



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Planaltina - FUP
Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - PROFÁGUA

Felipe do Nascimento Martins

**ANÁLISE MULTICRITERIAL PARA PRIORIZAÇÃO DE
PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS**

BRASÍLIA

2022



Felipe do Nascimento Martins

**ANÁLISE MULTICRITERIAL PARA PRIORIZAÇÃO DE
PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS**

Dissertação apresentada à Universidade de Brasília (UnB) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre do Programa Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA).

Área do conhecimento: Regulação e governança dos recursos hídricos.

Orientadora: Lucijane Monteiro de Abreu

Brasília-DF

2022



Banca Examinadora

Profa. Dra. Lucijane Monteiro de Abreu
Presidente

Prof. Dr. Mauro Roberto Felizatto
Membro externo

Prof. Dr. Weeberb João Réquia Júnior
Membro interno

Prof. Dr. Carlos José Sousa Passo
Suplente

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Linha do tempo dos SADs aplicado às ETEs.....	15
Figura 2. Principais SADs mencionados na literatura.....	16
Figura 3. Principais aplicações dos SADs no âmbito das ETEs.....	18
Figura 4. Protocolo de revisão sistemática da literatura.....	20
Figura 5. Resultados após aplicação do protocolo de pesquisa.....	23
Figura 6. Detalhamento estruturado dos principais aspectos considerados em estudos anteriores	26
Figura 7. Sistematização do tipo de pesquisa.....	51
Figura 8. Protocolo de revisão sistemática da literatura.....	52
Figura 9. Problemáticas decisórias α , β , γ e δ	55
Figura 10. Síntese da problemática multicritério.....	56
Figura 11. Modelo econômico – Simulação de Monte Carlo.....	58
Figura 12. Diagrama de desenvolvimento do modelo multicritério e métodos de apoio.....	60
Figura 13. Unidade Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Rio Paracatu – SF7.....	69
Figura 14. Síntese do sistema de esgotamento sanitário de Santa Fé de Minas.....	74
Figura 15. Performance do cenário I segundo cada critério de avaliação.....	75
Figura 16. Síntese do sistema de esgotamento sanitário de Buritizeiro.....	78
Figura 17. Performance do cenário II segundo cada critério de avaliação.....	79
Figura 18. Síntese do sistema de esgotamento sanitário de Paracatu.....	81
Figura 19. Performance do cenário III segundo cada critério de avaliação.....	82



LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Detalhamento do protocolo de pesquisa	22
Tabela 2. Aplicações dos métodos multicriteriais identificados na literatura	24
Tabela 3. Soluções tecnológicas de tratamento de esgotos	42
Tabela 4. Detalhamento do protocolo de pesquisa.	53
Tabela 5. Distribuição econômica das alternativas de tratamento.....	62
Tabela 6. Alternativas do modelo de priorização	63
Tabela 7. Critérios para seleção de sistemas de tratamento de esgoto observados na literatura ...	65
Tabela 8. Critérios adotados para seleção dos sistemas de tratamento	66
Tabela 9. Pesos dos critérios de avaliação.....	67
Tabela 10. Modelagem de preferência para utilização dos métodos multicriteriais	68
Tabela 11. Concessão de água, mananciais e demandas na bacia do Paracatu	71
Tabela 12. Concessão de esgoto, carga e população atendida na bacia do Paracatu.....	72
Tabela 13. Classificação das alternativas de ETes par ao cenário I.....	76
Tabela 14. Classificação das alternativas de ETes para o cenário II	80
Tabela 15. Classificação das alternativas de ETes par ao cenário III.....	83

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
APP	Áreas de Preservação Permanente
ASM	<i>Activated sludge models</i>
CBA	Abordagem de escolha por vantagens
CERH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
COPAM	Conselho de Política Ambiental
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio; (mg/L)
DM-LCA	Modelagem dinâmica e avaliação do ciclo de vida
DOI	<i>Digital Object Identifier</i>
DP	Desvio-padrão
DQO	Demanda Química de Oxigênio; (mg/L)
ELECTRE I	<i>Elimination and Choice Expressing Reality I</i>
ELECTRE III	<i>Elimination and Choice Expressing Reality III</i>
ELECTRE IV	<i>Elimination and Choice Expressing Reality IV</i>
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FB	Filtro Biológico
GEE	Gases do Efeito Estufa
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISSN	<i>International Standard Serial Number</i>
MADA	Método de Análise de Decisão por Atributos Múltiplos de Grupo
MADM	Abordagem de tomada de decisão com múltiplos atributos
MAVT	Teoria dos valores de atributos múltiplos
Máx	Valor máximo
MBR	Biorreator de membrana
MCDM	<i>Multi-Criteria Decision Making</i>
MG	Minas Gerais
Mín	Valor mínimo
MO	Matéria orgânica
N	Nitrogênio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável



ONU	Organização das Nações Unidas
P	Fósforo
PDBHRP	Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu
PIB	Produto Interno Bruto
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
PROFÁGUA	Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations</i>
Q	Vazão média afluyente; (m ³ /d)
Qeb	Vazão de esgoto bruto (m ³ /d)
RAALF	Reator anaeróbio- aeróbio de fluxo horizontal
RBC	Raciocínio Baseado em Casos
RNA	Processo de Rede Analítica
RNA	Redes Neurais Artificiais
SAAE	Serviços Autônomos de Água e Esgoto
SAD	Sistema de Apoio à Decisão
SBC	Sistemas Baseados em Conhecimento
SF	São Francisco
SIAD	Sistemas Inteligentes de Apoio à Decisão
SMAA	Análise de aceitabilidade de múltiplos critérios
SMC	Simulação de Monte de Carlo
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento;
TIR	Taxa Interna de Retorno
TOPSIS	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
TS	Tanque Séptico
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UnB	Universidade de Brasília
UPGRH	Unidade Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos
VPL	Valor Presente Líquido
VPLA	Valor Presente Líquido Anualizado
Wos	<i>Web of Science</i>
x	Média

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	3
1.1. Problema de Pesquisa	5
1.2. Objetivos.....	5
1.2.1. Objetivo Geral	5
1.2.2. Objetivos Específicos	5
1.3. Justificativa.....	6
1.4. Estrutura da Dissertação	7
1.5. Sistematização do Artigo I – Síntese dos principais sistemas apoio à decisão para estações de tratamento de efluentes: o estado da arte, restrições e desafios dos métodos multicriteriais .	7
1.6. Sistematização do Artigo II – Análise multicriterial para priorização de estações de tratamento de efluentes (ETEs): estudo de caso na Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu	8
2. Artigo I – Síntese dos principais sistemas apoio à decisão para estações de tratamento de efluentes (ETEs): o estado da arte, restrições e desafios dos métodos multicriteriais	9
2.1. INTRODUÇÃO.....	11
2.2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.2.1. Evolução histórica do SAD aplicado às ETES	12
2.2.2. Principais categorias de SADs.....	15
2.2.3. Aplicação das ferramentas MCDM para priorização de ETES	18
2.3. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
2.4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	23
2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
2.6. REFERÊNCIAS	29
3. Artigo II - Análise multicriterial para priorização de processos de tratamento de esgotos (ETEs): estudo de caso na Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu	37
3.1. INTRODUÇÃO.....	39
3.2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	39
3.2.1. Panorama do saneamento básico no Brasil.....	39
3.2.2. Sistemas de tratamento de esgotos	41
3.2.3. Critérios para priorização de ETES.....	45
3.2.4. Simulação de Monte Carlo	46
3.2.5. ELECTRE-TRI.....	47
3.2.6. TOPSIS.....	48
3.3. METODOLOGIA	50
3.3.1. Tipo de pesquisa.....	50



3.3.2.	Revisão sistemática da literatura	51
3.3.3.	Definição dos métodos multicriteriais de auxílio à decisão	54
3.3.4.	Definição das alternativas e critérios.....	56
3.3.5.	Consulta aos especialistas e enquadramento dos pesos atribuídos.....	59
3.3.6.	Desenvolvimento do modelo de priorização de ETEs.....	59
3.3.7.	Aplicação do modelo, análise dos resultados e conclusões.....	60
3.4.	DESENVOLVIMENTO DO MODELO	61
3.4.1.	Seleção das alternativas	61
3.4.2.	Seleção dos critérios	64
3.4.3.	Métodos multicriteriais.....	67
3.5.	APLICAÇÃO DO MODELO.....	68
3.5.1.	Características gerais da bacia hidrográfica do Rio Paracatu.....	69
3.5.2.	Diagnóstico dos serviços de água e esgoto.....	71
3.5.3.	Estudo de caso: Santa Fé de Minas	73
3.5.4.	Estudo de caso: Buritizeiro.....	77
3.5.5.	Estudo de caso: Paracatu	81
3.6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
4.	REFERÊNCIAS	89

1. INTRODUÇÃO

A Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu a Agenda 2030 que traz 17 objetivos para o desenvolvimento sustentável (ODS) com vistas a transformar o nosso mundo atual. Dentre eles, o objetivo número 6 pretende assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento de acesso universal a todos e todas.

Os indicadores de desenvolvimento humano estão diretamente relacionados ao acesso da população aos serviços de saneamento básico. Nos países em desenvolvimento, é notório que o agravamento dos indicadores de saúde, tais como expectativa de vida, taxa de mortalidade infantil e doenças epidêmicas de veiculação hídrica são influenciados pela baixa cobertura dos serviços de água e esgoto (TEIXEIRA, *et al.*, 2012).

Nesse contexto, o Brasil ocupa a 105º lugar no ranking mundial em termos de acesso a esses serviços essenciais, ficando atrás de países como a África do Sul, Jordânia e México (BARCELLOS, *et al.*, 2018). Em 2021, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), verificou a necessidade de ampliar os investimentos para o setor na ordem 20 bilhões de reais por ano, mas na realidade menos da metade desse montante vem sendo investido.

O Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil, elaborado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) aponta que o uso dos recursos hídricos deverá crescer 24% até 2030. Em contraponto com à disponibilidade e qualidade desse recurso cada vez menores, surge a necessidade crescente de priorizar o reúso das águas e o tratamento dos esgotos sanitários.

O lançamento de efluentes em corpos d'água, quando ocorre de maneira inadequada, sem observar as condições e padrões mínimos de qualidade, bem como na ocasião de violar a capacidade de suporte do corpo receptor, compromete o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos gerando graves consequências ao meio e à saúde pública, quais sejam: eutrofização, toxicidade e patogenicidade dos organismos vivos, transmissão de doenças, problemas estéticos, maus odores, além de elevar os custos operacionais de tratamento (VON SPERLING, 2014; KALBAR *et al.*, 2016).

Nessa seara, pesquisas recentes dos autores Hunt (2013), Molinos *et al.* (2015), Goffi (2017) e Sousa (2019) reiteram a complexidade de gerenciar projetos de sistemas de tratamento de esgotos, tendo em vista a insuficiência de recursos financeiros aplicados no setor, desde a

concepção, manutenção e ampliação das estações de tratamento de esgoto (ETEs), sendo que essas necessitam de constante atualização em busca de soluções mais avançadas e eficientes.

Entretanto, o método para definição do sistema de tratamento mais adequado não vem sendo empregado de maneira coerente, visto que envolve inúmeras alternativas acrescido de múltiplas variáveis, por vezes conflitantes e de difícil mensuração. Assim, o processo de tomada de decisão para priorização de ETEs é complexo e dispendioso, sobretudo em municípios de pequeno e médio porte com dificuldades financeiras (TAN *et al.*, 2014; MOLINOS *et al.*, 2015; GOFFI, 2017).

Ademais, consoante com Von Sperling (2014) a definição de tecnologias para tratamento de esgoto tem ocorrido de modo insatisfatório e pouco fundamentado, considerando por vezes apenas elementos econômicos e de performance tecnológica. Por consequência, a escolha da ETE ideal deve considerar o maior número de variáveis intrínsecas, a fim de assegurar uma solução ótima (MAURER *et al.*, 2012; GOFFI, 2017).

Nesse contexto, o processo de seleção de sistemas de tratamento de efluentes em âmbito municipal tem por enfoque antever uma determinada situação real, avaliando o desempenho de cada projeto antes mesmo de sua implantação. Um processo consciente baseado em ferramentas de análise e de apoio à tomada decisão favorece a concepção de uma futura ETE. Os fundamentos para utilização de tecnologias apropriadas ao serem adaptadas a uma metodologia coerente são capazes de influenciar de maneira positiva os gestores públicos em diferentes esferas de governo (NETTO *et al.*, 2012; MERLIN *et al.*, 2013).

Assim sendo, o presente estudo tem por enfoque abordar as etapas que antecedem à tomada de decisão relacionadas ao planejamento de estações de tratamento de esgoto doméstico, considerando a problemática de hierarquização das tecnologias apropriadas, bem como o conjunto de processos recomendados que atenda a realidade dos municípios inseridos na bacia hidrográfica do Rio Paracatu.

O projeto de pesquisa está apresentado no formato *multipaper*, composto por dois artigos. Os artigos são independentes e desenvolvidos através de procedimentos metodológicos específicos. Contudo, no contexto do estudo os artigos possuem um fio condutor, ou seja, as produções se complementam, principalmente através da revisão sistemática que corrobora para a aplicação dos métodos e a análise dos resultados.

1.1. Problema de Pesquisa

O desempenho insatisfatório dos projetos de saneamento, principalmente, aqueles no âmbito das bacias hidrográficas tem sido objeto de debate entre especialistas e gestores públicos em todo país. Nessa seara, verificam-se falhas durante o processo decisório de escolha dos sistemas de tratamento, o que interfere negativamente na concepção de infraestruturas básicas, prevalecendo alternativas obsoletas como sumidouros e lançamentos *in natura* em corpos d'água (MOLINOS *et al.*, 2015; BRINGER, *et al.*, 2018; SOUSA, 2019)

Convém, também, ressaltar que alguns autores recomendam que o planejamento e gestão dos recursos hídricos seja avaliado sob uma perspectiva sistêmica e integrada ao seu meio. Nessa conjuntura, é imprescindível a análise dos aspectos sociais, econômicos, técnicos e ambientais das soluções tecnológicas. Assim, as pesquisas operacionais, através dos métodos de auxílio à decisão, vêm sendo utilizadas para selecionar opções de sistemas de tratamento de esgotos (CASTILLO, *et al.*, 2016; FANTIN, *et al.*, 2017;).

Tomando por base o exposto, as principais questões a serem respondidas com esse projeto de pesquisa são: **Quais são os principais sistemas multicriteriais de apoio à decisão para ETEs registrados na literatura? Como a análise multicritério possibilitaria a avaliação dos aspectos sociais, econômicos, técnicos e ambientais para priorização de ETEs?**

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

O presente estudo tem por objetivo desenvolver um modelo multicritério de apoio à decisão para priorização de processos de tratamento de esgoto (ETEs).

1.2.2. Objetivos Específicos

- Identificar os sistemas multicriteriais de apoio à decisão aplicado ao contexto das ETEs, por meio de uma revisão sistemática, contemplando o estado da arte;
- Analisar a questão dos sistemas de tratamento sob as dimensões econômica, técnica, social e ambiental para auxiliar no desenvolvimento do modelo;

- Selecionar variáveis que contemplem as dimensões econômica, técnica e social para assegurar um processo de tomada de decisão racional, estruturado e transparente;
- Aplicar o modelo multicriterial à tomada de decisão em municípios localizados na bacia hidrográfica do Rio Paracatu (MG).

1.3. Justificativa

A relevância do estudo se justifica pela constatação de falhas durante o processo decisório para seleção dos projetos de saneamento municipais, principalmente, aquelas ligadas a soluções subdimensionadas, sistemas obsoletos e definição de tecnologias baseada apenas no menor preço. Quanto a utilização das análises multicritério, os autores Salisbury *et al.* (2018) afirmam que ao serem associadas alternativas e preferências de uma equipe de especialistas é factível escolher o sistema de tratamento mais adequado.

Butchart-Kuhlmann, Kralisch, Fleischer e Meinhardt (2018) afirmam, também, que sistemas multicriteriais de suporte à decisão buscam opções que levam em consideração a redução de custos, a minimização dos impactos ambientais, a identificação das alternativas técnicas e socialmente mais aceitáveis, além, claro, de propiciar o envolvimento da comunidade científica em todo processo de gestão.

Dessa forma, o modelo proposto considera uma série de alternativas que, ao serem comparadas a diferentes critérios multidisciplinares, possibilita ao agente envolvido optar pela melhor alternativa tecnológica. Ademais, no Brasil, existe a necessidade institucional de um planejamento eficiente das ações e, sobretudo, transparência nas tomadas de decisão ao priorizar os investimentos para o setor. Assim, os resultados da pesquisa poderão fundamentar a seleção de ETEs, que são de grande relevância por assegurar a manutenção do meio ambiente, a saúde e o desenvolvimento social.

1.4. Estrutura da Dissertação

A dissertação está estruturada no formato *multipaper*, composta por artigos publicáveis, sendo que esses poderão ser submetidos à publicação antes ou depois da apresentação (BARBOSA, 2015). Essa modalidade de trabalho acadêmico não segue o padrão tradicional, uma vez que é composta por um conjunto de artigos, cada qual com características distintas, tais como: objetivos, referencial teórico, materiais e métodos, resultados, discussões e conclusão (FRANK; YUKIHARA, 2013).

Desse modo, essa dissertação será estruturada em capítulos, sendo que o **primeiro capítulo** apresenta a introdução do tema, problema de pesquisa, objetivos, justificativa, estrutura da dissertação e a sistematização dos dois artigos.

O **segundo capítulo** corresponde ao Artigo I – “Síntese dos principais sistemas de apoio à decisão para escolha de estações de tratamento de efluentes (ETEs): o estado da arte, restrições e desafios dos métodos multicriteriais”. O presente estudo foi concebido por intermédio de uma revisão sistemática da literatura, baseado no protocolo de pesquisa proposto pelos autores Moher, Liberati, Tetzlaff *et al.* (2015), em que permitiu a categorização dos artigos para o levantamento dos principais métodos multicriteriais e suas aplicações.

O **terceiro capítulo** diz respeito ao Artigo II – “Análise multicriterial para priorização de estações de tratamento de efluentes (ETEs): estudo de caso na Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu”. Esse estudo tem por objetivo desenvolver um modelo para seleção de sistemas e tecnologias de tratamento de efluentes, baseado nos métodos multicriteriais *Elimination and Choice Translating Algorithm* (ELECTRE-TRI) apresentado por Roy (1996) e *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) proposto por HWANG e YOON (1981). Ademais, o modelo será aplicado como uma ferramenta auxiliar na determinação de ETEs para três municípios na bacia hidrográfica do rio Paracatu.

1.5. Sistematização do Artigo I – Síntese dos principais sistemas apoio à decisão para estações de tratamento de efluentes: o estado da arte, restrições e desafios dos métodos multicriteriais

O artigo I tem por intuito identificar o estado da arte dos principais métodos de apoio à decisão, bem como a aplicação das ferramentas *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM) no contexto para priorização de ETEs. Nesse estudo, poderemos realizar o levantamento de artigos

científicos publicados nas principais revistas vinculadas às bases de dados Periódicos Capes, *Web of Science* (WoS) e *Science Direct*.

A metodologia utilizada foi a revisão sistemática da literatura através da sequência de etapas baseadas no modelo Prisma (MOHER; LIBERATI; TETZLAFF *et al.*, 2015). O emprego da abordagem sistemática permite uma maior exatidão e melhores níveis de confiabilidade durante a revisão da literatura. Isso esboça uma estratégia e um método sistemático para processar buscas e analisar resultados, que possibilite reiterar ciclos contínuos até alcançar os propósitos da revisão (CONFORTO, AMARAL e SILVA, 2011).

Nessa perspectiva, o estudo categoriza os principais *papers*, títulos e autores encontrados nos periódicos nacionais e estrangeiros de classificação Qualis A1 e A2, cuja a matéria seja relacionada as ferramentas MCDM de aplicabilidade ao tema. Assim, os resultados obtidos pela pesquisa serão melhor estruturados e preferíveis, considerando a sistematização pormenorizada.

1.6. Sistematização do Artigo II – Análise multicritério para priorização de estações de tratamento de efluentes (ETEs): estudo de caso na Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu

O artigo II contempla o desenvolvimento e aplicação do modelo multicritério para escolha de ETEs que atendam a realidade de três municípios na bacia hidrográfica do rio Paracatu. A pesquisa está composta por uma base teórica que apresenta o panorama do saneamento no Brasil, as tecnologias e sistemas de tratamento disponíveis na atualidade e os critérios mais comuns para definição de projetos, assim como os fundamentos da análise multicritério, especialmente, aqueles relacionados aos métodos ELECTRE-TRI e TOPSIS.

O material e métodos contemplarão a definição do tipo de pesquisa, o procedimento para coletas de dados e as etapas para construção do modelo de apoio à decisão, baseados na revisão da literatura apontada no artigo I. A metodologia descreve os procedimentos para avaliação do desempenho de ETEs, segundo as preferências de alternativas e critérios selecionados em consulta à especialistas. Dessa forma, as etapas que necessitem de validação com as partes interessadas serão realizadas consultas online através do *Microsoft Forms*.

2. Artigo I – Síntese dos principais sistemas apoio à decisão para estações de tratamento de efluentes (ETEs): o estado da arte, restrições e desafios dos métodos multicriteriais

RESUMO

O emprego de sistemas de apoio à decisão (SAD) possibilita o diagnóstico prévio de projetos, baseado na abordagem integrada à análise de problemas, a fim de fornecer uma solução ótima dentre as opções disponíveis. Desse modo, o presente estudo realizou uma revisão sistemática dos principais SADs aplicados ao contexto das estações de tratamento de esgoto (ETE). O protocolo de pesquisa considerou os artigos científicos vinculados às bases de dados Periódicos Capes, *Web of Science* (WoS) e *Science Direct*, categorizando os principais métodos multicriteriais e suas aplicações. Nessa conjuntura, os resultados obtidos indicam que os critérios econômico, técnico/operacional e social são bastante explorados na literatura, apesar dos aspectos sustentáveis serem amplamente difundidos nos últimos anos. Ademais, as técnicas com maior relevância para seleção de sistemas de tratamento são o ELECTRE-TRI, TOPSIS e AHP, assim como os softwares WiSDOM e NovEDAR_EDSS. Conclui-se, portanto, que o uso de SADs contribui com o processo decisório de escolha de projetos, favorecendo a economia de recursos e maior nível de eficiência dos sistemas de tratamento de esgoto.

Palavras-chave: Saneamento. Tratamento de Esgoto. Sistema de apoio à decisão. MCDM.

ABSTRACT

The use of decision support systems (DSS) enables the prior diagnosis of projects, based on the integrated approach to problem analysis, in order to provide an optimal solution among the available options. Thus, the present study carried out a systematic review of the main SADs applied to the context of sewage treatment plants (ETE). The research protocol considered the scientific articles linked to the Capes, Web of Science (WoS) and Science Direct databases, categorizing the main multicriteria methods and their applications. In this context, the results obtained indicate that the economic, technical / operational and social criteria are extensively explored in the literature, despite the sustainable aspects being widely disseminated in recent years. In addition, the most relevant techniques for selecting treatment systems are ELECTRE-TRI, TOPSIS and AHP, as well as WiSDOM and NovEDAR_EDSS software. It is concluded, therefore, that the use of SADs contributes to the decision-making process for choosing projects, favoring resource savings and a higher level of efficiency in sewage treatment systems.

Keywords: Sanitation. Sewage treatment. Decision support system. MCDM.

2.1. INTRODUÇÃO

A concepção dos sistemas de tratamento de esgotos tem por intuito representar os fenômenos naturais de degradação que ocorrem nos corpos hídricos, logo após o lançamento dos efluentes domésticos, sustentando condições controladas e taxas sustentáveis de tratamento (VON SPERLING, 2014). Nessa direção, alguns autores como Garrido-Baserba, Hospido, Reif, *et al.*, (2016) afirmam que o projeto de uma estação de tratamento de esgoto (ETE) deve considerar ao menos três metas de sustentabilidade, quais sejam: preservação ambiental (baixo nível de poluição), progresso econômico (custos de implantação e operação) e confiança social (proteção sanitária).

Convém, também, mencionar que a priorização de ETEs deve observar o nível de tratamento e efetividade na remoção de poluentes desejada, a fim de definir os processos e operações necessárias para escolha do projeto que forneça um tratamento confiável com menor gasto de recursos possível (VON SPERLING, 2014; POCH *et al.*, 2017). Segundo Benedetti *et al.*, (2010), o planejamento tradicional das plantas operacionais não aborda objetivamente os riscos envolvidos durante o processo decisório. Nesse sentido, a adesão de um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) no decorrer do projeto pode fornecer um juízo de valor mais abrangente (BISINELLA DE FARIA, *et al.*, 2015).

O SAD proporciona ao observador a seleção de uma resposta plausível para problemas específicos em um curto espaço de tempo (HAMOUDA, 2011). Desse modo, a construção teórica define os SADs como conjuntos baseados em computador, aplicáveis a diferentes problemas e cenários, em função das informações disponíveis, permitindo analisar a viabilidade com intuito de fornecer uma solução ótima entre as alternativas acessíveis (TORREGROSSA, *et al.*, 2017).

De acordo com Hamouda (2011) e Gomes (2012), nos últimos anos, o emprego do SAD nas organizações permitiu escolher soluções tecnológicas com maiores níveis de confiança e sustentabilidade, em virtude da abordagem integrada à análise de problemas. Existem quatro categorias principais de SADs aplicados às ETEs tratadas na literatura: tomada de decisão multicritério, modelos matemáticos, avaliação do ciclo de vida, e mais recentemente, os sistemas de apoio à decisão inteligentes (PASCUAL PAÑACH *et al.*, 2018).

2.2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.2.1. Evolução histórica do SAD aplicado às ETEs

Na década de 1960, o desenvolvimento de SADs aplicado ao contexto das ETEs surgiu a partir da carência de otimização dos sistemas de tratamento existentes na época. A lacuna de conhecimento sobre os fenômenos de transporte, dinâmica de processos e a complexidade operacional das estações que não contavam com instrumentos de automação e controle, podem ser considerados os principais impasses daquele período (ANZALDI *et al.*, 2014).

Nesse ínterim, o advento tecnológico proporcionou a comunidade científica ter acesso a sistemas informatizados, esses capazes de contribuir na estruturação de projetos e operação dos sistemas de tratamento de esgotos (OLSSON, *et al.*, 2003). Em vista disso, os SADs começaram a ser utilizados para solucionar problemas próprios relacionados às ETEs, inclusive alguns estudos de programação linear avançam para obtenção de modelos de qualidade de água (DEININGER, 1965).

Nos anos 1970, o conhecimento adquirido sobre a mecânica de fluídos integrado a compreensão dos diferentes níveis de tratamento admitiu a utilização de SADs mais robustos dedicados ao tratamento das águas residuais (CONVERSE, 1972). Naquela época, os autores Hahn *et al.*, (1973) e Klemetson (1975) destacam o início do uso de funções algorítmicas com viés nos custos, sobretudo, em modelos de otimização da qualidade operacional para obter melhores soluções dentre as alternativas ofertadas pelos SADs. Contudo, apesar do período ter sido imprescindível para o desenvolvimento apoiado em modelos matemáticos, é retratada adversidades quando aplicado aos casos reais (DE MELO e CAMARA, 1994).

Nesse âmbito, nos anos de 1980, algumas pesquisas retratam o avanço dos SADs no sentido de considerar as variáveis climáticas, tendo em vista a sazonalidade no hemisfério norte, principalmente, o verão e inverno que exigiam atenção especial devido a dinamicidade dos padrões de qualidade (KLEMETSON e GRENNEY, 1985). Segundo Henze *et al.*, (2000), o conhecido *Activated sludge models* (ASM), modelo de lodos ativados foi apresentado a comunidade científica, baseado no entendimento sobre cinemática aplicado à modelagem matemática. Nesse decurso, surge os primeiros trabalhos que tentavam imitar o raciocínio de especialistas, utilizando técnicas de inteligência artificial, sendo reconhecidos como os precursores dos Sistemas Inteligentes de Apoio à Decisão (SIAD) (BERTHUEX *et al.*, 1987; MAEDA, 1989; TZAFESTAS e LIGEZA, 1989).

