *outliers* e valores extremos com propósito de identificação das anormalidades que ocorreram no tratamento em função de desvios, rotinas operacionais e deficiências estruturais. Adicionalmente, os valores considerados *outliers* e extremos das características da água bruta foram identificados, entretanto mantidos no banco de dados, pois ocorrem naturalmente em momentos de precipitações intensas. Posteriormente, avaliou-se se os dados obedeciam ou não distribuição normal que nortearia a aplicação de testes paramétricos ou não paramétricos.

Aplicação da análise de componentes principais

A finalidade da análise exploratória a partir da análise de componentes principais (ACP) foi reduzir a dimensão original dos dados e modelar, detectar comportamentos anômalos no fenômeno investigado (*outliers*) e/ou determinar número otimizado de variáveis (WOLD; ESBENSEN; GELADI, 1987). A técnica básica para análise consistiu na identificação de agrupamentos dos pontos gráficos que denotam variáveis e amostras. Essa técnica estatística constitui uma ferramenta que demonstra quais tendências, relações e padrões podem estar ocultos em uma coleção de dados em análise. Construir a ACP remete a estudar as similaridades dos sistemas de tratamento avaliados vendo como os dados abarcados traduzem a realidade geral.

Tabela 1 - Características das estações de tratamento amostradas para aplicação do sistema de indicadores de desempenho.

Unidade	ETA I	ETA II	ETA III*	ETA IV*	ETA V
Vazão nominal (L.s ⁻¹)	20	60	50	60	36
Pré-tratamento	Não	Desarenação	Não	Não	Pré-cloração
Mistura rápida	Medidor Parshall	Medidor Parshall	Medidor Parshall	Medidor Parshall	Medidor Parshall
Floculação	Hidráulica de escoamento vertical em bandejas perfuradas	Hidráulica de escoamento helicoidal	Hidráulica de escoamento helicoidal	Hidráulica de escoamento vertical em bandejas perfuradas	Hidráulica de escoamento helicoidal
Decantação	Alta taxa	Alta taxa	Escoamento horizontal	Alta taxa	Escoamento horizontal
Filtração	Escoamento descendente em camada dupla	Escoamento descendente em camada dupla	Escoamento descendente em camada simples	Escoamento descendente em camada dupla	Escoamento descendente em camada simples

ETA: estação de tratamento de água; *no decorrer do ano, o uso do coagulante é suspenso por conta da excelente qualidade da água bruta.

A distribuição e a frequência dos dados foram avaliadas por meio da ACP com auxílio do programa Matlab 7.9.0 R2009b (MATHWORKS, 2009), a fim de analisar a consistência dos dados, mas já com interface com a verificação do desempenho das estações. As ACP foram realizadas mês a mês, para os 12 meses de cada ano, com o propósito de identificar e discutir particularidades de cada estação quanto aos dados que serviram de base para obtenção dos indicadores. Determinaram-se as medianas dos parâmetros que consistem nos dados fundamentais para cada dia dos anos de 2011 e 2012.

Assim sendo, para efeito de estudar os dados fundamentais por aplicação de ACP, foram geradas 84 imagens que possibilitaram considerações e conhecimento sobre as amostras disponíveis. Comprovada a consistência dos dados, passou-se ao desenvolvimento do sistema de indicadores propriamente dito.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Proposição e justificativa dos indicadores de desempenho

Conforme mencionado, os indicadores propostos prestam-se a avaliar a operação de estações convencionais de tratamento de água e, por consequência, o atendimento aos padrões de potabilidade ou às metas de qualidade mais estritas estabelecidas pelos próprios prestadores. Intenta-se que a aplicação do sistema de indicadores permita ao trabalhador identificar as deficiências e planejar a alocação de recursos para eventuais melhorias estruturais nas unidades de tratamento ou nos procedimentos operacionais. Dessa forma, diferencia-se a visão do prestador de serviço — voltada à melhoria do desempenho da estação — das agências reguladoras, inclinadas ao custo e à qualidade do efluente.

