

VI-056 - METODOLOGIA MULTICRITÉRIO PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS DE UMA BACIA DE ESGOTAMENTO EM FORTALEZA/CE

Stephanie de Oliveira Souza ⁽¹⁾

Engenheira de Petróleo, Mestre e Doutoranda em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pela Universidade Federal do Ceará.

Ana Barbara de Araújo Nunes ⁽¹⁾

Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará.

Endereço ⁽¹⁾: Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - Bloco 713 - Campus do Pici - Fortaleza - Ceará - CEP: 60440-970 - Brasil - Tel: +55 (85) 3366-9623 - e-mail: stephanie_souza@hotmail.com

RESUMO

As estações de tratamento de esgotos são consideradas fontes pontuais de poluição, podendo ocasionar o comprometimento dos corpos hídricos receptores. O desempenho eficaz e eficiente das ETEs contribui para a gestão sustentável dos recursos hídricos. Neste estudo, indicadores de desempenho (IDs) mais relevantes para a avaliação do desempenho de ETEs de uma bacia de esgotamento no município de Fortaleza, Ceará, Brasil, foram selecionados e analisados com base nas opiniões de especialistas. Primeiramente, realizaram-se a seleção e a proposição de IDs mais adequados à avaliação das ETEs do estudo nas dimensões ambiental e operacional. Em seguida, os critérios (importância, mensurabilidade, facilidade de interpretação e sensibilidade) e as alternativas (IDs) foram avaliados por meio da consulta Delphi aos atores de decisão. As respostas obtidas por meio do método Delphi foram utilizadas para definir os pesos dos IDs, utilizando o método AHP. Dos 18 IDs selecionados, destacaram-se: “Remoção de carga poluente do esgoto afluente na estação de tratamento”, “Conformidade das análises de esgoto tratado para sólidos suspensos totais” e “Conformidade das análises de esgoto tratado para DBO”.

PALAVRAS-CHAVE: Estações de tratamento de esgotos, Método multicritério de apoio à decisão, Método AHP, Método Delphi.

INTRODUÇÃO

O gerenciamento das águas residuais é um processo complexo, que abrange geração de efluentes, redes de esgoto, tratamento de efluentes e reintegração de subprodutos ao meio ambiente. Alcançar um processo de gestão de águas residuais sustentável requer a identificação de fatores específicos locais que impactam na composição das águas residuais, tecnologias de tratamento disponíveis e eficientes, sensibilidade do ambiente receptor, estrutura organizacional e disponibilidade de experiência, bem como a compreensão detalhada de como esses fatores estão interligados (COSSIO *et al.*, 2020).

Nesse sentido, o interesse pelo desenvolvimento e implementação de sistemas de tratamento de esgotos vem aumentando devido à adoção de regulamentações, nacionais e internacionais, destinadas a minimizar o impacto das águas residuais sobre os corpos d'água receptores (SALA-GARRIDO; MOLINOS-SENANTE; HERNÁNDEZ-SANCHO, 2011). De certo, o número de estações de tratamento de esgotos (ETEs) em todo o mundo aumentará e com isso crescerá a necessidade de avaliação da ecoeficiência desses sistemas, quanto à sustentabilidade (DONG; ZHANG; ZENG, 2017).

Diante disso, deve-se considerar a capacidade depurativa dos corpos receptores e impedir o lançamento de efluentes tratados em vazão superior ao que o corpo d'água possa tolerar (THEBALDI *et al.*, 2011). A regulamentação dos despejos de sistemas de tratamento visa a redução de impactos causados aos corpos receptores. Assim, um conjunto de normas legais ambientais, critérios, políticas e revisões procuram influir tanto na seleção dos locais de descarga quanto no nível de tratamento exigido. O propósito é garantir que os impactos ambientais provocados pela disposição dos efluentes tratados sejam aceitáveis (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2005).

No Brasil, as normas ambientais pertinentes aos aspectos de qualidade da água e efluentes são as Resoluções Conama nº 357/05 e 430/11, sendo que a última complementa e altera a primeira. No estado do Ceará, a Resolução Coema nº 02/17 aborda sobre condições, parâmetros, padrões e diretrizes para gestão do lançamento de efluentes em corpos receptores e em rede coletora de esgoto, em consonância com as Resoluções Conama nº 357/05 e 430/11.

Diante do exposto, é fundamental avaliar as eficiências e o gerenciamento sustentável das ETEs para controlar a qualidade da água devolvida ao meio ambiente (GÓMEZ-LLANOS; DURÁN-BARROSO; MATÍAS-SÁNCHEZ, 2018). Nesse sentido, novas abordagens para a gestão das ETEs são necessárias, visando à sustentabilidade e o fortalecimento da gestão das bacias hidrográficas.