A década de 90, de acordo com os autores Evenson e Baetz (1994), sobreveio a proposta de dividir o fluxograma de uma ETE em três etapas: elencar os processos de tratamento viáveis; executar testes de bancada aplicando os processos no modelo proposto; e eleger a melhor alternativa entre as opções testadas. Ademais, as preocupações com controle operacional, segurança e risco de acidentes impulsionaram o uso de sistemas via internet para aprimorar o gerenciamento das plantas (RODRIGUEZ-RODA *et al.*, 2000; OLSSON *et al.* 2003).

Nessa época, a busca por SIADs com a intenção de atender demandas de múltiplos propósitos aumentou demasiadamente, especialmente, os Sistemas Baseados em Conhecimento (SBC) com aplicação no diagnóstico prévio de ETEs de lodo ativado (SERRA *et al.*, 1994); assim como para o atendimento dos padrões de qualidade da água (KROVVIDY e WEE, 1993); soluções tecnológicas de controle e operação de ETEs para economia de recursos (BECK *et al.*, 1990); e alguns estudos sugeriram a aplicação do Raciocínio Baseado em Casos (RBC) para supervisão de estações de tratamento (SÀNCHEZ-MARRÈ *et al.*, 1997). Além disso, a divulgação dos SIADs no domínio das ciências ambientais favoreceu a criação de um desenho global mais adequado para ETEs, aprimorado posteriormente por POCH (2004).

Os anos 2000, as pautas que defendiam o desenvolvimento sustentável tiveram ampla notoriedade no contexto internacional, sobretudo, preocupações relativas a economia, aspectos sociais e meio ambiente (AHMED *et al.*, 2002). Nesse período, a Diretiva Quadro da Água (2000/60/CE) estabeleceu ações comunitárias no âmbito da política de recursos hídricos europeia, que previa metas para atingir bons níveis de tratamento das águas residuais. Assim, pesquisas foram concebidas a partir de SADs aplicadas à ETEs com interesse de reduzir a carga de poluentes lançada nos corpos d'água (BORRELL *et al.*, 2002).

Nessa seara, a década ficou marcada pela expansão da inteligência artificial, o que beneficiou o emprego dos sistemas especialistas, cuja a lógica reproduz o raciocínio humano (AHMED *et al.*, 2002). Segundo Hamed, *et al.*, (2004), alguns modelos foram elaborados com fundamento em Redes Neurais Artificiais (RNA), sendo manipulados para antevê a comunicação dos processos em ETEs correlacionando os aspectos econômicos e sociais. Naquele período, apenas a simulação e os parâmetros de qualidade eram empregues como origem de evidências para aprovar deliberações nas ETEs (VRECK *et al.*, 2006). Com base nessas limitações, o *Multiple Criteria Decision Making* (MCDM), método formado em ambiente virtual que utiliza dados dos custos para definição do sistema de tratamento mais satisfatório, ponderando critérios relevantes

com a intenção de apresentar uma ordem de preferência das soluções possíveis para um problema específico (HIDALGO, *et al.*, 2007).

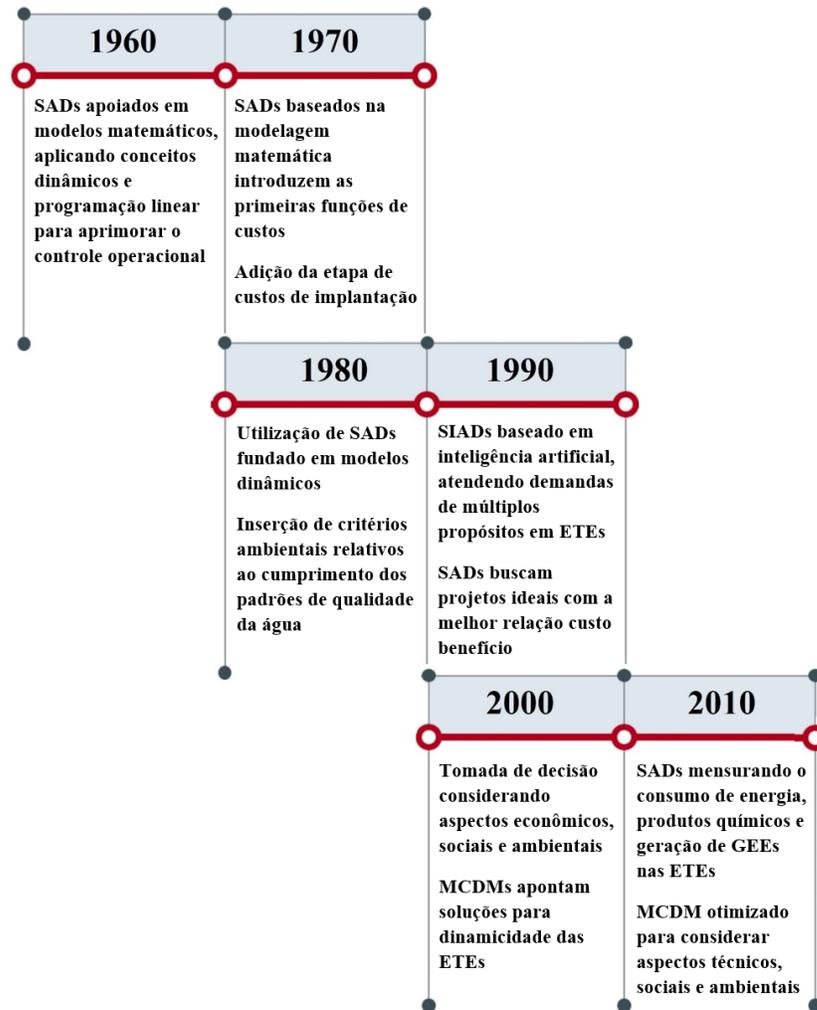
Em meados de 2010, o setor produtivo passou a priorizar a eficiência econômica dos seus processos, a partir da redução do consumo de energia, matéria-prima e produtos químicos. Porém, o próprio mercado exigia aumento da responsabilidade social e ambiental das empresas, além das autoridades cobrarem melhores respostas tocante à pegada de carbono (COMAS *et al.*, 2010; HAKANEN *et al.*, 2011). O debate sobre as mudanças climáticas influenciou a preferência pelos SADs no processo de escolha das ETEs, devido à preocupação com a emissão dos gases dos efeitos estufa (GEEs) (CANIANI *et al.*, 2015).

Zeng *et al.* (2017) afirma que a ampliação da busca por SADs com objetivo de mensurar os gases de efeito estufa (GEEs) nas ETEs está ligada ao receio empresarial com o aspecto sustentável do negócio. Por esse pressuposto, as ferramentas MCDM e SIAD evoluíram no sentido de apoiar os gestores, durante as tomadas de decisão, no esforço de encontrar melhores variações tecnológicas (ARROYO e MOLINOS, 2018). Nesse cenário, em 2006, desponta as abordagens amplamente orientadas em dados através do SIADs, conhecido na atualidade como *Environmental Data Mining* (GIBERT *et al.*, 2012).

A ciência de dados ambiental permitiu novas interpretações fundado na inteligência artificial, principalmente, após o advento do termo *Internet of Things* (IoT) com seus sensores inteligentes, transmissão em tempo real e SIADs modernos (GIBERT *et al.*, 2018). Algumas pesquisas são referências nessa esfera de atuação, quais sejam: revisão de técnicas aplicadas em sistemas gestores de água para suporte à decisão (COROMINAS *et al.* 2018); remoção de poluentes emergentes como hormônios, pesticidas e fármacos (FISCHER *et al.*, 2017); operação apoiada no fluxograma de trabalho das ETEs (PASCUAL PAÑACH *et al.*, 2018). Desse modo, o SAD tornou-se um instrumento primordial de preferência a novos projetos de sistemas de tratamento.

A Figura 1 apresenta o resumo dos principais fatos, nas últimas décadas, que constituíram a evolução histórica dos SADs aplicados às ETEs.

Figura 1. Linha do tempo dos SADs aplicado às ETEs

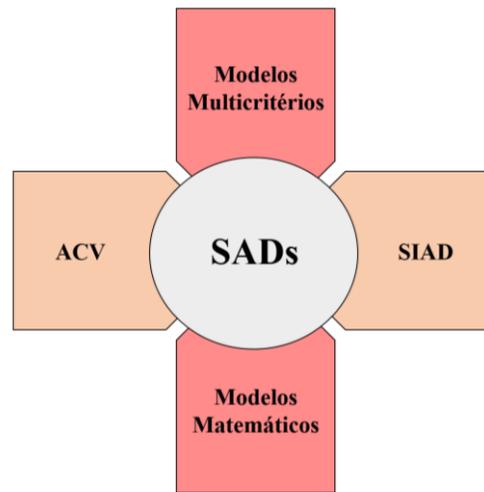


Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.2. Principais categorias de SADs

Nesse tópico, os SADs foram categorizados com o objetivo de trazer uma visão geral das aplicações pertinentes aos sistemas de tratamento de esgotos, de acordo com seus principais atributos. Dessa forma, os SADs mais difundidos e bem aceitos pela comunidade científica são apresentados a seguir: modelos matemáticos; modelos multicritério de tomada de decisão; sistema inteligente de apoio à decisão (SIAD); e avaliação do ciclo de vida (ACV) (Figura 2).

Figura 2. Principais SADs mencionados na literatura



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os modelos matemáticos foram os precursores do SADs, amplamente publicados na literatura, tendo em vista o baixo custo para ser implementado, compreendendo uma série de recursos integrantes das etapas de tratamento (MANNINA *et al.*, 2016). Dentre suas aplicações, Zuthi *et al.* (2012) avaliou a qualidade dos efluentes por meio da remoção biológica do fósforo e amônia; Fenu *et al.* (2010) mediu o metabolismo da biomassa com intuito de entender as taxas de oxigênio e produção de lodo; além de análises das emissões diretas de GEEs (MANNINA *et al.*, 2018).

Nesse contexto, algumas vantagens da utilização de modelos matemáticos podem ser enumeradas: validar resultados em escala de laboratório e fornecer previsões em escala real (Zuthi *et al.*, 2012); disponibilizar uma cadeia de soluções viáveis durante a tomada de decisão (MANNINA e COSENZA, 2013); porém, sua efetivação depende da confiabilidade do banco de dados que fornece os valores padrão, fundamentais para acurácia do modelo (NI e YUAN, 2015). Destarte, esse tipo de SAD simula alternativas de tratamento antes mesmo de sua realização, sendo capaz de conter gastos e solucionar uma adversidade.

Os modelos multicriteriais (MCDM) apresentam arranjo de diferentes critérios e alternativas com a intenção de otimizar o gerenciamento de uma ETE, sobre a perspectiva de múltiplas soluções, desde reduzir os custos de projetos e insumos necessários para operação do sistema, até a efetividade do tratamento após receber elevadas concentrações de matéria orgânica (CHOW *et al.*, 2018). Nesse quadro, existe um consenso na literatura que a observância da

abordagem MCDM comprovou ser um dos SADs mais fidedignos quando se busca a melhoria de ETEs (ZENG *et al.*, 2017; JIANG *et al.*, 2018).

Di Trapani *et al.* (2018) reconhece que adoção do MCDM tem tornado os sistemas de tratamento de esgotos mais sustentáveis, levando em conta a facilidade do decisor de incluir e atribuir pesos iguais aos dos aspectos técnico-financeiros, sendo esses subjetivamente superiores. Os modelos multicriteriais, também, são considerados versáteis no sentido de serem agrupados com outros gêneros de SADs (BISINELLA DE FARIA *et al.*, 2015). Assim, Castillo *et al.* (2016) alcançou a solução ideal, após integrar a base de critérios a um modelo matemático na intenção de gerar uma ordenação de diferentes categorias de tratamento.

Os SIADs consistem no apanhado de técnicas derivadas de elementos estatísticos, sistemas dinâmicos e inteligência artificial, na intenção de subsidiar decisões complexas dos especialistas (SÀNCHEZ-MARRÈ e CORTÉS, 2011). Recentemente, pesquisas foram concebidas para compreender arranjos multifacetados como as bacias hidrográficas, integrada por ETEs distintas, e não apenas projetos individuais (GIBERT *et al.*, 2018).

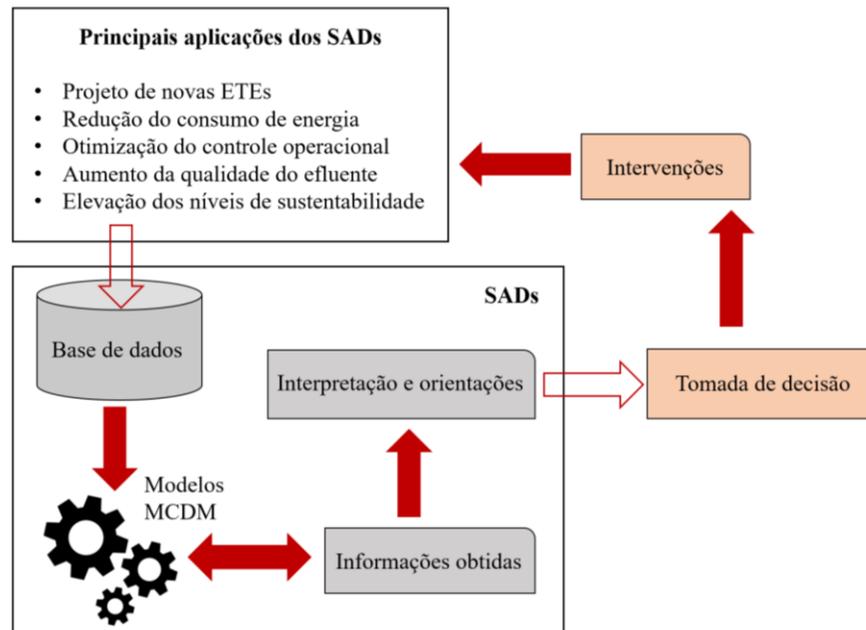
A avaliação do ciclo de vida (ACV) demonstrou ser uma excelente ferramenta de auxílio à decisão, sobretudo, ao analisar os aspectos ambientais desde a origem até o final da cadeia produtiva, bem como qualificar a eficiência dos processos de tratamento (PASQUALINO *et al.*, 2009). Yoshida *et al.* (2014) elaborou indicadores para avaliar os impactos ambientais causados por ETEs, calculando as emissões geradas para verificar seus efeitos sobre a economia, sociedade e meio ambiente. Algumas publicações afirmam que os principais critérios a serem ponderados em estações de tratamento são o consumo de energia, qualidade do efluente final e a produção de lodo (LASSAUX *et al.*, 2007).

Convém, também, mencionar o interesse singular das companhias de saneamento nos estudos a respeito da metodologia ACV, tendo em vista a necessidade de reduzir os custos operacionais, limitar as cargas poluidoras, reutilizar o lodo e recuperar os gases para produção de energia (ZARKADAS *et al.*, 2016). Nos últimos anos, pesquisas acerca da ACV dissertaram sobre vários escopos: estudos de caso sobre os impactos ambientais de ETEs (PINTILIE *et al.*, 2016); estratégias de aperfeiçoamento das operações associada a modelagem matemática (BISINELLA DE FARIA *et al.*, 2015); e comparação entre tecnologias convencionais e não-convencionais (MORERA *et al.*, 2015).

2.2.3. Aplicação das ferramentas MCDM para priorização de ETEs

Conforme preceitua os estudos de Pintilie *et al.* (2016) e Jiang *et al.* (2018), os gestores das estações de tratamento têm utilizado os SADs, especialmente, com a finalidade de conceber novos projetos, reduzir o consumo de energia, aperfeiçoar o controle operacional, melhorar a qualidade do efluente, assim como tornar as ETEs sustentáveis. Nesse contexto, o SAD está orientado em circuito fechado, sendo essencial a coleta de dados para execução dos modelos MCDM, favorecendo a compreensão dos especialistas. Posteriormente, ocorre a interpretação dos resultados e orientação das intervenções as serem efetivadas para concretização dos fins propostos (Figura 3).

Figura 3. Principais aplicações dos SADs no âmbito das ETEs



Fonte: Elaborado pelo autor, inspirado em Pintilie *et al.* (2016).

Em relação a configuração de novos projetos, no momento atual, existem demandas globais diferentes a depender dos cenários pesquisados. A título de exemplo, a Europa busca modernizar as plantas existentes e cumprir os parâmetros de qualidade da água cada vez mais rigorosos. Em contrapartida, os países da América latina e África empenham-se em implementar novas estações de tratamento, pretendendo atender somente os padrões sanitários mínimos (CASTILLO *et al.*, 2016).

Regularmente, não é factível adotar um *design* genérico para todas as ETEs, tendo em vista a necessidade de avaliação das condições específicas do local. De acordo com POCH *et al.* (2017), raramente, os SADs conseguem acompanhar o desdobramento das inovações tecnológicas, nem mesmo alcançar um sistema capaz de integrar todas as fases do tratamento. Contudo, apesar dos obstáculos citados, os SADs orientam uma tomada de decisão lógica, considerando vários aspectos concomitantes para subsidiar a seleção de alternativas satisfatórias (CASTILLO *et al.*, 2016).

O consumo de energia corresponde a uma parcela significativa do orçamento destinado à operação e manutenção das ETEs. Todavia, a despesa gerada durante todas as etapas, por vezes, tem sido ignorada pelos tomadores de decisão, por não existir praxe de conexão dos dados junto às concessionárias de energia. Esse distanciamento retarda o tempo de resposta para solução de problemas técnicos, onerando ainda mais os custos operacionais, devido a ineficiência do processo de tratamento (TORREGROSSA *et al.*, 2017).

O progresso de SADs que auxiliam a otimização do controle operacional se deve ao advento da tecnização, desenvolvidos para monitorar as ETEs em tempo real. Esse mecanismo favorece a compilação dos dados de vazão, pH, ortofosfato e sólidos suspensos através de sensores automáticos focados na gerência desses sistemas. Assim, o modelo está focado em sugerir soluções operacionais preferíveis com o melhor custo benefício, fundamentado nos fatores energéticos, qualitativos e sustentáveis (DÍAZ MADROÑERO *et al.*, 2018).

Os SADs concebidos para aprimorar a qualidade do efluente final, frequentemente, são utilizados para simular a eficiência do tratamento, avaliando sob diversos cenários a efetividade de remoção dos poluentes e patógenos, antes mesmo de ocorrer a implantação do sistema (NADIRI *et al.*, 2018). Existem softwares programados para analisar cada parâmetro da planta operacional, verificando a probabilidade de resistirem ao choque de cargas, apoiado no balanço das concentrações (JING *et al.*, 2018).

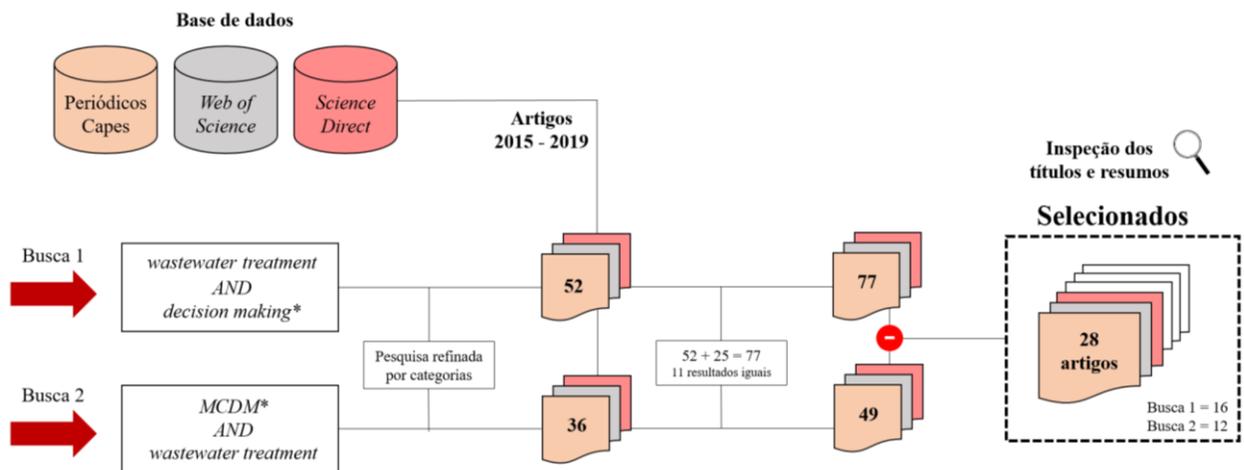
Segundo Gémar *et al.* (2018), na atualidade, a inclinação do setor está orientada em melhorar a sustentabilidade das ETEs, sobretudo, aderindo a premissa de tratar maiores volumes de esgotos com mínimo de recursos possível, bem como priorizando a redução dos impactos ambientais. Alguns estudos afirmam que os SADs mais completos são aqueles que integram múltiplos aspectos, incluindo as vertentes técnico-econômica, social e ambiental com o propósito de alcançar a sustentabilidade, suportado na identificação das possibilidades e no planejamento das intervenções (MOLINOS *et al.*, 2014; TOMEI *et al.*, 2016).

2.3. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia pretende alcançar o estado da arte para obter a síntese dos principais sistemas de apoio à decisão utilizados no contexto de ETEs, assim o recurso selecionado para atingir melhor rigor e confiabilidade na revisão da literatura foi empregar a abordagem sistemática. Isso quer dizer, determinar uma estratégia e um método sistemático para processar buscas e analisar resultados, recapitulando através de ciclos contínuos até que os propósitos da revisão sejam concebidos (LINDE; WILLICH, 2003).

Conforme afirma Cronin, Ryan e Coughlan (2008), a revisão sistemática da literatura estabelece um protocolo de pesquisa para eleger e analisar fontes, obedecendo as seguintes etapas: (I) Formulação da questão de pesquisa; (II) estabelecimento dos critérios de inclusão e exclusão; (III) seleção e acesso da literatura; (IV) avaliação da qualidade da literatura incluída na revisão e; (V) análise, síntese e disseminação dos resultados. Desse modo, a partir das definições apresentadas na literatura, o protocolo adotado pode ser observado na Figura 4.

Figura 4. Protocolo de revisão sistemática da literatura



Fonte: Elaborado pelo autor, inspirado em Guarnieri (2015).

I. Formulação da questão de pesquisa

- Quais são os principais sistemas multicriteriais de apoio à decisão para ETEs registrados na literatura?
- Como a análise multicritério possibilitaria a avaliação dos aspectos sociais, econômicos, técnicos e ambientais para priorização de ETEs?

II. Definição dos critérios de pesquisa

Os critérios de pesquisa são divididos nas etapas identificação, seleção e inclusão/exclusão dos estudos. A primeira etapa busca orientar a escolha das bases de dados, período de publicação, palavras-chave, idiomas e definição dos operadores booleanos. Em seguida, a seleção dos estudos considera o tipo do artigo e as formas de acesso. Por fim, a inclusão/exclusão examina o teor dos estudos, analisando os métodos, ferramentas e aplicações possíveis (Tabela 1).

III. Seleção e acesso da literatura

A pesquisa dos artigos sucedeu a partir da busca no Periódicos Capes, *Web of Science* e *Science Direct*. As buscas foram realizadas em pares em cada uma das plataformas, utilizando o operador “AND”, contemplando ao todo seis ações investigatórias. Na etapa seguinte, considerando a soma das três bases de dados, foram encontrados 52 artigos, utilizando as palavras-chaves *wastewater treatment* AND *decision making**. Por sua vez, 36 artigos foram obtidos através dos descritores MCDM* AND *wastewater treatment*. Desse modo, dos resultados encontrados, 11 desses eram repetidos, totalizando 77 artigos selecionados.

IV. Avaliação da qualidade da literatura incluída na revisão

A próxima etapa compreendeu a leitura dos títulos, resumos e palavras-chave dos 77 artigos pré-selecionados, a fim de avaliar a qualidade dos estudos. O principal critério de avaliação foi a correlação desses três filtros com o tema da pesquisa. Assim, foram excluídos 49 artigos que se distanciaram da proposta de auxílio à decisão aplicadas as soluções de tratamento. Logo, 28 artigos foram considerados, sendo 16 e 12 encontrados na busca, respectivamente.

V. Análise, síntese e disseminação dos resultados

A etapa final de aplicação do protocolo envolveu a extração de informações, sendo lidos na íntegra os 28 artigos, que foram incluídos para a construção da revisão sistemática. Sendo assim, resumos envolvendo os principais tópicos abordados foram produzidos, sintetizando os aspectos, métodos/ferramentas e suas aplicações no contexto dos sistemas de suporte à decisão, esses serão detalhados no próximo capítulo da análise e discussão dos resultados.

Tabela 1. Detalhamento do protocolo de pesquisa

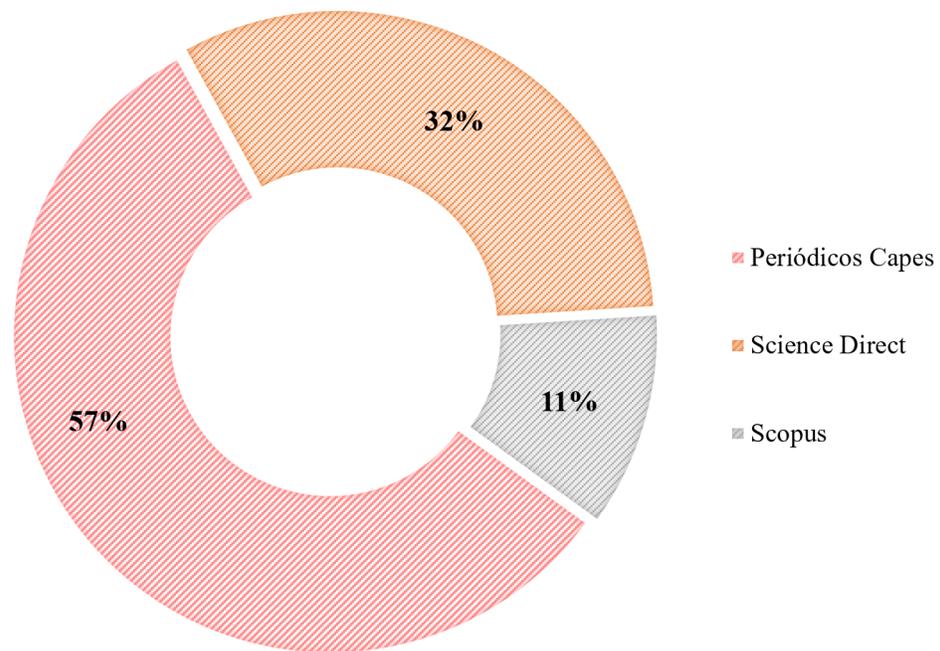
Identificação	Bases de dados: Periódicos Capes, <i>Web of Science</i> e <i>Science Direct</i> foram selecionados por serem fontes multidisciplinares, compreendendo periódicos com alto grau de aceitação, sendo pesquisados por tópicos, que incluem títulos, resumos e palavras-chave;
	Período de publicação: Período de tempo de 5 anos (2015 - 2019);
	Palavras-chave: Foram utilizados os descritores <i>wastewater treatment</i> , <i>decision making*</i> e <i>MCDM*</i> com a intenção de obter resultados referentes aos sistemas de suporte à decisão, estações de tratamento de esgoto e métodos multicritérios, respectivamente. Ressalta-se que o asterisco (*) remete a qualquer letra ou termo subsequente e não foram usadas as (“”) para não haver restrição no resultado;
	Idiomas: Foram considerados periódicos em português, inglês e espanhol;
	Operadores Booleanos: Foram construídas combinações com os descritores citados e o operador “AND”, considerando que os resultados deveriam remeter necessariamente aos dois operadores;
Seleção	Tipos de artigos: Foram selecionados artigos e <i>proceedings papers</i> com ISSN e DOI, que são os periódicos de conferências, congressos e anais de eventos;
	Formas de acesso: Foram selecionados artigos com acesso aberto e fechado, cujo os temas são pertinentes à pesquisa através da plataforma Periódicos Capes;
Inclusão	Foram incluídos artigos após a análise dos métodos, ferramentas e aplicações de cada estudo de caso;
Exclusão	Foram excluídos artigos repetidos, notícias de jornal e estudos com assuntos irrelevantes.

