

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**ANDREIA DOS SANTOS GOFFI**

**MODELO PARA DEFINIÇÃO DO USO DE SISTEMAS ADEQUADOS PARA  
TRATAMENTO DE ESGOTO URBANO EM PEQUENAS E MÉDIAS  
LOCALIDADES**

**TESE**

**PONTA GROSSA**

**2022**

**ANDREIA DOS SANTOS GOFFI**

**MODELO PARA DEFINIÇÃO DO USO DE SISTEMAS ADEQUADOS PARA  
TRATAMENTO DE ESGOTO URBANO EM PEQUENAS E MÉDIAS  
LOCALIDADES**

**Model for selecting the most adequate systems for urban wastewater treatment in small  
and medium-sized locations**

Trabalho de conclusão de curso de tese apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção do Programa de Pós-Graduação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Flavio Trojan

**PONTA GROSSA**

**2022**



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Ponta Grossa**



ANDREIA DOS SANTOS GOFFI

**MODELO PARA DEFINIÇÃO DO USO DE SISTEMAS ADEQUADOS PARA TRATAMENTO DE ESGOTO  
URBANO EM PEQUENAS E MÉDIAS LOCALIDADES**

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutora Em Engenharia De Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Gestão Industrial.

Data de aprovação: 18 de Março de 2022

Prof Flavio Trojan, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Fernando Celso De Campos, Doutorado - Universidade Metodista de Piracicaba (Unimep)

Prof Gilson Adamczuk Oliveira, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Hugo Valadares Siqueira, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Rodrigo Jose Pires Ferreira, Doutorado - Universidade Federal de Pernambuco (Ufpe)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 18/03/2022.

Dedico aos meus pais, Adelar Goffi e Maria Lucia dos Santos Goffi, que com seus exemplos de amor e coragem sempre me incentivaram a caminhar.

## AGRADECIMENTOS

A Deus pelo seu amor incondicional.

A Alcione de Abreu pelo companherismo, ensinamentos, carinho e amor.

A Andressa dos Santos Goffi e Etelvina Paz dos Santos por todo o amor, apoio e confiança em mim depositada durante todos os momentos da minha vida.

A Isabela de Abreu que brilha os olhos ao falar ‘a Andreia faz doutorado’ essa simples frase me fez querer continuar por inumeras vezes.

Aos meus amigos e familiares, que presentes ou não, sempre contribuíram com palavras de apoio e orações.

A professora Karina Querne de Carvalho Passig, primeira doutora que conheci e me fez querer chegar até aqui. Jamais vou esquecer o empenho, carinho, confiança, incentivo e amizade – sem os quais nada disso seria possível.

Ao meu orientador Professor Flavio Trojan pela atenção, paciência, disponibilidade e orientação nesta jornada.

A todos os professores do curso de pós-graduação em Engenharia de Produção pelos ensinamentos.

A todos membros da banca, pelas muitas contribuições na pesquisa.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná – câmpus Ponta Grossa, por toda sua infraestrutura cedida, o que me permitiu não só obter o título, mas a aprender muito.

As minhas doguinhas, que foram o remédio essencial durante todo esse percurso, a alegria delas me contagiou nos momentos de tristeza.

Aos meus filhos, todo esse percurso é para deixa-los orgulhosos.

A todos que de alguma maneira contribuíram para a concretização deste sonho. Muito Obrigada!

## RESUMO

A correta definição de sistemas de tratamento de efluentes urbanos é uma tarefa complexa devido a um variado número sistemas de tratamento disponíveis, além da diversidade de características apresentadas em cada cenário específico. Para garantir a escolha ideal para cada caso torna-se necessária uma análise aprofundada das particularidades intrínsecas a essa temática. Este trabalho fornece um modelo de seleção de sistemas de tratamento conforme as necessidades locais e elenca os indicadores considerados relevantes para apoiar o tomador de decisão na identificação de critérios para a escolha da alternativa de maior compromisso com os objetivos de projeto. No modelo são consideradas quatro dimensões de avaliação, econômica, técnica, ambiental e social, as quais são avaliadas através de uma abordagem integrada que emprega ELECTRE, COPELAND, AHP, SIMOS e PROMETHEE juntos para selecionar a melhor alternativa. O ELECTRE é empregado para divisão das alternativas em classes de tratamento, o COPELAND é usado para analisar a estrutura do problema de seleção dos critérios de seleção, o AHP e o método de SIMOS para determinar os pesos dos critérios, e o método PROMETHEE é usado para obter a classificação final e fazer uma análise de sensibilidade alterando os pesos. A metodologia foi testada para três cenários diferentes. Vinte e sete tecnologias de tratamento foram avaliadas, e previamente mensuradas. Nas três aplicações, o processo de tratamento wetland foi observado nos ranques entre as primeiras alternativas, em função da sua confiabilidade, durabilidade, flexibilidade e robustez. Os resultados mostraram que os métodos integrados podem ser utilizados com sucesso na solução de problemas de saneamento. Este trabalho auxiliará nas decisões para analisar, projetar e avaliar as alternativas para tratamento de efluentes, tanto para soluções individuais ou conjuntas.

Palavras-chave: tomada de decisão; multicritério; tratamento de efluentes; COPELAND; AHP; SIMOS; PROMETHEE.

## ABSTRACT

The correct definition of urban wastewater treatment systems to meet different scenarios is a complex task due to the varied number of treatment systems available in addition to the diversity of characteristics presented in each specific scenario. In order to guarantee the best alternative selection for each case, an in-depth analysis of the intrinsic particularities of this theme is necessary. This work provides a model for selecting treatment systems according to local needs and lists the indicators considered relevant to support the decision maker in identifying criteria for choosing the alternative with the greatest commitment to the project objectives. The model considers four evaluation dimensions, economic, technical, environmental and social, which are evaluated through an integrated approach that employs ELECTRE, COPELAND, AHP, SIMOS and PROMETHEE together to select the best alternative. COPELAND is used to analyze the structure of the selection criteria selection problem, the AHP and the SIMOS method to determine the criteria weights, and the PROMETHEE method is used to obtain the final classification and do a sensitivity analysis by changing the criteria weights. The methodology was tested for three different scenarios. Twenty-seven treatment technologies were evaluated, and previously measured. In the three applications, the wetland treatment process was observed in the ranks among the first alternatives, due to its reliability, durability, flexibility and robustness. The results showed that the integrated methods can be successfully used to solve sanitation problems. This work will assist in the decisions to analyze, design and evaluate the alternatives for effluent treatment, both for individual or joint solutions.

Keywords: decision making; multicriteria; wastewater treatment; COPELAND; AHP; SIMOS; PROMETHEE.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 – Diagrama de organização da tese .....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 2 – Total de municípios com ETEs em operação por grandes regiões .....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 3 – Níveis de tratamento e mecanismos de ação .....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 4 – Particularidades do local para caracterização dos cenários de decisão.....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 5 – Caracterização e classificações da pesquisa .....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 6 – Palavras-chaves para busca de artigos relacionados ao tema.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 7 – Modelo proposto para seleção de sistemas de tratamento urbanos .....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 8 – Índices para caracterização das particularidades de cada local .....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 9 – Critérios encontrados na literatura de seleção de sistemas de tratamento ....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 10 – Classificação dos critérios encontrados na literatura .....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 11 – Classificação dos critérios .....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 12 – Construção dos cenários avaliados por particularidade observada.....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 13 – Critérios priorizados por particularidade do contexto .....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 14 – Alternativas de tratamento avaliadas no modelo de seleção.....</b>	<b>90</b>
<b>Figura 15 - Fluxos de preferência para o cenário A .....</b>	<b>104</b>
<b>Figura 16 - Fluxos de preferência para o cenário B .....</b>	<b>106</b>
<b>Figura 17 - Fluxos de preferência para o cenário C .....</b>	<b>108</b>
<b>Figura 18 – Classificação completa por cenário de avaliação .....</b>	<b>110</b>



## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1 - Agregação de pesos: AHP x SIMOS .....</b>	<b>100</b>
<b>Gráfico 2 - Distribuição do peso por dimensão de avaliação: AHP x SIMOS .....</b>	<b>102</b>
<b>Gráfico 3 – Distribuição das alternativas pelo arranjo GAIA Cenário A .....</b>	<b>113</b>
<b>Gráfico 4 – Distribuição das alternativas pelo arranjo GAIA Cenário B .....</b>	<b>114</b>
<b>Gráfico 5 – Distribuição das alternativas pelo arranjo GAIA Cenário C .....</b>	<b>115</b>

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1- Descrição dos métodos multicritério .....</b>	<b>56</b>
<b>Quadro 2 - Indicadores para mensuração de critérios qualitativos .....</b>	<b>73</b>
<b>Quadro 3 – Parametros para mensuração dos critérios quantitativos de avaliação .....</b>	<b>78</b>
<b>Quadro 4 - Matriz de seleção e avaliação de critérios: Decisor 1.....</b>	<b>83</b>
<b>Quadro 5 - Matriz de seleção e avaliação de critérios: D 1 + D 2 .....</b>	<b>88</b>
<b>Quadro 6 - Matriz de seleção e avaliação de critérios: D 1 + D 2 + D 3 .....</b>	<b>89</b>
<b>Quadro 7 – Caracterização dos Cenários em que o modelo foi previamente aplicado....</b>	<b>91</b>
<b>Quadro 8 – Votação de critérios pelos decisores em função das particularidades.....</b>	<b>92</b>
<b>Quadro 9 – COPELAND para os critérios selecionados em cada cenário avaliado .....</b>	<b>93</b>
<b>Quadro 10 - Matriz de decisão de pesos AHP: Cenário A.....</b>	<b>94</b>
<b>Quadro 11 - Matriz de decisão de pesos AHP: Cenário B.....</b>	<b>95</b>
<b>Quadro 12 - Matriz de decisão de pesos AHP: Cenário C.....</b>	<b>96</b>
<b>Quadro 13 - Simos para decisão de pesos: Cenário A.....</b>	<b>97</b>
<b>Quadro 14 - Simos para decisão de pesos: Cenário B.....</b>	<b>98</b>
<b>Quadro 15 - Simos para decisão de pesos: Cenário C.....</b>	<b>99</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 - Pesos para definição das classes de alternativas .....</b>	<b>57</b>
<b>Tabela 2 - Parâmetros para os limites entre as classes .....</b>	<b>57</b>
<b>Tabela 3 - Critérios para seleção .....</b>	<b>63</b>

## LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Alternativas
ADM	Apoio Multicritério à Decisão
AHP	<i>AnalyticHierarchyProcess</i>
CO <sub>2</sub>	Gás Carbônico
CT	Coliformes totais
CF	Coliformes fecais
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DP	Desvio-padrão
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DTR	Distribuição de Tempo de Residência
ELECTRE	<i>Elimination and Choice Expressing Reality</i>
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
EC	Escherichia coli
FB	Filtro Biológico
H <sub>2</sub>	Hidrogênio
GRA	<i>Grey relational analysis</i>
ND	Informação não Disponível
NT	Nitrogênio Total
N-NTK	Nitrogênio total Kjeldahl
N-Amon	Nitrogênio amoniacal
N-Org	Nitrogênio orgânico
N-NO <sub>2</sub>	Nitrito
N-NO <sub>3</sub>	Nitrato
Máx	Valor máximo
Mín	Valor mínimo
NaOH	Hidróxido de Sódio
Promethee II	<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations II</i>
P- Fósforo;	Fósforo
P-Org	Fósforo Orgânico
P-Inor	Fósforo Inorgânico
pH	Potencial Hidrogênionico
Q	Vazão média afluyente
RAC	Reator Anaeróbio Compartimentado
RAHLF	Reator Anaeróbio Horizontal de Leito Fixo
RBS	Reactor por batelada sequencial
ST	Sólidos Totais
STE	Sistema de tratamento de esgoto
STF	Sólidos Totais Fixos
STV	Sólidos Totais Voláteis
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSF	Sólidos Suspensos Fixos

SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
SNSIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SMC	Simulação de Monte Carlo
t	Tempo
T	Temperatura
TOPSIS	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
TDH	Tempo de Detenção Hidráulico
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
VPL	Valor Presente Líquido
VPLA	Valor Presente Líquido Anualizado
x	Média

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>16</b>
1.1.1	Objetivo Geral .....	16
1.1.2	Objetivos específicos.....	16
<b>1.2</b>	<b>Justificativa .....</b>	<b>17</b>
1.2.1	Originalidade, Inovação e Relevância do Estudo Proposto .....	19
<b>1.3</b>	<b>Contribuição da tese para a engenharia de produção .....</b>	<b>20</b>
<b>1.4</b>	<b>Delimitação do tema .....</b>	<b>21</b>
<b>1.5</b>	<b>Organização da tese.....</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b>	<b>Saneamento básico .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2</b>	<b>Tratamento de esgoto sanitário doméstico.....</b>	<b>27</b>
<b>2.3</b>	<b>Alternativas de tratamento.....</b>	<b>29</b>
<b>2.4</b>	<b>Métodos multicritérios .....</b>	<b>31</b>
2.4.1	Método COPELAND .....	32
2.4.2	Método ELECTRE TRI.....	33
2.4.3	Método AHP.....	33
2.4.4	Método SIMOS .....	34
2.4.5	Método PROMETHEE & GAIA .....	35
<b>2.5</b>	<b>Análise de particularidades do local.....</b>	<b>36</b>
2.5.1	Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) .....	37
2.5.2	Densidade demográfica .....	38
2.5.3	Capacidade de geração .....	39
2.5.4	Número de habitantes .....	39
2.5.5	Relevo.....	40
2.5.6	Aspectos Climáticos .....	41
2.5.7	Destinação Final .....	42
2.5.8	Modelos de gestão .....	43
2.5.9	Caracterização do afluente .....	44
<b>2.6</b>	<b>Eixos de avaliação.....</b>	<b>45</b>
2.6.1	Dimensão econômica .....	46
2.6.2	Dimensão Ambiental .....	47
2.6.3	Dimensão tecnológica .....	48
2.6.4	Dimensão social .....	49
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>50</b>

<b>3.1</b>	<b>Classificação da pesquisa .....</b>	<b>50</b>
<b>3.2</b>	<b>Fases da pesquisa .....</b>	<b>51</b>
<b>3.3</b>	<b>Definição da base teórica .....</b>	<b>53</b>
<b>3.4</b>	<b>Multicritério .....</b>	<b>55</b>
<b>4</b>	<b>MODELO DE SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO .....</b>	<b>59</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização do cenário .....</b>	<b>59</b>
<b>4.2</b>	<b>Critérios de seleção .....</b>	<b>60</b>
<b>4.3</b>	<b>Definição e mensuração dos critérios .....</b>	<b>64</b>
4.3.1	Critérios qualitativos .....	65
4.3.2	Critérios quantitativos .....	77
<b>4.4</b>	<b>Triagem dos critérios para a seleção em cada cenário de avaliação .....</b>	<b>80</b>
<b>4.5</b>	<b>Definição das alternativas .....</b>	<b>90</b>
<b>5</b>	<b>APLICAÇÃO DO MODELO DE SELEÇÃO .....</b>	<b>91</b>
<b>5.1</b>	<b>Cenário .....</b>	<b>91</b>
<b>5.2</b>	<b>Critérios .....</b>	<b>91</b>
<b>5.3</b>	<b>Definição dos parâmetros de ponderação .....</b>	<b>94</b>
<b>5.4</b>	<b>Seleção da melhor alternativa .....</b>	<b>103</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES FINAIS .....</b>	<b>118</b>
<b>6.1</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>118</b>
<b>6.2</b>	<b>Sugestões para futuros estudos .....</b>	<b>120</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>122</b>
	<b>APÊNDICE A - ALTERNATIVAS DE TRATAMENTO .....</b>	<b>130</b>
	<b>APÊNDICE B - INFERÊNCIAS DO PORTIFÓLIO BIBLIOGRÁFICO .....</b>	<b>138</b>
	<b>APÊNDICE C - MÉTRICAS DE DESEMPENHO .....</b>	<b>153</b>
	<b>APÊNDICE D - APLICAÇÃO PROMETHEE .....</b>	<b>157</b>
	<b>APÊNDICE E - TERMINOLOGIAS .....</b>	<b>161</b>

## 1 INTRODUÇÃO

À medida que a infraestrutura urbana cresce nos municípios, eleva-se também a geração de resíduos que se não forem corretamente tratados, podem afetar diretamente na saúde dos habitantes e na qualidade de vida relacionada aos aspectos ambiental, econômico e social (KHATTIYAVONG; LEE, 2019).