A proposição dos indicadores destacou o parâmetro turbidez, crucial na potabilização. Um efluente tratado com turbidez inferior a 0,5 uT, conforme recomenda a Portaria nº 2.914 (BRASIL, 2011), eleva substancialmente a perspectiva da ausência de cistos e oocistos de protozoários — sabidamente mais resistentes à desinfecção com cloro — na água disponibilizada à população abastecida.

A própria definição dos indicadores justificou sua representatividade para as diretrizes de gestão e tomada de decisão. Alguns dos indicadores propostos demonstraram o desempenho de forma direta e outros são correlatos a fatores que interferem ou explicam o desempenho.

Assim, conforme mencionado na Metodologia, os 13 indicadores indicados foram categorizados em indicadores de resultado (IR) (7), que demonstram o desempenho de forma direta, e indicadores de causa (IC) (6), que consistem em informação sobre as condições operacionais que possam interferir no desempenho das estações. A seguir, são

apresentados os indicadores propostos com suas respectivas nomenclaturas, as definições, os conceitos e as especificidades técnicas que os fundamentaram.

1. IRO1: percentual de amostras com cor aparente da água tratada inferior a 15 uH

Indicador do desempenho referenciado pela Portaria nº 2.914 (BRASIL, 2011) cujo resultado insatisfatório requer:

- análise da água tratada para determinação da cor verdadeira e comparação com a cor aparente, pois, para turbidez mínima do efluente, os teores de cor aparente e cor verdadeira da água tratada deverão tender à igualdade; diferenças significativas podem ser decorrentes de problemas hidráulicos da estação ou coagulação insatisfatória;
- verificação de eficiência do pré-tratamento quando houver, principalmente na oxidação de ferro e manganês;
- verificação do processo de coagulação química quanto à dosagem e à espécie de coagulante, além da frequência de realização dos ensaios de *Jar Test*.

Baixos valores do indicador IRO1, associados às cores verdadeira e aparente no efluente de mesma magnitude e à coagulação adequada, provavelmente apontam para o emprego de pré-tratamento a montante da estação em termos de pré-desinfecção e/ou adsorção em carvão ativado em pó.

2. IRO2: percentual de amostras de água filtrada com ausência de coliformes totais

Indicador do desempenho contemplado pela Portaria nº 2.914 (BRASIL, 2011) cuja ocorrência de resultados inferiores a 100% pode apontar para:

- avaliação da acurácia na dosagem de desinfetante, inclusive análise de cloro residual livre;
- análise da água bruta especificamente no que concerne à concentração de *E. coli*;
- análise da turbidez da água tratada, pois valores consistentemente inferiores a 0,5 uT e a presença de coliformes totais no efluente indicam insucesso da desinfecção. Em contrapartida, valores mais significativos da turbidez da água filtrada favorecem a ocorrência do denominado efeito-escudo, justificando a ineficiência da desinfecção.

3. IRO3: percentual de amostras da água tratada com turbidez inferior a 0,5 uT

Indicador contemplado pela Portaria nº 2.914 (BRASIL, 2011) com os princípios fundamentais da floculação, sedimentação/flotação e filtração vinculados à remoção de turbidez. Por conseguinte, na presente pesquisa, propôs-se analisar a turbidez em condições específicas de vazão afluente, de turbidez da água bruta e quanto à eficiência da clarificação.

4. IRO4: percentual de amostras com turbidez da água tratada inferior a 0,5 uT quando os filtros operaram com taxa de filtração superior à estabelecida pela NBR 12.216 (ABNT, 1992)

Transcendendo as premissas da Portaria nº 2.914 (BRASIL, 2011), o indicador presta-se a avaliar o desempenho da estação em condição de sobrecarga das unidades de filtração. Esse indicador traduz, essencialmente, que a taxa de filtração condizente com a NBR 12.216 (ABNT, 1992) e resultados insatisfatórios de turbidez efluente indicam insucesso da clarificação para com as características da água bruta ou más condições do meio filtrante, da camada suporte ou do sistema de drenagem dos filtros.