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No processo de inclusão dos artigos, os dados obtidos após a aplicação do protocolo de revisão sistemática evidenciaram as bases de dados que apresentaram maior volume de artigos foram o Periódicos Capes e *Science Direct*, sendo 57 e 32%, respectivamente. O arcabouço encontrado na plataforma *Scopus* corresponde a 11% dos artigos relacionados à pesquisa (Figura 5).

Figura 5. Resultados após aplicação do protocolo de pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir são descritas na Tabela 2, as informações coletadas dos 28 artigos que foram considerados de maior relevância para a pesquisa, devido difundirem aplicações práticas em estudos baseados nos modelos MCDM para definição de ETEs. Pode-se observar que dentre os artigos selecionados, 56% corresponde a busca por novas soluções tecnológicas, 32% procuram otimizar o controle operacional e a qualidade dos efluentes, e apenas 12% são relacionados a sustentabilidade.

Tabela 2. Aplicações dos métodos multicriteriais identificados na literatura

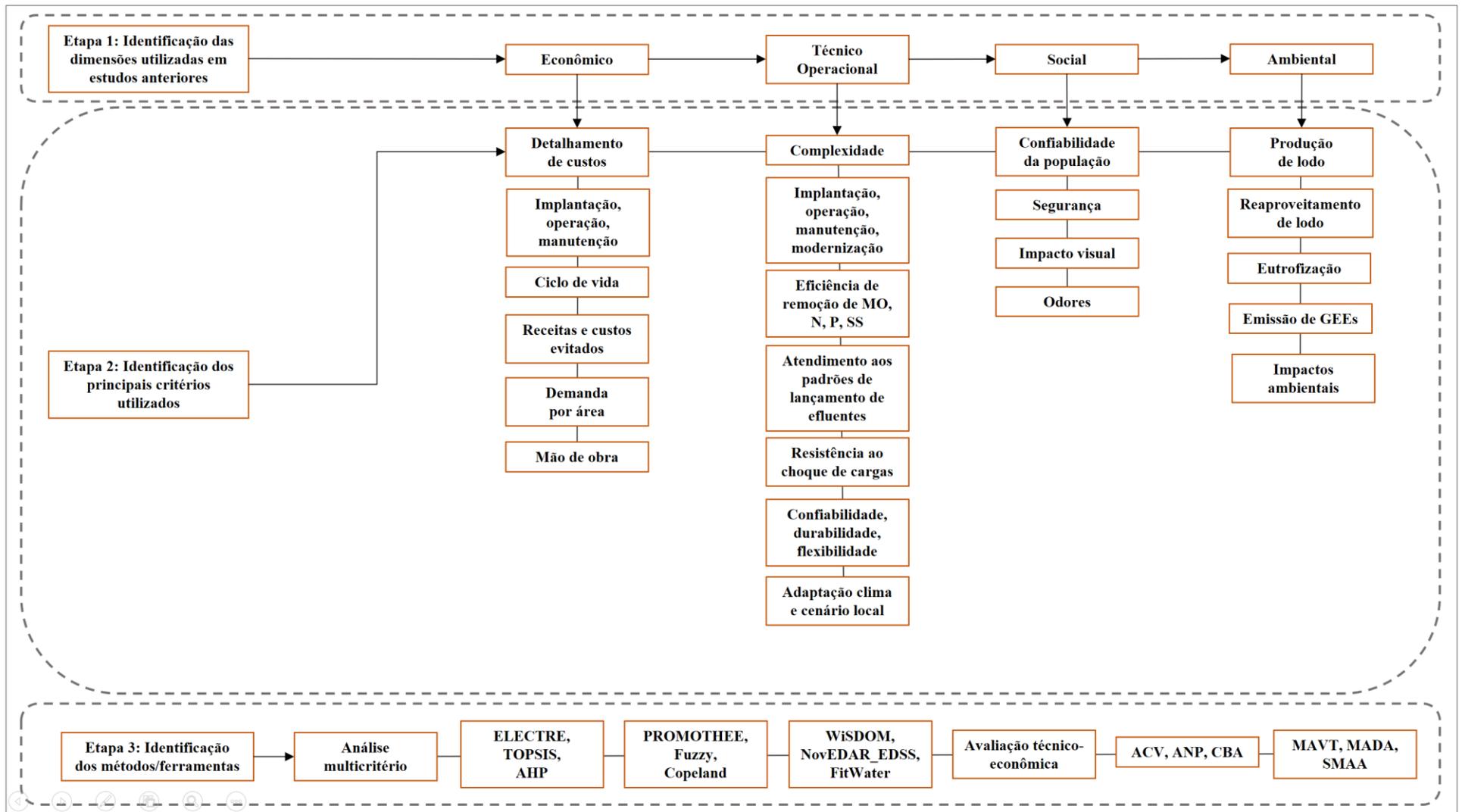
Autores	Métodos/Ferramentas	Aplicações
(VIDAL; HEDSTRM; BARRAUD <i>et al.</i> , 2019)	ELECTRE III	Definição de 12 critérios econômicos, sociais, técnicos, ambientais e saúde para comparar alternativas de saneamento urbano.
(BUTCHART; KRALISCH; FLEISCHER <i>et al.</i> , 2019)	PROMETHEE	Combinação de indicadores hidrológicos com o MCDM para gestão de uma bacia transfronteiriça entre Angola e Zâmbia, em cenários de mudança climática.
(GOFFI; FLAVIO; DE LIMA <i>et al.</i> , 2019)	ELECTRE III, Simulação de Monte Carlo e ProKnow-C	Análise da viabilidade econômica para seleção de ETEs, considerando 37 soluções de tratamento e 2 indicadores econômicos: Valor Presente Líquido e Valor Presente Líquido Anual.
(BRINGER; REIS; MENDONÇA, 2018)	ELECTRE III	Análise multiobjetivo para seleção de sistemas de tratamento de esgotos, baseado nos padrões ambientais de DBO, na bacia do Rio Pardo (ES).
(SALISBURY; BROUCKAERT; STILL <i>et al.</i> , 2018)	Teoria dos valores de atributos múltiplos (MAVT)	Aplicação do MCDM para seleção de soluções sustentáveis de tratamento, em pequenos municípios na África do Sul.
(SADR; JOHNS; MEMON <i>et al.</i> , 2018)	WiSDOM	Aplicação de software para formulação e configuração de sistemas de águas residuais, em diferentes cenários na Índia.
(FANTIN; REIS; MENDONÇA <i>et al.</i> , 2017)	QUAL-UFGM, Algoritmo genético, VPL	Utilização combinada do modelo de qualidade da água, técnica de otimização e conjunto de critérios técnicos e econômicos associados a diferentes sistemas de tratamento de águas residuais.
(TSCHEIKNER- GRATL; EGGER; RAUCH <i>et al.</i> , 2017)	ELECTRE, AHP, WSM, TOPSIS e PROMETHEE	Aplicação de técnicas de suporte à decisão para gestão integrada dos sistemas de águas residuais.
(ARROYO; MOLINOS <i>et al.</i> , 2017)	Abordagem de escolha por vantagens (CBA)	Comparação dos métodos CBA e AHP para seleção das melhores tecnologias de tratamento de águas residuais.
(MARKOV; JOVANOSKI; DIMITROVSKI <i>et al.</i> , 2017)	Avaliação técnico- econômica (VPL)	Avaliação do processo de planejamento e seleção de ETEs, levando em consideração dados de entrada e condições ambientais locais.
(REN; LIANG <i>et al.</i> , 2017)	Método de análise de decisão por atributos múltiplos de grupo (MADA) e Fuzzy Set	Avaliação da sustentabilidade de sistemas de tratamento de esgotos, baseado em 10 critérios técnicos, econômicos, sociais e ambientais.
(CHHIPI-SHRESTHA; HEWAGE; SADIQ <i>et al.</i> , 2017)	FitWater	Aplicação de software para avaliar custos, consumo de energia, efluente tratado, riscos à saúde e emissões de carbono de ETEs.
(GOFFI, 2017)	Copeland e PROMETHEE II	Seleção de tecnologia para tratamento de águas residuais, considerando várias dimensões e analisando 37 soluções tecnológicas.

(CASTILLO; PORRO; GARRIDO-BASERBA <i>et al.</i> , 2016)	NovEDAR_EDSS	Avaliação das capacidades de um novo sistema de suporte à decisão ambiental, baseado no estudo de múltiplos cenários de tratamento de águas residuais.
(ZHENG; EGGER; LIENERT, 2016)	Análise de aceitabilidade de múltiplos critérios (SMAA) e Simulação de Monte Carlo	Análise de múltiplos critérios, baseado em diferentes cenários para comparação de infraestruturas de águas residuais sustentáveis.
(KALBAR; KARMAKAR; ASOLEKAR <i>et al.</i> , 2016)	Abordagem de tomada de decisão com múltiplos atributos (MADM)	Seleção de tecnologia apropriada para o tratamento de águas residuais em áreas urbanas, suburbanas e rurais.
(MOLINOS; GÓMEZ; CABALLERO <i>et al.</i> , 2015)	Processo de rede analítica (ANP)	Classificação 7 configurações de ETes para tratamento secundário em pequenas comunidades.
(BISINELLA DE FARIA; SPÉRANDIO; AHMADI <i>et al.</i> , 2015)	Modelagem dinâmica e avaliação do ciclo de vida (DM-LCA)	Avaliação das vantagens energéticas e ambientais de diversas ETes.
(GARRIDO; MOLINOS; ABELLEIRA <i>et al.</i> , 2015)	NovEDAR_EDSS	Avaliação das alternativas de tratamento de lodo, integrando critérios econômicos e ambientais.
(MORERA; COMAS; POCH <i>et al.</i> , 2015)	Avaliação técnico-econômica (VPL/TIR) e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	Avaliação da gestão integrada de 2 ETes vizinhas, considerando aspectos econômicos e ambientais.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O conteúdo pesquisado contribui no entendimento de como os modelos multicriteriais podem ser empregados em estudos para seleção de ETes, indicando as aplicações possíveis e orientando os investimentos no setor. Todavia, não se pode declarar quais métodos apresentaram melhores resultados, ou ainda, qual foi o mais efetivo, sendo crucial a predileção do pesquisador se basear na disponibilidade de dados e nas variáveis do estudo. Com a intenção de promover uma melhor compreensão, a Figura 6 apresenta a estruturação das dimensões, principais critérios, métodos/ferramentas consideradas nos estudos examinados.

Figura 6. Detalhamento estruturado dos principais aspectos considerados em estudos anteriores



Fonte: Elaborado pelo autor.

A comunidade científica reconhece que definir uma configuração ideal para ETEs sempre foi uma tarefa árdua, ainda sim, sugere que a incorporação cada vez mais ampla de variáveis corrobora na construção de um SAD abrangente preparado para lidar com questões conflitantes. Nas últimas décadas, tem se observado avanço na compreensão do tratamento de águas residuais, contribuindo para o advento de modelos multicriteriais mais sofisticados, instruídos em apoiar decisões complexas no gerenciamento dos efluentes sanitários.

Não obstante, essa matéria está em constante aperfeiçoamento, levando em consideração os estudos que apontam a necessidade de incluir critérios de eficiência do tratamento, segurança das instalações e soluções modernas para alcançar padrões sustentáveis. Os MCDMs são frequentemente adotados nas tomadas de decisão com abordagens complexas, em especial, questões de projeto que tratam sobre custos de implantação e operação, confiabilidade, avaliação tecnológica e mais recentemente, análise de múltiplos cenários e iniciativas baseadas na internet (CHOW *et al.*, 2018).

Os SIADs pautados em inteligência artificial tornaram acessível a fusão de vários métodos e modelos, que juntos são capazes de fornecer um sistema de auxílio à decisão significativo e confiável para o usuário final. Nessa seara, alguns estudos se destacam por apresentarem SADs híbridos, quais sejam: Morera *et al.* (2015) utilizaram o modelo para avaliação de estruturas globais e ecossistêmicas; Castillo *et al.* (2016) propuseram a reconstituição de plantas operacionais obsoletas; e Singh e Kansal (2016) recorreram para o controle de poluição, economia de custos e redução dos GEEs.

Em geral, a literatura predominante orienta ser imprescindível a modernização das ETEs atuais, mas também, a construção de novas plantas operacionais capazes de atender padrões de qualidade cada vez mais rigorosos. Singh e Kansal (2016) destacam que apesar do alto potencial dos SADs em favorecerem a redução do consumo de energia em ETEs, essa solução tem sido, insuficientemente, explorada pelos gestores. Salienta-se que na revisão sistemática não foram encontrados estudos dedicados, exclusivamente, com a intenção de reduzir o consumo e aumentar a performance dos aspectos energéticos.

Em contrapartida, a aplicação de SADs no campo do controle operacional tem sido bastante difundida na literatura, visando alcançar níveis satisfatórios de qualidade dos efluentes. Apesar disso, ainda hoje, é obscuro estabelecer um sistema padrão confiável, automatizado, online, cuja a operação seja exemplar para todas circunstâncias. Contudo, otimizar SADs focados nos aspectos de qualidade favorece o atendimento das condições específicas do lugar, gerando menores impactos econômicos, sociais e ambientais.

A integração de múltiplos critérios permite elucidar a complexidade intrínseca do tratamento de águas residuais. Porém, o obstáculo verificado consiste em não haver um consenso entre os pesquisadores sobre a definição de sustentabilidade no contexto das ETEs (MOLINOS *et al.*, 2014). Não existe um padrão preferido que possa ser aplicado a maioria dos SADs, o que implica em diferentes interpretações referente aos critérios sustentáveis. Dessa forma, sugere-se que os SADs sejam examinados isoladamente, analisando cada cenário, estrutura lógica e resultados para serem beneficiados.

Nesse ínterim, o estudo de Pascual Pañach *et al.* (2018) se destaca por apresentar um sistema com padrões abertos capaz interagir de forma transparente com outros programas, envolvendo sistemáticas ambientais com fluxos automatizados nas ETEs. Entretanto, o inconveniente observado pelos usuários remete a dificuldade de acesso aos bancos de dados, reiteradamente, indisponíveis, assim como a carência de SADs com interfaces amigáveis e inteiramente baseadas na internet, provocando o desinteresse do público no teste e utilização desses sistemas (CHHIPI SHRESTHA *et al.*, 2017).

2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, os objetivos propostos pelo presente artigo foram alcançados com êxito. Esse estudo, mediante emprego da revisão sistemática, buscou identificar o panorama de referências bibliográficas sobre os SADs, demonstrando a relevância dos modelos multicriteriais no auxílio à decisão, durante a etapa de priorização de estações de tratamento de esgotos.

Por meio das análises quantitativas, as dimensões de destaque foram os aspectos econômicos, técnico/operacional e social, porém, nos últimos anos, foi observada uma preocupação especial com a avaliação dos aspectos ambientais. Entre os métodos e ferramentas identificados nos estudos, destacam-se os modelos multicritério ELECTRE, TOPSIS e AHP, mas também, softwares como WiSDOM e NovEDAR_EDSS.

Como contribuição prática, o detalhamento estruturado traz os principais critérios e métodos utilizados em estudos anteriores, que pode ser aplicado em pesquisas futuras pelos agentes de decisão, favorecendo a hierarquização dos projetos de ETEs. Por fim, recomenda-se difundir soluções tecnológicas que promovam a redução dos custos operacionais, tratamento eficiente e a sustentabilidade. Além disso, a promoção de SADs com interfaces intuitivas baseadas na internet contribuirá na adesão entre os usuários.

2.6. REFERÊNCIAS

AHMED, S.A; SHADIA, R.T; HALA, A.T. **Development and verification of a decision support system for the selection of optimum water reuse schemes.** 2002.

Desalination, 152 (1–3), pp. 339-352

ANZALDI, G; RUBION, E; CORCHERO, A; SANFELIU, R; DOMINGO, X; PIJUAN, J; TERSA, F. **Towards an enhanced knowledge-based decision support system (DSS) for integrated water resource management (IWRM).** 2014. Procedia Eng., 89, pp. 1097-1104

ARROYO, P; MOLINOS, M. **Selecting appropriate wastewater treatment technologies using a choosing-by-advantages approach.** 2018. The Science of the total environment. 625. 819-827. 10.1016/j.scitotenv.2017.12.331.

ARROYO, P; MOLINOS, M. **Science of the total environment selecting appropriate wastewater treatment technologies using a choosing-by-advantages approach.** 2018. Sci. Total Environ., 625, pp. 819-827.

BASERBA, M; MOLINOS, M; ABELLEIRA, J.M; FDEZ-GÜELFO, L.A; POCH, M; HERNÁNDEZ-SANCHO, F. **Selecting sewage sludge treatment alternatives in modern wastewater treatment plants using environmental decision support systems.** Journal of Cleaner Production, 16 November 2015, Vol.107, pp.410-419.

BERTANZA, G; CANATO, M; LAERA, G; TOMEI, M. **Methodology for technical and economic assessment of advanced routes for sludge processing and disposal.** Environmental Science and Pollution Research, 2015, Vol.22(10), pp.7190-7202.

BERTHUEX, P. M; LAI, M; DARJATMOKO, D. **A Statistics-based information and expert system for plant control and improvement.** 1987. In: W.E. Carrol, (ed.) Proceeding of 5th National Conf. on Microcomputers in Civil Engineering, Orlando, Florida, pp. 146–150

BISINELLA DE FARIA, A. B; SPÉRANDIO, M; AHMADI, A; TIRUTA-BARNA, L. **Evaluation of new alternatives in wastewater treatment plants based on dynamic modelling and life cycle assessment (DM-LCA).** 2015. Water Res., 84, pp. 99-111.

BORRELL, F; RIAÑO, D; SÀNCHEZ-MARRÈ, M; RODRÍGUEZ-RODA, I. **Implementation of a Multiagent Prototype for WWTP Management.** 2002. 1st International Congress on Environmental Modelling & Software (iEMSs'2002), Lugano, Switzerland. IEMSs'2002 Proceedings 3, 402-407. ISBN 88-900787-0-7.

BRINGER, L. M; REIS, J. A; MENDONÇA, A. S. **Seleção de sistemas de tratamento de águas residuais dentro de bacias hidrográficas usando análise multiobjetiva.** RBRH, Porto Alegre, v. 23, e22, 2018.

- BUTCHART, D; KRALISCH, S; FLEISCHER, M; MEINHARDT, M; BRENNING, A. **Multicriteria decision analysis framework for hydrological decision support using environmental flow components.** Ecological Indicators, October 2018, Vol.93, pp.470-480.
- CANIANI, D; ESPOSITO, G; GORI, R; MANNINA, G. **Towards a new decision support system for design, management and operation of wastewater treatment plants for the reduction of greenhouse gases emission.** 2015. Water, 7 (10), pp. 5599-5616.
- CASTILLO, A; PORRO, J; GARRIDO, M; BASERBA, D; ROSSO, D; RENZI, D; FATONE, F; GÓMEZ, V; COMAS, J; POCH, M. **Validation of a decision support tool for wastewater treatment selection.** J. Environ. Management. 184 (2016), pp. 409-418.
- CHHIPI-SHRESTHA, G; HEWAGE, K; SADIQ, R. **Fit-for-purpose wastewater treatment: Conceptualization to development of decision support tool (I).** Science of the Total Environment, 31 December 2017, Vol.607-608, pp.600-612.
- CHOW, C.W; LIU, J; LI, J; SWAIN, N; REID, K; SAINT, C. **Chemometrics and intelligent laboratory systems development of smart data analytics tools to support wastewater treatment plant operation.** 2018. Chemomet. Intell. Lab. Syst., 177, pp. 140-150.
- CHOW, C; LIU, J; LI, J; SWAIN, N; REID, K; SAINT, C. **Development of smart data analytics tools to support wastewater treatment plant operation.** Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 15 June 2018, Vol.177, pp.140-150.
- COMAS, J; MONCLÚS, H; FERRERO, G; RODRÍGUEZ-RODA, I; SANCHO, L; AYESA, E. **Development and Validation of a Decision Support System for the Integrated Operation of Membrane Bioreactors.** 2010. In proceeding of: International Congress on Environmental Modelling and Software. 518.
- CONVERSE, A. O. **Optimum number and location of treatment plants.** J. Water Pollut. Control Federat., 44 (8), pp. 1629-1636.
- COROMINAS, M; GARRIDO-BASERBA, M; VILLEZ, K; OLSSON, G; CORTÉS, U; POCH, M. **Transforming data into knowledge for improved wastewater treatment operation: a critical review of techniques.** 2016. Environ. Modell. Software, 106, pp. 89-103.
- CRONIN, P; RYAN, F; COUGHLAN, M. **Undertaking a literature review: a step-by-step approach.** British Journal of Nursing, v. 17(1), p. 38-43, 2008.
- DE MELO, J. J; CAMARA, A.S. **Models for the optimization of regional wastewater treatment systems.** 1994. Eur. J. Operat. Res., 73, pp. 1-16
- DEININGER, R. A. **Water quality management: the planning of economically optimal pollution control systems.** 1965. Ph.D. Thesis Northwestern University, Evanston, Illinois, IL.

DI TRAPANI, D; MANNINA, G; VIVIANI, G. **Membrane Bioreactors for wastewater reuse: respirometric assessment of biomass activity during a two year survey.** 2018. *J. Cleaner Prod.*, 202, pp. 311-320.

DÍAZ-MADROÑERO, M; PÉREZ-SÁNCHEZ, M; SATORRE-AZNAR, J; MULA, J; LÓPEZ-JIMÉNEZ, P. **Analysis of a wastewater treatment plant using fuzzy goal programming as a management tool: a case study.** 2018. *J. Clean. Product.*, 180, pp. 20-33.

EVENSON, E. J; BAETZ, B.W. **Selection and sequencing of hazardous waste treatment processes: a knowledge-based systems approach.** 1994. *Waste Manage.*, 14, pp. 161-165

FANTIN, L. L. D; REIS, J. A. T; MENDONCA, A. S. F. **Proposta de metodologia para pré-seleção de sistemas de tratamento de esgoto em bacias hidrográficas.** RBRH, Porto Alegre, v. 22, e12, 2017.

FENU, A; GUGLIELMI, G; JIMENEZ, J; SPERANDIO, M; SAROJ, D; LESJEAN, B; BREPOL, C; THOEYE, C, NOPENS, I. **Activated sludge model (ASM) based modeling of membrane bioreactor (MBR) processes: a critical review with special regard to MBR specificities.** 2010. *Water Res.*, 44, pp. 4272-4294.

FISCHER, A; TER LAAK, T; BRONDERS, J; DESMET, N; CHRISTOFFELS, E; VAN WEZEL, A; VAN DER HOEK, J. P. **Decision support for water quality management of contaminants of emerging concern.** 2017. *J. Environ. Manage.*, 193, pp. 360-372.

GARRIDO BASERBA, M; MOLINOS SENANTE, M; ABELLEIRA PEREIRA, J. M; FDEZ GÜELFO, L. A; POCH, M; HERNÁNDEZ SANCHO, F. **Selecting sewage sludge treatment alternatives in modern wastewater treatment plants using environmental decision support systems.** 2015. *J. Clean. Product.*, 107 (2015), pp. 410-419.

GÉMAR, G; GÓMEZ, T; MOLINOS-SENANTE, M; CABALLERO, R. **Assessing changes in eco-productivity of wastewater treatment plants: the role of costs, pollutant removal efficiency and greenhouse gas emissions.** 2018. *Environ. Impact Assess. Rev.*, 69, pp. 24-31.

GIBERT, K; SÀNCHEZ-MARRÈ, M. **A picture on Environmental Data Mining Real Applications.** 2012. What is done and how? 6th International Congress on Environmental Modelling & Software (iEMSs 2012). iEMSs 2012 Proceedings, 1612-1619. July 2012. ISBN: 978-88-9035-742-8.

GIBERT, K; JEFFERY, S; HORSBURGH, I; ATHANASIADIS, N; HOLMES, G. **Environmental data science.** 2018. *Environ. Modell. Software*, 106, pp. 4-12.

GOFFI, A. S. **Uso da análise multicritério para seleção de tecnologias de tratamento de efluentes.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas). Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Pato Branco, 2017.

GOFFI, A; FLAVIO, T; DE LIMA, J; LIZOT, M; THESARI, S. **Economic feasibility for selecting wastewater treatment systems.** *Water Science Technol* (2018) 78 (12): 2518–2531. Disponível em: <<https://doi.org/10.2166/wst.2019.012>. />. Acesso em: 09 jun. 2020.

GOMES, L. F; GOMES, C. F. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério.** 4 ed. Editora Atlas. São Paulo. 2012.

HAHN, H.H; MEIER, P.M; ORTH, H. **Regional wastewater management systems. Models for Environmental Pollution Control.** 1973. Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, MI.

HAKANEN, J; MIETTINEN, K; SAHLSTEDT, K. **Wastewater treatment: new insight provided by interactive multiobjective optimization.** 2011. *Decision Supp. Syst.*, 51, pp. 328-337.

HAMED, M.M; KHALAFALLAH, M.G; HASSANIEN, E.A. **Prediction of wastewater treatment plant performance using artificial neural networks.** 2004. *Environ. Modell. Software*, 19, pp. 919-928

HAMOUDA, M.A. **Selecting Sustainable Point-of-Use and Point-of-Entry Drinking Water Treatment: A Decision Support System.** 2011. PhD Thesis.

HENZE, M; GUJER, W; MINO, T; VAN LOOSDRECHT, M.C. **Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3.** 2000. IWA Publishing, London, UK.

HIDALGO, D; IRUSTA, R; MARTINEZ, L; FATTA, D. **Development of a multi-function software decision support tool for the promotion of the safe reuse of treated urban wastewater.** 2007. *Desalination*, 215, pp. 90-103

JIANG, Y; DINAR, A; HELLEGERS, P. **Economics of social trade-off: Balancing wastewater treatment cost and ecosystem damage.** *Journal of Environmental Management*, 01 April 2018, Vol.211, pp.42-52.

JIANG, Y; DINAR, A; HELLEGERS, P. **Economics of social trade-off: balancing wastewater treatment cost and ecosystem damage.** 2018. *J. Environ. Manage.*, 211, pp. 42-52.

KALBAR, P.P; KARMAKAR, S; ASOLEKAR, S. R. **Life cycle-based decision support tool for selection of wastewater treatment alternatives.** 2016. *J. Clean. Product.*, 117, pp. 64-72.

KLEMETSON, S. L. **Development of a dynamic programming model for the regionalization and staging of wastewater treatment plants.** 1975. Ph.D. Thesis Utah State University, Logan, UT.

KLEMETSON, S. L; GRENNEY, W.J. **Dynamic optimization of regional wastewater treatment systems.** 1985. *J. Water Pollut. Control Federat.*, 57 (2), pp. 128-134.

KROVVIDY, S; WEE, W. G. **Wastewater treatment systems from case-based reasoning.** 1993. *Mach. Learn.*, 10, pp. 341-363

LASSAUX, S; RENZONI, R; GERMAIN, A. **LCA methodology of water from the pumping station to the wastewater treatment plant.** 2007. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 12 (2), pp. 118-126.

LINDE, K; WILLICH, S. **How objective are systematic reviews? Differences between reviews on complementary medicine.** *J R Soc Med.*, v. 96, p. 17–22, 2003.

MAEDA, K. **A knowledge-based system for the wastewater treatment plant.** 1989. *Future Generat. Comput. Syst.*, 5, pp. 29-32

MANNINA, G; CAPODICCI, M; COSENZA, A; DI TRAPANI, D. **Carbon and nutrient biological removal in a University of Cape Town membrane bioreactor: analysis of a pilot plant operated under two different C/N ratios.** 2016. *Chem. Eng. J.*, 296, pp. 289-299.

MANNINA, G; CAPODICCI, M; COSENZA, A; DI TRAPANI, D. **Nitrous oxide from integrated fixed-film activated sludge membrane bioreactor: assessing the influence of operational variables.** 2018. *Bioresour. Technol.*, 247, pp. 1221-1227.

MANNINA, G; COSENZA, A. **The fouling phenomenon in membrane bioreactors: assessment of different strategies for energy saving.** 2013. *J. Membr. Sci.*, 444, pp. 332-344.