O impacto do lançamento inadequado de esgoto no corpo hídrico é uma questão crítica para a maioria dos países, sendo fundamental o estabelecimento de legislação adequada para a proteção da qualidade dos recursos hídricos. Segundo Von Sperling e Chernicharo (2002) um exemplo disto é a constante redução das concentrações limites dos padrões aceitáveis após o tratamento de efluentes. Neste sentido, a busca por tecnologias de tratamento cada vez mais eficientes se faz necessária.

Vários sistemas têm sido desenvolvidos a fim de se obter melhores resultados quanto à eficiência no tratamento de esgotos. Este crescente número de alternativas disponíveis tornou o processo de seleção ainda mais complexo. Deste modo, é vital escolher a melhor tecnologia de tratamento (YAO *et al.*, 2020; ALI *et al.*, 2020).

Garantir que o sistema de tratamento de esgoto (STE) mais adequado seja montado corretamente é o primeiro desafio enfrentado para melhorar projetos de saneamento básico (GOFFI *et al.*, 2018). Esse desafio consiste em analisar diversos aspectos, tais como ambientais, técnicos, sociais e econômicos, concomitantemente (GARRIDO-BASERBA *et al.*, 2012).

A complexidade do processo de seleção do STE pode gerar decisões de baixa qualidade com alto impacto na eficiência e custos do tratamento, o que também afeta questões ambientais e econômicas, mesmo em países desenvolvidos (KALBAR *et al.*, 2012a). Vários aspectos estão envolvidos na caracterização dos sistemas de tratamento, nesse contexto, análises foram destacadas por diversos pesquisadores (SALA-GARRIDO *et al.*, 2011; KARIMI *et al.*, 2011; LEONETI, 2010; KALBAR *et al.*, 2012a; MOLINOS-SENANTE *et al.*, 2012; MOLINOS-SENANTE *et al.*, 2014; MOLINOS-SENANTE *et al.*, 2015).

Levar em conta o maior número de aspectos intrínsecos à decisão, bem como, considerar seus conflitos e aplicar o cruzamento dessas informações, tendo em conta as preferências do decisor é um diferencial da abordagem multicritério para priorização de decisões. Esta estratégia de seleção garante que diferentes aspectos sejam examinados, tanto pela quantificação de custos financeiros (capital e operações), bem como, aspectos e custos ambientais e sociais mais amplos, tais como benefícios de cada opção em um horizonte de



planejamento expandido (HARDISTY *et al.*, 2013; YAO *et al.*, 2020), garantindo deste modo economia com os gastos diretos e indiretos advindos da falta de saneamento básico.

Dessa forma, este trabalho destaca a importância da seleção dos critérios corretos na tomada de decisão, considerando as particularidades de cada cenário. Isso enfatiza a relevância de uma avaliação cuidadosa e aprofundada, a fim de identificar os principais aspectos em diferentes cenários. Assim, é possível obter melhores resultados com baixa variação e maior semelhança com as condições reais, o que permite o planejamento estratégico e aumenta a capacidade de tomada de decisão dos gestores.

Nesse contexto, através desta pesquisa busca-se construir um modelo que possa auxiliar na definição de sistemas de tratamento de esgotos urbanos adequados, considerando as particularidades de cada local através de uma análise multicritério, ponderando quatro dimensões de avaliação, econômica, técnica, ambiental e social, as quais são avaliadas através de uma abordagem integrada que emprega os métodos ELECTRE, COPELAND, AHP, SIMOS e PROMETHEE juntos para selecionar a melhor alternativa na solução de problemas de saneamento.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Este estudo tem por objetivo auxiliar na definição mais adequada de sistemas de tratamento de efluentes para os municípios, considerando cenários distintos através da análise multicritério.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- a) Caracterizar as particularidades locais para implantação do sistema de tratamento de esgoto urbano;
- b) Propor um modelo de escolha de critérios para seleção de tecnologias de tratamento de esgoto urbano;
- c) Definir aspectos para mensuração de critérios qualitativos e quantitativos;
- d) Construir uma matriz de desempenho para avaliação de alternativas de tratamento de esgoto;

- e) Propor um modelo de definição de sistemas adequados para tratamento de esgoto urbano;
- f) Aplicar em diferentes cenários para avaliar a aplicabilidade e validade do modelo.

## 1.2 Justificativa

O tratamento de esgoto desempenha um papel fundamental na busca pela sustentabilidade (GARRIDO-BASERBA *et al.*, 2012). Um processo de tratamento inadequado desencadeia numa série de impactos ambientais adversos, tais como: eutrofização, riscos de contaminação, transmissão de doenças, problemas estéticos, maus odores, mortalidade de peixes, toxicidade das algas, aumento da complexidade e custos do tratamento de água. Em função destes impactos, o gerenciamento de efluentes é um grande desafio (Von SPERLING e CHERNICHARO, 2002; KALBAR *et al.*, 2012a; KALBAR *et al.* 2012b; e Von SPERLING, 2014).

As consequências advindas da descarga de esgoto no corpo hídrico é uma questão de grande preocupação, especialmente em países em desenvolvimento. De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento, 53,7% do esgoto gerado no Brasil não recebe tratamento (SNIS, 2018).

De acordo com os dados do IBGE (2017), esse número é ainda mais preocupante, dos 3.359 municípios brasileiros que possuem rede de esgotamento sanitário, apenas 2.013 têm de fato seu esgoto tratado, ou seja, cerca de 40% (1.346 municípios) com rede de esgoto ainda não realiza o tratamento dos efluentes. Além disso, os 2.013 municípios que tem rede de esgoto e processo de tratamento aplicado (60%), não definem com clareza forma de seleção do sistema de tratamento. Da quantidade total de municípios do Brasil, 2.211 municípios do total de 5.570, não possuem nem sistema de esgotamento, tampouco o esgoto recebe tratamento.

A partir destes dados, evidencia-se que uma ferramenta multicritério, para a seleção do tipo de tratamento de esgoto a ser aplicado em cada situação, tem grande contribuição, haja vista a precariedade no sistema nacional de esgotamento existente, frente ao percentual significativo de efluentes que não é, nem coletado, muito menos tratado.

Von Sperling e Chernicharo (2002) e Von Sperling (2014) afirmam que a determinação das tecnologias para tratamento de esgotos no Brasil tem sido realizada de forma precária e pouco estruturada, analisando muitas vezes apenas dados econômicos e de eficiência das tecnologias, o que não garante o melhor desempenho. O tratamento inadequado ou seleção

de uma tecnologia inapropriada leva a soluções ineficazes, custos excessivos e péssimos resultados.

Não somente, a importância da temática é corroborada por Zeng *et al.*, 2007; Leoneti *et al.*, 2010; Hakanen *et al.*, 2011; Netto, Zaiat, 2012; Maurer *et al.*, 2012; Molinos-Senante *et al.*, 2015, Yao *et al.*, 2020. De acordo com os autores, a escolha do sistema de tratamento mais adequado depende diretamente dos critérios avaliados, bem como, das variáveis intrínsecas a este problema de seleção.

Além disso, outros pesquisadores tais como: Sala-Garrido *et al.* (2011), Kalbar *et al.* (2012a), Garrido-baserba *et al.* (2012), Molinos-Senante *et al.* (2014) e Molinos-Senante *et al.* (2015), Arroyo e Molinos-Senante (2018), destacam a necessidade de investimentos em ações que auxiliem na escolha e definição dos sistemas de tratamento de esgoto, de modo sustentável, reforçando a importância desse estudo.

Outro ponto relevante para este trabalho é apontado pelas Organização das Nações Unidas (ONU), que sugere a adoção de objetivos para o desenvolvimento sustentável. São apresentados diferentes objetivos que abordam os principais desafios de desenvolvimento enfrentados por pessoas no Brasil e no mundo. Um dos objetivos é o “acesso a água e saneamento para todos” (ONU, 2020).

O decreto nº 9.203, de 22 de novembro de 2017, aponta seis princípios para a governança pública de recursos são eles: capacidade de resposta; melhoria regulatória; integridade; prestação de contas; responsabilidade; confiabilidade; e transparência. Garantir que esses princípios sejam seguidos depende de instrumentos que facilitem os processos decisórios na gestão pública (BRASIL, 2017). Neste sentido, este trabalho fornece uma ferramenta estratégica com diretrizes para concepção e estruturação de sistemas de tratamento de efluentes, bem como estabelece objetivos claros, além de um plano de ação para seleção de critérios de priorização para a seleção do sistema de tratamento com as melhores respostas.

Segundo Oliveira *et al.* (2018) a construção de um espaço urbano de melhor qualidade está diretamente associada à implementação de políticas urbanas que busquem soluções para os problemas ambientais nas cidades. Sendo assim, este trabalho contribui para infraestrutura mais eficiente, otimizando o uso dos recursos, propiciando a expansão das unidades de tratamento de esgoto.

Sendo assim, este trabalho é inédito em função do desenvolvimento de um modelo multicritério único de seleção de critérios baseados nas particularidades de cada local, para determinação do sistema ideal de tratamento de esgoto, seja este uma solução individual ou coletiva, considerando aspectos sociais, econômicos, ambientais e técnicos.

### 1.2.1 Originalidade, Inovação e Relevância do Estudo Proposto

Evidenciam-se os fatores de originalidade, inovação e relevância desta tese pela sua contribuição ao desenvolver um modelo de apoio à tomada de decisão para seleção do sistema de tratamento ideal considerando diferentes particularidades locais.

Neste sentido, a importância deste estudo é ampliada pelo fato de não haver estudos que contemplem a utilização de critérios para seleção do sistema de tratamento em função das diferentes particularidades em múltiplos cenários, ao qual a tecnologia de tratamento pode ser implantada, além da avaliação conjunta dos aspectos econômicos, ambientais, técnicos e sociais para a comparação das alternativas de tratamento, considerando os objetivos e preferências dos decisores.

Embora os critérios sejam abrangentes e por vezes amplamente aceitos, pouco se tem a respeito das características de cada local. Por isso, segundo Ujang e Henze (2006), é importante que o maior número de particularidades seja levado em consideração para a escolha do sistema de tratamento que melhor responda às necessidades de cada cenário, o que confirma a relevância e ineditismo do estudo desenvolvido nesta tese.

Além disso, a caracterização inicial dessas particularidades para a definição dos cenários pode servir de instrumento para identificar possíveis melhoras de desempenho no setor do saneamento. Esse instrumento inédito permite tomar decisões tecnicamente definidas e implementar políticas que respeitem as características de cada município brasileiro. Decisões mais acertadas geram economia de recurso, tempo, e maior eficiência, o que por consequência proporciona maiores avanços no setor.

Kanwal *et al.* (2020) destacam a necessidade de estudos que busquem por instrumentos que possam melhorar a gestão de águas residuais nas cidades bem como colaborar no planejamento urbano, o que de fato pode auxiliar rumo à gestão sustentável de recursos em um ambiente complexo.

A elaboração de projetos de engenharia geralmente demanda tempo e mão de obra especializada, contudo o modelo proposto busca fornecer uma ferramenta simples e de fácil entendimento, para que os decisores, mesmo que sem conhecer com detalhes a operação dos sistemas, possam por meio da aplicação dos métodos multicritérios, colaborar com a tomada de decisão.

Dursun (2016) e Yao *et al.* (2020) reforçam a existência de uma lacuna de pesquisa quanto a aplicação de diferentes ferramentas multicritério para a seleção de alternativas com melhores respostas para o tratamento de efluentes, uma vez que poucos são os estudos encontrados na literatura.

Portanto, a originalidade desta tese é destacada pela contribuição que o modelo desenvolvido pode gerar para os gestores municipais na etapa de planejamento e implantação de uma estação de tratamento de esgoto, bem como, pode ser uma opção para otimização de sistemas já existentes. Além disso, o modelo proposto pode ser utilizado didaticamente pela comunidade científica, uma vez que propicia a avaliação do quanto os métodos multicritérios são capazes de contribuir na decisão acerca de diferentes cenários através de simulações.

### **1.3 Contribuição da tese para a engenharia de produção**

Esta tese tem como objetivo mostrar como as ferramentas da Engenharia de Produção podem ser aplicadas para auxiliar o desenvolvimento do saneamento básico. Nessa perspectiva, amplia-se a possibilidade de interação entre essas duas grandes áreas do conhecimento.

Apesar da ampla divulgação do conceito de desenvolvimento sustentável proposto em 1987, no Relatório Brundtland que diz respeito à utilização dos recursos de modo a não comprometer a disponibilidade do mesmo para as futuras gerações, poucas são as estratégias integradas que promovam a conservação ambiental através da otimização dos recursos no setor do saneamento.

Para que as organizações sejam sustentáveis, estas devem buscar equilíbrio entre três dimensões: a econômica, a ambiental e a social. Porém, estes princípios são muitas vezes vistos como conflitantes. Neste sentido, a engenharia de produção dispõe de uma série de ferramentas que podem ser utilizadas na gestão dessas organizações.

É fundamental a aproximação das áreas de engenharia de produção e suas ferramentas multicritérios na gestão do saneamento, a fim de aliar os benefícios dessas ferramentas quando aplicadas às problemáticas de complexa solução, provendo a análise global e permitindo que as discussões não sejam subjetivas, mas que englobem diferentes aspectos.

Esta tese de doutorado foi conduzida pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – PPGEPP da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Campus Ponta Grossa, na área de concentração: Gestão Industrial e na linha de pesquisa: Gestão do Conhecimento e Inovação. Está vinculada ao estudo dos métodos de apoio à tomada de decisão.

#### **1.4 Delimitação do tema**

Tendo em vista as inúmeras possibilidades, técnicas e abordagens aplicáveis à tomada de decisão no saneamento, principalmente no âmbito do tratamento de efluente sanitário, é importante destacar os caminhos escolhidos, bem como, os limites da pesquisa e aplicações disso.

Deste modo, esta tese busca integrar métodos multicritério de apoio à decisão com a gestão de recursos no âmbito sanitário. Assim, o estudo limitou-se às questões relacionadas à fase de planejamento das estações de tratamento de esgoto sanitário, na qual é definida a tecnologia de tratamento ou o conjunto de processos e unidades operacionais utilizadas para o tratamento de efluentes em diferentes locais considerando diferentes particularidades.

Sendo considerada a problemática da ordenação dos sistemas de tratamento, dentro da fase de planejamento das unidades de tratamento de efluentes, desconsiderando deste modo outros aspectos complexos da tomada de decisão nesta fase inicial, tais como, localização da estação de tratamento e redes coletoras de esgoto.

Portanto, o Modelo busca auxiliar na definição de qual sistema de tratamento pode ser utilizado, conforme os critérios previamente definidos, considerando cada caso específico. Desta forma, atuando como ponto de apoio ao projeto, operação e planejamento inicial das estações de tratamento de esgoto, além disto, pode ser utilizado na avaliação de soluções já existentes.