5. IRO5: percentual de amostras com turbidez da água tratada inferior a 0,5 uT para elevada turbidez da água bruta

No mesmo viés do IRO4, esse indicador presta-se a avaliar a robustez da estação no atendimento à Portaria nº 2.914 (BRASIL, 2011). Adotaram-se como valores elevados de turbidez da água bruta os pertencentes ao quarto quartil dos dados referentes a cada estação. O desempenho insuficiente para turbidez do efluente, considerando condições de alta turbidez da água bruta, pode culminar até com a interrupção do tratamento ou fornecimento de água em condições inadequadas. Cabe mencionar sucintamente algumas hipóteses que desse indicador podem surgir:

- valores baixos apontam condição da água bruta não tratável se mantido o padrão operacional em curso;
- valores elevados apontam o êxito na tratabilidade da água bruta e/ou acuidade operacional;
- valores intermediários podem demonstrar o potencial da estação na condição específica, fazendo-se necessários ajustes operacionais.

6. IRO6: percentual de amostras com turbidez da água decantada inferior a 2 uT

Indicador vinculado ao êxito da clarificação, em especial às condições de coagulação, adotando-se a recomendação norte-americana como balizadora do indicador (LETTERMAN & YIACOUMI, 2011). Cabe ressaltar que, para estações às quais afluíu água bruta de turbidez elevada (superior a 100 uT), efluente inferior a 5 uT também pode indicar eficiência da clarificação, prolongando a duração das carreiras de filtração.

7. IRO7: percentual de amostras de turbidez da água tratada inferior a 0,5 uT quando a razão entre a vazão afluente e a vazão nominal é maior que a unidade

Esse indicador apresenta nítida interface com o IRO4 visando avaliar o desempenho da estação em condição de sobrecarga. As amostras coletadas serão consideradas quando se verificar a máxima vazão horária registrada nos relatórios de monitoramento. A partir da determinação do IRO7, pode-se inferir que:

- se o desempenho é totalmente satisfatório, não há problemas para a estação trabalhar com sobrecarga;
- valores intermediários significam avaliação da rotina operacional em termos, principalmente, da lavagem dos filtros e das condições de coagulação;
- valores baixos do IRO7 podem conduzir à ampliação da estação em função das características da água bruta.

8. ICO1: percentual de tempo de funcionamento da estação que os filtros operaram com taxa de filtração superior à estabelecida pela NBR 12.216 (ABNT, 1992)

Indicador de causa que pode interferir no desempenho descrevendo a condição de operação dos filtros. O limite operacional real de cada estação é governado pelas características da água bruta e pela qualidade da operação. Não é indicador de destaque individualmente, mas, no sistema proposto, correlaciona-se com os indicadores de resultado (IRO1, IRO2, IRO3, IRO4, IRO5 e IRO7) e haverá de contribuir para a avaliação do desempenho da estação.

9. ICO2: razão entre a mediana das taxas de filtração reais e a taxa de filtração estabelecida pela NBR 12.216 (ABNT, 1992)

Para estações de maior porte, esse indicador pode usualmente ser determinado com frequência diária, compatível aos registros horários da vazão afluente. Para unidades de pequeno porte, comumente, não se verifica significativa variação na vazão afluente — também pelo funcionamento diário frequentemente inferior a 24 horas. Esse indicador é correlato ao projeto hidráulico da estação e, quanto maior a razão, maior a importância desse item em termos de previsão do limite operacional.

10. ICO3: razão entre a mediana da turbidez da água tratada e o valor de referência 0,5 uT

Indicador que exprime o quanto o resultado do desempenho no atendimento ao padrão turbidez da água tratada está aquém (ou além) da meta e é diretamente relacionado ao indicador IRO3. Com vistas à Portaria nº 2.914 (BRASIL, 2011), espera-se que a razão expressa pelo indicador seja menor ou igual à unidade. Esse indicador não foi considerado IR por não ser uma medida clara do sucesso no atendimento do padrão em relação ao número de amostras observadas.