Sabe-se que essa problemática envolve múltiplos critérios, uma pluralidade de pontos de vista, diversos atores de decisão e alternativas. Nesse contexto, a utilização de metodologias multicritério de apoio à decisão é indicada para auxiliar os decisores, em situações nas quais há a necessidade de identificação de prioridades, principalmente, quando coexistem interesses em conflito.

OBJETIVOS

Este estudo teve como objetivo aplicar os métodos multicritério Delphi e *Analytic Hierarchy Process* (AHP) com *ratings* para identificar e classificar um conjunto de indicadores mais relevantes à avaliação do desempenho de ETEs de uma bacia de esgotamento no município de Fortaleza, Ceará, Brasil, considerando aspectos ambientais e operacionais dessas unidades.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

O município de Fortaleza, capital do estado do Ceará, vem apresentando um significativo crescimento populacional nas últimas décadas, decorrente do intenso processo de urbanização. De acordo com o Censo Demográfico de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Fortaleza é a quinta cidade mais populosa do país, com uma população de 2.452.185 pessoas, é a capital brasileira com maior densidade demográfica, com 7.786,44 hab/km², e a cidade mais populosa do Ceará. O Panorama Municipal do IBGE de 2018 estimou que a população fortalezense seria de 2.686.612 pessoas em 2020, concentrando 29,24% da população total do estado do Ceará (IBGE, 2018).

A Bacia do Rio Cocó, área de abrangência desse estudo, é a maior das quatro bacias hidrográficas no município de Fortaleza, drenando as porções leste, sul e central do município. O processo de tratamento dos efluentes dessa bacia ocorre em estações de tratamento de esgotos. Contabilizam-se 55 ETEs de vários tipos, porte e condições de operação diferenciadas, como decanto-digestores associados a filtros anaeróbios, lagoas de estabilização, lodos ativados e reatores anaeróbios. O serviço de esgotamento sanitário é prestado pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará (Cagece).

Seleção de indicadores de desempenho para avaliação de ETEs

Bezerra *et al.* (2019) pontuam que indicadores de desempenho (IDs) são capazes de possibilitar uma visão abrangente, de modo a se obter avaliações consistentes sobre o desempenho de diferentes serviços. A sua quantificação pode impulsionar bastante os processos de tomada de decisão, uma vez que permitem a identificação de problemas e a consequente promoção de medidas corretivas, além de apoiarem à formulação de ações, políticas e estratégias mais eficientes.

No setor de saneamento, várias organizações propuseram diferentes IDs cobrindo todas as tarefas fundamentais dos sistemas de águas residuais. Dimensões de avaliação foram propostas a depender da finalidade de utilização e de atributos dos indicadores.

Assim, a primeira etapa metodológica consistiu na pré-seleção de indicadores de desempenho mais adequados à avaliação de estações de tratamento de esgotos. Inicialmente, levantaram-se 615 IDs com aplicação geral ao sistema de esgotamento sanitário de 13 entidades. Esses IDs são utilizados pelas principais entidades nacionais

e internacionais da área de saneamento, como: IWA, AWWA, WSAA, ISO, IBNET, ADERASA, ERSAR, OFWAT, SSCG, SNIS, ABAR, PNQS e ARCE.

Posteriormente, selecionaram-se, do levantamento inicial, os IDs mais adequados à avaliação de ETEs, pois os sistemas analisados apresentam uma abordagem abrangente, visando ser aplicáveis a entidades de diferentes dimensões, nível de desenvolvimento e contextos.

Neste estudo, elegeu-se trabalhar com as dimensões ambiental e operacional para avaliar o desempenho das ETEs da bacia do Rio Cocó quanto ao possível comprometimento da qualidade dos corpos hídricos receptores pelo lançamento de efluentes tratados.

A dimensão ambiental abrangeu indicadores referentes aos impactos ambientais, incluindo o atendimento aos padrões de lançamento, frequência de eventos de extravasamento das vazões afluentes derivadas para o corpo receptor e a disposição final dos resíduos sólidos. A dimensão operacional compreendeu o funcionamento, a manutenção do sistema e a capacidade de operação do tratamento, incluindo o monitoramento da qualidade do esgoto.

Para esse fim, consideraram-se os critérios aplicabilidade (aplicação na avaliação de ETEs) e redundância (indicadores semelhantes) para a seleção dos IDs nas dimensões ambiental e operacional. Características de contexto local do sistema avaliado foram observadas na seleção, na formulação de novos IDs e na adaptação de algumas variáveis, unidades e nomenclaturas.

Ressalta-se que alguns indicadores pré-selecionados pelos critérios aplicabilidade e redundância tiveram que ser descartados da seleção. Isso ocorreu nos casos em que os parâmetros necessários ao cálculo dos IDs não são medidos e nem acompanhados qualitativamente pela prestadora de serviço, como volume afluente e volume de efluente tratado.