#### **1.5 Organização da tese**

Este trabalho está estruturado em seis capítulos. A Figura 1 apresenta um diagrama de todas as etapas executadas para a elaboração deste trabalho.

Figura 1 – Diagrama de organização da tese

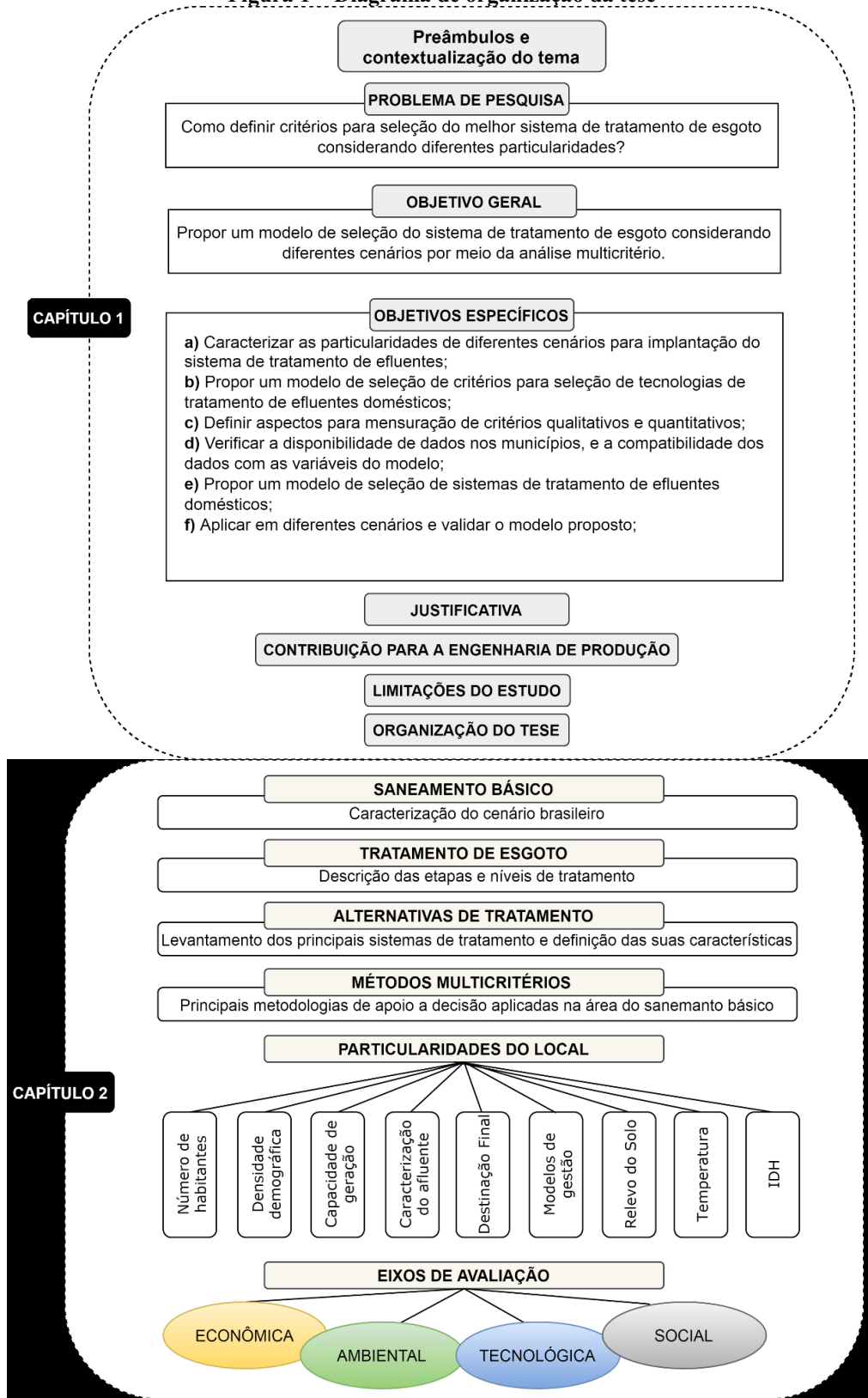
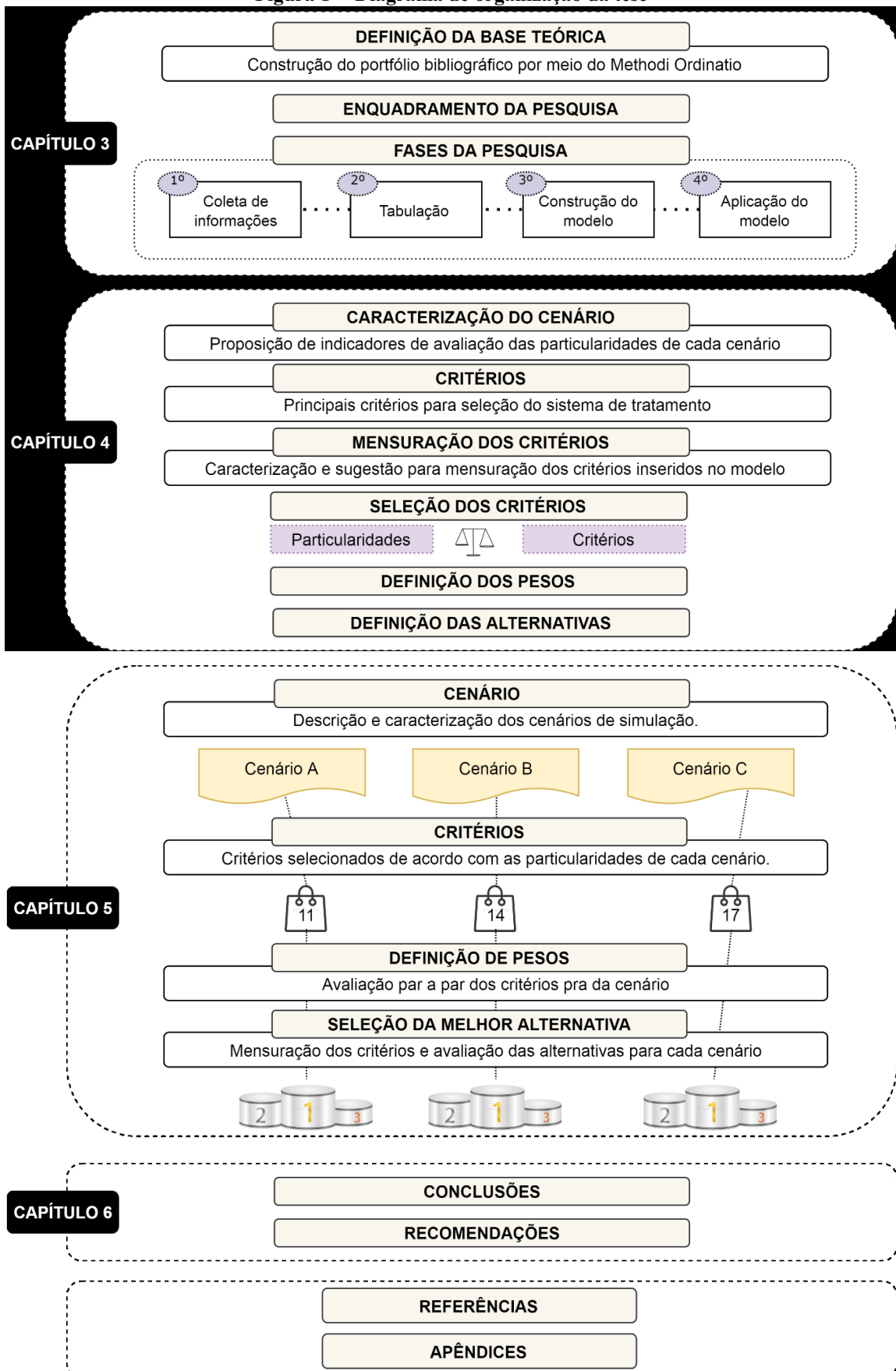


Figura 1 – Diagrama de organização da tese



Fonte: Autoria própria (2022)



No primeiro capítulo, “Introdução”, encontra-se as motivações e objetivos do trabalho, problema, justificativas, contribuição da tese para a Engenharia de Produção, delimitação temática, além da estrutura de apresentação deste documento.

O Capítulo 2, “Referencial teórico”, compõe a base conceitual do trabalho, abordando conceitos relativos ao estudo, obtidos por meio da pesquisa bibliográfica, discorrendo sobre o cenário de saneamento no Brasil, os principais fatores para análise de projetos, bem como, apresentam conceitos relevantes ao apoio à decisão multicritério, assim como as principais aplicações de metodologias multicritério de apoio à decisão aplicada à área.

No Capítulo 3, “Material e Métodos”, são descritos os métodos de pesquisa os quais foram divididos em três partes: características da pesquisa, descrição das etapas da metodologia de apoio à decisão multicritério e o planejamento da pesquisa. Esse segmento descreve a investigação, coleta e análise de dados, exibindo também todo o procedimento da metodologia multicritério.

O Capítulo 4 contém os desenvolvimentos, e peculiaridades na determinação das tecnologias de tratamento e critérios utilizados no modelo de decisão. Ao passo que o Capítulo 5 tem por objetivo demonstrar os principais resultados obtidos pela aplicação do modelo proposto, bem como apresentar as principais discussões acerca dos resultados.

E por fim, no Capítulo 6 serão apresentadas as considerações finais e perspectivas futuras do trabalho, e as recomendações para trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentada a base conceitual deste trabalho, trazendo um panorama do saneamento básico no Brasil, apresentando conceitos relevantes ao tratamento de efluente sanitário, à decisão multicritério, assim como, discorrendo a cerca das principais metodologias multicritério de apoio à decisão as quais foram aplicadas ao saneamento.

### 2.1 Saneamento básico

A má gestão dos recursos disponíveis para o saneamento básico gera uma sequência de erros que podem resultar no lançamento impróprio de esgotos, seja pelo não tratamento, ou pelo tratamento inadequado. Esse lançamento, quando impróprio está entre as principais fontes de poluição dos corpos hídricos, frente suas características altamente poluidoras. Segundo Von Sperling (2014) o descarte de esgotos tem consequência a eutrofização dos cursos de água, além de acarretar sérios problemas de saúde pública, propagando várias doenças de veiculação hídrica.

De acordo com o último diagnóstico dos serviços de água e esgotos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2019) a situação do saneamento no Brasil é ainda bastante precária. A exemplo esta o atendimento por redes de esgotos, o que não necessariamente indica tratamento, o contingente de população urbana atendida alcança 105,5 milhões de habitantes, sendo o total de habitantes no Brasil é de 211,8 milhões (IBGE, 2019).

Conforme dados do IBGE (2017) do total de 5570 municípios brasileiros, 2211 não possuem nem sistema de esgotamento, tampouco o esgoto recebe tratamento. Sendo que dos 3359 municípios brasileiros que possuem rede de esgotamento sanitário, apenas 2013 têm de fato seu esgoto tratado. Ou seja, cerca de 1346 municípios, embora tenham acesso a rede de esgoto, ainda não tem seu esgoto tratado adequadamente.

Quando observada a taxa de atendimento por região a situação sanitária demonstra-se ainda mais preocupante (Figura 2). Vale destacar que esses serviços são distribuídos de forma desigual entre as grandes regiões do país. Na região Norte tem apenas 9,6% do esgoto tratado, sendo, a região com maior déficit. Já a região Nordeste tem apenas 25,1% do esgoto tratado, enquanto a região sul tem cerca de 29,3%. As regiões Centro-Oeste e Distrito Federal apresentam aproximadamente 36%. No Sudeste 60,1% do esgoto é tratado, sendo esta a região

com melhor desempenho, embora com índice ainda insatisfatório, uma vez que atinge pouco mais da metade da população.

**Figura 2 – Total de municípios com ETEs em operação por grandes regiões**



Fonte: Elaborado com base nos dados do IBGE (2017)

Os dados observados indicam que a coleta e tratamento do esgoto é realizada principalmente nas cidades mais populosas. Os municípios menos populosos, com até 20 mil habitantes, ficaram abaixo da média do Brasil e os maiores percentuais foram observados nos municípios com mais de 500 mil habitantes. Um exemplo disso é São Paulo, estado com maior índice de coleta e tratamento, respectivamente, 100%, 93,6% (IBGE, 2017).

Vale destacar a carência e desatualização das informações específicas sobre os serviços de saneamento. Especialmente considerando que os dados estatísticos muitas vezes tratam sobre o acesso à rede coletora de esgoto, ou representam apenas a existência do serviço no município, desconsiderando importantes fatores como a extensão da rede, a qualidade do atendimento e, sobretudo quanto à destinação final do esgoto coletado, bem como o processo de tratamento ao qual este é submetido.

De acordo com o IBGE (2017), o serviço é realizado por entidades públicas na maioria dos municípios, sendo as prefeituras as executoras na maioria das cidades (46,2%). Entretanto esse número vem caindo ao longo dos anos, com o aumento da participação das Companhias Estaduais (41,6%) e das autarquias municipais, comumente denominadas Serviços Autônomos de Água e Esgoto (SAAEs), que atuavam em 11% das cidades. O serviço era prestado por empresas privadas em apenas 3,1% dos municípios.

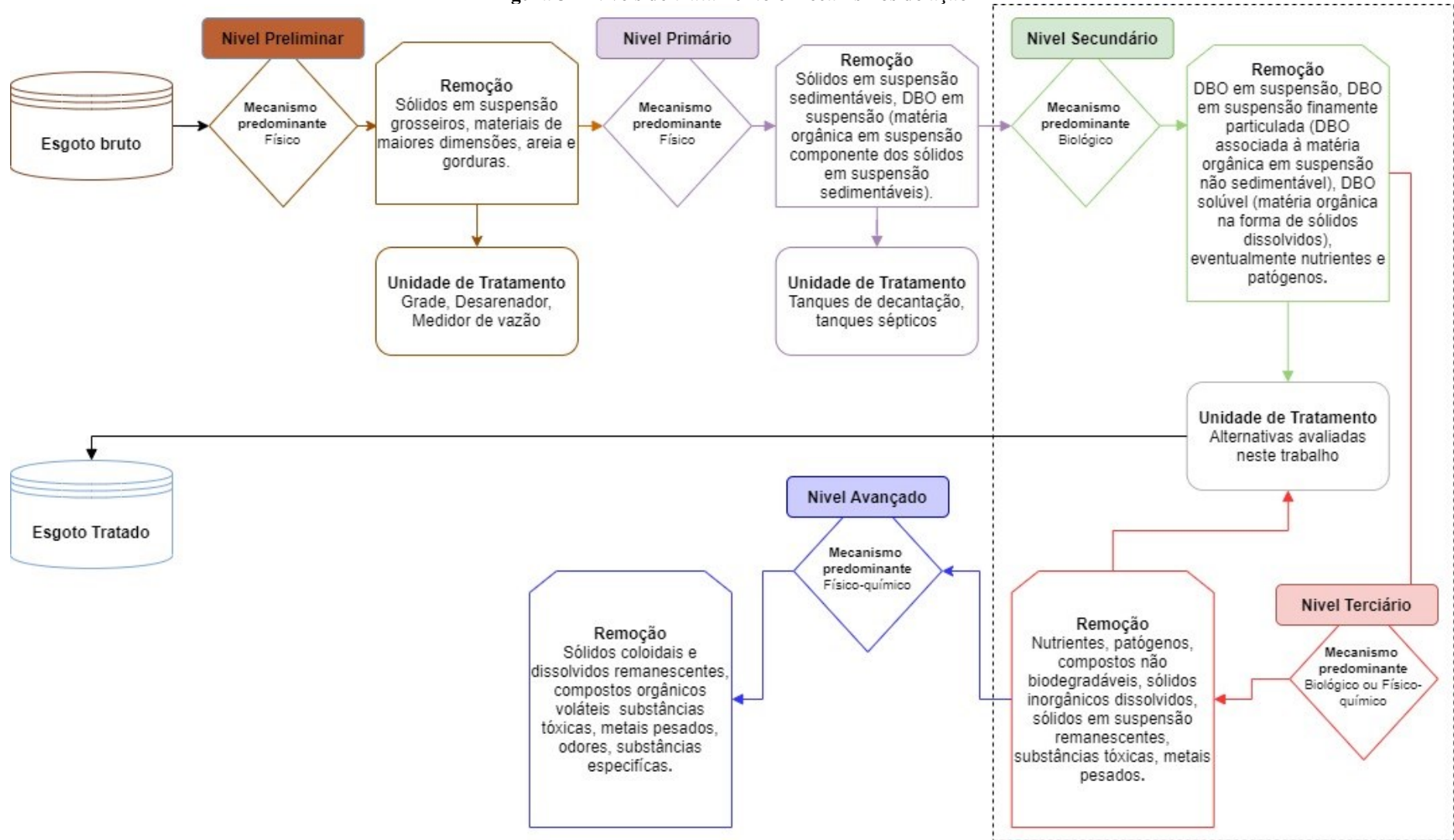
## **2.2 Tratamento de esgoto sanitário doméstico**

O tratamento de esgotos sanitários consiste na remoção de poluentes através de operações unitárias que simulam fenômenos naturais de degradação. Esse processo que ocorre em um corpo d'água após o lançamento de despejos, é realizado na estação de tratamento de efluentes (ETEs) em condições controladas, garantindo assim taxas elevadas de tratamento, e por fim maior eficiência no processo de depuração dos poluentes (RICHTER, 2007; Von SPERLING, 2014).