11. ICO4: razão entre a mediana da turbidez decantada e a mediana da turbidez tratada

Indicador que permite uma avaliação individualizada da filtração — associando-o aos indicadores ICO1 e ICO2 — e contribui para a avaliação do desempenho geral da estação. Da análise do valor do indicador ICO4, é possível inferir que:

- valores mais elevados do indicador apontam para adequado desempenho das unidades de filtração que se prestam a corrigir eventual desempenho insatisfatório das outras etapas do tratamento;
- valores próximos à unidade e pleno atendimento aos padrões de turbidez do efluente evidenciam excelente qualidade da água bruta. Do contrário, o não atendimento ao padrão de turbidez, ainda que o valor do indicador esteja próximo à unidade, aponta para o mau desempenho dos filtros;
- valores inferiores à unidade, ainda que muito raros, apontam para transpasse e/ou suspensão de sólidos depositados no tanque de contato, o que implica padrão operacional inadequado. Fazem-se necessários verificar a rotina de lavagens dos filtros e a análise da vida útil do material filtrante e da estrutura dos filtros.

12. IC05: percentual de tempo por ano que a estação de tratamento operou com vazão maior que a vazão de projeto

Indicador que expressa o período de sobrecarga que pode ou não afetar o desempenho da estação, cuja análise deve associar-se à do indicador IR07. Ainda que a sobrecarga afete em maior ou menor magnitude todas as etapas do tratamento, as características da água bruta e a adequada operação podem assegurar a qualidade do efluente.

13. IC06: irregularidade na lavagem dos filtros

Indicador vinculado à regularidade de lavagem dos filtros e ao sucesso da clarificação que pode estimar a duração das carreiras de filtração e a magnitude das taxas médias de filtração. Tal dispêndio, quando não há reaproveitamento de água de lavagem, comumente varia entre 2 e 5% do volume produzido.

As equações que viabilizam a determinação dos 13 indicadores de desempenho propostos estão listadas na Tabela 2.

Conforme mencionado, a proposição dos indicadores norteou-se nos parâmetros comumente monitorados na operação da maioria das estações de tratamento brasileiras. Três outros possíveis indicadores foram descartados pelo baixo número de dados disponíveis nas estações amostradas e, muito provavelmente, na maioria significativa das estações brasileiras:

- percentual de valores de turbidez da água filtrada inferior a 0,5 uT para as primeiras amostras após o início da carreira de filtração;
- percentual de valores de turbidez da água filtrada inferior a 0,5 uT da última amostra antes do fim da carreira de filtração;
- percentual de valores de turbidez da água decantada inferior a 2 uT das amostras coletadas imediatamente antes da descarga do decantador.

Cabe, por fim, destacar que alguns dos indicadores propostos já foram explorados como parâmetros de referência para trabalhos fundamentados em outros pontos de vista que não o do prestador de serviço. Oliveira *et al.* (2014) exploraram como indicadores para avaliação de desempenho das estações os parâmetros de atendimento da Portaria nº 2.914 (BRASIL, 2011), que coincidem com os indicadores IR01, IR02 e IR03. Os demais indicadores propostos apresentam interfaces com esses indicadores, porém evidenciou-se, na revisão da literatura, a abordagem inovadora a partir da visão do próprio prestador de serviço.

Aplicação dos indicadores de desempenho propostos

Para o cálculo dos indicadores propostos, utilizaram-se os registros de turbidez e cor aparente da água tratada, turbidez da água bruta e

Tabela 2 - Equações de cálculo dos indicadores de desempenho propostos.