Ao final da pré-seleção, notou-se a necessidade de proposição de novos indicadores que abrangessem alguns problemas apresentados pelos Sistemas Isolados, os quais foram levantados pelo Diagnóstico do Sistema de Esgotamento Sanitário do Plano Municipal de Saneamento Básico de Fortaleza de 2014.

Determinação dos pesos dos critérios e dos indicadores pelo método AHP com *ratings*

Esta etapa teve como objetivo determinar os pesos dos critérios e dos IDs selecionados. Para isso, aplicou-se o método multicritério AHP (*Analytic Hierarchy Process*) que é uma teoria de medição por meio de comparações de pares e se baseia nos julgamentos de especialistas para obter escalas de prioridades. Esse método tem como vantagem a capacidade de integrar os fatores quantitativos e qualitativos obtidos das opiniões de especialistas e categorizá-los em um *ranking* multicritério (NAM *et al.*, 2019).

Neste estudo, utilizou-se o método AHP com *ratings*, em que se estabelecem categorias de classificação (*ratings*) para cada critério e se prioriza as categorias comparando-as aos pares por preferência. As alternativas são avaliadas selecionando a categoria de classificação (*ratings*) em que se enquadram em cada critério. Esse método apresenta como vantagem poder classificar muitas alternativas com bastante rapidez, gerando resultados satisfatoriamente próximos do modelo tradicional.

A Figura 1 mostra a estrutura hierárquica do problema de estudo pelo método AHP com *ratings*. A primeira etapa foi a estruturação do problema como uma hierarquia, em que o objetivo da decisão, os critérios com suas respectivas categorias (*ratings*) e as alternativas foram definidos. No primeiro nível da hierarquia estava o objetivo geral de “Avaliação de estações de tratamento de esgotos por meio de indicadores de desempenho”.

No segundo nível estavam os critérios que contribuem para atingir o objetivo. Os critérios selecionados para avaliação estavam dentre os principais atributos de indicadores levantados na literatura (ALEGRE *et al.*, 2004; MATOS *et al.*, 2004). Os critérios escolhidos foram: a) importância: relevância do ID para a avaliação de ETEs, representando processos e atividades; b) mensurabilidade: facilidade de obtenção do ID a partir de dados disponíveis e determinados regularmente; c) facilidade de interpretação: o ID é definido claramente, de fácil compreensão e de interpretação única; d) sensibilidade: o ID reflete um efeito cuja causa é passível de mudança. Por fim, no nível inferior estão as alternativas (IDs) que devem ser avaliadas em termos dos critérios definidos no segundo nível.

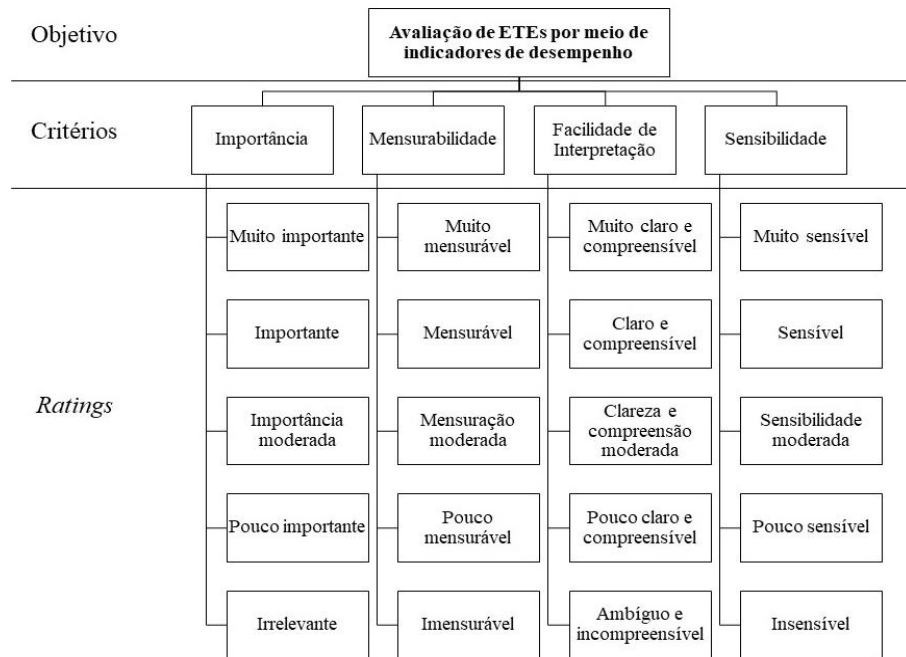


Figura 1: Estrutura hierárquica do problema pelo método AHP com ratings

Após a construção da hierarquia, iniciou-se o processo de julgamento (segunda etapa) quando os especialistas, consultados por meio do método Delphi, expressaram suas preferências através das matrizes de comparação pareada dos critérios e das categorias (*ratings*), com base na adaptação da Escala Fundamental de Saaty (SAATY; VARGAS, 2001) (Tabela 1).