Deste modo, as estações de tratamento urbanas tentam purificar as águas residuais municipais, convertendo materiais orgânicos em materiais estáveis que têm a capacidade de ser absorvido pelo meio ambiente com reduzido grau de impacto. Outro objetivo da ETE pode ser acelerar o processo de purificação para promover a reutilização.

Para isso, as ETEs são projetadas considerando quatro diferentes níveis de tratamento, são estes: preliminar, primário, secundário e terciário ou também conhecido como avançado (Von SPERLING, 2014) (Figura 3).

Figura 3 – Níveis de tratamento e mecanismos de ação



Fonte: Adaptado de Metcalf (2003); Von Sperling (2014); Markov *et al.* (2017).

O tratamento preliminar promove a remoção de sólidos em suspensão grosseiros, materiais de maiores dimensões, areia e gorduras. Geralmente são utilizados mecanismos físicos, tais como gradeamento e sedimentação por gravidade, como método de tratamento. Esta etapa tem a finalidade de proteger as unidades de tratamento subsequentes e os dispositivos de transporte, como bombas e tubulações, além de proteção dos corpos receptores quanto aos aspectos estéticos (METCALF, 2003).

O tratamento primário, além dos sólidos sedimentáveis, remove também uma pequena parte da matéria orgânica, utilizando-se de mecanismos físicos como método de tratamento.

No tratamento secundário o esgoto é submetido a processos biológicos, por isso também é conhecido como tratamento biológico. O afluente é submetido à ação de microorganismos, que promovem reações bioquímicas de degradação da matéria orgânica biodegradável. De acordo com Von Sperling (2014) neste nível grande parte da matéria orgânica é removida, podendo ocorrer também a remoção parcial de nutrientes como nitrogênio e fósforo.

O tratamento terciário, ou também dito tratamento avançado, nem sempre é presente, geralmente constituído de unidade de tratamento físico-químico, tem como finalidade a remoção complementar de matéria orgânica, nutrientes, poluentes específicos, e principalmente promover a desinfecção dos esgotos tratados (Von SPERLING, 2014).

Em cada nível de tratamento diferentes operações, processos e sistemas de tratamento podem ser aplicados, de modo individual ou simultâneo em uma mesma unidade de tratamento. Para a adequada seleção desses deve-se considerar o nível de tratamento e eficiência de remoção almejada, tais como requisitos fundamentais para a definição dos processos e operações englobadas na unidade de tratamento.

### **2.3 Alternativas de tratamento**

Um grande número de configurações de tratamento de esgoto está disponível. Contudo essas alternativas são cada vez mais diferentes entre si, com objetivos e particularidades distintas.

Uma quantidade expressiva de processos e operações que realizam tratamento está disponível como alternativa para tratamento das águas residuais, entre estes, estão os processos biológicos, os quais podem ser aeróbios, anaeróbios ou então sistemas combinados. Conhecer

esses sistemas, suas vantagens bem como desvantagens é fundamental para a tomada de decisão seja conduzida de forma adequada.

Goffi *et al.* (2018) levantaram as alternativas de tratamento mais utilizadas no Brasil e as classificou de acordo com o nível de tratamento, as quais também foram selecionadas para este trabalho. Von Sperling *et al.* (2001) reitera a necessidade de pesquisas que indiquem as vantagens da combinação de processos de tratamento de águas residuais municipais.

Von Sperling (2014) apresenta um resumo dos principais sistemas de tratamento de esgoto doméstico em nível secundário, utilizados, geralmente, em países de clima quente, com maior tendência para a utilização de sistemas combinados no Brasil.

Cheng *et al.* (2011) e Capodaglio *et al.* (2015) destacam que o processo biológico é amplamente eficiente na remoção de compostos orgânicos solúveis e coloidais em efluentes domésticos.

Chernicharo (2006) enfatiza alta taxa reatores anaeróbios usados para tratamento de o esgoto em alguns países de clima quente, especialmente no Brasil, Colômbia e Índia, os quais possuem vários sistemas de tratamento operando em escala completa. Sendo no Brasil os reatores anaeróbicos uma das principais opções, em qualquer estudo de viabilidade.

Os reatores UASB, por exemplo, têm se mostrado uma tecnologia capaz de superar algumas das desvantagens dos sistemas aeróbios mecanizados, principalmente pela ausência de consumo de energia e menor geração de excesso de lodo. No entanto, o efluente tratado geralmente é incapaz de cumprir com a maioria dos padrões de lançamento existentes. Mungray *et al.* (2010) analisa criticamente o desempenho de alguns métodos convencionais de pós-tratamento comumente usados combinando com reatores UASB.

Portanto, conhecer as particularidades de cada sistema é essencial para a tomada de decisão. O Apêndice A apresenta um resumo das principais características de cada alternativa avaliada e sugerida no modelo proposto neste trabalho.

## 2.4 Métodos multicritérios

As Metodologias Multicritério de Apoio a Tomada de Decisão –MCDAs são amplamente utilizadas e indicadas quando o problema de decisão é multidimensional, de alta complexidade envolvendo diferentes critérios, atributos, alternativas de solução. Bem como definido por Belton e Stewart (2002), os quais definem os métodos de MCDA como ferramentas científicas que apoiam o processo de tomada de decisão, em problemas com objetivos diferentes, e em situações complexas. Neste contexto, frequentemente faz-se uso de métodos que utilizam a abordagem de superação, a fim de selecionar um subconjunto de um conjunto finito de alternativas ou mesmo ordená-las (ALMEIDA; COSTA, 2003; GOMES *et al.*, 2002).

Diante deste complexo cenário, com elevado número de variáveis, as quais são por vezes conflitantes entre si, as MCDMs podem ser utilizadas para ordenamento, classificação e seleção das alternativas, nas mais diversas áreas do conhecimento, buscando definir as melhores respostas para cada problema estudado (ALMEIDA, 2009; TROJAN, 2019).

Segundo Bouyssou *et al.* (2000) o número de técnicas e métodos multicritérios de apoio à decisão é bastante diverso e vão desde ferramentas mais sofisticadas, como argumentação lógica e conjuntos ordenados, até ferramentas mais simples e de fácil aplicação. De acordo com Figueira *et al.* (2005) são mais de 50 técnicas de MCDM documentadas na literatura, variando de sistemas de classificação altamente sofisticados a sistemas mais simples.

Thokala e Duenas (2012) dividem a aplicação de métodos de MCDA em quatro estágios, sendo estes: identificação das alternativas que serão consideradas no modelo; definição de critérios com os quais as alternativas serão avaliadas; determinação dos pesos que refletem o valor esperado do desempenho apresentado por cada um dos critérios; e por fim cálculo da razão de importância para cada critério, estabelecendo assim uma relação de importância que pode ser medida entre esses critérios.

Uma grande variedade de métodos é utilizada na solução de diferentes problemas. Segundo Leoneti e Pires (2017) os métodos mais utilizados são: *Analytical Hierarchy Process* (AHP); *Elimination et Choice Traduisant la Réalité* (ELECTRE); *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations* (PROMETHEE); *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS); *Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique* (MACBETH); e *Multi attribute Utility Theory* (MAUT).



De acordo com Longaray *et al.* (2016), embora os métodos possam diferir em perspectiva matemática uma solução ideal para um determinado problema, todos são empregados com o mesmo propósito: o desenvolvimento de um Sistema de Apoio à Decisão baseado em análise multicritério, a fim de apoiar gestores e pesquisadores.

A importância de metodologias multicritério aplicadas à área de saneamento tem sido discutida em diversos estudos, visto que esses tipos de problemas geralmente envolvem vários aspectos e, às vezes, objetivos diferentes. Nesse sentido, métodos de multicritério são muito úteis para descobrir as melhores soluções.

As decisões devem ser conduzidas com o auxílio de vários tomadores de decisão, os quais devem considerar um número viável de alternativas bem definidas. No entanto, alguns problemas, principalmente os relacionados ao saneamento, apresentam um elevado número de critérios e alternativas envolvidos, o que torna ainda mais complexa a integração desses diferentes e conflitantes aspectos.

Diversos estudos têm mostrado a necessidade da utilização de métodos adequados para auxiliar neste tipo de decisão. É possível verificar um fenômeno de evolução nas pesquisas relacionadas a esta temática. Ocorrendo nos 3 últimos anos um aumento significativo na taxa de crescimento do número de artigos publicados, que aplicam métodos multicritérios para auxiliar alguma tomada de decisão no âmbito do saneamento, demonstrando assim, uma tendência de pesquisa (YAO *et al.*, 2020, GHERGHEL *et al.*, 2020).

Portanto, desenvolver uma abordagem que permita conhecer os critérios detalhados que envolvem cada sistema de tratamento certamente se tornará útil para o processo de planejamento e seleção do sistema de tratamento de esgoto, principalmente para municípios de pequeno porte, que costumam trabalhar com recursos escassos. O Apêndice B apresenta algumas das principais pesquisas encontradas na área do saneamento, utilizando multicritério.

#### 2.4.1 Método COPELAND

O método Copeland foi desenvolvido considerando princípios dos métodos de Borda e Condorcet, conciliando as vantagens dos dois métodos (CALDAS; AZEVEDO, 2009). O Copeland realiza o ordenamento das alternativas de acordo com o cálculo da soma das vitórias menos as derrotas, em uma votação por maioria simples (LEVINO; MORAES, 2010; TROJAN, 2012).

Este método apresenta como principal vantagem sempre fazer uma ordenação total, ao contrário do método de Condorcet embora tenha sido originado deste (FERREIRA *et al.*, 2011). Outra vantagem, segundo Gomes Junior *et al.* (2005), é a redução da influência de alternativas irrelevantes.

#### 2.4.2 Método ELECTRE TRI

Desenvolvido por Mousseau *et al.* (2001) o ELECTRE TRI é um método multicritério para alocar um conjunto de alternativas em categorias. Este método tem sido utilizado em diversas aplicações envolvendo alocação de alternativas em classes pré-definidas, considerando uma avaliação multicritério com critérios ponderados. Esta alocação resulta da comparação de cada alternativa com os limites definidos pelas classes. Neste trabalho foi utilizado o método ELECTRE TRI com a finalidade de alocação das tecnologias de tratamento em classes.

No ELECTRE TRI as classes são ordenadas da pior ( $C_1$ ) à melhor ( $C_k$ ). Cada categoria deve ser caracterizada por um perfil inferior e superior. A atribuição de uma alternativa  $a$  em uma determinada classe  $C_h$  resulta da comparação de  $a$  aos limites que definem os limites inferior e superior das categorias; sendo  $b_h$  o limite superior da categoria  $C_h$  e o limite inferior da categoria  $C_{h+1}$ , para todo  $h = 1, \dots, k$ . Para um determinado limite de classe,  $b_h$ , essa comparação depende da credibilidade das assertivas  $aSb_h$  e  $b_hSa$  (MOUSSEAU *et al.*, 2001).

Este método apresenta relações de superação  $S$ , que valida ou invalida a afirmação de que  $aSb_h$  e  $(b_hSa)$ , cujo significado é " $a$  é pelo menos tão bom quanto  $b_h$ ". Duas condições devem ser verificadas para validar a afirmação  $aSb_h$ .

Assim, o ELECTRE TRI é utilizado principalmente em problemas de classificação de alternativa, o qual busca avaliar o desempenho das alternativas e então alocar em uma das classes de desempenho predefinidas. Dois procedimentos de atribuição podem ser avaliados: procedimento pessimista e procedimento otimista (MOUSSEAU *et al.*, 2001).

#### 2.4.3 Método AHP

O método AHP consiste na decomposição e síntese das relações entre os critérios até que se chegue a uma priorização dos seus indicadores, aproximando-se de uma melhor resposta de medição única de desempenho (SAATY, 1991).

Segundo Vieira (2006) o método pode ser dividido em 3 princípios, são eles: a construção de hierarquias; definição de prioridades; e a consistência lógica. Um problema complexo geralmente requer a estruturação dos critérios em uma hierarquia, o método AHP permite a estruturação dos critérios, sendo a estruturação em árvore a mais utilizada, na qual o critério de mais alto nível é decomposto a níveis mais detalhados. Definir a ordem de preferência é essencial, tais prioridades são definidas a partir de comparações par a par dos elementos, à luz de determinado critério.

E por fim, o método permite, por meio da proposição de índices, avaliar a consistência da definição de prioridades, ou seja, é capaz de verificar a consistência dos julgamentos, e com isso garantir resultados mais robustos.

#### 2.4.4 Método SIMOS

De acordo com Figueira e Roy (2002) Simos é um procedimento simples, indicado para o contexto em que as preferências do Tomador de Decisão são conhecidas e há a necessidade de que os pesos dos critérios sejam definidos.

Simos (1990) propôs uma técnica que permite que qualquer DM (não necessariamente familiarizado com o auxílio à decisão multicritério) possa expressar a forma como deseja hierarquizar os diferentes critérios em um determinado contexto.

Esse procedimento também visa comunicar ao decisor as informações de que ele precisa para atribuir um valor numérico para os pesos de cada critério, ideal para utilização posterior de outros métodos multicritérios que precisam desta definição numérica dos pesos.

Esta abordagem consiste de associar uma "carta de jogo" a cada critério. Na qual o decisor deve utilizar cartões a fim de classificar cada critério, inserindo os cartões em branco, a fim de destacar a diferença de preferência entre os critérios.

Esta dinâmica permite uma compreensão bastante intuitiva do procedimento de avaliação. Além disto, este procedimento visa comunicar ao analista as informações de que necessita para atribuir um valor numérico aos pesos de cada critério. O procedimento foi aplicado a diferentes contextos da vida real e provou ser muito bem aceito pelos tomadores de decisão (MARZOUK *et al.*, 2014).