MARKOV, Z; JOVANOSKI, I; DIMITROVSKI, D. **Multi-criteria analysis approach for selection of the most appropriate technology for municipal wastewater treatment.** 2017. *Journal of Environmental Protection and Ecology.* 18. 289-303.

MOLINOS, M; GOMEZ, T; BASERBA, M; CABALLERO, R; GARRIDO, R. **Assessing the sustainability of small wastewater treatment systems: a composite indicator approach.** *Sci. Total Environ.*, 497–498 (2014), pp. 607-617.

MORERA, S; COMAS, J; POCH, M; COROMINAS, L. **Connection of neighboring wastewater treatment plants: economic and environmental assessment.** *Journal of Cleaner Production*, 01 March 2015, Vol.90, pp.34-42.

NADIRI, A; SHOKRI, S; TSAI, F; MOGHADDAM, A. **Prediction of effluent quality parameters of a wastewater treatment plant using a supervised committee fuzzy logic model.** 2018. *J. Clean. Product.*, 180, pp. 539-549.

NI, B; YUAN, Z. **Recent advances in mathematical modeling of nitrous oxides emissions from wastewater treatment processes.** 2015. *Water Res.*, 87, pp. 336-346.

OLSSON, G; NEWEL, B; ROSEN, C; INGILDSEN, I. **Application of information technology to decision support in treatment plant operation.** 2003. *Water Sci. Technol.*, 47 (12), pp. 35-42

PASCUAL PAÑACH, J; CUGUERÓ ESCOFET, M.A; AGUILÓ MARTOS, P; SÀNCHEZ MARRÈ, M. **An Interoperable Workflow-Based Framework for the Automation of Building Intelligent Process Control Systems.** 2018. 9th International Congress on Environmental

Modelling & Software (iEMSs 2018). iEMSs 2018 Proceedings June 24-28, 2018, Fort Collins, Colorado, USA.

PASQUALINO, J; MENESES, M; ABELLA, M; CASTELLS, F. **LCA as a decision support tool for the environmental improvement of the operation of a municipal wastewater treatment plant.** 2009. Environ. Sci. Technol., 43, pp. 3300-3307.

PINTILIE, L; TORRES, C; TEODOSIU, C; CASTELLS, F. **Urban Wastewater reclamation for industrial reuse: An LCA case study.** 2016. J. Clean. Product., 139, pp. 1-14.

POCH, M; COMAS, J; RODRÍGUEZ-RODA, I; SÀNCHEZ-MARRÈ, M; CORTÉS, U. **Designing and building real environmental decision support systems.** 2004. Environ. Modell. Software, 19, pp. 857-873

POCH, M; COMAS, J; CORTÉS, U; SÀNCHEZ-MARRÈ, M; RODRÍGUEZ-RODA, I. **Crossing the death valley to transfer environmental decision support systems to the water market.** 2017. Glob. Challen. J., 1 (3), pp. 1-10.

REN, J; LIANG, H. **Multi-criteria group decision-making based sustainability measurement of wastewater treatment processes.** 2017. Environmental Impact Assessment Review. 65. 91-99. 10.1016/j.eiar.2017.04.008.

RODRÍGUEZ, R; POCH, M; BAÑARES-ALCÁNTARA, R. **Conceptual design of wastewater treatment plants using a design support system.** 2000. J. Chem. Technol., 75, pp. 73-81

SADR, S; JOHNS, M; MEMON, F; MORLEY, M; SAVIC, D. **Development and Application of a User-Friendly Decision Support Tool for Optimization of Wastewater Treatment Technologies in India.** 2018. Water SA, 2018, Vol.21(3|4), p.278.

SALISBURY, F; BROUCKAERT, C; STILL, D; BUCKLEY, C. **Multiple criteria decision analysis for sanitation selection in South African municipalities.** Water SA, 2018, Vol.44(3), p.448.

SÀNCHEZ-MARRÈ, M.; CORTÉS, U.; R-RODA, I.; POCH, M., LAFUENTE, J. **Learning and Adaptation in WWTP through Case-Based Reasoning. Special issue on Machine Learning.** 1997. Microcomputers in Civil Engineering/Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 12(4), 251–266.

SÀNCHEZ-MARRÈ, M; CORTÉS, U. **Artificial Intelligence Tools applied to Wastewater Treatment.** 2011. Chapter 1 in the book: NOVEDAR_Consolider 4th Summer School: “Environmental Decision Support Systems (EDSS): A Tool for the Wastewater Management in the XXI Century”, Edited by M. Garrido & M. Poch. July 2011. ISBN 978-84-8458-360-8.

SERRA, P; SÀNCHEZ-MARRÈ, M; LAFUENTE, J; CORTÉS, U; POCH, M. **DEPUR: a knowledge based tool for wastewater treatment plants.** 1994. Eng. Appl. Artif. Intell., 7 (1) (1994), pp. 23-30.

SINGH, P; KANSAL, A. **Energy and GHG accounting for wastewater infrastructure.** Resour. Conservat. Recycl., 128 (2016), pp. 499-507.

TOMEI, M; BERTANZA, G; CANATO, M; HEIMERSSON, S; LAERA, G; SVANSTRÖM, M. **Techno-economic and environmental assessment of upgrading alternatives for sludge stabilization in municipal wastewater treatment plants.** 2016. J. Clean. Product., 112, pp. 3106-3115.

TORREGROSSA, D; HERNÁNDEZ SANCHO, F; HANSEN, J; CORNELISSEN, A; POPOV, T; SCHUTZ, G. **Energy saving in wastewater treatment plants: a plant-generic cooperative decision support system.** 2017. J. Clean. Product., 167, pp. 601-609.

TSCHEIKNER-GRATL, F; EGGER, P; RAUCH, W; KLEIDORFER, M. **Comparison of Multi-Criteria Decision Support Methods for Integrated Rehabilitation Prioritization.** Water, 2017, Vol.9(2), p.68.

TZAFESTAS, S; LIGEZA, A. **A framework for knowledge based control.** Intell. Robot. Syst., 1 (4), pp. 407-426.

VAN RIEL, W; VAN BUEREN, E; LANGEVELD, J; HERDER, P; CLEMENS, F. **Decision-making for sewer asset management: Theory and practice.** Urban Water Journal: Sewer Asset Management. Guest editors: Jeroen Langeveld and Francois Clemens, 02 January 2016, Vol.13(1), pp.57-68.

VIDAL, BRENDA, V; HEDSTRM, A; BARRAUD, S; KRRMAN, E; HERRMANN, I. **Assessing the sustainability of on-site sanitation systems using multi-criteria analysis.** 2019. Environmental Science: Water Research & Technology, 2019, Vol.5(9), pp.1599-1615.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade da Água e ao Tratamento de Esgoto, Princípio do Tratamento Biológico de Águas Residuárias.** 4ª ed: Belo Horizonte, 2014.

VRECK, D; GERNAEY, K.V; ROSEN, C; JEPSSON, U. **Benchmark simulation model No 2 in Matlab-Simulink: towards plant-wide WWTP control strategy evaluation.** 2006. Water Sci. Technol., 54 (8), pp. 65-72.

XIN, C; ADDY, M; ZHAO, J ; CHENG, Y; MA, Y; LIU, S; MU, D; LIU, Y; CHEN, P; RUAN, R. **Waste-to-biofuel integrated system and its comprehensive techno-economic assessment in wastewater treatment plants.** Bioresource technology, February 2018, Vol.250, pp.523-531.

YOSHIDA, H; CLAVREUL, J; SCHEUTZ, C; CHRISTENSEN, T. **Influence of data collection schemes on the life cycle assessment of a municipal wastewater treatment plant.** 2014. Water Res., 56, pp. 292-303.

ZARKADAS, I; DONTIS, G; PILIDIS, G; SARIGIANNIS, D. **Exploring the potential of fur farming wastes and byproducts as substrates to anaerobic digestion process.** 2016. Renew. Energy, 96, pp. 1063-1070.

ZENG, S; CHEN, X; DONG, X; LIU, Y. **Efficiency assessment of urban wastewater treatment plants in china: considering greenhouse gas emissions.** 2017. Resour. Conservat. Recycl., 120, pp. 157-165.

ZHENG, J; EGGER, C; LIENERT, J. **A scenario-based MCDA framework for wastewater infrastructure planning under uncertainty.** Journal of Environmental Management, 01 December 2016, Vol.183, pp.895-908.

ZUTHI, M. F; NGO, H.H; GUO, W.S. **Modeling bioprocesses and membrane fouling in membrane bioreactor (MBR): a review towards finding an integrated model framework.** 2012. Bioresour. Technol., 122, pp. 119-129.

3. Artigo II - Análise multicriterial para priorização de processos de tratamento de esgotos (ETEs): estudo de caso na Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu

RESUMO

A definição da melhor alternativa para o tratamento de esgotos deve considerar os múltiplos aspectos relacionados a conjuntura local. A diversidade de tecnologias associada ao elevado número de variáveis dificulta a tomada de decisão. Desse modo, o presente estudo desenvolveu uma metodologia multicritério de auxílio à decisão capaz de hierarquizar soluções para o tratamento de águas residuárias, analisando as dimensões econômica, técnica, social e ambiental. O método considerou as alternativas exequíveis, após o estudo de viabilidade econômica, apoiado nos indicadores Valor Presente Líquido (VPL) e Valor Presente Líquido Anualizado (VPLa). Em seguida, os principais critérios identificados na literatura foram submetidos a avaliação dos especialistas. Posteriormente, a modelagem multicritério baseada nos métodos *Elimination and Choice Translating Algorithm* (ELECTRE-TRI) e *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) foi empregada ao estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio Paracatu (MG). Nessa seara, os resultados obtidos indicam que as tecnologias de infiltração lenta e infiltração rápida são as opções preferidas para cidades de pequeno porte, enquanto a opção com pior desempenho foi o reator UASB seguido por escoamento superficial. Ademais, em centros urbanos, as opções indicadas são a lagoa anaeróbia seguida pela facultativa e o reator UASB com filtro anaeróbio. Em contrapartida, o sistema australiano seguido por lagoa de alta taxa foi contraindicado. Conclui-se, portanto, a relevância dos modelos multicriteriais como ferramenta institucional de gestão dos sistemas de tratamento de esgotos.

Palavras-chave: Saneamento. Tratamento de Esgoto. MCDM. Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu.

ABSTRACT

The definition of the best alternative for the treatment of sewage must consider the multiple aspects related to the local situation. The diversity of technologies associated with the high number of variables makes decision-making difficult. In this way, the present study developed a multicriteria decision aid methodology capable of prioritizing solutions for the treatment of wastewater, analyzing the economic, technical, social and environmental dimensions. The method considered the feasible alternatives, after the economic feasibility study, supported by the Net Present Value (NPV) and Annualized Net Present Value (ANPV) indicators. Then, the main criteria identified in the literature were submitted to expert evaluation. Subsequently, multicriteria modeling based on the Elimination and Choice Translating Algorithm (ELECTRE-TRI) and Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) methods was used in the case study of the hydrographic basin of Rio Paracatu (MG). In this area, the results obtained indicate that the technologies of slow infiltration and fast infiltration are the preferred options for small cities, while the option with the worst performance was the UASB reactor followed by runoff. In addition, in urban centers, the options indicated are the anaerobic lagoon followed by the optional one and the UASB reactor with anaerobic filter. In contrast, the Australian system followed by a high rate lagoon was contraindicated. It is concluded, therefore, the relevance of multicriteria models as an institutional tool for the management of sewage treatment systems.

Keywords: Sanitation. Sewage treatment. MCDM. Paracatu River Basin.

3.1. INTRODUÇÃO

O tratamento de esgotos tem o propósito de remover as cargas poluentes presente na água, logo após a utilização doméstica ou industrial, observando as condições e padrões mínimos de qualidade exigidos para manutenção dos corpos hídricos. Por essa razão, são concebidas as estações de tratamento de esgoto (ETEs), responsáveis pela conservação do meio ambiente, progresso econômico e proteção da saúde pública (VON SPERLING, 2014).

Segundo Kalbar *et al.* (2016), o diagnóstico multidisciplinar dos sistemas de tratamento de esgoto pretende avaliar uma proposta de solução tecnológica antes mesmo da sua concepção. O emprego de métodos de auxílio à decisão fornece juízo de valor mais amplo e objetivo, capaz influenciar positivamente o processo decisório de gestores públicos em diferentes esferas de governo (BISINELLA DE FARIA, *et al.*, 2015).

Nesse sentido, Gomes (2012) afirma que a utilização de um sistema de apoio à decisão (SAD) tem permitido que as organizações escolham soluções tecnológicas sustentáveis, baseada na abordagem integrada de problemas. Assim, a priorização de ETEs deve observar o nível de tratamento desejado, bem como os processos e equipamentos necessários, a fim de fornecer uma solução economicamente viável (POCH *et al.*, 2017; GOFFI, 2017).

Desse modo, o SAD possui a capacidade de definir a melhor ETE através das preferências dos tomadores de decisão, assim como pela avaliação dos critérios intrínsecos ao ambiente avaliado. Isto posto, o artigo propõe o debate das abordagens mais relevantes da análise multicriterial aplicada ao tratamento de esgotos, considerando a problemática de ordenação da tecnologia mais apropriada para o estudo de caso.

3.2. REFERENCIAL TEÓRICO

3.2.1. Panorama do saneamento básico no Brasil

Durante década de 1970, o Brasil progrediu o estabelecimento da infraestrutura de saneamento, especialmente no aumento da proporção de domicílios atendidos com abastecimento

de água e rede esgoto. Naquele período, o índice de abastecimento de água foi de 35% para 55% e o acesso à rede coletora de esgoto foi de 15% a 29% (SAIANI *et al.*, 2010). Entretanto, o país ainda exprime um enorme déficit na cobertura de domicílios, sobretudo em relação ao esgotamento sanitário, o que torna utópico o direito de universalização ao saneamento básico.

Segundo os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), entre os anos de 2007 e 2015, houve uma estabilização no abastecimento de água, crescendo de 80,9% para 83,3% e uma ligeira evolução nos índices de coleta e tratamento do esgoto, partindo de 42% para 50,3% e 32,5% para 42,7%, respectivamente. Esses resultados demonstram uma evolução deficitária na prestação de serviços essenciais para o bem-estar e saúde da população.

Convém, também, mencionar a desigualdade regional no nível de atendimento, sendo que as regiões norte e nordeste apresentam os piores resultados, enquanto a região sudeste apresenta os maiores índices de abastecimento de água e coleta de esgoto. Contudo, ainda que tenha um índice de cobertura por rede de água em 91,2% e coleta de esgoto em 77,2%, apenas 47,4% do esgoto gerado vem sendo tratado (SNIS, 2015).

Existe uma relação direta entre os investimentos realizados e o acesso aos serviços de saneamento. Em relação ao produto interno bruto (PIB) brasileiro, no período de 1971 a 2015, observa-se que, realmente a década de 70 foi promissora, onde 0,46% do PIB foram investidos. Segundo prognóstico do Ministério das Cidades, o país deveria ter investido esse mesmo patamar desde o início do século para alcançar a universalização em 2020. Todavia, nesse período foram investidos 0,20% do PIB, ou seja, menos da metade do montante necessário (SNIS, 2015).

Nesse contexto, o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) postergou a meta de universalização do saneamento para 2033, estimando a necessidade de investimentos na ordem de R\$ 304 bilhões. No entanto, existe o temor que devido à crise econômica recente, os investimentos fiquem aquém do esperado. Esse caminho assevera a universalização, principalmente pela cobertura e tratamento de esgoto insuficiente, que diminui a qualidade dos recursos hídricos, aumenta os casos epidemiológicos, além de agravar os riscos à saúde pública.

3.2.2. Sistemas de tratamento de esgotos

Os sistemas de tratamento de esgotos podem ser definidos como um conjunto de técnicas capazes de representar os fenômenos naturais de degradação, que ocorrem em corpos d'água após o lançamento de efluentes, no intuito de assegurar condições satisfatórias e taxas elevadas de tratamento. A definição pelo sistema mais apropriado deve levar em conta o nível de tratamento e a eficiência de remoção desejada, em razão da escolha dos processos e operações a serem compreendidas na unidade de tratamento (VON SPERLING, 2014).

Nesse contexto, Richter (2007) esclarece que existem níveis de tratamento distintos, quais sejam: preliminar, primário, secundário e terciário, também denominado como avançado. Cada qual apresenta seus próprios mecanismos, equipamentos e aplicações adequadas, obtendo taxas de remoção de sólidos suspensos, DBO, nutrientes, patógenos, substâncias tóxicas e metais pesados a depender da configuração estabelecida.

Em síntese, na unidade de tratamento, os processos e operações unitárias podem ser empregados de maneira individual ou sincronizadas. Dentre elas, destacam-se a operação física unitária composta por técnicas onde prevalece a força mecânica, por exemplo o gradeamento e a sedimentação. No processo químico ocorre a transformação ou remoção de contaminantes pela reação dos produtos químicos, tais como a desinfecção e adsorção. Por último, no processo biológico, a remoção dos contaminantes advém da biossíntese dos microorganismos, tal como a nitrificação e digestão do lodo (METCALF *et al.*, 2003; VON SPERLING, 2014).

De acordo com Chernicharo (2001), existe uma modernização do setor quanto a configuração das plantas operacionais, com o propósito de obter sistemas mais estáveis e eficientes, otimizando os recursos disponíveis e diminuindo o passivo ambiental. A ideia central das pesquisas consiste em desenvolver sistemas descomplicados com baixo custo operacional (GOFFI, 2017). A Tabela 3 apresenta a síntese das principais soluções tecnológicas para o tratamento de esgotos, vantagens, desvantagens e eficiências de remoção explorados no Brasil.

Tabela 3. Soluções tecnológicas de tratamento de esgotos

Tecnologias	Vantagens	Desvantagens	DBO (%)	DQO (%)
Tratamento primário	Remoção parcial dos sólidos em suspensão/grosseiros, que promove a remoção parcial de MO; demanda de área e energia reduzidas; custos de implantação e operação reduzidos; resistência as variações de carga orgânica; operação e manutenção simplificada.	Menor remoção de MO e sólidos; ausência na remoção de nutrientes e patógenos; não cumpre os padrões legais de lançamento.	25-35	25-75
Tanque séptico	Capacidade adaptativa quanto à carga orgânica; redução da carga através do tratamento preliminar; solução indicada para usos individuais, principalmente em comunidades rurais; operação e manutenção simplificadas; custo de construção, operação e manutenção reduzidas.	Dificuldade em satisfazer padrões de lançamento; ineficiência na redução de coliformes e nutrientes; odores; entupimento; não indicado para efluentes com baixas concentrações de sólidos; custos de bombeamento, pós tratamento e disposição do lodo; ameaças de contaminação do solo e água.	<30	25-35
Tanque séptico + filtro anaeróbico (TS)	Capacidade adaptativa quanto à concentração de esgotos; resistência ao choque de cargas; remoção de DBO mediana; demanda de área e energia reduzidas; custos de implantação e operação reduzidos; construção, operação e manutenção simplificada.	Menor remoção de coliformes; remoção insuficiente de N e P; efluente com aspecto desagradável; odores; ameaça de entupimento; tratamento limitado para efluentes com concentrações de sólidos elevadas.	40-75	70-80
Infiltração	Sistema inteiramente natural; remoção de DBO elevada, remoção de patógenos elevada; assimilação de N e P pelas plantas; custo reduzido; não ocorre produção de lodo; agem como fertilizantes; resistência ao choque de cargas.	Demanda de área superficial elevada; ameaça de contaminação do solo, água e trabalhadores quando manejados incorretamente; odores; vinculada as variações climáticas e ambientais; subordinado as características do solo; atração elevada de insetos.	75-85	70-83
Filtro biológico percolador de alta carga (FB-A)	Demanda de área reduzida; remoção de DBO elevada; simplicidade; capacidade adaptativa maior que os FB-B; resistência ao choque de cargas melhor que os filtros de baixa carga; expectativa reduzida de maus odores.	Menor remoção de coliformes; custos de implantação elevados; vinculado a temperatura ambiente; exige o tratamento do lodo; perda de carga levada.	85-93	70-87
Filtro biológico percolador de baixa carga (FB-B)	Remoção de DBO elevada; nitrificação; demanda de área reduzida; taxa de mecanização relativamente reduzida; promove a estabilização do lodo no respectivo filtro.	Menor remoção de coliformes; capacidade adaptativa operacional menor que os lodos ativados; custos de implantação elevados; demanda de área maior que os FB-A; relativa vinculação a temperatura ambiente; vulnerável a descargas tóxicas; exige desidratação e disposição final do lodo; ameaças de proliferação de vetores; perda de carga elevada.	85-93	80-90

Filtro anaeróbio	Efluente clarificado; efluente com concentração de MO reduzida; ausência no consumo de energia; remoção de MO dissolvida elevada; produção de lodo reduzida; possibilidade de disposição no solo; resistência a variação de vazão; não demanda escavações profundas; construção e operação simplificada; não exige lodo inoculador; não exige recirculação de lodo; autonomia nas configurações e dimensões do projeto.	Efluente com alto teor de minerais; concentração elevada de patógenos; ameaça de entupimento ou colmatação do leito.	80-85	65- 80
Biodisco	Remoção DBO elevada; nitrificação; demanda de área reduzida; solução indicada para pequenas populações; mecanização simplificada; chances reduzidas de maus odores; perda de carga reduzida; solução mais simplificada que os lodos ativados.	Remoção de coliformes reduzida; custos de implantação e operação elevados; relativa vinculação a temperatura ambiente; exige tratamento completo do lodo; exige cobertura e manutenção dos discos.	88-95	83-90
Processos anaeróbios	Demanda de área reduzida; tratamento eficiente; solução híbrida indicada para pequenas comunidades e centros urbanos.	Exige controle rigoroso; necessita mão-de-obra qualificada; exige tratamento e disposição do lodo.	45-75	30-70
Lagoa facultativa	Operação e manutenção reduzidas; baixo custo; alta eficiência do sistema; prazo longo para remoção do lodo; resistência a choques de carga; ausência de mecanização; remoção de patógenos parcialmente eficiente.	Demanda de área elevada; tempo longo de detenção hidráulica; vinculado as variáveis climáticas e ambientais; remoção de MO reduzida; dificuldade em cumprir os padrões de lançamentos; ameaças de proliferação de vetores.	70-85	65-80
Lagoa aerada facultativa	Demanda de área parcialmente reduzida; tempo de detenção hidráulica menor se comparado com os demais segmentos de lagoas.	Custos elevados devido o consumo de energia dos aeradores; operação e manutenção mais complexa se comparadas às lagoas facultativas e anaeróbia facultativa.	75-85	65-80
Lagoas anaeróbia - facultativa	Operação e manutenção bastante simplificada; custo reduzido; admite maiores profundidades, demandando menores áreas.	Demanda de área elevada; vinculada as variáveis climáticas e ambientais; remoção de MO reduzida; ameaça de maus odores; exige afastamento das residências, o que incide em maiores custos com redes coletoras.	75-85	65-80
Lagoa de mistura completa + sedimentação	Demanda de área parcialmente reduzida devido concentração em meio líquido; tempo de detenção hidráulica reduzido; consumo de energia reduzido.	Complexidade operacional elevada; presença de biomassa no efluente; exige unidade de sedimentação; geração de lodo.	75-85	65-80
Lodos ativados convencional	Remoção de DBO muito elevada; nitrificação; remoção N e P; demanda de área reduzida; confiável; chances reduzidas de maus odores e vetores; capacidade adaptativa	Remoção de coliformes reduzida; custos de implantação e operação elevados; consumo de energia elevado; operação sofisticada; elevada taxa de mecanização;	85-93	80-90

	operacional; solução indicada para pequenas e grandes cidades.	sensível ao choque de cargas; exige tratamento completo do lodo.		
Lodos ativados aeração prolongada	Remoção de DBO elevada; nitrificação; geração de lodo reduzida; lodo estabilizado no reator; resistência elevada ao choque de cargas; não vinculado as variáveis climáticas e ambientais.	Remoção de coliformes reduzida; custos de implantação e operação elevados; elevada taxa de mecanização; exige a desidratação do lodo.	90-97	83-93
Biorreator de membrana (MBR)	Demanda de área reduzida; qualidade do efluente final elevada; resistência elevada ao choque de cargas; remoção de nitrogênio; baixa geração de lodo; operação simplificada.	Custos de instalação, operação, manutenção elevados; consumo de energia elevado; geração de ruídos; operação em alta pressão; difícil manutenção; limpeza das membranas necessita de produtos químicos; não elimina o contaminante.	>99	70-99
Reator anaeróbio de manta de lodo (UASB)	Remoção de DBO parcialmente elevada; demanda por área e energia reduzidos; custos de implantação e operação reduzidos; capacidade adaptativa para altas concentrações de MO; construção, operação e manutenção simplificada; produção de lodo bastante reduzida; lodo estabilizado no reator; retomada rápida após períodos de paralisação.	Dificuldade em cumprir padrões de lançamento; remoção de coliforme reduzidos; ausência parcial na remoção de N e P; ameaça de maus odores; retomada lenta do processo; sensível ao choque de cargas e compostos tóxicos; exige pós-tratamento.	60-75	55-75
Reator anaeróbio- aeróbio de fluxo horizontal (RAALF)	Concentração de MO reduzida; efluente clarificado; demanda baixa potência de aeração; produção de lodo reduzida; custos de implantação e operação reduzidos; perda dos sólidos reduzida; resistência a variação de vazão; autonomia nas configurações e dimensões do projeto.	Parcialmente sensível aos compostos tóxicos; estabilidade operacional reduzida; apresentam possibilidade de obstrução dos interstícios, ameaças de entupimento ou colmatação do leito.	80-95	70-95
UASB + pós tratamento	Mesmas vantagens do reator UASB; mesmas vantagens do pós tratamento; redução das unidades de tratamento; geração de lodo reduzida.	Mesmas desvantagens do reator UASB e pós tratamento; custos elevados; baixa remoção biológica de nutrientes no pós tratamento; complexidade operacional elevada;	60-80	70-90
<i>Wetlands</i>	Custo de implantação reduzidos; operação simplificada; autossuficiente; remoção de MO, sólidos, nutrientes e patógenos elevada; solução indicada no tratamento de efluentes de pequenas comunidades; maior distribuição do esgoto bruto; alta eficiência dos processos aeróbios; colmatação do filtro reduzida; sem geração de lodo; geração de renda através da biomassa; odores reduzidos.	Demanda por área elevada; custos de substratos e manejo das macrófitas; ameaça de proliferação de vetores; efluente com aspecto desagradável; tempo de detenção hidráulica elevada; vinculado as variáveis climáticas; exige água em abundância e tratamento prévio; ameaças de entupimento.	>70	75-85

Fonte: Elaborado pelo autor, inspirado em Von Sperling (2014) e Goffi (2017).

A partir da síntese apresentada na Tabela 3, observa-se que algumas soluções tecnológicas possuem maior eficiência de remoção de DBO e DQO que outras, justificando o emprego dos sistemas combinados. Entretanto, esse não pode ser o único critério adotado, sobretudo pela necessidade de analisar com cautela os prós e contras de cada opção disponível. Assim, torna-se imprescindível a definição de critérios de avaliação e métodos de auxílio à decisão para priorização dos sistemas de tratamento de esgotos.

3.2.3. Critérios para priorização de ETEs

Os critérios de avaliação são imprescindíveis para certificar a aderência de qualquer ferramenta de auxílio à decisão (CAMPOS, 2011). Apesar disso, Kalbar *et al.* (2016) esclarece que um número elevado de critérios exige uma maior base de dados, conseqüentemente a busca pela solução ideal demandará maiores investimentos e tempo de interpretação. Nesse sentido, o artigo considerou as dimensões econômica, técnica, social e ambiental, bem como os principais critérios abordados na literatura elencados por Martins (2020).

De acordo com Von Sperling (2014), em países subdesenvolvidos, a relevância exposta aos critérios de custos de instalação e operação, complexidade e sustentabilidade são superiores se comparadas aos itens decisórios considerados em países desenvolvidos, sendo esses a demanda por área, eficiência na remoção de poluentes, confiabilidade e a disposição do lodo. Embora exista uma multiplicidade de fatores intrínsecos no processo decisório, os critérios econômico-financeiros são comumente priorizados (DI TRAPANI *et al.*, 2018).