Tabela 1: Adaptação da Escala Fundamental de Saaty

Escala adaptada	Definição	Explicação
1	Igual importância	Duas atividades contribuem igualmente
3	Importância fraca	A experiência e o julgamento favorecem ligeiramente uma das atividades
5	Importância forte	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade sobre a outra
7	Importância muito forte	Uma atividade é fortemente favorecida em relação a outra; sua dominância é demonstrada na prática
9	Importância absoluta	A evidência que favorece uma atividade sobre a outra é da mais alta ordem de afirmação possível
Recíprocos	Se a atividade i possui um dos números acima, quando comparada com a atividade j, então j terá o valor inverso quando comparada com i	-

Quanto as categorias dos critérios (*ratings*), estabeleceram-se cinco níveis de intensidade para todos os critérios, de forma a se obter as suas prioridades idealizadas, ou seja, a melhor categoria recebe o valor 1 e as demais são proporcionalmente menores. Por exemplo, os níveis de intensidade do critério “Importância” foram: Muito importante, Importante, Importância moderada, Pouco importante e Irrelevante. Em seguida, esses níveis foram comparados aos pares, com base na adaptação da Escala Fundamental de Saaty, para estabelecer as prioridades e normalizá-las. Assim, as prioridades encontradas foram divididas pelo maior valor entre elas, de modo que a categoria “Muito importante” apresentou valor 1 e as demais foram proporcionalmente menores.

O método AHP permite, por meio da proposição de índices, avaliar a consistência dos julgamentos estabelecidos nas comparações par a par. A Razão de Consistência dos julgamentos é obtida comparando o Índice de Consistência (IC), referente ao maior autovalor da matriz de decisão ($\lambda_{\max}$) e a ordem da matriz (n), com o Índice de Consistência Randômico (IR), número tabelado correspondente a ordem da matriz. De acordo com Saaty e Vargas (2001), é desejável que a Razão de Consistência dos julgamentos seja menor que 0,10 (< 10%), caso contrário os julgamentos inconsistentes devem ser revistos para melhorar a consistência dessa matriz de comparação. Quanto mais próximo de n estiver o autovalor $\lambda_{\max}$, mais coerentes serão os julgamentos do decisor. Uma vez realizadas todas as comparações e verificada a consistência dos julgamentos de cada especialista foram registrados os vetores de prioridades e as prioridades idealizadas das categorias. Consultar Saaty e Vargas (2001) para mais detalhes do método AHP com *ratings*.

Na terceira etapa, as prioridades finais das alternativas foram identificadas, adicionando-se os valores provenientes da multiplicação entre as prioridades de cada categoria e as prioridades globais dos critérios dessas categorias (FRANÇOZO *et al.*, 2019). Neste estudo, o método AHP com *ratings* foi implementado por meio do *software Super Decisions* (CREATIVE DECISIONS FOUNDATION, 2021).

Quando há mais de um indivíduo participando do processo de decisão, pode-se agregar as suas preferências individuais em uma preferência de grupo. Essa agregação dependerá de como o grupo deseja atuar, se junto como uma unidade ou como indivíduos separados. Quando os indivíduos estão agindo cada um por si, com diferentes sistemas de valores, preocupa-se com as prioridades alternativas resultantes de cada um, sendo necessário fazer uma Agregação de Prioridades Individuais (AIP).

Os cálculos da abordagem AIP foram feitos usando a média aritmética e considerando o mesmo peso para todos os especialistas participantes. A aplicação da AIP ocorreu em planilha eletrônica. Ao final, obteve-se o *ranking* de prioridades dos IDs, representado pelos pesos das alternativas na hierarquia do problema. A Figura 2 apresenta o fluxograma com o procedimento seguido para a determinação dos pesos dos IDs.