#### 2.4.5 Método PROMETHEE & GAIA

O Promethee é um método de superação, que consiste em construir uma relação binária muito particular entre as alternativas em análise, atribuindo a cada critério um peso proporcional à sua importância (GOMES *et al.*, 2002). O uso do método Promethee, basicamente se dá pelas comparações entre as ações  $[a]$  e  $[b]$ , o que determina o resultado da função  $F_j(a,b)$ . A comparação é feita tanto de  $[a]$  para  $[b]$  quanto de  $[b]$  para  $[a]$ . Além disso esse método tem como vantagens a objetividade e flexibilidade, além de rápida utilização, fácil verificação, e transparência nos resultados.

Outra vantagem da utilização do método é a seleção ser feita sem admitir relações de incompatibilidade fornecendo como resultado final uma classificação de pré-ordem completa. Permitindo deste modo a classificação das tecnologias de forma hierárquica através da comparação entre todas as alternativas analisadas.

De acordo com Bogdanovic *et al.* (2012) a utilização do método PROMETHEE é preferível em comparação a outros métodos existentes devido à sua simplicidade e capacidade de aproximar a forma como a mente humana expressa e sintetiza preferências diante de múltiplas perspectivas contraditórias de decisão.

A aplicação do método pode ser realizada com o auxílio da ferramenta computacional Visual PROMETHEE 1.3 - *AcademicVersion*. Além de facilitar nos cálculos, o software utilizado também fornece a extensão GAIA (Análise geométrica para auxílio interativo), a qual possibilita a visualização gráfica do desempenho das alternativas em contraste com os critérios estabelecidos.

Sendo assim, a utilização da extensão gráfica GAIA permite que algumas propriedades sejam visualizadas de forma mais simples e rápida são elas: posição das alternativas; posição dos critérios; posição das alternativas com relação aos critérios de seleção. O estudo deste gráfico também permite identificar conflitos entre os critérios e o agrupamento das alternativas. Além disto, os resultados advindos da análise GAIA permitem que o decisor possa manipular de forma interativa os pesos relativos para avaliar a influência destes no desempenho das alternativas. Esta análise é importante, pois consegue uma assimilação visual sobre os resultados, permitindo que a análise de sensibilidade seja conduzida de maneira simples e rápida.

A posição das alternativas permite verificar as relações entre elas. Deste modo, pode-se concluir que quanto mais próxima uma alternativa a outra, maior será a similaridade entre

elas. O mesmo vale para a análise inversa, quanto mais distante uma alternativa a outra maior serão suas diferenças. Essa avaliação pode ser conduzida de forma individual ou coletiva.

A análise da posição dos critérios indica a similaridade entre eles, bem como permite a análise de uma alternativa sob mais de um critério, uma vez que, se os critérios são similares à alternativa que atende a um critério individual, automaticamente, atenderá o critério que for definido similar ao primeiro.

Quanto à análise de uma alternativa diante de um critério específico pode se definir a relação de proximidade como norteadora do desempenho desta segundo as preferências do decisor. Ou seja, quanto mais próxima uma alternativa de um critério melhor será o seu desempenho diante do mesmo.

Outra questão que foi considerada para utilização deste método, no ranqueamento das alternativas, foi à abordagem não compensatória (ALMEIDA, 2009), que se mostrou a mais apropriada para o decisor envolvido neste problema.

## **2.5 Análise de particularidades do local**

Em geral, diversas tecnologias têm sido desenvolvidas para tratamento de águas residuais em diferentes países, as quais são adotadas geralmente de acordo com diferentes condições.

Ujang e Henze (2006) apontam que várias tecnologias de saneamento municipal são elaboradas, desenvolvidas e adotadas para um cenário específico, contudo, podem ser aplicadas em outros cenários, desde que sejam consideradas as condições locais, aspecto geográfico-climático, mecanismos financeiros, bem como capacidade do sistema.

Lisbôa *et al.* (2020) reforçam a importância de que sejam amplamente consideradas as condições que definem o cenário para a seleção eficiente de uma tecnologia na fase inicial de planejamento e concepção do sistema de estação de tratamento de esgoto. Zeng *et al.* (2007) destacam em seu trabalho a importância de sejam consideradas situações particulares a cada modelo, a fim de obter os melhores resultados.

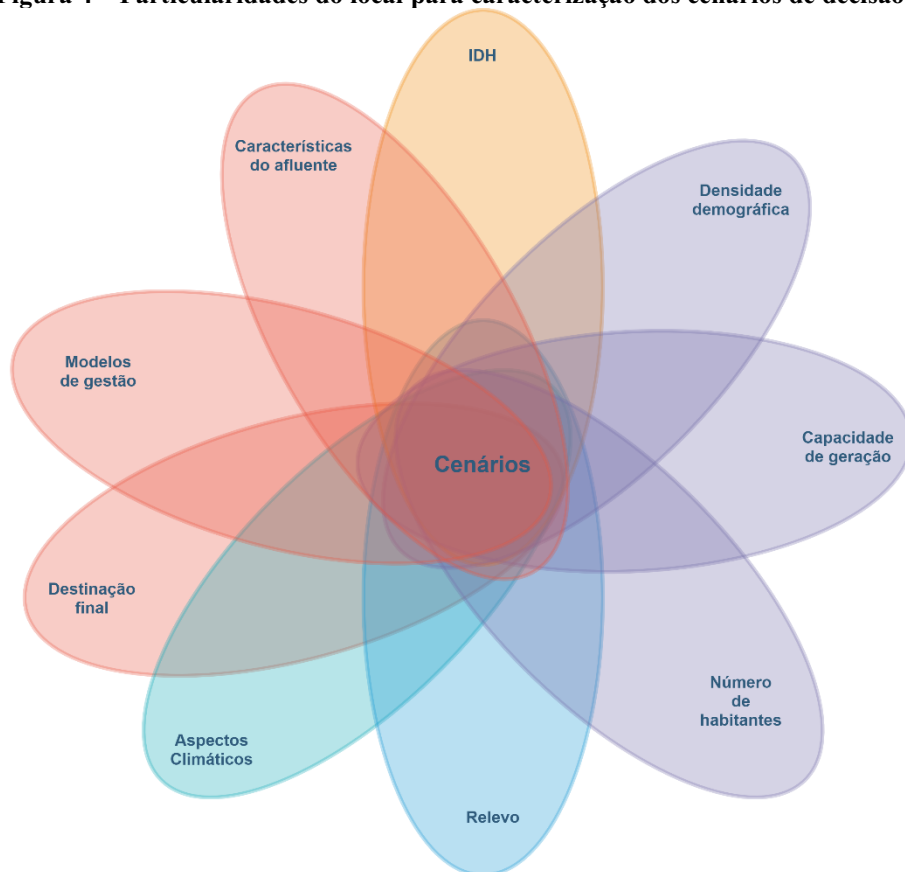
Contudo, considerar essas restrições regionais de modo claro na gestão e desenvolvimento dos projetos de gestão de águas residuais, é um grande desafio (KHATTIYAVONG; LEE, 2019).

Segundo Markov *et al.* (2017) algumas perguntas básicas na etapa de planejamento e engenharia de construção de um sistema de tratamento só podem ser respondidas após

diagnóstico detalhado das condições e necessidade locais. Detalhar essas particularidades garante um maior nível de customização de cada projeto, garantindo assim que cada planta tenha suas soluções desenvolvidas em função das suas necessidades.

Portanto, a análise dos aspectos do local pode influenciar de modo direto na seleção de um sistema de tratamento. Para considerar essas características é importante conhecer cada uma delas de modo a aproveitar essas peculiaridades em favor do projeto. Sendo assim, este item busca descrever as particularidades consideradas neste modelo de seleção de sistema de tratamento. Conforme apresentado na Figura 4, cada particularidade do modelo será melhor detalhada nos itens abaixo da figura.

**Figura 4 – Particularidades do local para caracterização dos cenários de decisão**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

### 2.5.1 Índice de Desenvolvimento Humano (IDH)

O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) é uma medida comparativa usada para classificar o grau de desenvolvimento humano de um determinado local. A estatística é composta a partir de dados de expectativa de vida ao nascer (longevidade), educação

(alfabetização e taxa de matrícula), e renda (PIB per capita), os quais são recolhidos em nível nacional (REZENDE *et al.*, 2005).

Lisbôa *et al.* (2020) destacam que questões relacionadas ao grau de desenvolvimento de um local, tais como: grau de urbanização, características populacionais, culturais, capacidade municipal de investimento, podem ser determinantes para selecionar uma tecnologia de tratamento de águas residuais.

A escolha desse indicador deu-se devido à facilidade de encontra-lá, aliado ao fato de que os indicadores levados em conta serem adequados para avaliar as condições de desenvolvimento de núcleos sociais menores, bem como grandes centros urbanos (ABDON BATISTA, 2009).

### 2.5.2 Densidade demográfica

A densidade demográfica pode influenciar diretamente no coeficiente de retorno, que é a relação entre o volume de esgotos recebido na rede coletora e o volume de água efetivamente fornecido à população. Em áreas centrais de alta densidade populacional os valores de coeficiente de retorno tendem a ser mais elevados, enquanto em áreas residenciais com muitos jardins, geralmente, são menores.

Lisbôa *et al.* (2020) apontam uma clara tendência de que a tecnologia que apresentar menor demanda por área seja a preferida em uma seleção em local densamente habitado. Uma vez que se deve maximizar a importância por espaço, posto que, em geral, a pouca oferta de terrenos e por consequência maior valorização de área urbana.

Sendo assim, a densidade demográfica pode indicar diferentes soluções de sistemas de tratamento. O sistema coletivo, por exemplo, também conhecido como dinâmico, é altamente indicado para locais com elevada densidade populacional (NUCASE, 2008).

Zeng *et al.* (2007) destacaram essa particularidade como determinante para a avaliação dos decisores a cerca do peso dos critérios de seleção, e por consequência fator decisivo na seleção da tecnologia de tratamento.

Através do estudo desta particularidade é possível também verificar as características do local, quanto ao volume de geração de efluentes, bem como, avaliar os locais adequados para o descarte seguro de águas residuais urbanas por meio do tratamento e reutilização de efluentes (KANWAL *et al.*, 2020).

### 2.5.3 Capacidade de geração

Um centro urbano ou uma pequena comunidade produz diferentes quantidades de efluentes líquidos. Esse volume de efluentes gerados refere-se a capacidade de geração, ou vazão de geração. Segundo Gherghel *et al.* (2020) a capacidade de geração, ou o porte da estação de tratamento de efluentes influencia diretamente nas opções de tecnologias sugeridas para cada cenário de acordo com esta particularidade.

O cálculo da capacidade de geração pode ser estimado de acordo com o consumo de água per capita, conforme sistema de abastecimento (NETO, 1996). Ou seja, a água utilizada é transformada em água residuária (esgoto sanitário), o conhecimento disto possibilita a determinação do volume produzido de esgoto sanitário.

Para que o cálculo seja feito de forma assertiva devem ser considerados aspectos tais como: clima, os hábitos e padrão de vida da população, demandas sazonais, entre outras variações que interfiram no consumo de água ou na geração direta de esgoto.

Cerca de 80% da vazão da água de abastecimento é transformada em água residuária, o que no cálculo da vazão de esgoto é denominado de coeficiente de retorno, o qual está também relacionado com a densidade da população (LEME, 1977; CHERNICHARO *et al.*, 2015). De acordo com Metcalf (2003) as vazões de águas residuárias domésticas podem também ser determinadas a partir da densidade da população em função da contribuição média per capita de consumo de água.

### 2.5.4 Número de habitantes

As obras de saneamento devem ser projetadas para atender a uma determinada população, em geral maior que a atual, o que corresponde ao crescimento demográfico em um determinado período de tempo, chamado de horizonte de projeto. Definido o horizonte de projeto, faz-se necessário conhecer a população de projeto, ou seja, a população que se espera encontrar na localidade ao fim do período admitido.

Deste modo, esta particularidade versa sobre a População atendida e atendível pela estação de tratamento. A qual pode ser determinada através de métodos de estudo de crescimento populacional, com base nos dados fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE.



Diversos são os métodos aplicáveis para o estudo de crescimento populacional, tais como: Crescimento Aritmético; Crescimento Geométrico, Método de Regressão Matemática, Método do Crescimento e Método da Previsão. O estudo da evolução da população urbana deve ser conduzido através de mais de um método, juntamente com a análise comparativa dos resultados (TSUTIYA, 2000).

De acordo com Markov *et al.* (2017) e Gherghel *et al.* (2020) a seleção das tecnologias de tratamento a serem consideradas varia em função do número de habitantes, onde pequenas comunidades com população inferior a 2 mil habitantes podem ter sistemas mais simplificado, ao passo que isso se modifica conforme o número de habitantes aumenta.

### 2.5.5 Relevô

As variações do tipo de relevô do local ao qual a estação de tratamento será implementada podem incorrer em custos adicionais para o transporte de águas residuais para o sistema de tratamento ou disposição final e tornar todo o sistema menos viável no longo prazo (KANWAL *et al.*, 2020).

Ponderando o relevô na fase inicial de planejamento é possível garantir que os fatores locais diretamente ligados a isto também sejam considerados, tais como: clima, tipo de solo, permeabilidade e, condições hidrológicas, entre outros (JAVAHERI *et al.*, 2006; RAHIMI *et al.*, 2019). Bem como garantir a adequabilidade ambiental dos locais selecionados sob o ponto de vista geomorfológico.

Sendo assim, em decorrência da morfologia que o relevô apresenta, podem ser sugeridas mais estações de tratamento de esgotos, por consequência diferentes modelos de gestão das águas residuárias, e por fim sistemas de tratamento diferentes.

O tipo predominante de relevô pode ser consultado através da análise do plano diretor de cada cidade. Esta classificação é feita com base nas suas características principais, dividindo-o em quatro principais formas de relevô: as montanhas, os planaltos, as planícies e as depressões (AB'SABER, 1960).

As montanhas são formas de relevô que se caracterizam pela elevada altitude em comparação com as demais altitudes da superfície terrestre. Geralmente com baixas temperaturas embora alta exposição ao sol, ventos fortes e baixa taxa de ocupação (FARIA, 2005). Markov *et al.* (2017) destacam que estações de tratamento localizadas em montanhas tendem a ter padrões de lançamento menos restritivos, desde que estudos detalhados indiquem

que tais descargas não afetam adversamente o meio ambiente, uma vez que a aplicação de tratamentos biológicos é difícil, especialmente em função das baixas temperaturas.

Os planaltos são definidos como áreas mais ou menos planas que apresentam médias altitudes, delimitações bem nítidas, geralmente compostas por escarpas, e cercadas por regiões mais baixas, com elevada densidade de canais de drenagem (ROSS, 1985).

As planícies são áreas planas e com baixas altitudes, normalmente muito próximas ao nível do mar. Encontram-se, em sua maioria, próximas a planaltos, formando alguns vales fluviais ou constituindo áreas litorâneas. Maior ocorrência de pântanos devido a baixa taxa de infiltração no solo (ROSS, 1985). E por fim depressão, são áreas rebaixadas que apresentam as menores altitudes da superfície terrestre, geradas por sedimentos advindos de processos erosivos.

Além disso, dados como taxa de percolação, profundidade e espessura do solo, profundidade do lençol freático, declividade do terreno e camada impermeável do solo precisam ser avaliados para escolha do melhor sistema (HUNT, 2013; BERNAL, 2018)

Segundo Ouyang *et al.* (2015) as características do tipo de solo podem ser consideradas requisitos externos para melhor desempenho da alternativa. Por exemplo, lagoas de estabilização devem ser estabelecidas em solos impermeáveis para minimizar a percolação, enquanto outros sistemas não são tão rígidos quanto à permeabilidade do solo. Ou o contrário no caso do processo de escoamento superficial, ou infiltração, os quais precisam de solos com maior permeabilidade.