Nesse contexto, usualmente, os projetos de tratamento de esgotos são comparados com base nos relatórios de viabilidade econômica, sendo que a melhor alternativa deve apresentar os menores custos de investimento, operação e manutenção, desconsiderando os demais critérios, ou seja, por vezes as escolhas são conceitualmente inapropriadas (ZENG *et al.*, 2017). Assim, cabe destacar o uso de modelos multicriteriais que visualizam o obstáculo sobre diferentes aspectos, sem subestimar o valor dos demais critérios.

Os critérios técnicos a serem julgados dizem respeito aos aspectos construtivos, operacionais, a capacidade adaptativa do projeto, além da eficiência de remoção de compostos químicos e orgânicos necessários para o atendimento à legislação de recursos hídricos. Através

desses critérios, as expectativas de consumo e produção da ETE podem ser avaliadas, sendo indispensáveis para análise de risco das instalações.

O emprego dos critérios sociais propõe tratar assuntos relativos ao bem-estar da sociedade atendida pelos sistemas de tratamento de esgoto. Na atualidade, esses aspectos têm recebido maior reconhecimento nos processos decisórios, principalmente nos comitês de bacia hidrográfica, orçamento participativo, além de serem parte integrante dos planos municipais de saneamento básico. Essa dimensão avalia a aceitação pública, segurança, além dos odores gerados pelo próprio tratamento.

Segundo Molinos *et al.* (2015), o desenvolvimento econômico-social e a proteção do meio ambiente são aspectos expressivos na promoção da sustentabilidade. O equilíbrio entre os critérios visa garantir a escolha do sistema de tratamento com o melhor desempenho global dentre as alternativas disponíveis (GARRIDO *et al.*, 2015). Nesse sentido, os critérios envolvem atenção aos níveis de emissão de gases, eutrofização dos corpos d'água, assim como as questões de geração e reaproveitamento do lodo.

3.2.4. Simulação de Monte Carlo

A Simulação de Monte Carlo (SMC) consiste em uma análise estatística baseada na geração de amostragens aleatórias para obtenção de resultados numéricos, empregados na solução de problemas não convencionais. O método utiliza o padrão estocástico com origem em eventos aleatórios, através de algoritmos computacionais para calcular os instantes probabilísticos, obtendo conformidades numéricas de funções complexas em que não é viável, ou mesmo impossível, alcançar uma solução analítica (LIMA *et al.*, 2017).

De acordo com Duclós (2013), a evolução do método SMC permitiu sua utilização na análise de investimentos em ambientes variáveis. Com base nas simulações é factível construir múltiplos cenários e suas probabilidades associadas, permitindo converter um episódio incerto em um risco calculado. A SMC vem sendo utilizada em diversas áreas da ciências, engenharias e finanças, especialmente, pela difusão de computadores e softwares com alta capacidade de processamento (SOARES, 2006).

Nessa seara, a SMC vem sendo utilizada em estudos de viabilidade econômica, dado sua aptidão em lidar com modelos de custos na gestão de projetos. A partir dessa análise é possível determinar o valor possível, valor mais provável e valor máximo possível estimado, essenciais para se implantar hipóteses nas previsões, embasar medidas, além de estruturar a gestão dos riscos (LIMA *et al.*, 2017).

3.2.5. ELECTRE-TRI

Os métodos da série de Realidade por Eliminação e Escolha (ELECTRE) têm como ideia fundamental separar do conjunto total de alternativas aquelas que são preferidas na maioria dos critérios de avaliação e que não causam um nível inaceitável de descontentamento nos outros critérios. Para isso, são introduzidos os conceitos de concordância e discordância em comparações entre alternativas, duas a duas. Consiste na utilização de funções q , p e v , indicando os limiares de indiferença, preferência e veto entre alternativas (ROY, B *et al.*, 1996).

Segundo Gobbetti e Barros (1993), o método ELECTRE-I consiste em um método de eliminação do subconjunto de alternativas menos desejáveis e escolha das alternativas mais preferidas segundo os critérios de avaliação, desde que não haja resultado desfavorável para nenhum dos critérios. Desse modo, o método ELECTRE-I estabelece através dos conceitos matemáticos critérios de concordância, $C(a, b)$, e discordância, $D(a, b)$, entre duas alternativas (Equação 1):

$$C(a,b) = \sum_{[k \in S(a,b)]} \left(\frac{W_k}{\sum_{k=1}^m W_k} \right) \quad (1)$$

Onde:

$C(a, b)$ = índice de concórdia entre as alternativas "a" e "b" (por definição, $0 \leq C(a, b) \leq 1$);

W_k = peso dado a priori para o k-ésimo critério;

m = número de critérios considerados; e

$S(a, b)$ = conjunto de todos os critérios para os quais a alternativa "a" é preferida ou tem preferência igual a "b".

$$D(a,b) = \frac{1}{R^*} \cdot \sum_{k=1, m}^{MAX} [Vka - Vkb]$$

(2)

Onde:

$D(a, b)$ = índice de discórdia entre as alternativas "a" e "b";

Vka = avaliação da alternativa "a" em relação ao k-ésimo critério;

Vkb = avaliação da alternativa "b" em relação ao mesmo critério;

R^* = maior valor utilizado em todas as escalas de todos os critérios.

Por meio do método os índices de concordância e discordância são calculados para todos os pares possíveis de alternativas e para todos os critérios utilizados, calculando-se duas matrizes quadradas, sendo uma de concordância e outra de discordância (GOICOECHEA *et al.*, 1982). Por sua vez, SOUZA (1992) propôs uma adaptação ao método, no intuito de obter uma classificação das alternativas por ordem de preferência. Logo, as alternativas são dispostas segundo sua frequência, ou seja, não são dominadas pela outra alternativa.

O ELECTRE-II utiliza os fundamentos da versão anterior, mas também cria outras definições acessórias como as relações de comparação “forte” e “fraca”, além das definições de concordância e discordância (HOKKANEN *et al.*, 1995). Nesse contexto, surge o método ELECTRE-III a partir da evolução de seus precursores somado aos dados fornecidos pelo agente durante o processo decisório, sendo ordenado em uma escala gradual de valores (DUCKSTEIN *et al.*, 1994).

3.2.6. TOPSIS

O método TOPSIS concebido por Hwang e Yoon (1991), cuja tradução literal pode ser compreendida como a Técnica de Ordenamento de Preferências por Similaridade a uma Solução Ideal, vem sendo aplicado na resposta de diversos impasses na tomada de decisão multicritério. A lógica busca priorizar as alternativas que tem a menor distância da solução ideal positiva e a maior distância da solução ideal negativa (KIM, 2016).

Segundo Lima Júnior *et al.*, (2015), o método é recomendado em problemas com grande número de alternativas e critérios, principalmente, aqueles de natureza quantitativa. Sua aplicação ocorre a partir da estruturação da matriz de decisão e o vetor de pesos, onde d_{ij} representa a

pontuação da alternativa i (W_i) no critério j (C_1). Então, ocorre a ponderação e normalização da matriz de decisão, onde d_{ij} são os elementos e e_{wj} representa o peso dos critérios (Equação 2).

$$n_{ij} = \frac{w_j d_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_{ij}^2}} \quad (2)$$

Assim, adquirem-se as soluções ideais positiva (A^+) e negativa (A^-) em concordância com as equações (3) e (4), respectivamente. Logo, n_j^+ reflete a melhor pontuação obtida pelas alternativas no critério j e n_j^- reflete a pior pontuação das alternativas para esse mesmo critério.

$$A^+ = \{MAX_j n_{ij} \mid j = 1, 2, \dots, m\} = \{n_1^+, \dots, n_j^+; \dots; n_m^+\} \quad (3)$$

$$A^- = \{MIN_j n_{ij} \mid j = 1, 2, \dots, m\} = \{n_1^-, \dots, n_j^-; \dots; n_m^-\} \quad (4)$$

As equações (5) e (6) estabelecem as distâncias (D_i^+) e (D_i^-) entre os elementos da matriz de decisão ponderada e a solução ideal positiva ou negativa.

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (n_{ij} - n_j^+)^2} \quad (5)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (n_{ij} - n_j^-)^2} \quad (6)$$

Finalmente, empregando a equação 7, calcula-se o coeficiente de aproximação (CC_i) de cada alternativa e dispõe os resultados de forma decrescente. Assim, quanto mais o valor CC_i se aproximar de 1, melhor será o desempenho da alternativa analisada.

$$CC_i = \frac{D_i^-}{(D_i^+ + D_i^-)} \quad (7)$$

3.3. METODOLOGIA

O presente capítulo tem o intuito de expor as propriedades da metodologia de pesquisa, ressaltando os métodos, técnicas e ferramentas a serem utilizadas para alcançar os objetivos do estudo. Adiante, serão apresentados os procedimentos metodológicos relativo as etapas de coleta e tratamento de dados. Ademais, será indicado os processos referente ao desenvolvimento e aplicação do modelo para priorização de estações de tratamento de efluentes.

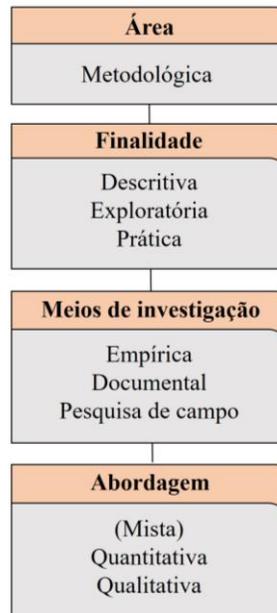
3.3.1. Tipo de pesquisa

Dentre as principais sistematizações de pesquisas, destacam-se os tipos relativo aos fins da pesquisa e quanto aos meios de investigação (VERGARA, 2016). Em referência a finalidade, a pesquisa pode ser reconhecida como descritiva quando a intenção for representar atributos de determinado fenômeno ou população (Figura 7). Nesse contexto, o estudo deve ser considerado descritivo, em virtude de descrever as tecnologias de tratamento de efluentes, realizando o diagnóstico das alternativas preferíveis durante o processo de tomada de decisão.

Nesse ínterim, a pesquisa se enquadra também como exploratória e prática, tendo em vista sua ocorrência em áreas cujo o conhecimento ainda é pouco difundido. Ademais, o estudo pretende propor algo com aplicabilidade real para solução de um problema específico, corroborando com a necessidade de deliberar a respeito de problemas concretos. Yin (2001) afirma que o estudo de caso permite compreender fenômenos, analisando o fato contemporâneo a partir do seu contexto factual. Nesse sentido, a pesquisa realizará o estudo de caso de três municípios da bacia hidrográfica do Rio Paracatu para evidenciar a utilidade do modelo multicriterial de priorização de ETEs.

Em relação aos meios de investigação, o estudo pode ser definido como pesquisa de campo, visto que considera o local onde ocorre determinado fenômeno, dispondo de elementos para sua elucidação (VERGARA, 2016). Não obstante, a investigação empírica postula a revisão sistemática da literatura, a fim de estabelecer o estado da arte, contemplando a bibliografia mais relevante sobre o tema publicada em livros, revistas, jornais, teses e artigos científicos (MARCONI e LAKATOS, 2017). Além disso, o estudo tem relação com a pesquisa documental, compreendendo análise de arquivos, leis, resoluções e normativos inerentes ao processo de seleção de ETEs.

Figura 7. Sistematização do tipo de pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor.

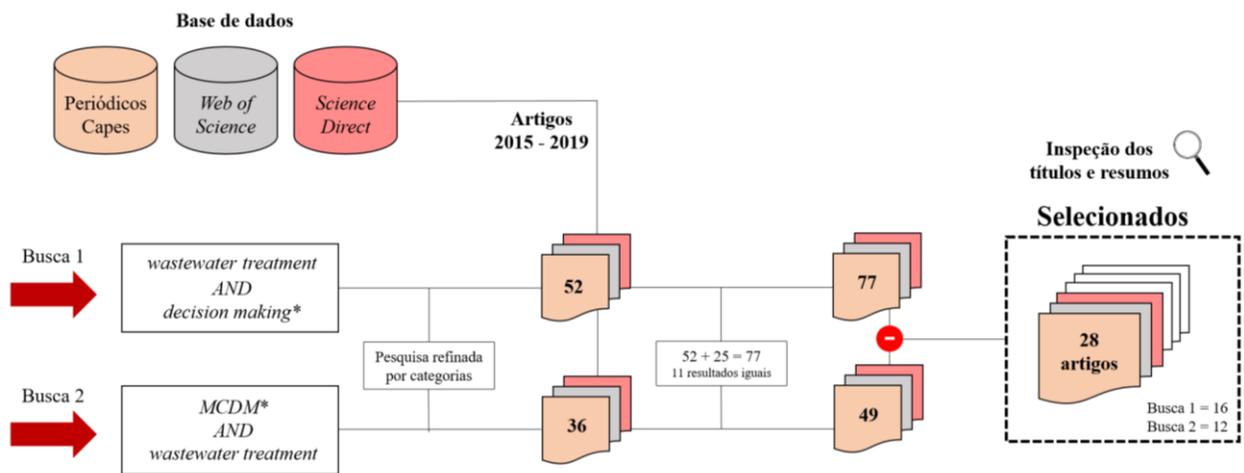
Segundo Gil (2017), quanto à abordagem, a pesquisa pode ser apontada como quantitativa quando ocorre a mensuração dos dados, a partir de instrumentos padronizados e imparciais, valendo-se da linguagem matemática para retratar fenômenos, sem que haja a intervenção do investigador. Por sua vez, a abordagem qualitativa pode ser caracterizada como interpretativa, submetido a figura do investigador e sua interação com os participantes, debatendo a complexidade de cada evento. Dessa forma, será realizada uma pesquisa mista, combinando ambas as abordagens na mesma investigação para obter maior clareza dos problemas de pesquisa (CRESWELL, 2010).

3.3.2. Revisão sistemática da literatura

A metodologia pretende alcançar o estado da arte para obter a síntese dos principais sistemas de apoio à decisão utilizados no contexto de ETEs, assim o recurso selecionado para atingir melhor rigor e confiabilidade na revisão da literatura foi empregar a abordagem sistemática. Isso quer dizer, determinar uma estratégia e um método sistemático para processar buscas e analisar resultados, recapitulando através de ciclos contínuos até que os propósitos da revisão sejam concebidos (LINDE; WILLICH, 2003).

Conforme afirma Cronin, Ryan e Coughlan (2008), a revisão sistemática da literatura estabelece um protocolo de pesquisa para eleger e analisar fontes, obedecendo as seguintes etapas: (I) Formulação da questão de pesquisa; (II) estabelecimento dos critérios de inclusão e exclusão; (III) seleção e acesso da literatura; (IV) avaliação da qualidade da literatura incluída na revisão e; (V) análise, síntese e disseminação dos resultados. Desse modo, a partir das definições apresentadas na literatura, o protocolo adotado pode ser observado na Figura 8.

Figura 8. Protocolo de revisão sistemática da literatura.



Fonte: Elaborado pelo autor, inspirado em Guarnieri (2015).

I. Formulação da questão de pesquisa

- Quais são os principais sistemas multicriteriais de apoio à decisão para ETEs registrados na literatura?
- Como a análise multicritério possibilitaria a avaliação dos aspectos sociais, econômicos, técnicos e ambientais para priorização de ETES?

II. Definição dos critérios de pesquisa

Os critérios de pesquisa são divididos nas etapas identificação, seleção e inclusão/exclusão dos estudos. A primeira etapa busca orientar a escolha das bases de dados, período de publicação, palavras-chave, idiomas e definição dos operadores booleanos. Em seguida, a seleção dos estudos considera o tipo do artigo e as formas de acesso. Por fim, a inclusão/exclusão examina o teor dos estudos, analisando os métodos, ferramentas e aplicações possíveis (Tabela 4).

III. Seleção e acesso da literatura

A pesquisa dos artigos sucedeu a partir da busca no Periódicos Capes, *Web of Science* e *Science Direct*. As buscas foram realizadas em pares em cada uma das plataformas, utilizando o operador “AND”, contemplando ao todo seis ações investigatórias. Na etapa seguinte, considerando a soma das três bases de dados, foram encontrados 52 artigos, utilizando as palavras-chaves *wastewater treatment* AND *decision making**. Por sua vez, 36 artigos foram obtidos através dos descritores MCDM* AND *wastewater treatment*. Desse modo, dos resultados encontrados, 11 desses eram repetidos, totalizando 77 artigos selecionados.

IV. Avaliação da qualidade da literatura incluída na revisão

A próxima etapa compreendeu a leitura dos títulos, resumos e palavras-chave dos 77 artigos pré-selecionados, a fim de avaliar a qualidade dos estudos. O principal critério de avaliação foi a correlação desses três filtros com o tema da pesquisa. Assim, foram excluídos 49 artigos que se distanciaram do objetivo proposto pela pesquisa. Logo, 28 artigos foram considerados, sendo 16 e 12 encontrados na busca, respectivamente.

V. Análise, síntese e disseminação dos resultados

A etapa final de aplicação do protocolo envolveu a extração de informações, sendo lidos na íntegra os 28 artigos, que foram incluídos para a construção da revisão sistemática. Sendo assim, resumos envolvendo os principais tópicos abordados foram produzidos, sintetizando os aspectos, métodos/ferramentas e suas aplicações no contexto dos sistemas de suporte à decisão.

Tabela 4. Detalhamento do protocolo de pesquisa.

Identificação	Bases de dados: Periódicos Capes, <i>Web of Science</i> e <i>Science Direct</i> foram selecionados por serem fontes multidisciplinares, compreendendo periódicos com alto grau de aceitação, sendo pesquisados por tópicos, que incluem títulos, resumos e palavras-chave;
	Período de publicação: Período de tempo de 5 anos (2015 - 2019);
	Palavras-chave: Foram utilizados os descritores <i>wastewater treatment</i> , <i>decision making*</i> e MCDM* com a intenção de obter resultados referentes aos sistemas de suporte à decisão, estações de tratamento de esgoto e métodos multicritérios, respectivamente. Ressalta-se que o asterisco (*) remete a qualquer letra ou termo subsequente e não foram usadas as (“”) para não haver restrição no resultado;

	Idiomas: Foram considerados periódicos em português, inglês e espanhol;
	Operadores Booleanos: Foram construídas combinações com os descritores citados e o operador “AND”, considerando que os resultados deveriam remeter necessariamente aos dois operadores;
Seleção	Tipos de artigos: Foram selecionados artigos e <i>proceedings papers</i> com ISSN e DOI, que são os periódicos de conferências, congressos e anais de eventos;
	Formas de acesso: Foram selecionados artigos com acesso aberto e fechado, cujo os temas são pertinentes à pesquisa através da plataforma Periódicos Capes;
Inclusão	Foram incluídos artigos após a análise dos métodos, ferramentas e aplicações de cada estudo de caso;
Exclusão	Foram excluídos artigos repetidos, capítulos de livro, notícias de jornal e estudos com assuntos irrelevantes.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.3. Definição dos métodos multicriteriais de auxílio à decisão

Nessa etapa, em decorrência da revisão sistemática da literatura, foi definido como sistema de apoio à decisão (SAD) a metodologia *multicriteria decision making* (MCDM), tendo em vista a capacidade de indicar a alternativa tecnológica com melhor desempenho, observando o comparativo entre os critérios selecionados. Além do mais, esse formato tem sido empregado com êxito em diversas finalidades no âmbito do saneamento e recursos hídricos (VIDAL *et al.*, 2019; BRINGER *et al.*, 2018; TSCHEIKNER-GRATL *et al.*, 2017; KALBAR *et al.*, 2016 e MOLINOS *et al.*, 2015).

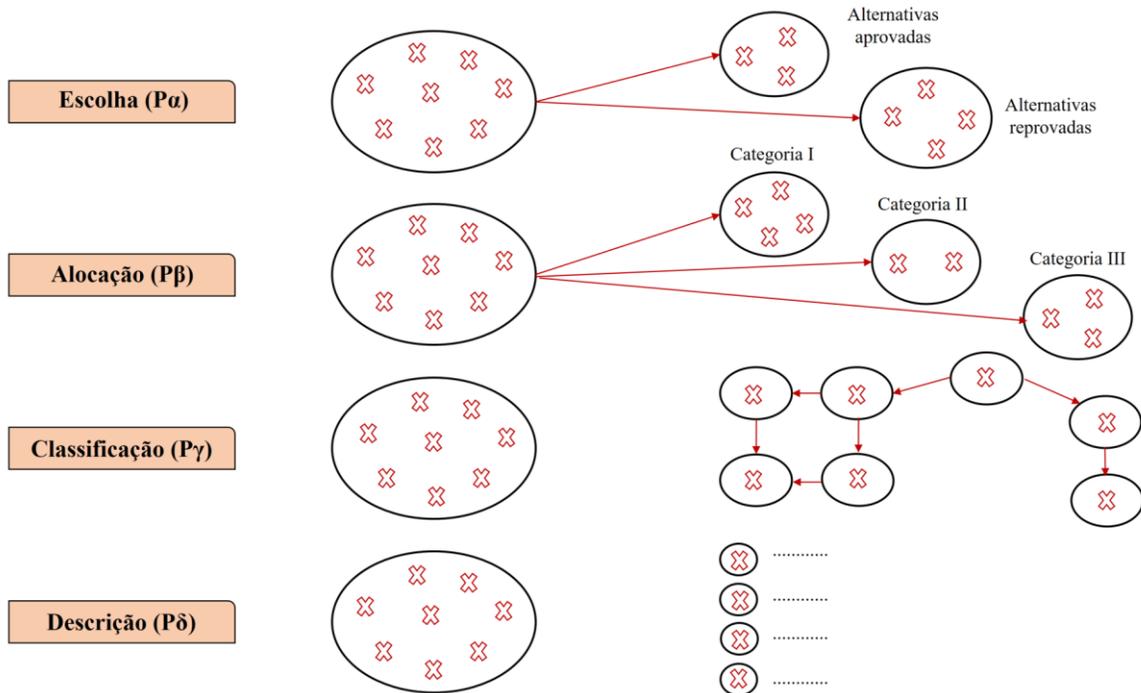
Convém, também, destacar que a metodologia MCDM dispõe de inúmeras técnicas e ferramentas, conseqüentemente, a etapa de identificação dos métodos mais adequados para avaliação de ETEs considerou quatro problemáticas decisórias de referência (α alfa • β beta • γ gama • δ delta) como pode ser observado na Figura 9, que são dispostas para determinar a problemática de tomada de decisão (ROY, 1985; MAYSTRE *et al.*, 1994).

A problemática α alfa constitui-se a partir da premissa de dispor o problema em termos da “melhor escolha”, selecionando as alternativas que são superiores para maioria dos critérios, tomando, ainda, o fato de não provocarem um nível de insatisfação para os demais. Por sua vez, a

problemática β beta convencionada o processo de alocação, isto é, ocorre a disposição das ações em classes pré-definidas, a partir do valor inerente de cada ação específica, não havendo comparação entre elas (GOMES *et al.*, 2004).

Na problemática γ gama ocorre a determinação das ações em função do modelo de preferências, selecionando aquelas que são “suficientemente satisfatórias”. Sucede a associação de ações semelhantes, através do processo de agrupamento da parte ou do todo em um conjunto de ações. Em contrapartida, a problemática δ delta realiza a discriminação das alternativas examinadas (GOMES *et al.*, 2004).

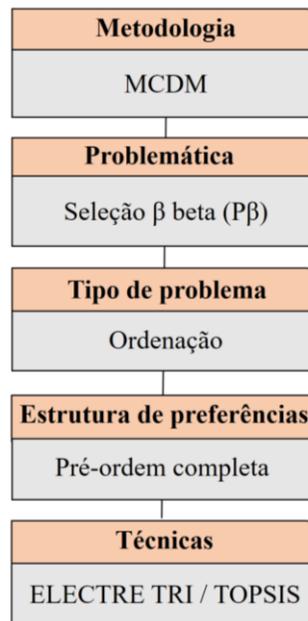
Figura 9. Problemáticas decisórias α , β , γ e δ



Fonte: Elaborado pelo autor, inspirado em Mendonça (2009).

Levando em consideração o escopo da pesquisa, decidiu-se pelo método *Elimination Et Choix Traduisant la Réalité* (ELECTRE-TRI), concebido por Yu e Roy (1992), assim como pelo método *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS), elaborado por Hwang e Yoon (1991), sendo que ambos são indicados pela inteligibilidade e por serem adaptados à problemática do tipo β beta (Figura 10) (GOFFI *et al.*, 2019; TSCHEIKNER-GRATL *et al.*, 2017).

Figura 10. Síntese da problemática multicritério



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.4. Definição das alternativas e critérios

Consoante a revisão sistemática da literatura, observa-se o destaque em considerar os aspectos econômicos, sobretudo, os critérios de custos durante a avaliação de desempenho de ETEs. Nessa seara, a pesquisa pretende realizar um estudo de viabilidade econômica fundamentada nas 37 soluções tecnológicas para tratamento de esgotos dispostas por Von Sperling (2014) como as mais relevantes no Brasil, com intenção de selecionar 15 alternativas economicamente viáveis para o estudo de caso.

A literatura considera como custos preponderantes para o tratamento de esgotos aqueles relacionados a implantação, operação, manutenção, consumo de energia e demanda por área (m^2) (GOFFI, 2017). Desse modo, serão realizados os cálculos de Valor Presente Líquido (VPL) e o

Valor Presente Líquido Anualizado (VPLa) para diferentes cenários, a fim de medir o desempenho econômico para comparar as soluções tecnológicas em termos de investimentos obrigatórios (Figura 11). Ademais, o estudo de viabilidade adotará o horizonte de projeto de 25 anos (DJUKIC *et al.*, 2016).

A etapa seguinte será compreendida pelo cálculo atualizado dos indicadores econômicos por intermédio da Simulação de Monte de Carlo (SMC), baseado nos valores mínimo, máximo e valor provável estabelecidos segundo Von Sperling (2014). A modelagem matemática de VPL e VPLa está expressa nas equações (8) e (9). O VPL reflete as diferenças nos fluxos de caixa futuros incluídos ao valor presente, descontando a aplicação inicial. Esse método de análise de investimento tem sido bastante utilizado por evidenciar quais ETes são economicamente preferíveis (MARKOV *et al.*, 2017).

$$VPL = -CF_0 + \sum_{j=1}^N \frac{CF_j}{(1+i)^j} \quad (8)$$

Onde:

CF_0 = valor investido

CF_j = valor dos benefícios esperados

i = taxa de juros (desconto)

N = tempo de duração

O Valor Presente Líquido Anualizado (VPLa) representa a expectativa de ganho com um investimento, recomendado para comparação de projetos de longo prazo (LIMA *et al.*, 2017).

$$VPLa = VPL + \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (9)$$

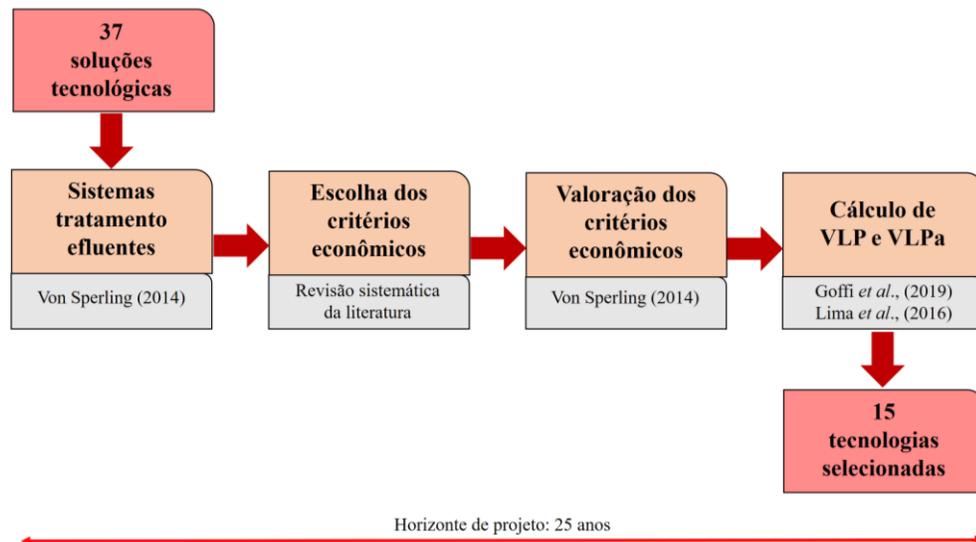
Onde:

VPL = valor presente líquido

i = taxa de juros (desconto)

N = tempo de duração

Figura 11. Modelo econômico – Simulação de Monte Carlo



Fonte: Elaborado pelo autor.