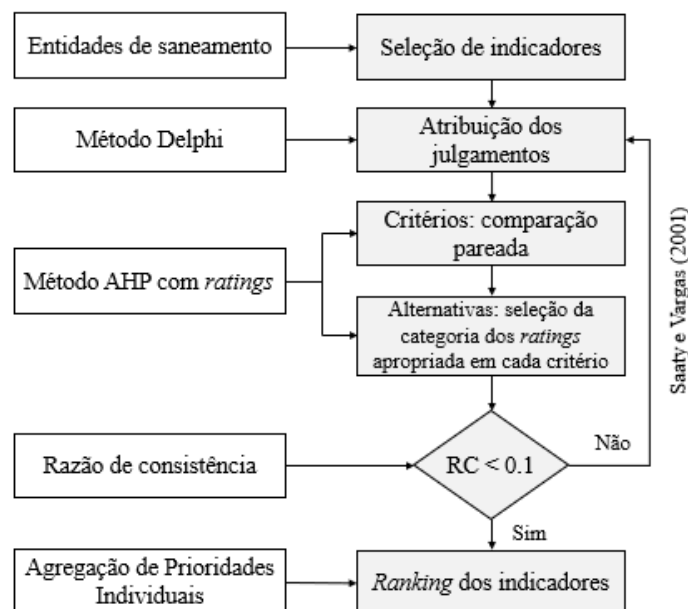


Figura 2: Fluxograma do procedimento de determinação dos pesos dos IDs

Avaliação dos IDs pelo método Delphi

Visto que a segunda etapa da aplicação do método AHP é o processo de julgamento dos especialistas, o objetivo desta seção foi a construção das matrizes de comparação par a par necessárias para o cálculo das prioridades finais das alternativas. A determinação da importância relativa dos critérios e a avaliação dos indicadores (alternativas) foram feitas por um grupo de especialistas da área de saneamento mediante a aplicação do método Delphi. Esse método se caracteriza como um método de tomada de decisão baseado em

opiniões de especialistas, podendo ser empregado para determinar fatores relevantes e priorizá-los com base em sua importância no processo de tomada de decisão (ZANGENEHMADAR; MOSELHI, 2016).

O procedimento de seleção dos especialistas é de grande importância para o processo de apoio à decisão. O painel foi formado por indivíduos com conhecimentos avançados relacionados ao tema em questão. Os atores de decisão consultados como representantes do contexto das ETEs foram: companhias de saneamento; órgãos de regulação e fiscalização ambiental; pesquisadores em tratamento de esgotos; e, consultores da área de saneamento.

O questionário é a principal ferramenta de pesquisa e coleta de dados do método Delphi. Elaborou-se um questionário para a consulta na plataforma *Google Forms*, o qual foi enviado para 110 profissionais da área de contexto. A maioria dos estudos utiliza painéis com 10 a 50 especialistas (NYGREN *et al.*, 2017). Não há um requisito específico para o tamanho do grupo de especialistas, porém o objetivo, o *design* do método, a ferramenta de coleta de dados, os custos e o prazo determinam o tamanho e a heterogeneidade do painel (GBEDEDU; LIYANAGE, 2020). Os dados de entrada coletados foram usados para implementação do método AHP.

No questionário, a representação da intensidade de importância de um critério em relação ao outro foi feita pela aplicação da Escala Fundamental de Saaty adaptada (Tabela 1). Os indicadores foram avaliados a partir da valoração atribuída pelos especialistas para cada um dos quatro critérios, selecionando a categoria (*ratings*) mais adequada ao indicador naquele critério.

Na última seção do questionário, solicitou-se a indicação de até três profissionais da área de saneamento, objetivando identificar outros especialistas por meio da técnica de amostragem bola de neve (*Snowball Sampling*). Essa técnica foi aplicada juntamente com o método Delphi como uma estratégia de recrutamento adicional ao painel de especialistas, em que os respondentes iniciais indicam novos participantes que por sua vez indicam outros e assim sucessivamente, até que seja alcançado o objetivo proposto.

RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos podem ser vistos nas tabelas abaixo. A Tabela 2 apresenta os 18 indicadores selecionados nas respectivas dimensões e unidades. Já o quantitativo de especialistas, participantes da consulta Delphi, por área de atuação pode ser visto na Tabela 3. Observou-se uma maior adesão de representantes das prestadoras de serviços (39%) à consulta Delphi proposta, seguidos por atores dos órgãos de regulação (29%), pesquisadores da área de saneamento (18%), representantes de órgãos ambientais (7%) e consultores da área de saneamento (7%). Por fim, a Tabela 4 apresenta o *ranking* dos pesos dos IDs obtidos pela aplicação do método AHP com *ratings* e abordagem AIP.

Tabela 2: Dimensões e indicadores de desempenho selecionados para o estudo

Dimensão	Indicador	Unidade	Entidade
Ambiental	Reuso de esgoto tratado (AM1)	%	IWA, ABNT NBR ISO 24511
	Disposição satisfatória de lodo (AM2)	%	OFWAT, IWA, ERSAR, Six-Cities Group
	Remoção de carga poluente do esgoto recebido na estação de tratamento (AM3)	%	PNQS, Six-Cities Group
	Frequência de extravasamentos (AM4)	-/ano	IWA
	Reclamações relativas a odor (AM5)	nº/1000 hab./ano	IWA
	Situação da Licença de Operação da ETE (AM6)	-	Proposto pelos autores
Operacional	Conformidade das análises de esgoto tratado	pH (OP1.1)	ABAR, ADERASA, AWWA
		temperatura (OP1.2)	
		sulfeto (OP1.3)	
		materiais sedimentáveis (OP1.4)	

		DBO (OP1.5)		
		óleos e graxas (OP1.6)		
		materiais flutuantes (OP1.7)		
		sólidos suspensos totais (OP1.8)		
		coliformes termotolerantes (OP1.9)		
	Estado de conservação da ETE (OP2)	-		Proposto pelos autores
	Existência de plano de ações de emergências e contingências no caso de paralisação da ETE (OP3)	-		Proposto pelos autores
	Existência de programa de manutenção preventiva (OP4)	-		Proposto pelos autores