Ashley *et al.* (2008) destacam que o declive pode influenciar nos custos para as obras de tratamento de forma positiva ou negativa, bem como, afetar os padrões de drenagem de uma grande parte da bacia. Ocasionalmente inundações ou secas, além de que em condições de tempestade, a formação de lagoas é predominante em áreas planas impermeáveis, o que pode influenciar sistemas de lagoas, por exemplo. Em áreas inclinadas, a água de superficial flui livremente, propiciando sistemas de escoamento superficial. Portanto este aspecto é fundamental para caracterização do cenário adequada seleção do sistema de tratamento de efluentes.

#### 2.5.6 Aspectos Climáticos

Restrições climáticas devem ser consideradas uma vez que estas podem comprometer e afetar o desempenho dos sistemas de tratamento (KARIMI *et al.*, 2011; OUYANG *et al.* 2015;

MARKOV *et al.*, 2017). A temperatura é um exemplo, esta afeta a taxa de reação dos processos mais biológicos, além disso, acelera a geração de odor e também limitar a dispersão atmosférica (REFSGAARD, 2003; OLIVEIRA, 2004; HUNT, 2013; Von SPERLING, 2014).

O processo de tratamento biológico dos esgotos consiste, basicamente, na conversão da matéria orgânica em produtos finais estabilizados mediante reações bioquímicas aeróbias ou anaeróbias. Esta conversão é conhecida como estabilização da matéria orgânica.

De acordo com Von Sperling (2014), os principais organismos envolvidos no tratamento dos esgotos são as bactérias, protozoários, fungos, algas e vermes. Dentre estes, as bactérias são, sem dúvida, os mais importantes na estabilização da matéria orgânica.

Neste sentido, a temperatura ambiente interfere diretamente no desenvolvimento dos processos de tratamento de esgoto. Segundo Ouyang *et al.* (2015) geralmente os aspectos climáticos são incluídos nos fatores técnicos, e são empregados para avaliar o desempenho operacional, bem como os requisitos externos. Os autores citam como exemplo os reatores de fluxo rápido e o sistema wetlands como não sujeitos à variação sazonal, enquanto o sistema de taxa lenta e fluxo superficial apenas operam bem nas estações mais quentes.

Nos digestores anaeróbios, por exemplo, a diminuição da temperatura pode provocar um efeito adverso sobre a intensidade do contato entre o substrato e o lodo biológico, um dos pré-requisitos para um tratamento eficiente (LETTINGA *et al.*, 1993).

Além disso, a temperatura afeta a produção de biogás. No esgoto, a baixas temperaturas, a fração dissolvida pode representar até 50% da quantidade produzida total (CHERNICHARO *et al.*, 2015).

Segundo Santos e Van Haandel (2018) quando a temperatura do esgoto é baixa, a taxa de hidrólise diminui, havendo, portanto, aumento da massa do material biodegradável particulado promovendo o aumento na produção de lodo.

Ou seja, todas as reações físicas, químicas, e biológicas, envolvidas nos processos de decomposição da matéria orgânica são diretamente influenciadas pelo clima e as condições ambientais do local.

### 2.5.7 Destinação Final

De acordo com Markov *et al.* (2017) uma pergunta fundamental na etapa inicial de caracterização do local é que nível de tratamento deve ser estabelecido para fornecer o nível

adequado de proteção ambiental. A resposta desta pergunta esta diretamente associada à disposição final do efluente.

Ao final do tratamento a disposição dos efluentes pode ser conduzida de diferentes maneiras: reuso agrícola, reuso doméstico, reuso industrial, aplicação no solo, ou o mais comum no Brasil, descarte em corpos-d'água.

Conhecer a destinação final do efluente tratado é muito importante para definição do nível de tratamento esperado para o sistema (KARIMI *et al.*, 2011). A destinação final deve ser previamente definida na concepção básica do projeto, uma vez que isto influencia no grau de tratamento e qualidade dos efluentes tratados. Saiani (2007) e Leoneti (2009) destacam a carência dessas informações em projetos já estabelecidos.

Conhecer a finalidade ao qual será disposto o efluente final implica diretamente nos objetivos do problema, e por fim, influencia na tomada de decisão. Sendo assim, a seleção da tecnologia de tratamento é diretamente influenciada pela destinação final. Por exemplo, em uma situação que exige reaproveitamento direto de águas residuais tratadas, tecnologias com maior potencial para remoção de patógenos serão pré-selecionadas pela metodologia de tomada de decisão. Conforme previamente destacado por Kalbar *et al.* (2012) a metodologia de tomada de decisão quando aplicada em cenários com reaproveitamento de efluente, selecionam tecnologias com maior potencial para produzir efluentes com maior qualidade.

Portanto, para a adequada seleção de um sistema de tratamento deve-se considerar o nível de tratamento e eficiência de remoção almejados, tais como requisitos fundamentais para a definição dos processos e operações englobadas na unidade de tratamento.

#### 2.5.8 Modelos de gestão

Segundo Markov *et al.* (2017) entender que tipo de operações e processos unitários devem ser empregados para realizar o tratamento do esgoto é outra das primeiras perguntas que os planejadores municipais, e engenheiros de processo e de projeto devem responder.

A concepção dos sistemas de tratamento pode ser dividida em 3 modelos de gestão de águas residuárias, são eles: centralizados ou convencionais; descentralizados; e individuais.

Os sistemas centralizados são sistemas que atendem a diversas localidades, possuindo tratamento centrado em uma única e grande estação de tratamento, subdividida em unidades responsáveis por coletar, transportar, reunir, tratar e dispor, no ambiente, os efluentes residenciais, comerciais e industriais (NUVOLARI, 2003).

O sistema centralizado é caracterizado pela complexidade, robustez estrutural e operacional, custos elevados e alta relação custo-benefício. Geralmente indicados para locais com elevada densidade populacional (Von SPERLING, 2014), e/ou para locais com condições topográficas adversas (MASSOUD *et al.*, 2009).

Os sistemas descentralizados normalmente utilizam sistemas convencionais simplificados que englobam técnicas mais simples e compactas de tratamento. De acordo com Oliveira Junior (2013) uma diferença fundamental na concepção desses sistemas, está no fato de que o sistema descentralizado requer a separação dos efluentes industriais.

O sistema descentralizado apresenta-se como uma alternativa intermediária entre os sistemas individuais e centralizados (NHAPI, 2004). O qual possui benefícios, tais como, baixo custo (USEPA, 2005) e flexibilidade no gerenciamento (OLIVEIRA JUNIOR, 2013).

Os sistemas individuais buscam atender um único imóvel, ou um pequeno conjunto de imóveis. Possui como características o tratamento simplificado e em alguns casos eficiência limitada. Embora não comumente utilizados no mundo (KANWAL *et al.*, 2020), estudos têm demonstrado vantagens do tratamento individual sobre outras tecnologias convencionais em termos de custos de operação e manutenção, baixo consumo de energia, robustez e simplicidade (ZHANG *et al.*, 2012; WU *et al.*, 2014).

Tanto os sistemas descentralizados quanto os individuais são indicados para locais com baixa ocupação populacional, como em loteamentos e em meios rurais, e também em áreas com topografia desfavorável à execução de um sistema convencional.

Cada sistema possui suas características técnicas e operacionais, e a análise e discussão de suas principais propriedades, relação custo/eficiência, aplicabilidade e outros elementos de avaliação são imprescindíveis para a correta avaliação das alternativas de tratamento, e por fim a tomada de decisão.

#### 2.5.9 Caracterização do afluente

Esgotos domésticos são uma mistura complexa de componentes sólidos e dissolvidos, geralmente produzidos em pequenas quantidades por residências, edificações comerciais, instituições privadas de pequeno e médio porte ou quaisquer edificações com banheiros, lavanderias e cozinhas, que são os principais geradores de esgoto doméstico, juntamente com uma pequena porção de água de chuva a qual infiltra no sistema (Von SPERLING, 2014).

As características dos esgotos estão diretamente associadas ao uso ao qual a água foi submetida, os quais variam de acordo com uma série de fatores tais como: clima, situação socioeconômica, hábitos da população, nível de saúde pública e condições sanitárias.

A adequada caracterização auxilia na escolha da tecnologia de tratamento mais apropriada, além de fornecer informações básicas para avaliação do desempenho do sistema (HUNT, 2013). Segundo Markov *et al.* (2017) o projetista tem como questão mais importante definir a coleta e análise das características do afluente de forma precisa e organizada. Essas informações são dados essenciais de entrada do modelo proposto pelos autores.

Von Sperling (2014) descreve a qualidade do efluente em parâmetros físicos, químicos e biológicos. Sendo eles temperatura, cor, odor e turbidez utilizados para a caracterização física. Ao passo que sólidos totais (em suspensão, dissolvidos e sedimentáveis), matéria orgânica (DBO<sub>5</sub>, DQO, COT), nitrogênio total (nitrogênio orgânico, amônia, nitrito e nitrato), fósforo (orgânico e inorgânico), pH, alcalinidade, cloretos, óleos e graxas são parâmetros utilizados para a caracterização química. Enquanto os parâmetros relacionados às bactérias, fungos, protozoários, vírus e helmintos são utilizados para caracterização biológica do afluente.

Markov *et al.* (2017) adiciona ao estudo de caracterização as taxas de fluxo e poluição esperadas, bem como futuras alterações ao final do horizonte de projeto da planta, resultando em projeções futuras nos dados de entrada.

Sendo assim, as características do afluente são extremamente importantes e devem ser consideradas na definição dos processos de tratamento e sua operação adequada (OLIVEIRA, 2004; Von SPERLING, 2014).

## **2.6 Eixos de avaliação**

Os critérios para seleção do sistema de tratamento devem ser escolhidos de modo cauteloso. A adequada definição dos critérios é fundamental para garantir a qualidade da decisão, uma vez que esses são os atributos que compõem os eixos de avaliação (CAMPOS, 2011).

Outro aspecto importante é o nível de aprofundamento dado aos critérios, a fim de que se garanta a tomada de decisão mais apropriada (LEONETI *et al.*, 2010). Assim, o equilíbrio e a escolha do máximo de critérios possíveis dentro dos aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais, é uma forma de garantir a seleção da alternativa mais adequada para a escolha do

sistema de tratamento de esgotos sanitários (REFSGAARD, 2003; ASHLEY *et al.*, 2008; KALBAR *et al.*, 2012a; Von SPERLING, 2014; MOLINOS-SENANTE *et al.*, 2014).

Embora existam alguns trabalhos que busquem definir critérios fixos que garantam a sustentabilidade no planejamento e gestão de sistemas de águas residuárias, Ashley *et al.* (2008) demonstram em seu trabalho que definir os critérios apropriados pode ser problemático, pois depende de um conjunto de variáveis, tais como: os decisores, os objetivos do projeto, bem como as particularidades do contexto.

Contudo, os autores apresentam como benefício, a estruturação previamente definida das dimensões da sustentabilidade, a fim de garantir que todas elas sejam devidamente contabilizadas, mantendo a flexibilidade na seleção de critérios. Com base nisto, este trabalho buscou definir quatro dimensões de avaliação, são estas: econômica, técnica, ambiental e social.

#### 2.6.1 Dimensão econômica

Nagel e Meyer (1999) definem que soluções tecnológicas adequadas levam em conta a economia, uma vez que a redução do consumo de matérias-primas, de energia, reciclagem ou reutilização de produtos são também soluções sustentáveis. Sendo assim o processo de seleção de uma tecnologia deve se basear em avaliações que minimizem custos e maximizem benefícios (HARDISTY *et al.*, 2013; LISBÔA *et al.*, 2020).

De acordo com Von Sperling (2014) em países desenvolvidos, os critérios que são considerados críticos na seleção de um sistema de tratamento são a eficiência, confiabilidade, disposição do lodo e a área necessária. Em contrapartida nos países em desenvolvimento, os itens críticos são os custos de construção, sustentabilidade, custos operacionais e a simplicidade da tecnologia.

Segundo Zeng *et al.* (2007), as alternativas de tratamento de águas residuais são geralmente comparadas basicamente com os dados econômicos fornecidos no relatório de viabilidade econômica do Projeto de Tratamento de Águas Residuais, onde a melhor alternativa é definida como sendo aquela que apresenta menor investimento inicial e menor custos de operação e manutenção, sem maiores detalhamentos, o que pode gerar escolhas inadequadas.

Em Lee *et al.* (2013) é claramente visível a importância de análises de sistemas de tratamento rentáveis, nos quais a maioria dos critérios que foram tomados se baseiam em análises de critérios de custos.

Para Souza (1998) as metodologias auxiliares na seleção de processos de tratamento de águas residuárias, com base em otimização, empregam a abordagem econômica, com o custo sendo normalmente o fator decisório. Hunt (2013), concluiu em seu trabalho que frente à falta de investimento em saneamento, o fator econômico é prioritário no Brasil.

No trabalho realizado por Leoneti (2009), em 40% dos casos a escolha da alternativa de menor valor monetário não se alterou com a adição do novo critério, o que demonstra a representatividade do valor econômico na escolha da tecnologia para o modelo proposto, todavia, 60% das escolhas mostraram-se variáveis, quando adicionados outros critérios para a escolha o que ressalta a importância do estudo de critérios.

Decisões inapropriadas apresentam alto impacto no aspecto de custos, o que resulta em pressão econômica, mesmo em países desenvolvidos (TSAGARAKIS *et al.*, 2002; KALBAR *et al.*, 2012a). Neste sentido, estudar o critério de custo, seus subcritérios e impactos, torna-se relevante.

### 2.6.2 Dimensão Ambiental

O crescente uso dos recursos naturais tem ocasionado enormes problemas de degradação dos ecossistemas gerando complexos sistemas de decisão os quais devem envolver critérios não apenas econômicos, mas também os aspectos ambientais (MOLINOS-SENANTE *et al.*, 2013).

Neste sentido, o tratamento eficiente e adequado de efluentes desempenha papel fundamental na proteção do meio ambiente e manutenção da qualidade ambiental (ASHLEY *et al.*, 2008; GARRIDO *et al.*, 2013). Uma vez que o tratamento busca reduzir o nível de poluentes antes que as águas residuais possam ser seguramente devolvidas ao meio ambiente (DURSUN, 2016).

Entretanto, não é possível assegurar o menor impacto ambiental apenas garantindo a eficiência imediata dos serviços de esgotamento. É imprescindível que outros critérios sejam avaliados. Nos últimos anos enormes investimentos em tecnologias e processos destinados a recuperar ou eliminar poluentes, vêm sendo desenvolvidas. Contudo, muitas vezes envolvendo o uso de grandes quantidades de energia e geração de resíduos excessivos, o que por sua vez pode ser insustentável (ASHLEY *et al.*, 2008).

Massoud *et al.* (2009) afirmam que as questões ambientais nem sempre têm alta prioridade à luz dos graves problemas sociais, políticos e econômicos que a maioria dos países



em desenvolvimento enfrenta. Contudo, os autores destacam que é importante que as políticas ambientais sejam integradas ao planejamento do desenvolvimento e consideradas como parte fundamental para a estrutura geral do planejamento econômico e social.

Portanto, considerar os critérios ambientais com profundidade, considerando as inter-relações com as demais dimensões é fundamental para atingir uma avaliação sustentável. Ashley *et al.* (2008) enfatizam a importância da utilização de ferramentas que auxiliem o desenvolvimento de projetos com visão holística, integrando diferentes critérios e indicadores, simultaneamente. Portanto, o sistema de tratamento ideal deve estar, entre outros aspectos, associado à baixa taxa de poluição, custos mínimos e máximo benefício social e cultural (ZENG *et al.*, 2007).