ID*	Sentido de preferência	Equação
IR01	↑	(Número de amostras de água tratada com cor aparente < 15 uH / Total de amostras anuais) x 100%
IR02	↑	(Número de amostras de água tratada com coliformes totais / Total de amostras anuais) x 100%
IR03	↑	(Número de amostras de água tratada com turbidez < 0,5 uT / Total de amostras anuais) x 100%
IR04	↑	(Número de amostras de água tratada com cor aparente < 0,5 uT quando Tf > NBR 12.216 / Total de amostras anuais coletadas quando Tf > NBR12.216) x 100%
IR05	↑	(Número de amostras de água tratada com turbidez < 0,5 uT para turbidez da água bruta no 4º quartil / Total de amostras anuais coletadas quando Tf > NBR12.216) x 100%
IR06	↑	(Número de amostras de água decantada com turbidez < 2,0 uT / Total de amostras anuais) x 100%
IR07	↑	(Número de amostras para Qo > Qn com turbidez < 0,5 uT / Total de amostras anuais para Qo > Qn) x 100%
IC01	↓	(Número de horas de funcionamento da estação com Tf > NBR 12.216 / Total de horas anuais de operação) x 100%
IC02	↓	Mediana das taxas de filtração > NBR 12.216 / Taxa de filtração da NBR 12.216
IC03	↓	Mediana da turbidez do efluente no período amostrado / 0,5
IC04	↓	Mediana da turbidez da água decantada no período amostrado / Mediana da turbidez da água tratada no período amostrado
IC05	↓	(Número de horas de funcionamento da estação para Qo > Qn / Total de horas anuais em operação) x 100%
IC06	↓	1 - [(Volume anual despendido de água de lavagem / Volume produzido anual) x 100%] / 5%

IR: indicador de resultado; IC: indicador de causa; *Tf: taxa de filtração (m³.m².dia⁻¹).

decantada e vazão afluyente. O número médio de registros disponíveis dos 5 parâmetros mencionados foi de 7.284. Atesta-se a significância do banco de dados considerando-se que os parâmetros nas estações amostradas são monitorados a cada 2 horas, o que totalizaria, em 2 anos de operação, 8.760 registros. Verificou-se menor número de registros para cor da água tratada, variando entre 22% (1.904) e 72% (6.267) do estimado.

A determinação dos indicadores de desempenho propostos para as cinco estações amostradas testifica-se pela Tabela 3.

Eventuais sobreposições entre os indicadores de desempenho propostos foram analisadas por meio dos coeficientes de Spearman ($p < 0,05$) e de Kendall Tau. Os resultados para o primeiro — cujas correlações foram mais elevadas que as de Kendall Tau — são apresentados na Tabela 4, destacando-se os valores mais significativos no nível de confiança de 95%.

Tabela 3 - Valores médios dos indicadores de desempenho propostos aplicados as cinco estações de tratamento amostradas.

ID	ETA I	Número de registros	ETA II	Número de registros	ETA III	Número de registros	ETA IV	Número de registros	ETA V	Número de registros
IRO1	78%	3.635	75%	4.599	73%	6.267	99%	1.904	68%	5.151
IRO2	100%	86	100%	136	100%	215	100%	204	100%	122
IRO3	22%	8.160	29%	7.789	17%	8.564	59%	8.242	6%	7.830
IRO4	22%	*	29%	*	16%	8.564	62%	6.452	7%	3.126
IRO5	8%	1.971	16%	1.922	0%	2.131	20%	2.441	3%	1.895
IRO6	72%	8.176	44%	8.274	79%	8.597	90%	8.245	23%	7.833
IRO7	22%	232	31%	5.895	18%	8.477	66%	6.661	6%	1
ICO1	0%*	16.708	0%*	16.698	100%	17.198	82%	16.928	42%	15.880
ICO2	0,66	8.354	0,67	8.341	1,74	8.593	1,20	8.450	0,98	7.943
ICO3	1,45	8.151	1,52	7.822	1,87	8.493	0,87	8.228	3,20	7.821
ICO4	1,44	8.186	2,88	8.295	1,04	8.582	1,32	8.286	2,70	7.862
ICO5	3%	8.319	95%	8.272	100%	8.592	82%	8.442	0%**	7.932
ICO6	53%	355	58%	231	59%	362	68%	377	0%***	866

ETA: estação de tratamento de água; IR: indicador de resultado; IC: indicador de causa.

*Obtidos valores nulos do indicador ICO1; ao IRO4, foi atribuído o valor do indicador IRO3, convencionado, nessa situação, como expectativa de sucesso na ocorrência de taxa de filtração maior que a norma.