Tabela 3: Quantitativo de atores de decisão participantes da consulta Delphi

Atores de decisão	Organização	UF	Quantitativo	
Prestadora de serviços (companhia de saneamento)	Companhia de Água e Esgoto do Ceará (Cagece)	CE	1	39%
	Companhia de Saneamento de Alagoas (Casal)	AL	1	
	Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar)	PR	4	
	Companhia Espírito Santense de Saneamento (Cesan)	ES	1	
	Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão (Caema)	MA	1	
	Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (Caern)	RN	2	
	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (Cagepa)	PB	1	
Órgão de regulação	Agência de Regulação e Controle de Serviços Públicos do Estado do Pará (Arcon-PA)	PA	1	29%
	Agência Reguladora dos Serviços Públicos do estado de São Paulo (Arseps)	SP	3	
	Agência Reguladora do Estado do Ceará (Arce)	CE	3	
	Autorarquia de Regulação, Fiscalização e Controle dos Serviços Públicos de Saneamento Ambiental (ACFor)	CE	1	
Pesquisador/Especialista da área de saneamento	Instituto Federal do Ceará (IFCE)	CE	1	18%
	Universidade Federal do Ceará (UFC)	CE	1	
	Universidade Federal do Pará (UFPA)	PA	1	
	Universidade Federal da Paraíba (UFPB)	PB	1	
	Universidade Federal do Paraná (UFPR)	PR	1	
Órgão ambiental	Superintendência Estadual do Meio Ambiente (Semace)	CE	2	7%
Consultor da área de saneamento	MW Engenharia	CE	1	7%
	Consultor autônomo	PR	1	
TOTAL			28	100%

Tabela 4: Ranking final das alternativas

Indicador	Prioridades (Pesos)	Ordem
Remoção de carga poluente do esgoto recebido na estação de tratamento (AM3)	0,0694	1

Conformidade das análises de esgoto tratado para sólidos suspensos totais (OP1.8)	0,0644	2
Conformidade das análises de esgoto tratado para DBO (OP1.5)	0,0621	3
Conformidade das análises de esgoto tratado para coliformes termotolerantes (OP1.9)	0,0619	4
Situação da Licença de Operação da ETE (AM6)	0,0615	5
Disposição satisfatória de lodo (AM2)	0,0604	6
Conformidade das análises de esgoto tratado para materiais sedimentáveis (OP1.4)	0,0589	7
Existência de programa de manutenção preventiva (OP4)	0,0584	8
Existência de plano de ações de emergências e contingências no caso de paralisação da ETE (OP3)	0,0557	9
Reclamações relativas a odor (AM5)	0,0549	10
Reuso de esgoto tratado (AM1)	0,0548	11
Estado de conservação da ETE (OP2)	0,0515	12
Frequência de extravasamentos (AM4)	0,0514	13
Conformidade das análises de esgoto tratado para pH (OP1.1)	0,0500	14
Conformidade das análises de esgoto tratado para óleos e graxas (OP1.6)	0,0476	15
Conformidade das análises de esgoto tratado para materiais flutuantes (OP1.7)	0,0470	16
Conformidade das análises de esgoto tratado para temperatura (OP1.2)	0,0454	17
Conformidade das análises de esgoto tratado para sulfeto (OP1.3)	0,0448	18

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Seleção e avaliação dos indicadores de desempenho

A partir da revisão de literatura, realizou-se a triagem de 615 IDs, considerando para a seleção somente os IDs mais adequados à avaliação das ETEs e às características da área de estudo, divididos nas dimensões ambiental e operacional. Segundo Cossio *et al.* (2020), o desenvolvimento de indicadores contextualizados garante o monitoramento eficaz de questões que são fundamentais para o contexto local. Assim, IDs referentes a problemas identificados nas ETEs da Bacia do Rio Cocó foram propostos, como ocorrência de maus odores, irregularidade da licença de operação, estado de conservação, existência de programas de manutenção preventiva e plano de ações de emergências e contingências para o caso de paralisação das ETEs (Tabela 2).

Após a seleção, ocorreu a consulta aos especialistas da área por meio do método Delphi. O questionário estruturado para a consulta foi enviado a 110 atores de decisão do contexto das ETEs. Ao final do prazo de 30 dias, 28 painelistas (25,45%) responderam ao questionário. Após realizar uma rodada do método, percebeu-se que as 28 respostas recebidas foram suficientes para subsidiar as tomadas de decisão desejadas. A utilização de duas ou mais rodadas do método tradicional reduziria ainda mais a participação na consulta proposta, a qual obteve 74,54% de abstenção com a execução de uma rodada única.