### 2.6.3 Dimensão tecnológica

Alsina *et al.* (2008) enfatizam a necessidade de que a tomada de decisão considere simultaneamente os critérios econômicos sociais e ambientais, mas também inclui os aspectos técnicos como sendo parte fundamental na avaliação das alternativas, embora tradicionalmente esta dimensão não componha os três pilares fundamentais da sustentabilidade, os autores reforçam a necessidade de que a dimensão seja avaliada na decisão.

Do mesmo modo que Balkema *et al.* (2002) reforçam a importância de considerar os indicadores técnicos para determinam com eficácia a melhor solução. Bem como Karimi *et al.* (2011) que considerou nove critérios nesta dimensão, a qual nomeou de dimensão técnica ou administrativa.

Conforme Hunt (2013), em certos casos, o indicador técnico pode ser tratado como uma restrição e não um critério, uma vez que não há como implementar uma tecnologia de forma eficaz se ela não for uma solução satisfatória na percepção do usuário final. Hunt (2013) também verificou em seu trabalho que, os critérios econômicos e tecnológicos são priorizados no Brasil.

Os critérios que compõem esta dimensão tecnológica devem ser constituídos de indicadores que definam os requisitos técnicos mínimos para garantir a funcionalidade e operação do sistema de tratamento.

#### 2.6.4 Dimensão social

Questões ambientais, segundo Refsgaard (2006), não podem ser simplesmente resolvidas sem considerar aspectos sociais, é imprescindível um modelo participativo para encontrar soluções, uma vez, que as consequências não afetam apenas um indivíduo, mas toda a comunidade.

Uma série de indicadores de qualidade econômica e ambiental tem sido amplamente utilizadas para avaliar os sistemas de tratamento. Tem havido um esforço crescente para incorporar a ideia de sustentabilidade na avaliação das tecnologias de tratamento nas últimas duas décadas (MOLINOS-SENANTE *et al.*, 2015). Neste sentido, a incorporação dos aspectos sociais é fundamental.

O objetivo desta dimensão, segundo Balkema *et al.* (2002) é proteger as necessidades sócio-culturais e espirituais dos indivíduos. Garantindo assim que os indivíduos se conectem, se estabeleçam e se organizem em comunidade.

De acordo com Balkema *et al.* (2002) e Ashley *et al.* (2008) os critérios sociais são talvez os mais difíceis de mensurar, especialmente porque muitos deles são qualitativos. Em função disto, os autores destacaram que durante o processo de mapeamento de decisão, os critérios sociais são raramente utilizados.

Entretanto, Balkema *et al.* (2002) destacam que esses indicadores desempenham um papel importante na implementação da tecnologia, especialmente, quando o usuário final está diretamente envolvido, como é o caso de soluções em pequena escala tratamento no local.

Ashley *et al.* (2008) enfatizam a importância e a necessidade de garantir a conexão com a comunidade, através da avaliação das opiniões sobre o valor dos indicadores sociais. Sendo assim, os autores sugerem que a coleta de informações para esta dimensão seja conduzida por meio de pesquisas quantitativas, através da utilização de grupos de foco, questionários, contato com representantes da comunidade, e pesquisas de porta em porta.

Refsgaard (2006) aponta como sendo apropriada a utilização das ferramentas multicritério em um processo de aprovação e participação pública, por exemplo. Através da qual, é possível apresentar uma análise bem estruturada e transparente do problema, além de promover uma avaliação de valor, mesmo sendo realizada por leigos.

Onde não há participação das partes interessadas, soluções eficientes podem ser perdidas se os critérios adequados não forem selecionados (REFSGAARD, 2006). Sendo assim, o processo de seleção deve estabelecer algumas regras para inclusão de diferentes atores da sociedade no processo decisório, a fim de garantir a participação de todas as partes interessadas.

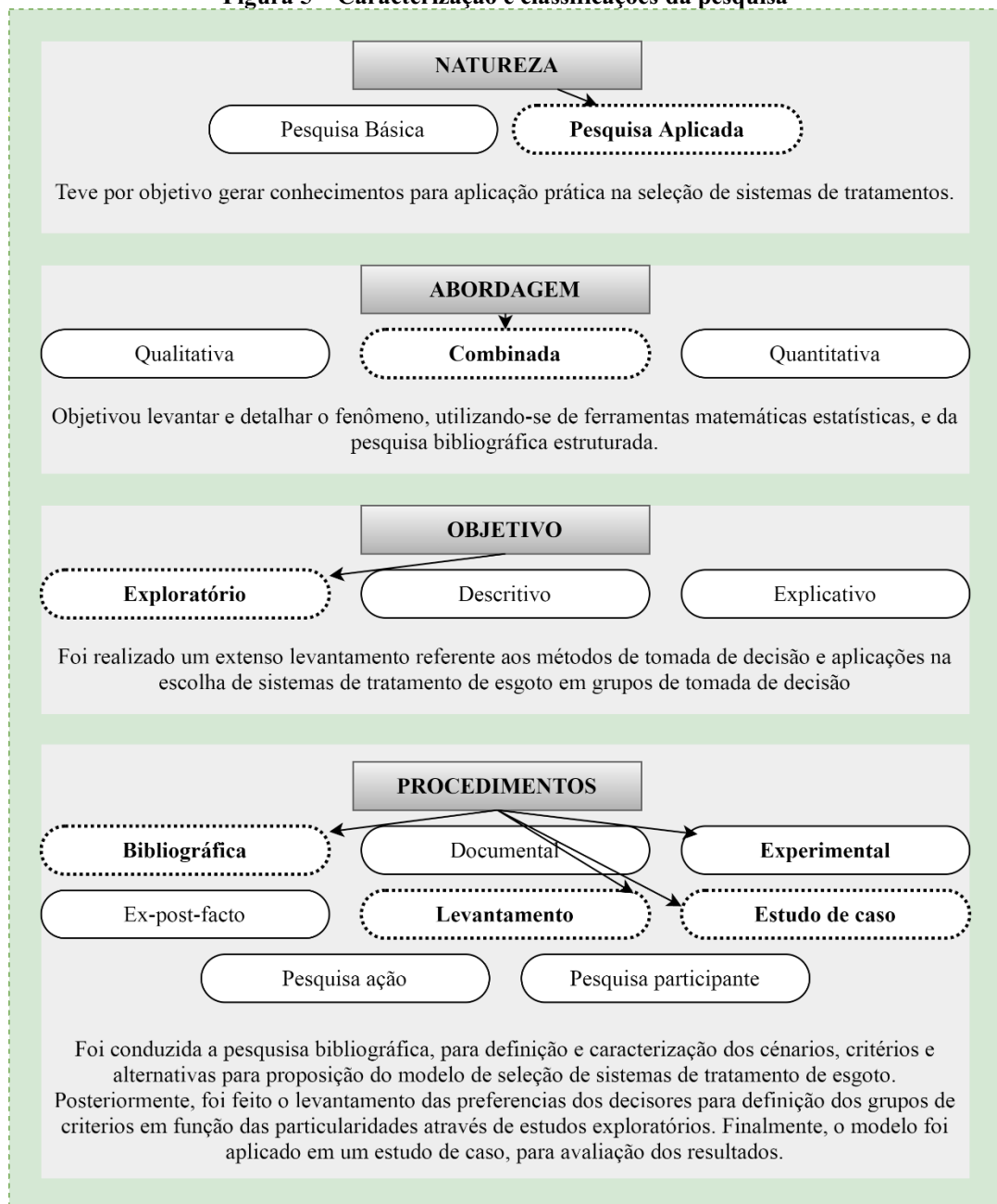
### **3 METODOLOGIA**

Neste capítulo apresentam-se os métodos aplicados para construção e aplicação do modelo proposto, incluindo o enfoque da pesquisa, bem como, as técnicas necessárias para atingir os objetivos do trabalho. Em seguida, são apresentadas as etapas referentes ao desenvolvimento do modelo e aplicação do modelo proposto de priorização. Posteriormente, é demonstrado o procedimento de análise de sensibilidade para verificação das respostas do modelo.

#### **3.1 Classificação da pesquisa**

Existem diversas formas de classificação de pesquisas. De acordo com Cauchick *et al.* (2012) a pesquisa pode ser classificada quanto à natureza (pesquisa básica e aplicada), quanto à abordagem do problema (pesquisa quantitativa, pesquisa qualitativa, abordagem combinada), quanto ao objetivo (exploratória, descritiva e explicativa) e quanto aos procedimentos técnicos (bibliográfica, documental, experimental, ex-post-facto, levantamento, estudo de caso, pesquisa ação e pesquisa participante). Conforme estas classificações, a Figura 5 apresenta a caracterização deste trabalho.

**Figura 5 – Caracterização e classificações da pesquisa**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

### 3.2 Fases da pesquisa

Dentre as fases de pesquisa, a fase 1 consiste na coleta de dados e de informações. Na fase 2 é construído o modelo, sendo que na fase 3 este modelo é aplicado em três locais diferentes. Na última fase (fase 4), é realizada uma análise de sensibilidade do modelo.

A primeira fase da pesquisa foi a coleta de informações, a qual contemplou a seleção de um conjunto de artigos bem alinhados ao tema de estudo e ao portfólio bibliográfico. Para

isso, uma pesquisa estruturada da literatura foi conduzida, a fim de construir conhecimento a partir dos interesses e delimitações de pesquisadores acerca dos principais aspectos que têm sido considerados prioritários na definição de tecnologia de tratamento. A revisão sistemática da literatura foi conduzida de acordo com o *Methodi Ordinatio* (PAGANI *et al.*, 2015), que será posteriormente descrito.

Nesta fase, também foram conduzidas pesquisas em manuais descritivos de estações de tratamento já instaladas, foi realizada consulta às normas técnicas, diretrizes e regulamentações para projetos de saneamento, a fim de definir quais particularidades influenciam na caracterização dos cenários ao qual a estação será implementada.

Ainda na fase de coleta de informações (primeira fase), foram levantadas as principais tecnologias disponíveis no mercado, especialmente no mercado brasileiro, considerando as bases de dados governamentais e o levantamento bibliográfico. Foi considerado como fonte principal de pesquisa o trabalho elaborado por Von Sperling (2014), o qual que caracterizou as tecnologias de tratamento mais populares em países em desenvolvimento. Também foi considerada a classificação destas tecnologias proposta por Goffi *et al.* (2018).

O levantamento de critérios para seleção e avaliação das alternativas de tratamento, constituiu outra etapa importante dentro da fase de coleta de informações. Todos os critérios foram retirados do portfólio bibliográfico, e posteriormente, na fase de tabulação dos dados, foram classificados em quatro dimensões: econômica, ambiental, técnica e social. Os critérios foram definidos para cada dimensão de acordo com os trabalhos obtidos na revisão sistemática da literatura, sendo, portanto, aplicado o método de votação de Copeland, no qual os critérios mais preferidos pelos autores nos trabalhos foram selecionados.

Na fase de coleta de dados e informações foram levantados os principais métodos auxiliares para a seleção do sistema de tratamento, e em seguida, esses dados foram tabulados. Contudo, apenas na segunda fase (construção do modelo), foi possível conduzir a definição dos métodos multicritérios para tratamento das informações de maneira apropriada e pertinente aos dados do modelo.

Com base no levantamento dos dados foi construído o modelo de apoio a decisão. Para isso, utilizou-se o programa de planilhas eletrônicas Excel da Microsoft, por ser um aplicativo bastante difundido, e que permite que outros usuários utilizarem com uma maior facilidade. Futuramente, o modelo deverá ser transcrito para linguagem computacional.

Por fim, foi conduzida a aplicação do modelo (fase 3), proposto em três locais diferentes. Na fase 4 foi realizada a análise de sensibilidade de escores de preferência de critérios, a fim de verificar o quanto sensível foram as classificações diante de variações nos

valores de entrada. Essa análise foi realizada por meio da variação sistemática dos escores de preferência, onde cada critério teve seu peso dobrado mantendo constantes os demais.

### 3.3 Definição da base teórica

Segundo Zhang *et al.* (2015) a pesquisa bibliográfica é aplicada a diversos campos da ciência, a fim de avaliar tendências de pesquisa, por meio da investigação das características das publicações. Assim, o levantamento bibliográfico, quando realizado de forma estruturada, seguindo um conjunto ordenado de procedimentos, fornece uma base sólida de informações na área.

Dessa forma, a revisão da literatura destaca a importância dos critérios corretos na tomada de decisão. Isso enfatiza a relevância de uma avaliação cuidadosa e aprofundada, a fim de identificar os principais aspectos em diferentes cenários. Dessa forma, é possível obter melhores resultados com baixa variação e maior semelhança com as condições reais, o que permite o planejamento estratégico e aumenta a capacidade de tomada de decisão dos gestores.

A seleção da base foi feita de acordo com três aspectos: O site permite expressões booleanas; a busca pode ser realizada nos campos de título, resumo e palavras-chave das publicações; e, por fim, a possibilidade de baixar os resultados para um software de gerenciamento bibliográfico. Após as exclusões, as bases selecionadas foram: Science Direct, Scopus e Web of Science.

Existem vários métodos de pesquisa que podem ser usados para definir um portfólio bibliográfico, entre eles: Sistema de Gestão do Instituto de Pesquisa Central (MSCRI) (VINKLER, 1986), Colaboração Cochrane (NIGHTINGALE, 2009), Proknow-C (LACERDA; ENSSLIN, 2014), e o MethodiOrdinatio (PAGANI *et al.*, 2015), o qual foi selecionado para desenvolver a presente pesquisa.

Esta metodologia abrange 9 etapas de investigação, a qual foi adaptada para descrever a sequência desta pesquisa:

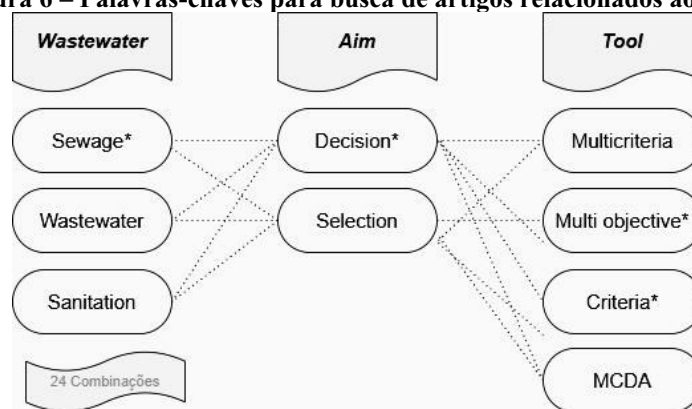
Etapa 1. Estabelecendo o tema de pesquisa: O presente estudo enfocou o tema de pesquisa: “Identificação de critérios para seleção de STR”.

Etapa 2. Pesquisa preliminar de palavras-chave em bancos de dados: Foi realizada uma pesquisa preliminar em repositórios (bancos de dados de trabalhos relacionados) previamente selecionados de acordo com o escopo e com literatura revisada por pares. Os principais repositórios disponíveis encontrados (bases científicas e sites de publicação online) para esta

pesquisa foram: Science Direct, Scopus e Web of Science. Os termos foram pesquisados inicialmente no título das obras, considerando-se período ilimitado, em todas as bases de dados e para qualquer tipo de documento.

Etapa 3. Combinação de palavras-chave: Para realizar a busca nas bases de dados selecionadas, é necessário definir os eixos de busca e palavras-chave. Como eixos de pesquisa anteriores, três expressões foram definidas: *Wastewater* (área de interesse), *Aim* (objetivo) e *Tool* (Ferramenta). Devido à existência de sinônimos, foram definidas as palavras-chave para cada eixo, o que gerou 24 combinações de busca, conforme mostra a Figura 6.