A definição dos critérios será concebida a partir dos periódicos examinados mediante a revisão sistemática da literatura, conforme a relação de preferência dos pesquisadores, sendo esses categorizados considerando os aspectos econômico, técnico, social e ambiental. Gomes (2012) recomenda uma análise minuciosa para que não sejam empregados critérios com escopo e juízo de valor análogos. Apesar de existirem obstáculos na definição dos limites entre os critérios, essas divisões favorecem a percepção do desempenho global das ETEs.

Isto posto, foram verificados 52 critérios na literatura, os quais 28 foram selecionados para composição do modelo, tendo em vista serem reiteradas vezes mencionados (MORERA *et al.*, 2015; ZHENG *et al.*, 2016; MARKOV *et al.*, 2017; VIDAL *et al.*, 2019). Portanto, essa verificação das alternativas e critérios sustentará a próxima etapa da pesquisa, designada como consulta aos especialistas.

3.3.5. Consulta aos especialistas e enquadramento dos pesos atribuídos

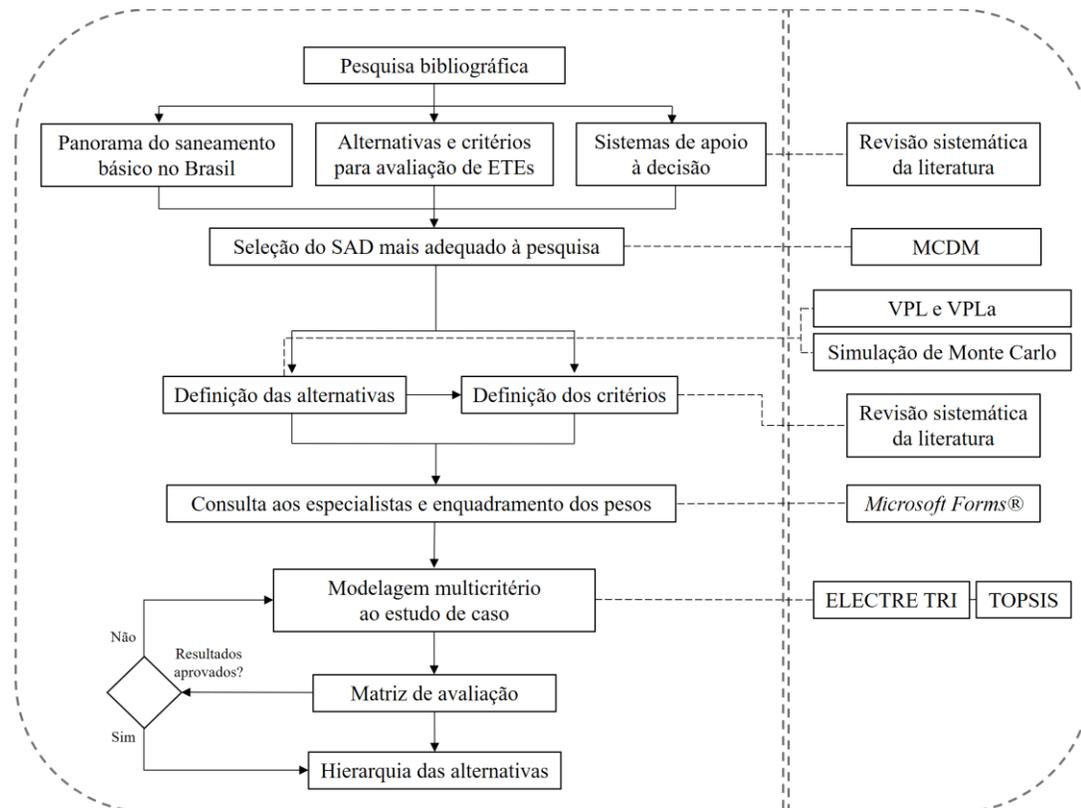
O formulário de pesquisa para consulta aos especialistas de recursos hídricos e saneamento, apresenta uma descrição da pesquisa, questionário e os critérios pré-selecionados agrupados nas dimensões econômica, técnica, social e ambiental para compor o modelo de avaliação de sistemas de tratamento de esgotos (Apêndice A), foram submetidos à aceitação e avaliados segundo uma escala de importância que varia de 0 (zero) a 4 (quatro).

A escolha dos especialistas consultados considerou a expertise, habilitação e tempo de atuação no setor, bem como na sugestão dos pesquisadores do Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA) da Universidade Brasília (UnB). O envio dos questionários será por intermédio da plataforma *Microsoft Forms*®, por ser um aplicativo de gerenciamento de pesquisas gratuito e online. Incluiu-se um espaço aberto para comentários e recomendações que possibilitarão o enquadramento dos pesos atribuídos, bem como a validação dos questionários produzidos.

3.3.6. Desenvolvimento do modelo de priorização de ETEs

O modelo multicritério tem por finalidade auxiliar a tomada de decisão para alternativas de tratamento de esgotos, sendo compatível com múltiplos cenários. O protocolo do modelo apresentado na Figura 12 considerou as seguintes etapas: (I) pesquisa bibliográfica; (II) seleção do sistema de apoio à decisão; (III) definição das alternativas e critérios; (IV) consulta aos especialistas e enquadramento dos pesos; (V) aplicação do modelo ao estudo de caso; (VI) matriz de avaliação e. (VII) hierarquização das alternativas.

Figura 12. Diagrama de desenvolvimento do modelo multicritério e métodos de apoio



3.3.7. Aplicação do modelo, análise dos resultados e conclusões

Assim sendo, a pesquisa propõe a aplicação do modelo de priorização de ETEs ao estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio Paracatu. Os 25 critérios selecionados serão agrupados em 4 (quatro) dimensões e a classificação das alternativas preferidas para o tratamento de esgotos foi obtida a partir da utilização do software ELECTRE TRI Academic® versão 2.0 disponibilizado pela *Dauphine Université Paris*, bem como o software TOPSIS versão 3.1.0 (*free access*), propriedade do *Statistical Design Institute*. Finalmente, foi verificado o nível de concordância da classificação gerada, especialmente, durante a análise dos resultados referente à aderência da proposta, permitindo a elaboração das conclusões e recomendações finais do estudo.

3.4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO

Nesse capítulo, o modelo de apoio à tomada de decisão foi estruturado em três etapas centrais, quais sejam: (I) definição dos sistemas de tratamento de esgotos baseada em parâmetros econômicos; (II) seleção dos critérios mais relevantes segundo consulta aos especialistas; e (III) determinação dos métodos multicriteriais (MCDM) mais adequados à pesquisa.

3.4.1. Seleção das alternativas

Na presente etapa foram definidas 15 alternativas a partir do estudo de viabilidade econômica, que considerou 37 soluções tecnológicas (Tabela 5) definidas por Von Sperling (2014) como as opções de tratamento mais difundidas no país. O processo decisório teve como base cidades com população entre 50 e 100 mil habitantes, sendo o critério de custo, o parâmetro fundamental para composição do modelo de priorização das alternativas (CAMPOS, 2011).

Desse modo, o estudo examinou as principais despesas inerentes ao processo de tratamento de esgotos, sendo os custos de implantação, operação e manutenção, energia elétrica e demanda por área (m²). Os valores de mínimo, máximo e valor provável foram utilizados na Simulação de Monte Carlo, calculados conforme a cotação apresentada por Von Sperling (2014) e a taxa de juros acumulada no período.

Assim sendo, o cálculo do custo total considerou as despesas de investimento, acrescido dos custos de operação e manutenção rotineiras, além dos gastos com consumo de energia e produtos químicos, bem como a demanda por área e o valor de mercado por m². Ademais, o estudo de viabilidade adotou o horizonte de projeto de 25 anos (DJUKIC *et al.*, 2016). Na Tabela 5 pode ser observado o resultado da distribuição econômica das alternativas com base na VPL e VPLa.

Tabela 5. Distribuição econômica das alternativas de tratamento.

Sistemas de tratamento		VPL (R\$)	VPLa (R\$)
T2	Tratamento primário convencional	226.025,71	33.403,72
T11	Infiltração lenta	258.644,63	38.224,38
T17	Reator UASB	280.832,72	41.503,51
T12	Infiltração rápida	312.716,56	46.215,53
T5	Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa	339.678,59	50.200,17
T4	Lagoa facultativa	339.958,89	50.241,60
T13	Escoamento superficial	374.808,28	55.391,90
T14	Terra úmidas construídas (<i>wetlands</i>)	406.360,23	60.054,87
T20	Reator UASB + filtro anaeróbio	409.607,44	60.534,77
T1	Tratamento primário (tanques sépticos)	430.426,90	63.611,62
T23	Reator UASB + lagoas de polimento	461.230,71	68.164,03
T8	Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação	468.685,53	69.265,75
T10	Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas	476.429,24	70.410,18
T9	Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de alta taxa	491.021,79	72.566,77
T26	Reator UASB + escoamento superficial	492.471,22	72.780,98
T16	Tanque séptico + infiltração	498.991,70	73.744,63
T21	Reator UASB + filtro biológico percolador de alta carga	546.264,65	80.730,97
T24	Reator UASB + lagoas aeradas facultativas	566.849,19	83.773,10
T25	Reator UASB + Lagoas aeradas MC + lagoa de decantação	591.006,62	87.343,25
T3	Tratamento primário avançado	599.008,17	88.525,78
T6	Lagoa aerada - facultativa	701.340,72	103.649,23
T22	Reator UASB + flotação por ar dissolvido	708.792,72	104.750,54
T15	Tanque Séptico + filtro anaeróbio	741.157,30	109.533,62
T7	Lagoa aerada misturada completa + lagoa de sedimentação	754.480,82	111.502,66
T19	Reator UASB + biofiltro aerado submerso	939.739,22	138.881,50
T18	Reator UASB + Iodos ativados	974.678,92	144.045,14
T37	Tanque séptico + biodisco	1.022.628,10	151.131,42
T34	Filtro biológico percolador de alta carga	1.022.639,00	151.133,03
T33	Filtro biológico percolador de baixa carga	1.022.651,46	151.134,88
T35	Biofiltro aerado submerso com nitrificação	1.143.143,36	168.942,04
T36	Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N	1.160.714,76	171.538,87
T28	Lodos ativados - aeração prolongada	1.396.682,03	206.411,84
T27	Lodos ativados convencional	1.416.445,34	209.332,59
T30	Lodos ativados convencional com remoção biológica de N	1.465.528,01	216.586,39
T29	Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)	1.469.177,67	217.125,76
T31	Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P	1.694.378,53	250.407,59
T32	Lodos ativados convencional + filtração terciária	1.713.723,17	253.266,47

A Tabela 6 apresenta os valores em reais (R\$) de VPL e VPLa, na ordem crescente, equivalente as despesas implantação e conservação de cada solução tecnológica avaliada. Dentre as alternativas estimadas pela SMC, as cinco opções que possuem os custos mais elevados correspondem aos sistemas de lodos ativados, sendo eles o convencional (T27), convencional com remoção biológica de N (T30), batelada com aeração prolongada (T29), convencional com remoção biológica de N/P (T31) e convencional com filtração terciária (T32). O custo médio anual dessas alternativas ficou entre R\$ 209.332,59 e R\$ 253.266,47, ou seja, uma variação de 20,98%.

Por sua vez, as cinco opções que possuem os menores custos foram o tratamento primário convencional (T2), infiltração lenta (T11), reator UASB (T17), infiltração rápida (T12) e o sistema australiano composto por lagoa anaeróbia seguida pela facultativa (T5). O custo médio anual dessas alternativas ficou entre R\$ 33.403,72 e R\$ 50.200,17, ou seja, uma variação de 50,28%. Convém, também, mencionar que dentre as alternativas economicamente viáveis, o reator UASB se destaca por ser uma tecnologia avançada com baixa demanda de área, o que esclarece sua inclusão dentre as alternativas com melhores custo-benefício (GOFFI, 2018).

Deste modo, a partir do estudo de viabilidade econômica foram dispostas as 15 alternativas de tratamento de esgotos com os valores mais competitivos no mercado para compor o modelo de priorização, detalhadas a seguir na Tabela 3.

Tabela 6. Alternativas do modelo de priorização

A1	T2	Tratamento primário convencional
A2	T11	Infiltração lenta
A3	T17	Reator UASB
A4	T12	Infiltração rápida
A5	T5	Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa
A6	T4	Lagoa facultativa
A7	T13	Escoamento superficial
A8	T14	Terra úmidas construídas (<i>wetlands</i>)
A9	T20	Reator UASB + filtro anaeróbio
A10	T1	Tratamento primário (tanques sépticos)
A11	T23	Reator UASB + lagoas de polimento
A12	T8	Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação
A13	T10	Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas
A14	T9	Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de alta taxa
A15	T26	Reator UASB + escoamento superficial

3.4.2. Seleção dos critérios

Essa etapa teve início com a revisão sistemática para pré-seleção dos critérios que são frequentemente citados na literatura. Os critérios foram submetidos a consulta dos especialistas através de formulários de pesquisa enviados via *GoogleForms*. Ao todo foram encaminhados 25 formulários, os quais 19 foram respondidos, o que corresponde a 76% de participação. O período aproximado para recebimento das respostas foi de 60 dias e o perfil dos participantes consistiu em gestores de recursos hídricos, profissionais do setor de saneamento e pesquisadores acadêmicos (Apêndice B).

A Tabela 7 apresenta a avaliação de importância de cada critério, que representa o cômputo das menções feitas pelos autores, consideradas preponderantes para definição de um sistema de tratamento de esgotos. Os critérios foram agrupados nas dimensões econômica, técnica, social e ambiental. Ademais, não existe um vínculo direto das avaliações individuais e a relação dos participantes, tendo em vista a manutenção do sigilo de pesquisa.

Dentre os itens avaliados, a dimensão econômica evidenciou ser o grupo de critérios com as melhores pontuações, em compensação a dimensão social confirmou ser a menos relevante. As menores notas atribuídas correspondem a durabilidade e impacto visual, ambos não receberam notas, sendo computados um total de 11 votos. O restante dos critérios alcançou nota mínima igual 1, o que indica que a maioria dos critérios devem ser classificados como significativos.

Os critérios considerados mais importantes foram o custo de investimento (3,57), custo de operação e manutenção (3,29), eutrofização (3,19), confiabilidade (3,10) e aceitação pública (3,05). Em contrapartida, os critérios apontados como menos importantes foram o reaproveitamento de lodo, resistência ao choque de cargas, durabilidade e impacto visual, sendo atribuído as notas 1,71, 1,57, 1,40 e 1,38, respectivamente.

Tabela 7. Critérios para seleção de sistemas de tratamento de esgoto observados na literatura

Critérios		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19	MÍN	MÁX	MÉD	DP*
Econômico	Custo de implantação	4	4	3	3	4	3	4	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	4	3	4	3,57	0,49
	Operação e manutenção	4	2	2	3	4	4	3	4	3	4	3	4	3	4	4	3	2	4	3	2	4	3,29	0,73
	Ciclo de vida	4	3	2	4	3	1	2	1	4	3	2	4	3	4	3	2	4	4	4	1	4	2,95	1,03
	Demanda por área	2	4	1	2	1	4	3	1	2	1	3	3	2	1	4	3	1	3	1	2	1	2,14	1,10
	Mão-de-obra	3	2	1	2	3	4	1	2	1	2	1	2	1	2	3	4	1	2	2	1	4	2,10	0,94
Técnico / Operacional	Complexidade	2	4	3	4	1	2	4	2	3	2	-	2	3	3	4	3	2	4	2	1	4	2,75	0,92
	Confiabilidade	1	4	2	4	4	2	4	2	3	4	3	4	4	3	4	3	3	4	2	1	4	3,10	0,93
	Durabilidade	1	-	1	2	1	2	1	1	2	2	1	2	1	1	-	2	1	2	1	-	4	1,40	0,58
	Flexibilidade	2	3	4	1	4	2	1	2	3	1	2	2	2	2	3	4	2	1	2	1	4	2,29	0,96
	Eficiência remoção de MO	3	4	2	1	2	2	3	4	1	1	2	2	2	1	4	3	4	3	2	1	4	2,43	1,04
	Eficiência remoção de N	1	1	1	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	1	1	2	1	2	1	1	4	1,62	0,50
	Eficiência remoção de P	1	1	1	2	1	2	2	1	2	2	2	2	2	1	1	2	1	2	1	1	4	1,62	0,50
	Eficiência remoção de SS	2	1	2	2	1	2	3	2	1	2	1	2	4	2	1	2	1	1	2	1	4	1,86	0,77
	Resistência choque de cargas	2	1	2	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1	3	1	2	2	1	2	1	3	1,57	0,60
	Produção de lodo	3	2	2	1	3	2	1	2	3	2	1	4	3	2	2	2	3	1	2	1	4	2,19	0,81
	Clima e cenário local	2	3	1	2	1	2	4	1	2	1	2	1	4	1	-	1	2	3	1	1	4	1,95	0,99
Social	Aceitação pública	4	2	4	3	2	3	4	2	2	4	3	3	4	4	2	2	4	3	3	2	4	3,05	0,83
	Segurança	2	3	1	4	2	-	2	2	3	2	4	1	4	2	2	3	1	2	4	1	4	2,45	1,01
	Impacto visual	2	1	1	-	2	2	2	1	1	1	2	1	2	2	-	2	2	1	1	-	3	1,38	0,67
	Odor	-	2	1	2	1	1	1	2	1	2	2	3	2	1	2	1	1	-	3	1	3	1,52	0,82
Ambiental	Reaproveitamento de lodo	1	2	2	3	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	4	2	1	1	1	1	4	1,71	0,81
	Eutrofização	3	4	4	4	3	2	2	2	4	4	3	3	4	2	3	2	4	4	4	2	4	3,19	0,83
	Emissão de GEEs	4	2	3	3	4	2	2	2	4	1	2	2	4	4	2	3	4	2	3	1	4	2,76	0,95
	Sustentabilidade	3	4	3	4	2	4	2	4	1	3	2	4	3	4	1	4	2	4	3	1	4	2,95	1,03
	Impactos ambientais	2	1	2	1	2	1	1	2	2	-	3	2	2	1	4	1	2	1	2	1	4	1,85	0,79

* DP: Desvio Padrão

A delimitação dos padrões de preferência favoreceu a seleção dos 16 critérios que foram priorizados no modelo, tendo em vista que um número elevado de alternativas e critérios, usualmente, acentua a subjetividade dos sistemas de apoio à decisão (Tabela 8).

Tabela 8. Critérios adotados para seleção dos sistemas de tratamento

Dimensão econômica		
C1	Custo de implantação	Custo de projeto e obras a executar
C2	Operação e manutenção	Custo de mão-de-obra, energia e insumos para operação do sistema
C3	Ciclo de vida	Custo das etapas do projeto desde o início até a sua conclusão
C4	Demanda por área	Necessidade de espaço territorial
C5	Mão-de-obra	Colaboração direta e indireta
Dimensão técnica-operacional		
C6	Complexidade	Evidencia os aspectos construtivos, operacionais e manutenção
C7	Confiabilidade	Evidencia a integridade do projeto
C8	Eficiência de remoção de MO	Efetividade no tratamento de MO
C9	Eficiência de remoção N e P	Efetividade no tratamento de N e P
C10	Produção de lodo	Evidencia o volume de resíduos gerados pelos sistemas
C11	Adaptação clima e cenário local	Evidencia a capacidade adaptativa em diferentes cenários
Dimensão social		
C12	Aceitação pública	Aceitabilidade física e econômica da população
C13	Segurança	Medidas ativas e passivas de proteção das instalações
Dimensão ambiental		
C14	Eutrofização	Evidencia o crescimento excessivo de plantas aquáticas para níveis que afetem a utilização desejável da água
C15	Emissão de GEEs	Evidencia a liberação de gases do efeito estufa para atmosfera
C16	Sustentabilidade	Evidencia o comportamento sustentável do projeto

Em virtude do entrave de determinar o peso dos critérios no modelo de avaliação, procurou-se definir os pesos de forma simples e objetiva, de modo a reduzir as incertezas inerentes ao processo. Na Tabela 9, os critérios foram corrigidos em valores percentuais e agrupados em escala de importância conforme suas dimensões para facilitar a aplicabilidade do modelo.

Tabela 9. Pesos dos critérios de avaliação

Critério		Peso inicial	Peso corrigido
C1	Custo de implantação	3,57	8,27
C2	Operação e manutenção	3,29	7,62
C3	Ciclo de vida	2,95	6,84
C4	Demanda por área	2,14	4,96
C5	Mão-de-obra	2,10	4,87
C6	Complexidade	2,75	6,37
C7	Confiabilidade	3,10	7,18
C8	Eficiência de remoção de MO	2,29	5,31
C9	Eficiência de remoção de N e P	2,43	5,63
C10	Produção de lodo	2,19	5,07
C11	Adaptação clima e cenário local	1,95	4,52
C12	Aceitação pública	3,05	7,07
C13	Segurança	2,45	5,68
C14	Eutrofização	3,19	7,39
C15	Emissão de GEEs	2,76	6,39
C16	Sustentabilidade	2,95	6,84
Total		43,16	100,00

3.4.3. Métodos multicriteriais

A metodologia *Multicriteria decision making* (MCDM) foi escolhida como sistema de apoio à decisão (SAD), considerando a necessidade de hierarquização das alternativas disponíveis, baseada no comparativo entre os critérios. Nesse sentido, optou-se pela utilização do software ELECTRE TRI *Academic*® versão 2.0 disponibilizado pela *Dauphine Université Paris*, bem como o software TOPSIS versão 3.1.0 (*free access*), propriedade do *Statistical Design Institute*.

O método ELECTRE-TRI concebido por Yu e Roy (1992) carece pela determinação dos parâmetros de entrada, que foram realizados segundo as relações de p/q e v/p . A execução do método exige atribuir um valor aleatório para o limiar de indiferença q , que se associe ao parâmetro a ideia de incerteza relacionada à avaliação. Desse modo, o valor atribuído corresponde ao percentual de 5% para os critérios que empregam indicadores, e os demais utilizaram o valor mínimo para distinguir o comportamento nas planilhas de avaliação. Assim, foi possível estabelecer os valores de p e q , assumindo a relação de p/q igual a 3 (Tabela 10).

Tabela 10. Modelagem de preferência para utilização dos métodos multicriteriais

Critérios		Mín	Máx	Limiaries	
				q	p
C1	Custo de implantação	10.000	100.000	0,1	0,3
C2	Operação e manutenção	-2	2	0,2	0,6
C3	Ciclo de vida	0	100	7	21
C4	Demanda por área	-1	0	0,05	0,15
C5	Mão-de-obra	-2	2	0,2	0,6
C6	Complexidade	0	100	10	30
C7	Confiabilidade	0	100	4	12
C8	Eficiência de remoção de MO	0	100	10	30
C9	Eficiência de remoção de N e P	0	1	0,05	0,15
C10	Produção de lodo	0	1	0,1	0,3
C11	Adaptação clima e cenário local	-2	2	0,2	0,6
C12	Aceitação pública	0	4	0,2	0,6
C13	Segurança	0	100	2	6
C14	Eutrofização	0	4	15	45
C15	Emissão de GEEs	0	1	0,05	0,15
C16	Sustentabilidade	0	100	2,5	7,5

O método TOPSIS elaborado por Hwang e Yoon (1991) exigiu a determinação do parâmetro p que evidencia a distância avaliada, refletindo a importância que o tomador de decisor concede aos desvios máximos, que pode assumir os valores 1, 2 e infinito (∞). Assim, $p=1$ indica que todos os desvios possuem pesos iguais na determinação de Lp . Ao passo que, $p=2$ importa que os desvios possuem pesos proporcionais à sua importância. Enfim, $p=\infty$ mostra que maior desvio recebe importância máxima. Portanto, o estudo adotou o valor de $p=2$ para atribuir aos desvios valores proporcionais à sua magnitude.

3.5. APLICAÇÃO DO MODELO

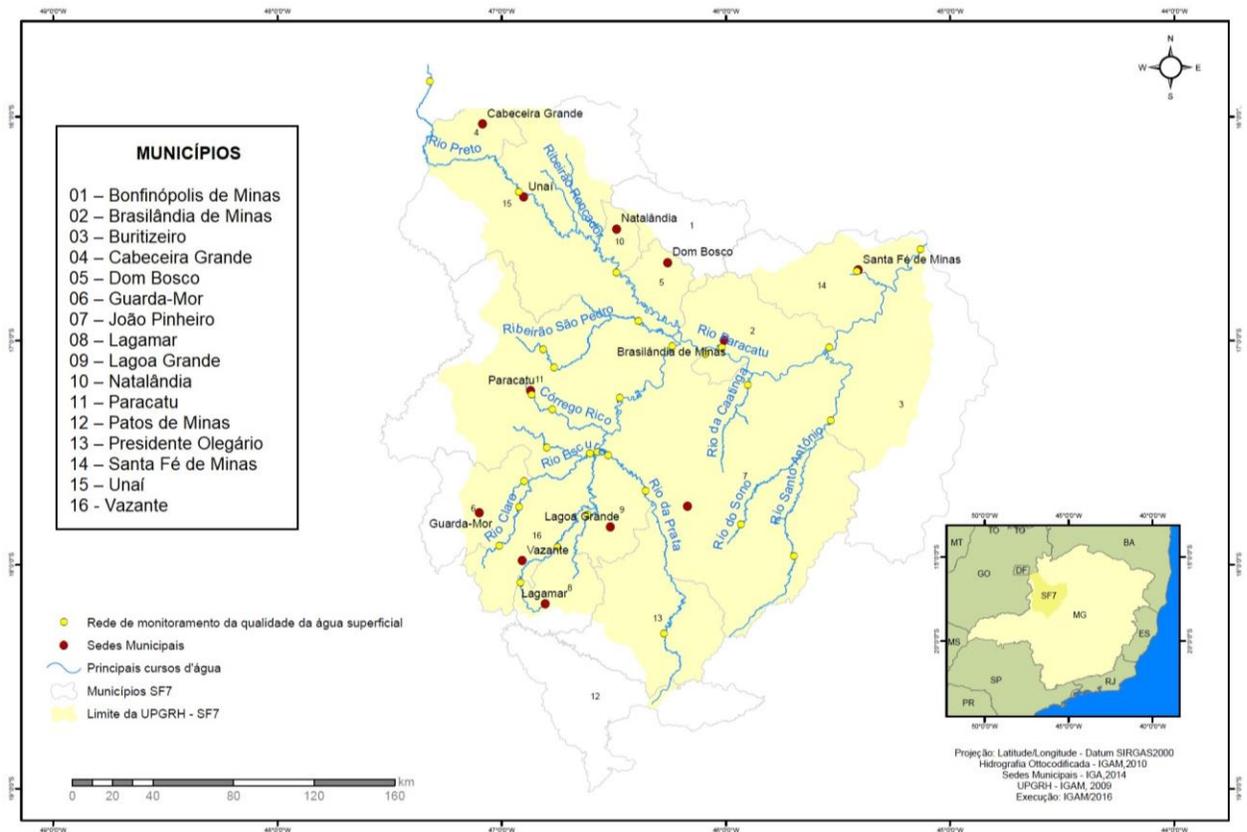
Nesse capítulo, a aplicação do modelo multicritério de priorização de ETEs foi disposta em três etapas: (I) caracterização da bacia hidrográfica do Rio Paracatu; (II) estudo de caso dos serviços de água e esgoto municipais; (III) avaliação do modelo multicriterial para hierarquizar alternativas de tratamento nos cenários propostos.