**Obtidos valores nulos do indicador ICO5; ao IRO7, foi atribuído o valor do indicador IRO3, convencionado, nessa situação, como expectativa de sucesso na ocorrência de vazão afluyente maior que a nominal.

***Obtidos percentuais de água de lavagem maiores que 5%; conferiu-se ao indicador ICO6 valor 0%.

Tabela 4 - Coeficientes de correlação de Spearman para os indicadores de desempenho propostos aplicados as cinco estações de tratamento amostradas.

	IRO1	IRO2	IRO3	IRO4	IRO5	IRO6	IRO7	ICO1	ICO2	ICO3	ICO4	ICO5	ICO6
IRO1	1,00		0,90	0,90	0,80	0,70	0,90	-0,10	-0,20	-1,00	-0,20	0,10	0,60
IRO2*		1,00											
IRO3			1,00	1,00	0,90	0,60	1,00	-0,20	-0,10	-0,90	0,00	0,30	0,70
IRO4				1,00	0,90	0,60	1,00	-0,20	-0,10	-0,90	0,00	0,30	0,70
IRO5					1,00	0,30	0,90	-0,40	-0,30	-0,80	0,30	-0,10	0,40
IRO6						1,00	0,60	0,60	0,50	-0,70	-0,80	0,50	0,90
IRO7							1,00	-0,20	-0,10	-0,90	0,00	0,30	0,70
ICO1								1,00	0,90	0,10	-0,90	0,30	0,50
ICO2									1,00	0,20	-0,70	0,50	0,60
ICO3										1,00	0,20	-0,10	-0,60
ICO4											1,00	-0,40	-0,60
ICO5												1,00	0,70
ICO6													1,00

IR: indicador de resultado; IC: indicador de causa.

*No universo amostral, não houve registro de coliformes totais no efluente das estações.

Da análise dos resultados da Tabela 4 depreende-se que, das 78 combinações analisadas, 16 (21%) indicaram correlação significativa. Conceitualmente, esperava-se que o teste não paramétrico destacasse a probabilidade de correlação entre IR03 e IC06, afinal a lavagem dos filtros (IC06) tende a influenciar os resultados de turbidez da água tratada (IR03). Ainda que o coeficiente de Spearman de 0,70 para tal correlação tenda a comprovar estatisticamente a afinidade entre esses indicadores, não se pode descartar a hipótese alternativa definida como possível coincidência. Na mesma vertente, confirmou-se correlação estatisticamente significativa entre o indicador IC06 e o IR06, pois, de fato, a turbidez da água decantada, juntamente com a magnitude da taxa de filtração, há de interferir na frequência de lavagem dos filtros. Por fim, ainda que as estações amostradas apresentem padrão operacional característico de unidades de tal porte, as correlações evidenciadas na Tabela 4 podem guardar alguma especificidade, ou seja, podem não se manifestar em outro universo amostral.

Por fim, cabe ainda salientar que a aplicação da ACP — não apresentada por exiguidade de espaço — permitiu hierarquizar as estações amostradas. Como seria de se esperar, a maior ou menor relevância de cada indicador de desempenho manifestou-se diferentemente para cada estação. Assim, para o conjunto de estações estudado, os indicadores em ordem de relevância para determinar o desempenho das estações foram: IR03, IR07, IR04, IR01, IC05, IC06, IR06, IR05, IR02, IC01, IC02, IC04 e, por último, IC03. Tal hierarquia poderia ser alterada caso o sistema de indicadores proposto fosse aplicado a conjunto distinto de estações amostradas.