Destaca-se ainda que a estratégia de recrutamento adicional ao painel de especialistas, por meio da técnica de amostragem bola de neve (*Snowball Sampling*), foi essencial para melhorar o recrutamento dos atores de decisão e a sua adesão à consulta Delphi.

De acordo com os coeficientes de variação das respostas referentes à avaliação dos IDs, apenas 10% obtiveram alto grau de dispersão, enquanto 72% apresentaram média dispersão e 18% tiveram baixa dispersão dos dados. Diante disso, a aplicação do método Delphi possibilitou identificar consensos e divergências de opiniões dos distintos atores de decisão consultados sobre os IDs selecionados para avaliar o desempenho operacional e o atendimento aos padrões e condições de lançamento de efluentes tratados de ETEs.

Ranking dos IDs pelo método AHP com ratings

De acordo com a Tabela 4, os IDs que apresentaram pesos mais elevados foram: “Remoção de carga poluente do esgoto recebido na estação de tratamento”, “Conformidade das análises de esgoto tratado para sólidos suspensos totais”, “Conformidade das análises de esgoto tratado para DBO” e “Conformidade das análises de esgoto tratado para coliformes termotolerantes”.

Esse resultado demonstra que os parâmetros Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e sólidos suspensos totais (SST) e coliformes termotolerantes (CTT) possuem grande influência na avaliação operacional e no atendimento aos padrões e condições de lançamento de efluentes tratados das ETEs, conforme os especialistas consultados. Essa maior influência reflete a associação desses parâmetros aos constituintes convencionais da qualidade da água e, portanto, os mais utilizados para avaliar o desempenho das ETEs.

A DQO e a DBO são uma indicação indireta do teor de matéria orgânica presente nos esgotos ou no corpo d'água. Portanto, uma indicação do potencial de consumo do oxigênio dissolvido no meio. Quanto mais elevado for os seus valores, menor será a concentração de oxigênio no meio. Essa redução, a depender da magnitude, pode causar a morte de diversos seres aquáticos. Caso o oxigênio seja consumido totalmente, têm-se as condições anaeróbias, com possível geração de maus odores (VON SPERLING, 2014).

Conforme Michalake, Silva e Silva (2016), a determinação dos sólidos suspensos fornece uma estimativa da matéria orgânica presente no resíduo. Caso os SST não estejam devidamente controlados podem causar graves danos, especialmente à vida aquática, como a diminuição da incidência de luz. Já os coliformes termotolerantes são utilizados como organismos indicadores para a determinação da eficiência de remoção de patógenos no processo de tratamento de esgotos (VON SPERLING, 2014).

A importância das ações da prestadora de serviços quanto ao monitoramento dos impactos ambientais gerados pelas ETEs, bem como das ações fiscalizadoras dos órgãos ambientais competentes é evidenciada pela ponderação conferida ao indicador “Situação da Licença de Operação da ETE” (AM6).

O lodo é um subproduto do processo de tratamento de esgotos, cuja gestão é um dos problemas enfrentados nas ETEs. A “Disposição satisfatória de lodo” (AM2) foi considerada um importante indicador ambiental de desempenho das ETEs. As práticas de tratamento e disposição do lodo são importantes para a proteção ambiental, pois o teor de poluentes orgânicos residuais, metais tóxicos e microrganismos patogênicos podem causar problemas de saúde, precisando ser removidos (GHERGHEL; TEODOSIU; DE GISI, 2019). O método mais adequado de disposição final do lodo deve ser escolhido para aumentar a produção limpa e a reutilização do lodo, minimizando o seu impacto ambiental, enquanto maximiza o seu valor de utilização (LI *et al.*, 2021).

CONCLUSÕES

Os métodos multicritério Delphi e AHP se mostraram eficientes para alcançar o objetivo deste trabalho. A aplicação do método Delphi possibilitou identificar consensos e divergências de opiniões dos atores de decisão sobre os IDs selecionados para avaliar o desempenho das ETEs. Já o método AHP com *ratings* permitiu a avaliação e hierarquização dos indicadores segundo seus pesos.

A metodologia deste trabalho pode ser aplicada a outras situações de contexto, possibilitando a variação dos indicadores de acordo com a disponibilidade de dados. Espera-se com esses resultados dar suporte aos atores de decisão do contexto das ETEs, fornecendo contribuições relevantes para a avaliação de inconformidades de natureza operacional e de atendimento aos padrões e condições de lançamento de efluentes tratados. Assim, será possível implementar ações que garantam a qualidade da água dos corpos hídricos receptores e a sustentabilidade das estações ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALEGRE, H.; HIRNER, W.; BAPTISTA, J. M.; PARENA, R. *Indicadores de Desempenho para Serviços de Abastecimento de Água*. Tradução e adaptação de DUARTE, P.; ALEGRE, H.; BAPTISTA, J.M. London: International Water Association (IWA), Instituto Regulador de Águas e Resíduos (IRAR) e Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2004. 277 p.
2. BEZERRA, S. T. M.; PERTEL, M.; MACÊDO, J. E. S. Avaliação de desempenho dos sistemas de abastecimento de água do Agreste brasileiro. *Ambiente Construído*, v. 19, n. 3, p. 249-258, 2019.
3. COSSIO, C.; NORRMAN, J.; MCCONVILLE, J.; MERCADO, A.; RAUCH, S. Indicators for sustainability assessment of small-scale wastewater treatment plants in low and lower-middle income countries. *Environmental and Sustainability Indicators*, v.6, p. 100028, 2020.