3.5.1. Características gerais da bacia hidrográfica do Rio Paracatu

O território da bacia hidrográfica do Rio Paracatu está compreendido entre as coordenadas geográficas 15°30'/19°30'S e 45°10'/47°30'W. A poligonal da bacia estende-se por uma área de 45.600 km², sendo que 92% dessa área pertence ao estado de Minas Gerais, e o remanescente, está distribuído entre o estado de Goiás e o Distrito Federal, sendo 5% e 3%, respectivamente. A bacia compreende a maior parte dos municípios da Macrorregião do Noroeste de Minas, assim como as Microrregiões de Unai e Paracatu (PDBHRP, 2006).

A bacia integra completamente os municípios mineiros de Brasilândia de Minas, Cabeceira Grande, Dom Bosco, Lagoa Grande, João Pinheiro, Natalândia e Vazante, assim como, parcialmente, os municípios de Bonfinópolis de Minas, Buritizeiro, Guarda Mor, Lagamar, Paracatu, Patos de Minas, Presidente Olegário, Santa Fé de Minas e Unai, sendo um total de 16 municípios (Figura 13).

Figura 13. Unidade Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Rio Paracatu – SF7



Fonte: IGAM (2014).

A bacia hidrográfica do rio Paracatu tem como aptidão a atividade agrícola, que abrange grandes extensões de terra de maneira intensiva ou extensiva. Na década de 80, o incentivo governamental somado as boas condições dos solos e relevo promoveram a popularização dessas práticas na região. Contudo, a intensa exploração dos solos na bacia tem provocado impactos ambientais adversos, de tal forma a prejudicar a disponibilidade hídrica na região.

Convém, também, destacar a existência de áreas de cultivo nos platôs da bacia, locais naturalmente responsáveis pela recarga dos aquíferos, que estão sendo degradados pelo uso indiscriminado de defensivos agrícolas, ou seja, comprometendo a qualidade e a disponibilidade das águas subterrâneas. Outro problema no rio do Prata e na sub-bacia do ribeirão Entre-Ribeiros corresponde aos cultivos e pastagens nos vales fluviais, locais antes cercados por matas ciliares e lagoas marginais, mas que hoje são trechos assoreados e áreas alagadas que foram drenadas para ceder espaço à agricultura.

A intervenção em áreas de preservação permanente (APP) tornou-se a principal forma de degradação dos recursos hídricos na bacia, especialmente pela utilização das veredas, que são áreas produtoras de água e responsáveis pelo controle e fluxo do lençol freático, além de serem um sistema represador e capazes de promoverem a vida aquática e terrestre. Após o represamento, elas são utilizadas como fonte de captação de água para irrigação e a dessedentação de animais, desse modo prejudica o fluxo natural dos ambientes aquáticos e promove a degradação da vegetação natural.

As lagoas marginais presentes ao longo do rio Paracatu, também, têm sofrido com o assoreamento de suas margens devido ao crescimento das lavouras e pastagens. Elas são os habitats naturais para desova e reprodução de peixes, e assim a descaracterização desses ambientes prejudica a biodiversidade aquática, bem como a redução dos estoques pesqueiros para as comunidades regionais.

Outras atividades como a mineração, a silvicultura e o carvoejamento são bastante difundidas e surgiram desde o período de povoamento da bacia. O caso mais emblemático sobre a mineração surge com o garimpo de ouro no córrego Rico, onde houve o assoreamento e uma enorme contaminação por mercúrio dos afluentes e dos cursos d'água a jusante do mesmo, deixando marcas de degradação dessa época de intensa exploração mineral.

3.5.2. Diagnóstico dos serviços de água e esgoto

Segundo o Atlas das Águas (ANA, 2015), a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) administra os serviços de captação, tratamento e abastecimento de água na maioria dos municípios da bacia do rio Paracatu, tendo a concessão para operar em dez municípios, o que representa cerca de 67%, sendo que o restante é compreendido pelas prefeituras e os Serviços Autônomos de Água e Esgoto (SAAE), que correspondem a 33% do total, ou seja, cinco municípios (Tabela 11).

Convém, também, mencionar a recomendação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) para necessidade de investimentos no setor, sendo imprescindível a melhoria da infraestrutura existente e a ampliação dos sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário. O estudo realizado prevê que os municípios de Cabeceira Grande, João Pinheiro, Lagoa Grande, Natalândia, Paracatu, Unaí e Vazante devem investir um montante de R\$ 9.753.846,87 para a ampliação desses sistemas nos próximos anos (ANA, 2015).

Tabela 11. Concessão de água, mananciais e demandas na bacia do Paracatu

Municípios	Prestador	Manancial	Demanda
Bonfinópolis de Minas	COPASA	Ribeirão das Almas	9 L/s
Brasilândia de Minas	COPASA	Rio Paracatu	30 L/s
Buritizinho	SAAE - MG	Poços e Rio São Francisco	67 L/s
Cabeceira Grande	SAAE - CG	Córrego Cabeceira Grande	14 L/s
Dom Bosco	Prefeitura	Poços e Córrego Gado Bravo	5 L/s
Guarda Mor	COPASA	Poços e Córrego Guarda-Mor	8 L/s
João Pinheiro	COPASA	Ribeirão dos Órfãos	109 L/s
Lagamar	COPASA	Poços e Córrego Carrapato	12 L/s
Lagoa Grande	COPASA	Poços Lagoa Grande	21 L/s
Natalândia	Prefeitura	Poços de Natalândia	6 L/s
Paracatu	COPASA	Poços e Ribeirão Santa Isabel	239 L/s
Presidente Olegário	COPASA	Poços e Ribeirão Três Barras	37 L/s
Santa Fé de Minas	COPASA	Poços e Ribeirão Santa Fé	5 L/s
Unaí	SAAE – Unaí	Poços e Rio Preto	177 L/s
Vazante	COPASA	Poços de Vazante	44 L/s

Fonte: ANA (2015)

As concessionárias de água dos municípios abastecem o consumo predominantemente doméstico. O sistema de tratamento convencional com as etapas de floculação, decantação, filtração, cloração e fluoretação corresponde a 80% da solução mais difundida na bacia. Por sua vez, o tratamento simplificado conta com cloração e fluoretação, normalmente utilizado após a captação de poços profundos está na ordem de 20%.

O Atlas de Esgotos (2013) aponta que 73% dos serviços de coleta, tratamento e disposição final dos efluentes sanitários são realizados pelas prefeituras e o SAAE, ao passo que 27% são administrados pela COPASA. (Tabela 12). O estudo evidenciou dados alarmantes na bacia do rio Paracatu, onde cerca 62,14% da população não é atendida pela coleta e o tratamento de esgotos. Alguns municípios como Bonfinópolis de Minas, Buritizeiro, Lagamar, Lagoa Grande, Presidente Olegário e Santa Fé de Minas o cenário é ainda mais preocupante, sendo que apenas 2% da população possui cobertura por esses serviços essenciais.

Tabela 12. Concessão de esgoto, carga e população atendida na bacia do Paracatu

Municípios	Prestador	Kg DBO/dia*	População Atendida
Bonfinópolis de Minas	COPASA	223,60	1%
Brasilândia de Minas	COPASA	691,60	6%
Buritizeiro	SAAE - MG	1.308,60	2%
Cabeceira Grande	SAAE - CG	284,90	9%
Dom Bosco	Prefeitura	101,10	17%
Guarda Mor	COPASA	60,30	95%
João Pinheiro	COPASA	489,30	96%
Lagamar	COPASA	280,20	2%
Lagoa Grande	COPASA	361,10	2%
Natalândia	Prefeitura	87,00	56%
Paracatu	COPASA	1.283,30	91%
Presidente Olegário	COPASA	736,50	0%
Santa Fé de Minas	COPASA	124,80	1%
Unai	SAAE – Unai	952,50	100%
Vazante	COPASA	174,50	90%

*Carga de esgoto – pós tratamento.

Fonte: ANA (2013)

Outro aspecto importante surge a partir da análise da carga de esgoto gerada pela população instalada na bacia. Observa-se que nos municípios de Bonfinópolis de Minas, Buritizeiro e Presidente Olegário a carga esgoto gerada corresponde a mesma carga presente no pós tratamento,

o que evidencia a inexistência de instalações sanitárias nos domicílios, ou seja, a população está lançando seus efluentes in natura em valas, fossas e nos corpos hídricos.

Os municípios de Unai e Paracatu possuem uma carga de esgoto no pós tratamento de 952,50 e 1.283,30 Kg DBO/dia, respectivamente. Atualmente, em Unai apesar do volume alto de matéria orgânica o rio Preto possui uma boa capacidade de autodepuração dos efluentes sanitários. Entretanto, o mesmo não se aplica ao caso de Paracatu, onde os córregos Rico e São Domingos não possuem boa capacidade de diluição em seus corpos receptores. O saneamento deficiente resulta em doenças de veiculação hídrica todos os anos, tais como: hepatite, cólera, febre tifóide, entre outras.

A ANA por meio do Atlas de Esgotos (2013) salienta que apenas 37,86% da população possui atendimento por redes coletoras de esgotos em suas sedes municipais, sendo que nas áreas rurais esse retrato é ainda mais preocupante. O estudo sugere que a bacia possui um número deficitário de estações de tratamento de esgotos (ETEs), havendo a necessidade de ampliação desse amparo para todos os municípios do noroeste mineiro. O estudo estima que o montante a ser investido para infraestrutura de coleta está na ordem de R\$ 113.189.708,40 e para os sistemas de tratamento será necessário a quantia de R\$ 64.605.612,12 até 2023.

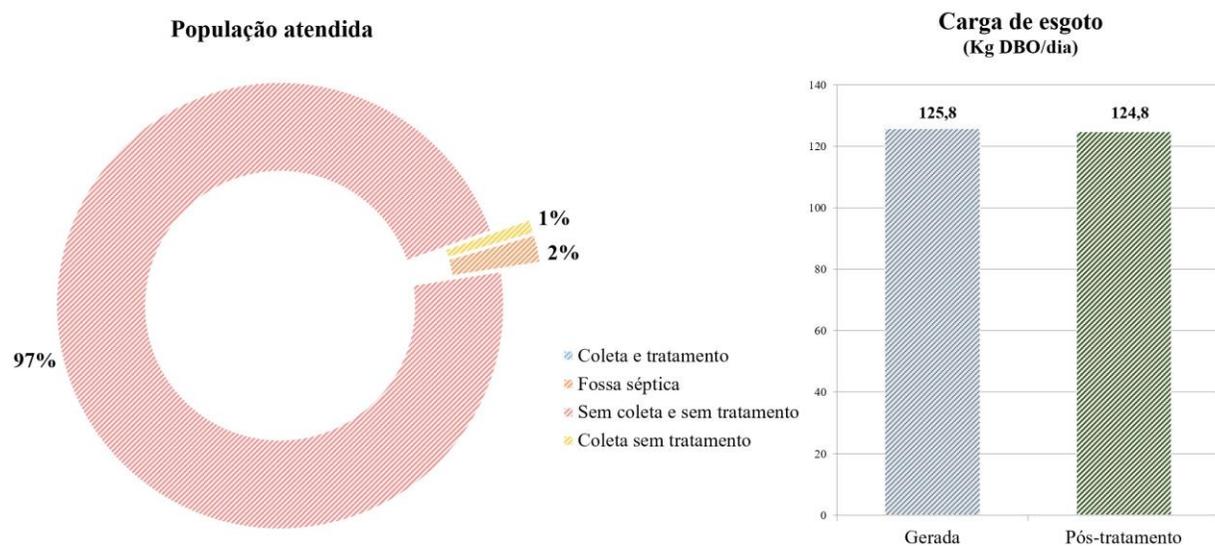
Nesse contexto, a pesquisa levou em consideração os seguintes fatores para realização do estudo de caso: população dos municípios segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), tipo de concessão dos sistemas de coleta, tratamento e disposição de efluentes, capacidade de diluição do corpo receptor, vazão bruta (m³/dia) e carga de esgoto (Kg DBO/dia).

3.5.3. Estudo de caso: Santa Fé de Minas

O município de Santa Fé de Minas está compreendido entre as coordenadas geográficas 16° 41' 24" S e 45° 24' 50" W. O território estende-se por uma área total de 2.917 km², possuindo uma população estimada de 3.866 habitantes, sendo a densidade demográfica de 1,32 hab/km². Dentre os principais indicadores, destacam-se o IDH de 0,622 (médio) e o PIB R\$ 34.852,73 (IBGE, 2018). A participação do município na área da bacia hidrográfica do Rio Paracatu corresponde a 5,40% (PDBHRP, 2006).

Nesse contexto, o cenário I foi considerado como uma comunidade pequena, pelo fato de ter vazão menor que 500 m³/dia e população de até 5 mil habitantes. O sistema de esgotamento sanitário é operado pela COPASA, tendo a vazão de esgoto bruto (Qeb) igual a 228,1 m³/dia e carga de esgoto em 125,8 Kg DBO/dia. Desse total, cerca de 97,1% dos efluentes domésticos não possuem coleta e tratamento, 1,6% dispõe apenas de coleta e sem tratamento e 1,3% destinado a soluções individuais (Figura 14). O corpo receptor é o Ribeirão Santa Fé que possui uma capacidade de diluição considerada regular/boa (ANA, 2013).

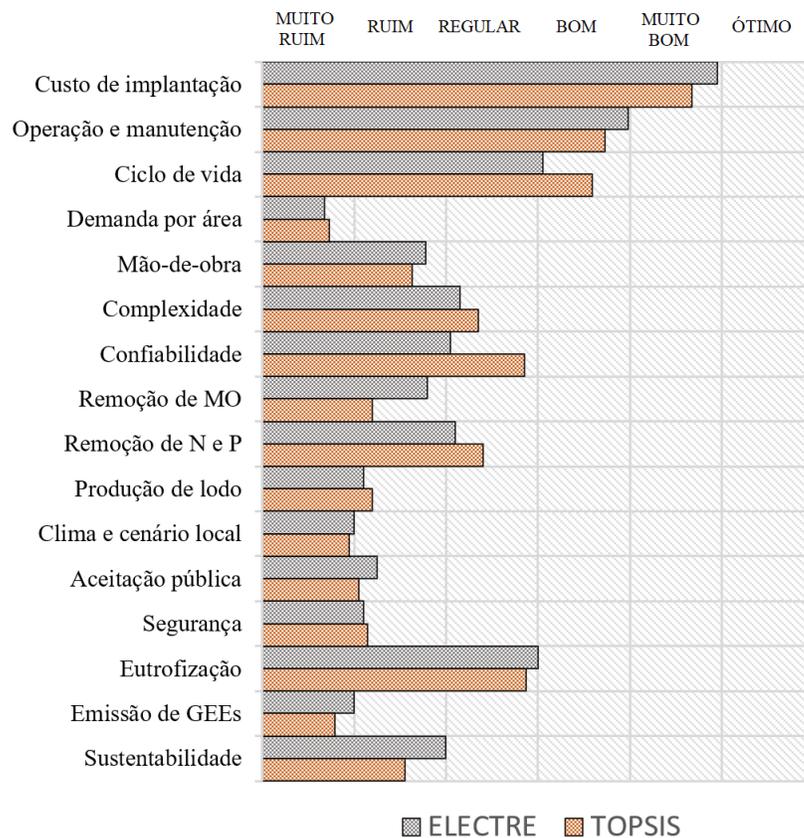
Figura 14. Síntese do sistema de esgotamento sanitário de Santa Fé de Minas



Os resultados alcançados com a aplicação do modelo multicritério proposto ao Cenário I são apresentados na Figura 15, que evidenciam a performance segundo cada critério avaliado, sendo obtidos pela utilização dos métodos ELECTRE-TRI e TOPSIS.

Verifica-se, a partir dos resultados obtidos, que o cenário I indica a relevância da dimensão econômica para escolha das tecnologias de tratamento, contudo os critérios sociais demonstraram ser preteridos se comparados aos expostos nas dimensões técnica e ambiental. Por outro lado, a preocupação com os aspectos de sustentabilidade tem se tornado uma tendência cada vez maior, permitindo sua integração em processos de tomada de decisão (KALBAR *et al.*, 2016).

Figura 15. Performance do cenário I segundo cada critério de avaliação



Com relação ao gráfico, apresentado na Figura 15, observa-se o mérito da nota atribuída a cada critério e a sua influência no processo decisório. Dentre os critérios que se mostraram preponderantes, vale destacar o custo de investimento, operação e manutenção, assim como o ciclo de vida, que apesar ter gerado discordância entre os métodos, avaliado como regular pelo ELECTRE-TRI e bom pelo TOPSIS, ambos têm significância pelo viés econômico-financeiro (MOLINOS *et al.*, 2015). Em termos gerais, representa o montante necessário para execução das atividades relativas a ETE selecionada.

Todavia, outros critérios como demanda por área, mão-de-obra, emissão de GEEs, adaptação ao clima e cenário local receberam notas menores. Isso ocorre pelos atributos do próprio município, que possui espaços territoriais ociosos, assim como ser relativamente simples requerer ou capacitar trabalhadores locais, além do futuro projeto de ETE pode contar com o Ribeirão Santa Fé, que apresenta parâmetros satisfatórios para o lançamento de efluentes.

A Tabela 13 apresenta o desempenho das alternativas avaliadas, a partir do tratamento dos dados para escolha da melhor solução para o município de Santa Fé de Minas, conforme os valores calculados pelos métodos ELECTRE-TRI e TOPSIS, obedecendo a hierarquia da melhor para a pior solução tecnológica. Com a intenção de reduzir as interferências externas, durante a fase de classificação, foram atribuídos pesos iguais e diferenciados para todos os critérios.

Tabela 13. Classificação das alternativas de ETEs par ao cenário I

Ordem	Pesos iguais		Pesos diferentes	
	ELECTRE-TRI	TOPSIS	ELECTRE-TRI	TOPSIS
1°	2	2	2	2
2°	4	4	1	1
3°	1	10	4	4
4°	10	1	10	10
5°	7	7	7	5
6°	9	5	5	7
7°	5	9	3	3
8°	3	3	9	6
9°	8	11	6	9
10°	11	8	8	8
11°	6	6	11	11
12°	14	14	13	13
13°	13	15	14	15
14°	15	13	12	14
15°	12	12	15	12

Ao considerar os pesos iguais, a classificação gerada pelo método ELECTRE-TRI verificou que as soluções tecnológicas que apresentaram ordem de preferência foram a A2 (infiltração lenta), seguida pela A4 (infiltração rápida) e A1 (tratamento primário convencional). Por sua vez, o método TOPSIS indicou uma tendência semelhante, sendo o ordenamento A2, A4 e A10 (tratamento primário por tanques sépticos). Em contrapartida, a alternativa com o pior desempenho em ambos os casos foi a A12 (lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação).

Por sua vez, ao ponderar os pesos, as alternativas que demonstraram ser fortemente preferidas, segundo os métodos ELECTRE-TRI e TOPSIS foram A2, A1 e A4, apenas uma mudança entre a segunda e terceira posição. Por outro lado, existiu uma divergência entre as alternativas com os piores

resultados, o método ELECTRE-TRI apontou a A15 (reator UASB + escoamento superficial), enquanto o TOPSIS assinalou novamente A12 como a opção menos indicada.

No geral, apesar de considerar pesos diferentes em duas ordenações distintas, observou-se que na maior parte dos casos a posição das alternativas foram conservadas. Com relação as opções de tratamento propostos, existe uma preferência clara pelos sistemas de infiltração, considerando que são soluções baseadas em processos naturais, sem a necessidade de mecanização, além de terem operação relativamente simples, não geradora de efeitos residuais.

Ademais, apesar do tratamento preliminar convencional surgir como opção, essa alternativa foi descartada por não atender as condições e padrões de lançamento de efluentes, estabelecidos pela Deliberação Normativa COPAM/CERH-MG nº 1/2008, que define uma eficiência mínima de remoção de DBO em 60% e DQO em 55%. Segundo Von Sperling (2014) a alternativa em questão alcança um intervalo de redução de DBO entre 25% - 35% e DQO em 25% - 75%.

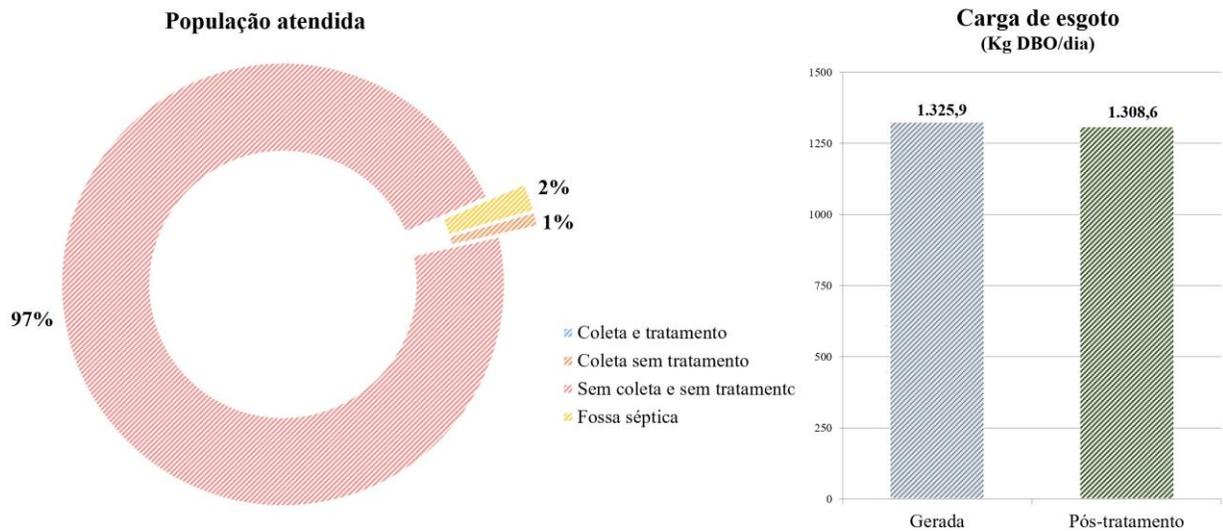
Não obstante, o modelo contraindicou a opção A12 composta pelo segmento de lagoas, provavelmente por produzir excesso de algas no efluente final, além da emanção de odores característicos dos sistemas anaeróbios. O reator UASB, também, foi desaconselhado pela ótica de custos, por se tratar de um sistema avançado que exige maior aporte de recursos financeiros, realidade distante da pequena comunidade.

3.5.4. Estudo de caso: Buritizeiro

O município de Buritizeiro está compreendido entre as coordenadas geográficas 17° 21' 03" S 44° 57' 43" W. O território estende-se por uma área total de 7.226 km², possuindo uma população estimada de 27.988 habitantes, sendo a densidade demográfica de 3,89 hab/km². Dentre os principais indicadores, destacam-se o IDH de 0,624 (médio) e o PIB R\$ 307.798,49 mil (IBGE, 2018). A participação do município na área da bacia hidrográfica do Rio Paracatu corresponde a 7,70% (PDBHRP, 2006).

Nesse âmbito, o cenário II foi considerado como cidade de pequeno porte, pelo motivo de ter vazão menor que 500 m³/dia e população de até 50 mil habitantes. O sistema de esgotamento sanitário é operado pelo SAAE, sendo que a vazão de esgoto bruto $Q_{eb} = 2.777,8$ m³/dia e carga de esgoto em 1.325,9 Kg DBO/dia. Desse modo, cerca de 97,8% dos esgotos não possuem coleta e tratamento e 2,2% está destinado a soluções individuais (Figura 16). O efluente é lançado no Córrego Lontras e Córrego das Pegras, que possuem capacidade de diluição considerada ruim/péssima (ANA, 2013).

Figura 16. Síntese do sistema de esgotamento sanitário de Buritizeiro

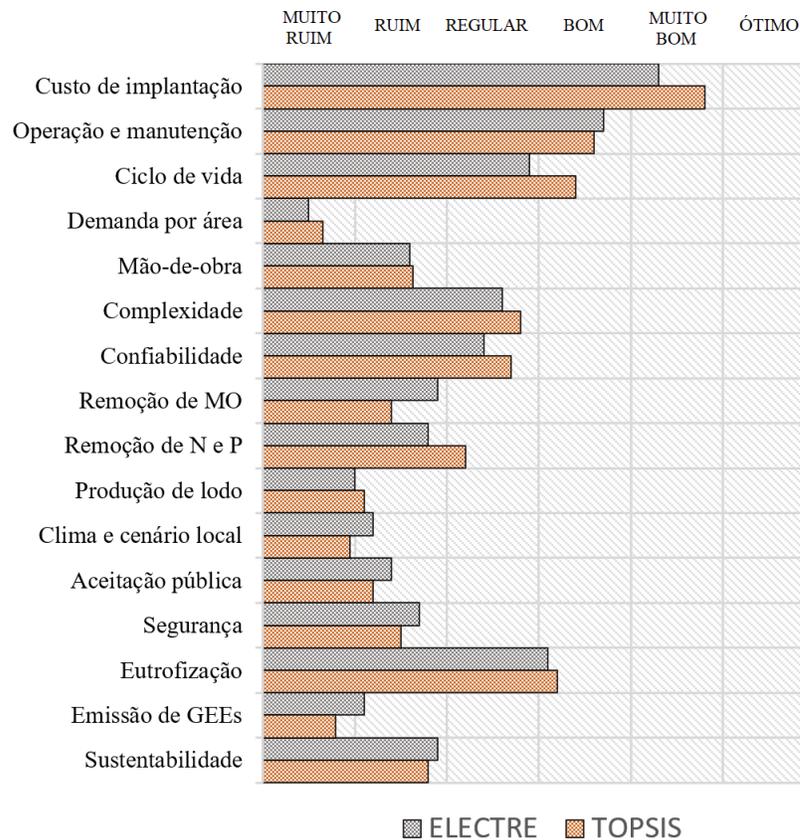


Os resultados obtidos com a utilização do modelo multicriterial sugerido ao Cenário II são apresentados na Figura 17, que expõe a performance segundo cada critério avaliado, sendo alcançados pela utilização dos métodos ELECTRE-TRI e TOPSIS.

Os resultados da análise do cenário II evidenciam novamente a predileção da dimensão econômica para definição de ETEs, sobretudo os critérios de custo de investimento e ciclo de vida expostos pelo TOPSIS. Nessa seara, outros critérios como a complexidade, remoção de matéria orgânica e eutrofização despontaram em segundo plano, provavelmente pelas condições atuais dos corpos receptores, devido à baixa capacidade de autodepuração dos Córrego Lontras e Córrego das Pegras.

Convém, também, destacar as notas atribuídas para produção de lodo e emissão de GEEs em ambas as técnicas analisadas, que são reduzidas possivelmente pela inexistência de uma ETE, que acaba posicionando critérios não essenciais em níveis inferiores, mesmo fazendo parte das dimensões técnica e ambiental. A Tabela 14 exhibe o desempenho das alternativas analisadas para o município de Buritizeiro, baseada nas etapas descritas no item 3.5.3.

Figura 17. Performance do cenário II segundo cada critério de avaliação



A hierarquia das alternativas baseada em pesos análogos, sugeriu através do ELECTRE-TRI que as soluções preferidas são A1 (tratamento primário convencional), A2 (infiltração lenta) e A10 (tratamento primário por tanques sépticos), enquanto o TOPSIS indicou A1, A10 e A2, respectivamente. Enquanto isso, duas opções foram desaconselhadas, sendo A14 (lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de alta taxa) pelo ELECTRE-TRI e A15 (reator UASB + escoamento superficial) pelo TOPSIS.

Nesse contexto, ao considerar pesos diferenciados, as alternativas com melhor desempenho foram A1 e A10 em ambos os sistemas, apenas divergindo na terceira posição, sendo o ELECTRE-TRI a opção A4 e TOPSIS a opção A2. Todavia, não houve alteração entre a pior alternativa, permanecendo a opção A15 (reator UASB + escoamento superficial), a mesma apontada quando os pesos foram desconsiderados.