CONCLUSÕES

A revisão da literatura e a aplicação do sistema de indicadores propostos às estações amostradas permitem concluir:

- o sistema de indicadores aventado demonstrou-se efetivo e viável desde a concepção e definição de cada indicador. Conforme mencionado, trata-se da obtenção de respostas para iniciar o processo de melhoria contínua na gestão das estações de tratamento de água, no que tange a operação e eventuais ampliações das unidades que as integram. Como esteve pautado em dados facilmente obteníveis na rotina de operação das estações brasileiras, o sistema de indicadores teve sua aplicação favorecida, sendo factível para utilização do prestador de serviço de abastecimento de água;
- a correlação entre indicadores manifestou-se em 21% das análises bivariadas, apontando baixa sobreposição entre eles. Como cada indicador proposto apresenta informação conceitual específica ligada às múltiplas etapas do tratamento de água, o descarte de indicadores com eventuais sobreposições — ou motivado pela hierarquização delineada pela ACP — poderia representar perda de informação no intuito de avaliar de forma mais acurada o desempenho das estações de tratamento. Assim, toda estruturação do sistema de indicadores proposto deve ser inicialmente preservada para aplicação a outras estações convencionais de tratamento de água.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). (2005) *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (1992) *NBR 12216*: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT. 18 p.
- BRASIL. Ministério da Saúde. (2011) Portaria nº 2.914: Normas e padrão de potabilidade da água destinada ao consumo humano. Brasília: Ministério da Saúde.
- CHANG, E.-E.; CHIANG, P.-C.; HUANG, S.-M.; LIN, Y.-L. (2007) Development and implementation of performance evaluation system for a water treatment plant: case study of Taipei Water Treatment Plant. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, v. 11, n. 1, p. 36-47. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-025X\(2007\)11:1\(36\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-025X(2007)11:1(36))
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA (IBGE). (2008) *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico*. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 27 ago. 2016.
- LETTERMAN, R.D.; YIACOUMI, S. (2011) Coagulation and Flocculation. In: EDZWALD, J.K. (Org.). *Water Quality and Treatment*. 6. ed. Denver: AWWA.
- MATHWORKS. (2009) *MATLAB 7.9.0 R2009B*. Massachusetts: MathWorks.
- OLIVEIRA, M.D.; QUEIROGA, L.L.; OLIVEIRA, S.M.C.; DINIZ, D.T.; LIBÂNIO, M. (2014) Development and evaluation of a performance indicators system applied to water treatment plants. In: IWA WORLD WATER CONGRESS & EXHIBITION, 2014, Lisboa. Anais... Lisboa: IWA.
- SILVA, C.; RAMALHO, P.; QUADROS, S.; VIEIRA, P.; ALEGRE, H.; ROSA, M.J. (2011) Preliminary results of the Portuguese initiative for performance assessment of water and wastewater treatment plants. In: IWA SPECIALIST CONFERENCE ON BENCHMARKING AND PERFORMANCE ASSESSMENT OF WATER SERVICES, 2011, Valência. Anais... Valência: IWA. 1 CD-ROM.
- SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). (2014). Diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2014. Brasil: Ministério das Cidades.
- STATSOFT. (2007) *Statistica 7.0*. StatSoft.

VIEIRA, P.; ALEGRE, H.; ROSA, M.J.; LUCAS, H. (2008) Drinking water treatment plants assessment through performance indicators. *In: IWA WORLD WATER CONGRESS & EXHIBITION, 2008, Viena. Viena: IWA. 1 CD-ROM.*

VIEIRA, P.; ROSA, M.J.; ALEGRE, H.; LUCAS, H. (2010) Assessing the Operational Performance of Water Treatment Plants - Focus on Water Quality and Removal Efficiency. *In: IWA WORLD WATER CONGRESS & EXHIBITION, 2010, Montreal. Montreal: IWA. 1 CD-ROM.*

WOLD, S.; ESBENSEN, K.; GELADI, P. (1987) Principal component analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, v.2, p.37-52. [https://doi.org/10.1016/0169-7439\(87\)80084-9](https://doi.org/10.1016/0169-7439(87)80084-9)

ZHANG, K.; ACHARI, G.; SADIQ, R.; LANGFORD, C.H.; DORE, M.H.I. (2012) An integrated performance assessment framework for water treatment plants. *Water Research*, v. 46, n. 6, p. 1673-1683. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.006>