4. CREATIVE DECISIONS FOUNDATION. *Super Decisions software for decision making*. Disponível em: <<http://www.superdecisions.com>> Acesso: 15 abr. 2021.
5. DONG, X.; ZHANG, X.; ZENG, S. Measuring and explaining eco-efficiencies of wastewater treatment plants in China: An uncertainty analysis perspective. *Water Research*, v. 112, p. 195-207, 2017.
6. FRANÇOZO, R.V.; SILVA, A. C. S.; BELDERRAIN, M. C. N. Avaliação de Projetos em Feiras Científicas Estudantis Combinando Value-Focused Thinking e Analytic Hierarchy Process. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, 19., 2019, Rio de Janeiro, RJ. *Anais ...* Rio de Janeiro: Centro de Análises de Sistemas Navais, 2019.
7. GBEDEDO, M. A.; LIYANAGE, K. Descriptive framework for simulation-aided sustainability decision-making: A Delphi study. *Sustainable Production and Consumption*, v. 22, p. 45-57, 2020.
8. GHERGHEL, A.; TEODOSIU, C.; DE GISI, S. A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. *Journal of cleaner production*, v. 228, p. 244-263, 2019.
9. GÓMEZ-LLANOS, E.; DURÁN-BARROSO, P.; MATÍAS-SÁNCHEZ, A. Management effectiveness assessment in wastewater treatment plants through a new water footprint indicator. *Journal of Cleaner Production*, v. 198, p. 463-471, 2018.
10. IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Panorama Municipal 2018: Fortaleza*. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/fortaleza/panorama>> Acesso: 17 jan. 2021.
11. LI, Y.; XU, Y.; FU, Z.; LI, W.; ZHENG, L.; LI, M. Assessment of energy use and environmental impacts of wastewater treatment plants in the entire life cycle: A system meta-analysis. *Environmental Research*, v. 198, p. 110458, 2021.
12. MATOS, R.; CARDOSO, A.; ASHLEY, R.; DUARTE, P.; MOLINARI, A.; SCHULZ, A. *Indicadores de Desempenho para Serviços de Águas Residuais*. Tradução e adaptação de MATOS, R.; CARDOSO, A.; DUARTE, P.; NEVES, E. B.; RODRIGUES, R. London: International Water Association (IWA), Instituto Regulador de Águas e Resíduos (IRAR) e Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2004. 283 p.
13. MICHALAKE, A. E.; SILVA, C. R.; SILVA, F. F. Análise dos parâmetros físico-químicos do esgoto tratado de Curitiba (PR)-Estação Belém. *Ciência e Natura*, v. 38, n. 3, p. 1560-1569, 2016.
14. NAM, S. N.; NGUYEN, T. T.; OH, J. Performance Indicators Framework for Assessment of a Sanitary Sewer System Using the Analytic Hierarchy Process (AHP). *Sustainability*, v. 11, n. 10, p. 2746, 2019.
15. NYGREN, N. A.; TAPIO, P.; QI, Y. Lake management in 2030 - Five future images based on an international Delphi study. *Futures*, v. 93, p. 1-13, 2017.
16. OLIVEIRA, S. M. A. C.; VON SPERLING, M. Avaliação de 166 ETEs em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Parte 1: análise de desempenho. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 10, n. 4, p. 347-357, 2005.
17. SAATY, T.; VARGAS, L. *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. 1. ed. New York: Springer, 2001.
18. SALA-GARRIDO, R.; MOLINOS-SENANTE, M.; HERNÁNDEZ-SANCHO, F. Comparing the efficiency of wastewater treatment technologies through a DEA metafrontier model. *Chemical Engineering Journal*, v. 173, n. 3, p. 766-772, 2011.
19. THEBALDI, M. S.; SANDRI, D.; FELISBERTO, A. B.; DA ROCHA, M. S.; NETO, S. A. Qualidade da água de um córrego sob influência de efluente tratado de abate bovino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental- Agriambi*, v. 15, n. 3, 2011.
20. VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade da água e ao tratamento de esgoto*. Volume 1, 4 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. 472 p.
21. ZANGENEHMADAR, Z.; MOSELHI, O. Prioritizing deterioration factors of water pipelines using Delphi method. *Measurement*, v. 90, p. 491-499, 2016.