Tabela 14. Classificação das alternativas de ETEs para o cenário II

Ordem	Pesos iguais		Pesos diferentes	
	ELECTRE III	TOPSIS	ELECTRE III	TOPSIS
1°	1	1	1	1
2°	2	10	10	10
3°	10	2	4	2
4°	4	4	2	4
5°	7	7	12	12
6°	8	12	9	5
7°	12	8	5	9
8°	6	6	11	11
9°	5	9	7	7
10°	9	5	6	6
11°	11	11	3	8
12°	3	13	8	3
13°	13	3	14	14
14°	15	14	13	13
15°	14	15	15	15

Atualmente, o SAAE de Buritizeiro não está em conformidade com os padrões de lançamento determinados pela DN nº1/2008 - COPAM/CERH-MG, que estabelece DBO de até 60 mg/L e DQO de até 180 mg/L. O modelo de priorização sugere que o projeto da ETE seja constituído, particularmente, pelo tratamento preliminar ou tanques sépticos por serem opções econômicas. Entretanto, essas opções foram desconsideradas por atenderem a remoção mínima de DBO e DQO definida pela legislação de recursos hídricos. Assim, as alternativas recomendadas são a infiltração lenta (A2) e a infiltração rápida (A4).

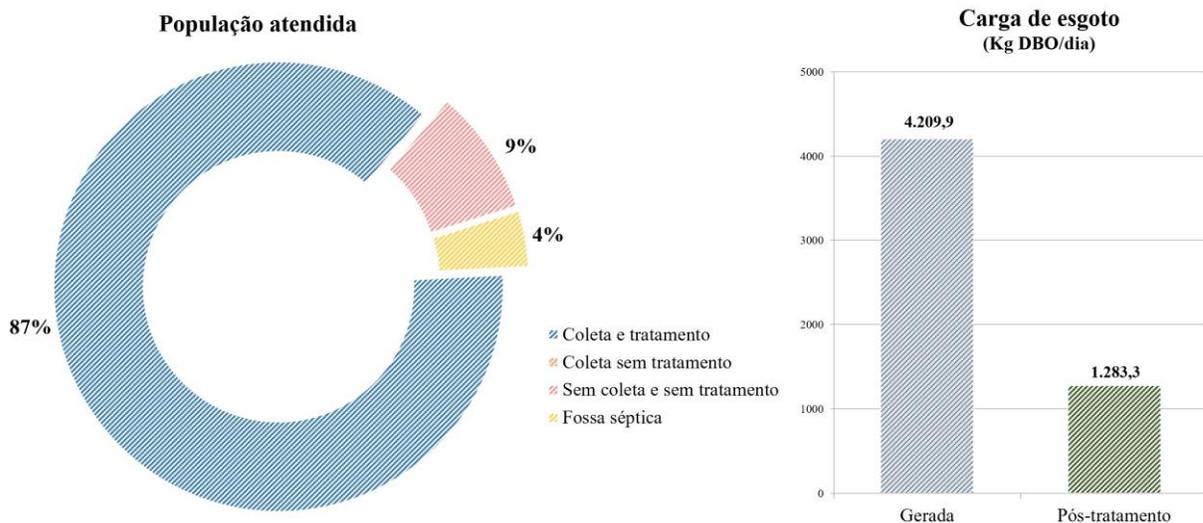
Entretanto, dentre as alternativas desaprovadas destaca-se o reator UASB + escoamento superficial, certamente pelo custo oneroso de implantação e operação, bem como o alto consumo de energia e o elevado nível de mecanização. O resultado coincide com o verificado por Von Sperling (2014), onde afirma que tecnologias mais robustas dependem de operação sofisticada, sendo escolhas impeditivas para pequenas cidades.

3.5.5. Estudo de caso: Paracatu

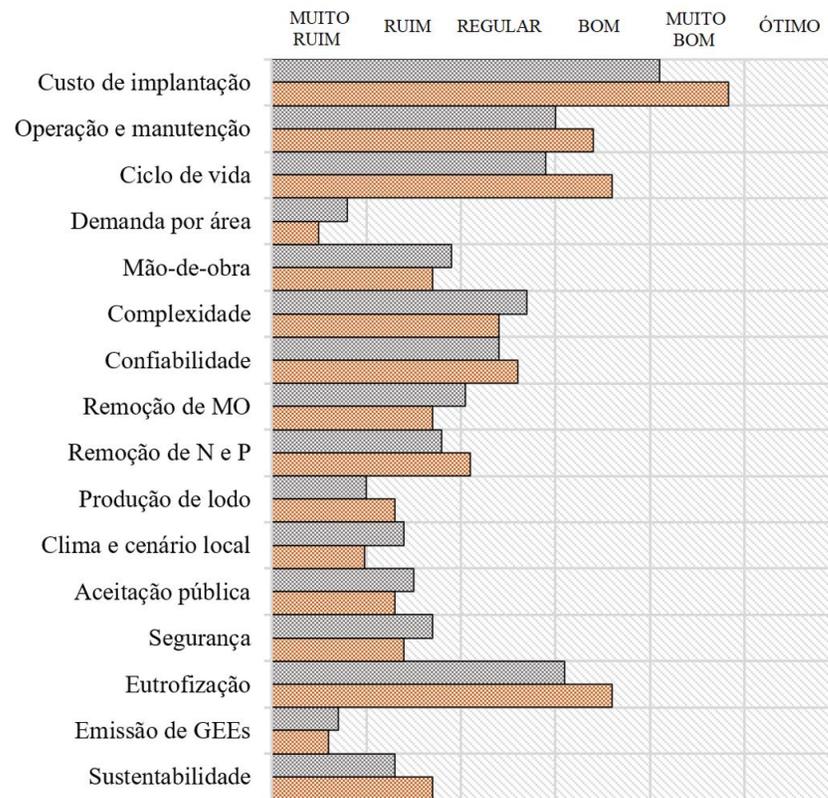
O município de Paracatu está compreendido entre as coordenadas geográficas 17° 13' 18" S 46° 52' 30" W. O território estende-se por uma área total de 8.230 km², possuindo uma população estimada de 92.430 habitantes, sendo a densidade demográfica de 11,32 hab/km². Dentre os principais indicadores, destacam-se o IDH de 0,760 (alto) e o PIB R\$ 3.218.934,265 mil (IBGE, 2018). A participação do município na área da bacia hidrográfica do Rio Paracatu corresponde a 15,30% (PDBHRP, 2006).

Nessa conjuntura, o cenário III foi considerado como centro urbano, devido a vazão ser superior que 500 m³/dia e população maior que 50 mil habitantes. O sistema de esgotamento sanitário é operado pela COPASA, sendo que a vazão de esgoto bruto $Q_{eb} = 7.257,6$ m³/dia e carga de esgoto em 4.209,9 Kg DBO/dia. Logo, cerca de 87,4% são direcionados para ETE Paracatu, que conta com um sistema australiano composto por lagoa anaeróbia seguida pela facultativa, 8,7% dos esgotos não possuem coleta e tratamento e 3,7% está designado a soluções individuais (Figura 18). O Córrego Rico e Córrego São Domingos recebem o efluente gerado, sendo que a capacidade de diluição de ambos é considerada ruim/péssima (ANA, 2013).

Figura 18. Síntese do sistema de esgotamento sanitário de Paracatu



Os resultados processados com a aplicação do modelo multicritério recomendado para o Cenário III são apresentados na Figura 19, que expressa a performance individual segundo os diferentes critérios, adquiridos pela utilização dos métodos ELECTRE-TRI e TOPSIS.

Figura 19. Performance do cenário III segundo cada critério de avaliação

A análise do cenário III, visivelmente, permitiu constatar que na maior parte dos casos, os critérios receberam maiores pontuações quando processados pelo TOPSIS, indicando uma inclinação mais conservadora do ELECTRE-TRI. O mesmo comportamento foi observado nos cenários anteriores, esse fato pode ser explicado pelo estudo ter adotado valores que atribuem desvios proporcionais à importância de cada item. Assim, os critérios mais relevantes foram o custo de investimento, ciclo de vida e a eutrofização.

Por outro lado, observou-se que alguns critérios com baixas pontuações em cenários anteriores, como a aceitação pública e segurança, se manifestaram significantes para esse estudo de caso. Assim sendo, o fato pode ser esclarecido pelo reconhecimento dos benefícios trazidos à sociedade com a construção de um sistema de tratamento, que atenda as demandas locais e promova a recuperação dos corpos receptores. A Tabela 15 exhibe o desempenho das alternativas analisadas para o município de Paracatu, baseada nas etapas descritas no item 3.5.3.

Tabela 15. Classificação das alternativas de ETEs par ao cenário III

Ordem	Pesos iguais		Pesos diferentes	
	ELECTRE III	TOPSIS	ELECTRE III	TOPSIS
1°	5	5	9	5
2°	9	9	5	9
3°	12	2	7	2
4°	2	12	12	12
5°	4	4	2	4
6°	7	7	4	7
7°	10	10	10	10
8°	1	8	1	1
9°	8	1	8	8
10°	6	6	15	15
11°	15	15	11	11
12°	11	3	6	3
13°	3	14	3	6
14°	14	11	13	13
15°	13	13	14	14

A classificação formada ao igualar os pesos por meio do ELECTRE-TRI constatou que as soluções favoritas foram A5 (lagoa anaeróbia + lagoa facultativa), A9 (reator UASB + filtro anaeróbio) e A12 (lagoa facultativa + lagoa anaeróbia + lagoa de maturação). Similarmente, o TOPSIS indicou a preferência pelo sistema de lagoas, sendo o ordenamento A5, A9 e A2 (infiltração lenta). Contudo, ambos os métodos apontaram A13 (lagoa facultativa + lagoa anaeróbia + remoção de algas) como a pior opção.

Em compensação, ao aplicar os pesos, segundo o ELECTRE-TRI as alternativas que precederam as demais foram A9, A5 e A7 (escoamento superficial). Já o método TOPSIS apresentou os mesmos resultados ao acatar pesos iguais, ou seja, A5, A9 e A2. No entanto, os dois métodos atestaram a solução A14 (lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de alta taxa) como a alternativa com o pior desempenho.

Constata-se, para o caso estudado, que os sistemas de lagoas são mais aceitos se comparados aos reatores, coincidentemente, a solução A5 representa o sistema australiano implantado no município. Apesar disso, o que tem se observado são falhas operacionais na ETE Paracatu, pelo não atendimento aos padrões de lançamento de efluentes, causado pelo sistema obsoleto que não acompanhou o crescimento populacional, bem como a redução da vazão de referência dos seus principais corpos receptores.

Nesse contexto, sugere-se optar pela segunda alternativa A9 (reator UASB + filtro anaeróbio), dado a eficiência na remoção de DBO ser 85% a 93%, enquanto o sistema de lagoas promove em média de 50% a 60% (VON SPERLING, 2014). Ademais, o reator UASB possui flexibilidade operacional, processo confiável e demanda áreas menores, característica essencial para adaptação aos centros urbanos. Outro caminho coerente, seria a própria modernização do sistema existente para alcançar no mínimo 90% de eficiência na remoção da carga orgânica.

3.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, os objetivos propostos pela pesquisa foram alcançados com êxito. O modelo multicritério comprovou ser um importante instrumento de auxílio à decisão durante a priorização de projetos de estações de tratamento de esgotos. A revisão sistemática fundamentou as etapas de desenvolvimento do modelo, sobretudo, a verificação das alternativas disponíveis, assim como os principais critérios de seleção mencionados na literatura.

Dentre as soluções propostas para o contexto da bacia hidrográfica do rio Paracatu, os resultados preferidos para comunidades e pequenos municípios são tecnologias baseadas no tratamento preliminar convencional (A1) e tanques sépticos (A10), bem como pela infiltração lenta (A2) e infiltração rápida (A4). Enquanto a lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação (A12) e o reator UASB + escoamento superficial foram opções desaconselhadas.

Nesse contexto, as alternativas com os melhores desempenhos para centros urbanos foram lagoa anaeróbia + lagoa facultativa (A5) e o reator UASB + filtro anaeróbio (A9). Em contrapartida, as configurações baseadas nos sistemas de lagoas A13 e A14 são opções pouco indicadas, provavelmente, pela maior demanda de área, recurso esse limitado nas cidades. Assim, sugere-se priorizar sistemas compactos com remoção de matéria orgânica e nutrientes.

No tocante aos métodos aplicados para hierarquização das alternativas, constatou-se que o TOPSIS possui maior facilidade de utilização e julgamento, possibilitando maior clareza na interpretação dos dados. Por outro lado, o ELECTRE-TRI representa melhor as variáveis de cada sistema, admitindo uma confiabilidade elevada dos resultados. Dessa forma, ambos os métodos se mostraram pertinentes e mutuamente complementares para promoção do modelo multicriterial.

Por fim, recomenda-se difundir a visão multicritério para priorização de sistemas de tratamento de esgotos, principalmente, nos municípios com restrições técnico-financeiras para atender o maior número de critérios viáveis, sem obrigatoriamente elevar os custos do projeto. Sugere-se, ainda, a continuidade dos estudos para o desenvolvimento de softwares específicos baseados na internet para definição de projetos de ETEs, que promovam a redução dos custos, atendimento aos padrões de lançamento e o desenvolvimento sustentável.



APÊNDICE A FORMULÁRIO DE PESQUISA

1. INTRODUÇÃO

O preenchimento do presente formulário contribuirá para realização da pesquisa intitulada “ANÁLISE MULTICRITERIAL PARA PRIORIZAÇÃO DE PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS”, em desenvolvimento no Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA) da Universidade de Brasília (UnB) pelo discente Felipe do Nascimento Martins.

A pesquisa tem por objetivo desenvolver um modelo multicritério de apoio à decisão para priorização de estações de tratamento de esgoto (ETEs), por meio da análise das dimensões econômica, técnica, social e ambiental. Nesse contexto, o diagnóstico propõe a validação do modelo no estudo de caso da Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu (MG).

Na revisão sistemática da literatura, as alternativas tecnológicas e os critérios de decisão foram selecionados para avaliação dos sistemas de tratamento de efluentes, sendo preponderante a etapa seguinte de consulta aos especialistas, sobretudo, pesquisadores, projetistas, representantes de órgãos reguladores e ambientais para definição dos respectivos graus de importância.

A definição do peso de cada critério é fundamental para sustentar a tomada de decisão, considerando que a classificação das alternativas se baseia em tais dados, especialmente, devido os fatores envolvidos na seleção de ETEs integrarem uma problemática de múltiplos aspectos. Os principais critérios identificados na literatura estão listados na Tabela 1.

2. QUESTIONÁRIO DE PESQUISA

I. Avaliar a importância de cada critério

Solicita-se que para cada critério descrito na Tabela I, seja atribuída uma nota que corresponda ao grau de importância durante a avaliação de desempenho de ETEs. Use nesse parecer a escala de valores descritas a seguir:

DESCRIÇÃO	VALOR
Dispensável	0
Pouco importante	1
Importante	2
Muito importante	3
Indispensável	4

Tabela 1. Critérios de avaliação de desempenho de ETEs

ASPECTOS ECONÔMICOS	NOTAS
Custos de implantação	
Custos de operação e manutenção	
Ciclo de vida	
Demanda por área	
Mão de obra	
ASPECTOS TÉCNICOS	
Complexidade	
Confiabilidade	
Durabilidade	
Flexibilidade	
Eficiência na remoção de matéria orgânica	
Eficiência na remoção de fósforo	
Eficiência na remoção de nitrogênio	
Eficiência na remoção de sólidos suspensos	
Resistência ao choque de cargas	
Produção de lodo	
Adaptação ao clima e cenário local	
ASPECTOS SOCIAIS	
Aceitação pública	
Segurança	
Impacto visual	
Odores	
ASPECTOS AMBIENTAIS	
Reaproveitamento de lodo	
Eutrofização	
Emissão de GEEs	
Sustentabilidade	
Impactos ambientais	

- II. Seria necessário a inclusão de algum critério para melhor avaliação dos sistemas de tratamento de esgotos? Caso sejam apresentados novos critérios, quais notas devem ser atribuídas? Se possível, justifique a inclusão dos mesmos
- III. Existe algum comentário, recomendação ou informação adicional?

APÊNDICE B
Tabela 8. Matriz de resultados

Critérios		Alternativas															
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	Pesos
Econômico	C1	33.403	38.224	41.503	46.215	50.200	50.241	55.391	60.054	60.534	63.611	68.164	69.265	70.410	72.566	72.780	0,083
	C2	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,076
	C3	75	70	46	70	65	65	68	68	46	75	42	63	63	63	42	0,068
	C4	-0,8	-0,6	-0,7	-0,6	-0,3	-0,3	-0,9	-0,8	-0,7	-0,8	-0,7	-0,2	-0,2	-0,2	-0,7	0,050
	C5	-0,4	-0,3	-0,9	-0,3	-0,7	-0,7	-0,3	-0,3	-0,9	-0,4	-0,9	0,7	-0,7	-0,7	-0,9	0,049
Técnico / Operacional	C6	33	35	72	35	58	58	37	37	72	33	76	54	54	54	76	0,064
	C7	41	2,4	65	2,4	59	59	44	44	65	41	67	57	57	57	67	0,072
	C8	55	59	64	59	73	73	61	61	64	55	64	71	71	71	64	0,053
	C9	0,3	0,4	0,7	0,4	0,6	0,6	0,35	0,35	0,7	0,3	0,8	0,65	0,65	0,65	0,8	0,056
	C10	0,7	0,6	0,3	0,6	0,5	0,5	0,8	0,8	0,3	0,7	0,3	0,5	0,5	0,5	0,3	0,051
	C11	-0,7	-0,7	-0,9	-0,7	-0,4	-0,4	-0,5	-0,5	-0,9	-0,7	-0,8	-0,4	-0,4	-0,4	-0,8	0,045
Social	C12	1,72	1,65	0,47	1,65	1,74	1,77	1,12	1,09	0,41	1,72	0,38	1,70	1,68	1,68	0,40	0,071
	C13	40	45	50	45	55	55	40	40	50	40	50	55	55	55	50	0,057
Ambiental	C14	2,25	0,10	0,85	0,10	0,65	0,65	0,50	0,50	0,60	2,25	0,55	0,55	0,40	0,55	0,50	0,074
	C15	0,6	0,6	0,3	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	0,3	0,6	0,3	0,5	0,5	0,5	0,3	0,064
	C16	40	70	50	70	60	60	40	40	50	40	50	60	60	60	50	0,068

4. REFERÊNCIAS

- BARBOSA, J. C. **Formatos Insubordinados de Dissertações e Teses na Educação Matemática**. In: Beatriz Silva D'Ambrosio; Celi Espasandin Lopes (org.). *Vertentes a subversão na produção Científica em Educação Matemática*. 1 ed. **Campinas: Mercado de Letras**, 2015, v. 1, p. 347 -367.
- BARCELLOS, C; MAGALHÃES, M; **Desenvolvimento de Indicadores para um sistema de gerenciamento de informações sobre saneamento, água e agravos à saúde relacionados**. 2018. Departamento de informações de saúde (DIS), Fiocruz, Brasil.
- BRINGER, L. M; REIS, J. A; MENDONCA, A. S. **Seleção de sistemas de tratamento de águas residuais dentro de bacias hidrográficas usando análise multiobjetiva**. RBRH, Porto Alegre, v. 23, e22, 2018.
- BUTCHART, D; KRALISCH, S; FLEISCHER, M; MEINHARDT, M; BRENNING, A. **Multicriteria decision analysis framework for hydrological decision support using environmental flow components**. *Ecological Indicators*, October 2018, Vol.93, pp.470-480.
- CASTILLO, A; PORRO, J; GARRIDO, M; BASERBA, D; ROSSO, D; RENZI, D; FATONE, F; GÓMEZ, V; COMAS, J; POCH, M. **Validation of a decision support tool for wastewater treatment selection**. *J. Environ. Management*. 184 (2016), pp. 409-418.
- CONFORTO, E. C; AMARAL, D. C; SILVA, S. L. **Roteiro para Revisão Bibliográfica Sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos**. In: 8o CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO, 2011, Anais...Porto Alegre: Instituto de Gestão de Desenvolvimento de Produto, 2011.
- CRESWELL, J. W. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto**. Porto Alegre: Artmed, 2010.
- CRONIN, P; RYAN, F; COUGHLAN, M. **Undertaking a literature review: a step-by-step approach**. *British Journal of Nursing*, v. 17(1), p. 38–43, 2008.
- DJUKIC, M.; JOVANOSKI, J.; MUNITLAK, O.; LAZIC, M.; BODROZA, D. **Cost-benefit analysis of an infrastructure project and a cost-reflective tariff: A case study for investment in wastewater treatment plant in Serbia**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 59, p. 1419–1425. 2016.
- FANTIN, L. L. D; REIS, J. A. T; MENDONCA, A. S. F. **Proposta de metodologia para pré-seleção de sistemas de tratamento de esgoto em bacias hidrográficas**. RBRH, Porto Alegre, v. 22, e12, 2017.

FRANK, A. G; YUKIHARA, E. **Formatos alternativos de teses e dissertações (Blog Ciência Prática). 2013; Tema: Ciência prática.** Disponível em: < <http://cienciapratica.wordpress.com/>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** São Paulo: Atlas, 2017.

GOFFI, A. S. **Uso da análise multicritério para seleção de tecnologias de tratamento de efluentes.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas). Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Pato Branco, 2017.

GOFFI, A; FLAVIO, T; DE LIMA, J; LIZOT, M; THESARI, S. **Economic feasibility for selecting wastewater treatment systems.** Water Science Technol (2018) 78 (12): 2518–2531. Disponível em: <<https://doi.org/10.2166/wst.2019.012>>. Acesso em: 09 jun. 2020.

GOMES, L. F. A. M; GOMES, C. F. S. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério.** 4 ed. Editora Atlas. São Paulo. 2012.

GOMES, M; ARAYA, G; CARIGNANO, C. **Tomada de decisão em cenários complexos.** São Paulo, SP. Thomson, pp. 168, 2004

HUNT, C. C. **Modelo Multicritério de Apoio à Decisão Aplicado à Seleção de Sistema de Tratamento de Esgoto para Pequenos Municípios.** Rio de Janeiro, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

HWANG, C. L; YOON, K. **Multiple attribute decision making: methods and applications.** Berlin: Springer-Verlag, 1981. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>>. Acesso em: 06 jun. 2020.

GUARNIERI, P. **Síntese dos principais critérios, métodos e subproblemas da seleção de fornecedores multicritério.** Revista Administração Contemporânea, v. 19, n. 1, p. 1-25, Curitiba, 2015.

KALBAR, P.P; KARMAKAR, S; ASOLEKAR, S. R. **Life cycle-based decision support tool for selection of wastewater treatment alternatives.** 2016. J. Clean. Product., 117, pp. 64-7.

KIM, R. A. **Study on Competitiveness Analysis of Ports in Korea and China by Entropy Weight TOPSIS.** The Asian Journal of Shipping and Logistics, v.32, n.4, p.187-194, dez. 2016.

LAI, J; LIU, Y; HWANG, L. **TOPSIS for MCDM.** European Journal of Operational Research. 76(3). 486-500, 1994.

LIMA, J. D; TRENTIN, M. G; OLIVEIRA, G. A; BATISTUS, D. R; SETTI, D. **Systematic Analysis of Economic Viability with Stochastic Approach: A Proposal for Investment.** Springer International Publishing, 2017, v. 10, p. 317-325.

LIMA JUNIOR, F.R; CARPINETTI, C.R. **Uma comparação entre os métodos TOPSIS e Fuzzy-TOPSIS no apoio à tomada de decisão para seleção de fornecedores.** *Gestão & Produção*, v.22, n.1, p.17-34, 2015.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica.** São Paulo: Atlas, 2017.

MARKOV, Z; JOVANOSKI, I; DIMITROVSKI, D. **Multi-criteria analysis approach for selection of the most appropriate technology for municipal wastewater treatment.** 2017. *Journal of Environmental Protection and Ecology*. 18. 289-303.

MAURER, M; BUFARDI, A; TILLEY, E; ZURBRÜGG, C; TRUFFER, B. **A compatibility based procedure designed to generate potential sanitation system alternatives.** *J. Environ. Manage.* 104. p. 51–61. 2012.

MAYESTRE, Y; PICTET, J; SIMOS, J. **Méthodes multicritères Electre: description, conseils pratiques et cas d’application à la gestion environnementale.** Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne, Suíça. pp. 323, 1994.

MENDONÇA, E. C. **Metodologia para avaliação de desempenho de sistemas de drenagem urbana.** Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, DF, pp. 171, 2009.

MERLIN, F. K; SOUZA, J. L; ENSSLIN, L; PEREIRA, V. L. D. V.; ENSSLIN, S. R. **Sistemática genérica no suporte à pesquisa bibliométrica ilustrada à avaliação de desempenho orientada às questões referentes ao desenvolvimento sustentável.** *Revista Produção Online*, v.13, n. 4, p. 1198-1226, 2013.

MOHER D; LIBERATI A; TETZLAFF, F; ALTMAN D. G. **Principais itens para relatar Revisões sistemáticas e Meta-análises: A recomendação PRISMA*.** Traduzido por Taís Freire Galvão e Thais de Souza Andrade Pansani; retro-traduzido por: David Harrad. *Epidemiol. Serv. Saúde*, Brasília, 24(2): abr-jun 2015.

MOLINOS, M; GOMEZ, T; BASERBA, M; CABALLERO, R; GARRIDO, R. **Assessing the sustainability of small wastewater treatment systems: a composite indicator approach.** *Sci. Total Environ.*, 497–498 (2014), pp. 607-617.

MORERA, S; COMAS, J; POCH, M; COROMINAS, L. **Connection of neighboring wastewater treatment plants: economic and environmental assessment.** *Journal of Cleaner Production*, 01 March 2015, Vol.90, pp.34-42.

NETTO, O. A; ZAIAT, M. **Treatment of domestic sewage in an anaerobic-aerobic fixed-bed reactor with recirculation of the liquid phase.** *Clean -Soil, Air, Water*. p. 25. 2012.

OLINDE, K; WILLICH, S. **How objective are systematic reviews? Differences between reviews on complementary medicine.** *J R Soc Med.*, v. 96, pp. 17–22, 2003.

- PNUD - PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: <https://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/sustainable-development-goals.html>. Acesso em: 02 jun. 2020.
- ROY, B. **Multicriteria Methodology for Decision Aiding**, 1996. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1996.
- SALISBURY, F; BROUCKAERT, C; STILL, D; BUCKLEY, C. **Multiple criteria decision analysis for sanitation selection in South African municipalities**. Water SA, 2018, Vol.44(3), p.448
- SOUSA, N. T. M. **Programa computacional para avaliação de ETEs como ferramenta de gestão de recursos hídricos**. 2019. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. Área de conhecimento: Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, 2019.
- TAN, R. R; AVISO, K. B; HUELGAS, A. P; PROMENTILLA, M. A. B. **Fuzzy AHP approach to selection problems in process engineering involving quantitative and qualitative aspects**. 2014. Process Safety and Environmental Protection. v. 92. p. 467–475.
- TEIXEIRA, J; GOMES, M; SOUZA, J. **Associação entre cobertura por serviços de saneamento e indicadores epidemiológicos nos países da América Latina: estudo com dados secundários**. 2012. UFJF. Revista Panamericana de Salud Pública. v.16. p. 235-247.
- TSCHEIKNER-GRATL, F; EGGER, P; RAUCH, W; KLEIDORFER, M. **Comparison of Multi-Criteria Decision Support Methods for Integrated Rehabilitation Prioritization**. Water, 2017, Vol.9(2), p.68.
- VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. São Paulo: Atlas, 2016.
- VIDAL, BRENDA, V; HEDSTRM, A; BARRAUD, S; KRRMAN, E; HERRMANN, I. **Assessing the sustainability of on-site sanitation systems using multi-criteria analysis**. 2019. Environmental Science: Water Research & Technology, 2019, Vol.5(9), pp.1599-1615.
- VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade da Água e ao Tratamento de Esgoto, Princípio do Tratamento Biológico de Águas Residuárias**. 4ª ed: Belo Horizonte, 2014.
- YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2001
- YU, W; ROY, B. ELECTRE TRI. Aspects Méthodologiques et Manuel d'Utilisation Document n. 74, version 1.0, Université de Paris Dauphine, Paris, pp. 80, 1992.
- ZHENG, J; EGGER, C; LIENERT, J. **A scenario-based MCDA framework for wastewater infrastructure planning under uncertainty**. Journal of Environmental Management, 01 December 2016, Vol.183, pp.895-908.