**Figura 6 – Palavras-chaves para busca de artigos relacionados ao tema**



**Fonte: A autoria própria (2022)**

Etapa 4. Busca nas bases de dados: nesta etapa foi utilizado o software de gerenciamento bibliográfico Mendeley, no qual foram extraídos os resultados da busca das combinações de palavras-chave nas três bases de dados selecionadas. Os resultados desta fase atingem um portfólio bibliográfico bruto de 1538 artigos. Logo a busca partiu de três eixos de busca: *Wastewater*, *Aim* e *Tool*, a partir da fixação desses eixos foram definidas 3, 2 e 5 palavras-chave respectivamente, gerando assim 10 combinações de busca. Para maximizar o retorno dos artigos na busca nas bases, foi utilizado o operador booleano “AND”, que considera a combinação de todas as palavras para encontrar o resultado, e também o caractere “\*” para cobrir as variações das palavras-chaves.

Etapa 5. Procedimentos de filtragem: No bibliográfico bruto foi aplicado um procedimento de filtragem para artigos repetidos, livros e conferências não relevantes e temas desalinhados, resultando em 351 artigos potenciais. Em seguida, também foram rejeitados os artigos cujo título, resumo ou palavras-chave não estivessem relacionados ao tema pesquisado, o que resultou em um total de 145 artigos alinhados ao tema pesquisado.

Etapa 6. Fator de impacto e relevância: Nesta fase foram verificados *Journal Citation Report* (JCR) e *SCImago Journal Rank* (SJR), ano de publicação e número de citações dos artigos no site Google Scholar.

Etapa 7. InOrdinatio: Após transferir os dados da etapa 6 para a planilha, a equação InOrdinatio (PAGANI *et al.*, 2015; 2018) foi aplicada, conforme mostrado na Equação 1:

$$InOr = \{FI / 1000\} + \{\alpha [10 - (Ry - Py)]\} + \{Nc\} \quad (1)$$

Onde:

*FI*: Fator de impacto;

$\alpha$ : Peso do ano;

*Ry*: Ano da pesquisa;

*Py*: Ano da publicação;

*Nc*: Número de citações.

Na sequência, os artigos foram classificados em ordem decrescente pelo Índice de InOrdinatio e foram selecionados aqueles que apresentavam índice igual ou superior a 50.

Etapa 8. Artigos completos: Com a classificação dos artigos, foram baixados 145 artigos selecionados para análise;

Etapa 9. Leitura final e análise sistemática dos trabalhos: Por fim, os 145 artigos selecionados foram lidos e analisados na íntegra, e 43 foram considerados para compor o portfólio bibliográfico final.

O Apêndice B apresenta os artigos finais resultantes da pesquisa de metodologia estruturada. Mostra ao lado do portfólio bibliográfico final, também o fator de impacto, número de citações, ano de publicação e o índice InOrdinatio. Esses artigos serviram de base para definição dos critérios, métodos de decisão, alternativas de tratamento, bem como, particularidades de cada cenário para avaliação e seleção do melhor sistema para a estação de tratamento de efluentes.

### 3.4 Multicritério

Na fase de construção do modelo foram utilizados diferentes métodos multicritério para o tratamento dos dados coletados. Sendo assim definido o método de COPELAND como o mais adequado para seleção dos critérios. O método ELECTRE TRI para definição de classes entre



as alternativas de tratamento. O método AHP para o levantamento de peso e Promethee para ordenação das tecnologias. E Promethee Gaia para análise de sensibilidade. Portanto, esta fase foi conduzida em cinco etapas. O enquadramento metodológico dos métodos utilizados é apresentado na Quadro 1.

**Quadro 1- Descrição dos métodos multicritério**

	<b>Etapa 1</b>	<b>Etapa 2</b>	<b>Etapa 3</b>	<b>Etapa 4</b>	<b>Etapa 5</b>
<b>Objetivo</b>	Definir grupo de critérios prioritários	Agrupar as alternativas em classes	Definição dos pesos	Ranquear as alternativas preferíveis	Avaliar o modelo
<b>Problemática</b>	P.α. Seleção	P.β. Classificação	P.γ. Ordenação	P.γ. Ordenação	Descrição
<b>Estrutura de preferência</b>	Pré-ordem Completa	Pseudo- ordem	Pré-ordem Completa	Pré-ordem parcial	-
<b>Natureza do problema</b>	Não compensatória	Não compensatória	Compensatória	Não compensatória	-
<b>Abordagem</b>	Sobreclassificação	Sobreclassificação	Critério único de síntese	Sobreclassificação	-
<b>Método</b>	<i>COPELAND</i>	<i>ELECTRE TRI</i>	<i>AHP</i>	<i>PROMETHEE</i>	<i>PROMETHEE GAIA</i>

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Na etapa 1 foi utilizado o princípio de votação de COPELAND para seleção do grupo de critérios essenciais para cada particularidade do cenário avaliado. Esta análise foi conduzida de acordo com os trabalhos obtidos por meio da revisão sistemática da literatura (D1), avaliação de especialistas (D2), e lista de critérios essenciais destacados por Von Sperling (2014) (D3). Sendo atribuído valor a cada critério em função do número de vezes que este constava para cada um dos 3 decisores (D1; D2; D3). Sendo assim, critérios fortemente preferíveis receberam 3 votos, portanto assumiram marcador “3”, critérios preferíveis, marcador “2”, critérios com preferência fraca, marcador “1”, e indiferentes, ou sem voto contabilizado, marcador “0”.

Na etapa 2 foi conduzido o agrupamento das alternativas de acordo com o método ELECTRE TRI. Nesta etapa foram definidos os pesos dos critérios relacionados à eficiência, com base nas indicações dos autores na literatura. Foi necessário um procedimento de normalização conforme cálculos apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1- Pesos para definição das classes de alternativas**

Critérios	Molinos-Senante	Molinos-Senante	Kanami	Soma	Peso $W_{(i)}$
	<i>et al.</i> , 2015	<i>et al.</i> , 2014	<i>et al.</i> , 2011	$\sum_{i=1}^n V_{W(i)}$	
- Remoção eficiente de matéria orgânica	31,15 %	29,14 %	45,50 %	1,0579	35,26 %
- Remoção de eficiência de sólidos suspensos	31,15 %	24,75 %	26,30 %	0,8220	27,40 %
- Remoção de eficiência de nitrogênio	18,85 %	21,36 %	14,10 %	0,5431	18,10 %
- Remoção de eficiência de fósforo	18,85 %	24,75 %	14,10 %	0,5770	19,23 %
Soma	100,00 %	100,00 %	100,00 %	$\sum_{j=1}^m V_{W(j)}$ 3,0000	100,00 %

Fonte: Autoria própria (2022)

Nesta etapa foram definidos os limites das classes, com base em apontamentos da literatura, conforme apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2 - Parâmetros para os limites entre as classes**

Classes	Profiles	Eficiência de remoção			
		$g_1$ Matéria orgânica	$g_2$ Sólidos	$g_3$ Nitrogênio	$g_4$ Fósforo
A Avançado	b <sub>2</sub>	95 %	90 %	75 %	50 %
B Intermediário					
C Simples	b <sub>1</sub>	80 %	75 %	55 %	45 %
Pesos		35.26 %	27.40 %	18.10 %	19.23 %
Direção de preferência		↑ Max	↑ Max	↑ Max	↑ Max

Fonte: Autoria própria (2022)

Uma vez definido os critérios de avaliação, inicia-se a aplicação do modelo. Nesta etapa faz-se a comparação par a par dos critérios com o objetivo de definir a importância relativa destes. Portanto, na etapa 3 foram definidos os pesos dos critérios utilizando o método AHP. Para gerar a matriz de comparações paritárias e por fim obter o vetor peso, o qual indica a importância relativa de cada critério em relação aos demais, foi utilizado o software *AHP PriorityCalculator*.

Para ranqueamento das alternativas foi utilizado o método PROMETHEE II, etapa 4. Segundo Lee *et al* (2013) este método de tomada de decisão garante o equilíbrio entre os critérios e permite classificar diferentes configurações, sob diferentes aspectos. O método foi

aplicado com o auxílio da ferramenta computacional Visual PROMETHEE 1.3 *Software - AcademicVersion*.

Foram obtidas as informações para cada métrica de desempenho de acordo com cada configuração, ponderando os diferentes cenários. As informações dos critérios foram obtidas pela análise de trabalhos específicos referentes a cada tecnologia, os quais foram selecionados da revisão de literatura. Também foram retirados dados do levantamento das características de cada sistema de tratamento realizado por Von Sperling (2014) e Goffi *et al.* (2018).

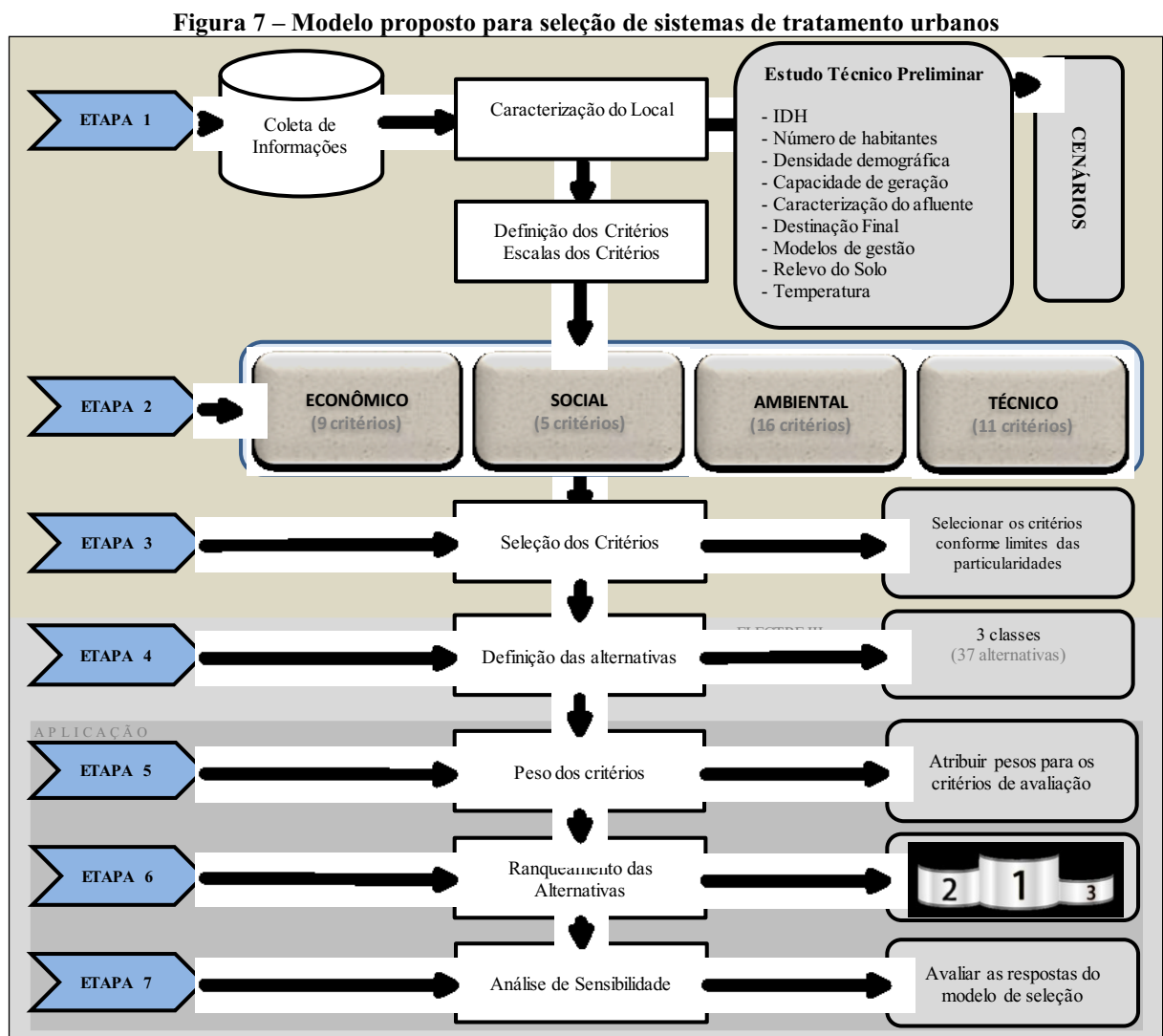
Em seguida, foram avaliadas as configurações de acordo com cada critério de uma maneira *pairwise*. Para cada comparação, uma pontuação de função de preferência foi calculada usando a função de preferência "usual", onde uma alternativa de configuração é pontuada com 1 se seu desempenho for superior à configuração alternativa emparelhada e com 0 se seu desempenho for equivalente ou inferior para a alternativa emparelhada. Cada comparação emparelhada recebe uma pontuação de função de preferência para cada critério.

Esses escores são multiplicados pelos pesos normalizados atribuídos a cada critério e somados para dar um único número para cada comparação. As somas ponderadas para cada configuração são somadas e divididas pelo número de configurações alternativas para calcular "fluxos de superação positiva" e "vazões de superação negativa". A classificação final baseia-se nos fluxos de ultrapassagem líquida, calculados como o fluxo positivo *outranking* menos o fluxo *outranking* negativo, esses fluxos são adimensionais e variam de -1 a +1.

## 4 MODELO DE SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO

Neste capítulo são apresentadas as particularidades, os critérios de decisão, as alternativas, bem como o modelo final de apoio à tomada de decisão, aplicado à definição estratégica do sistema de tratamento de efluentes sanitários.

Com base nas fases de pesquisa, foi elaborado o modelo proposto, conforme apresentado na Figura 7.



Fonte: Autoria própria (2022)

### 4.1 Caracterização do cenário

A combinação entre as particularidades pode compor diferentes cenários. Para cada particularidade avaliada foram definidos índices de fácil mensuração, acesso e compreensão.

A fim de tornar o modelo claro e simples de ser utilizado. A Figura 8 apresenta o levantamento das informações necessárias para caracterização dos cenários de avaliação.

**Figura 8 – Índices para caracterização das particularidades de cada local**

IDH	Número habitantes	Capacidade de geração	Densidade demográfica	Relevo do solo	Aspectos climáticos	Caracterização do afluente	Destinação Final	Tipo de Sistema
Baixo até 0,599	< 4 mil	Pequeno porte <60 L/s	Menos que 10	Montanha	Zona tropical	Fraco	Classe 1+ especial	Descentralizado
Médio 0,600 a 0,699	4 - 100 mil	Médio porte 60-200 L/s	10,1 a 25	Planalto	Zona temperada	Médio	Classe 2	Centralizado
Alto acima de 0,700	>100 mil	Grande porte >200 L/s	25,1 a 100	Planície	Zona polar	Forte	Classe 3	Combinado
			Mais do que 100	Depressão			Classe 4	
							Reuso direto	

Fonte: Autoria própria (2022)

A combinação desses índices pode resultar em mais de 58 mil cenários. A definição do cenário deve ser conduzida de maneira criteriosa e sistemática a fim de obter a melhor caracterização das variáveis relacionadas ao local ao qual o sistema de tratamento será implementado.

## 4.2 Critérios de seleção

Segundo Saaty (1994) para garantir a construção e aplicação do método, de forma eficiente, a correta seleção dos critérios é fundamental. Contudo, essa definição é um problema de alta complexidade, visto a heterogeneidade de indicadores disponíveis. Para isso, foram estabelecidas as prioridades para cada eixo de avaliação, bem como conduzidos estudos sobre os indicadores observados na literatura, a fim de verificar similaridades e ou diferenças nas definições dos indicadores.

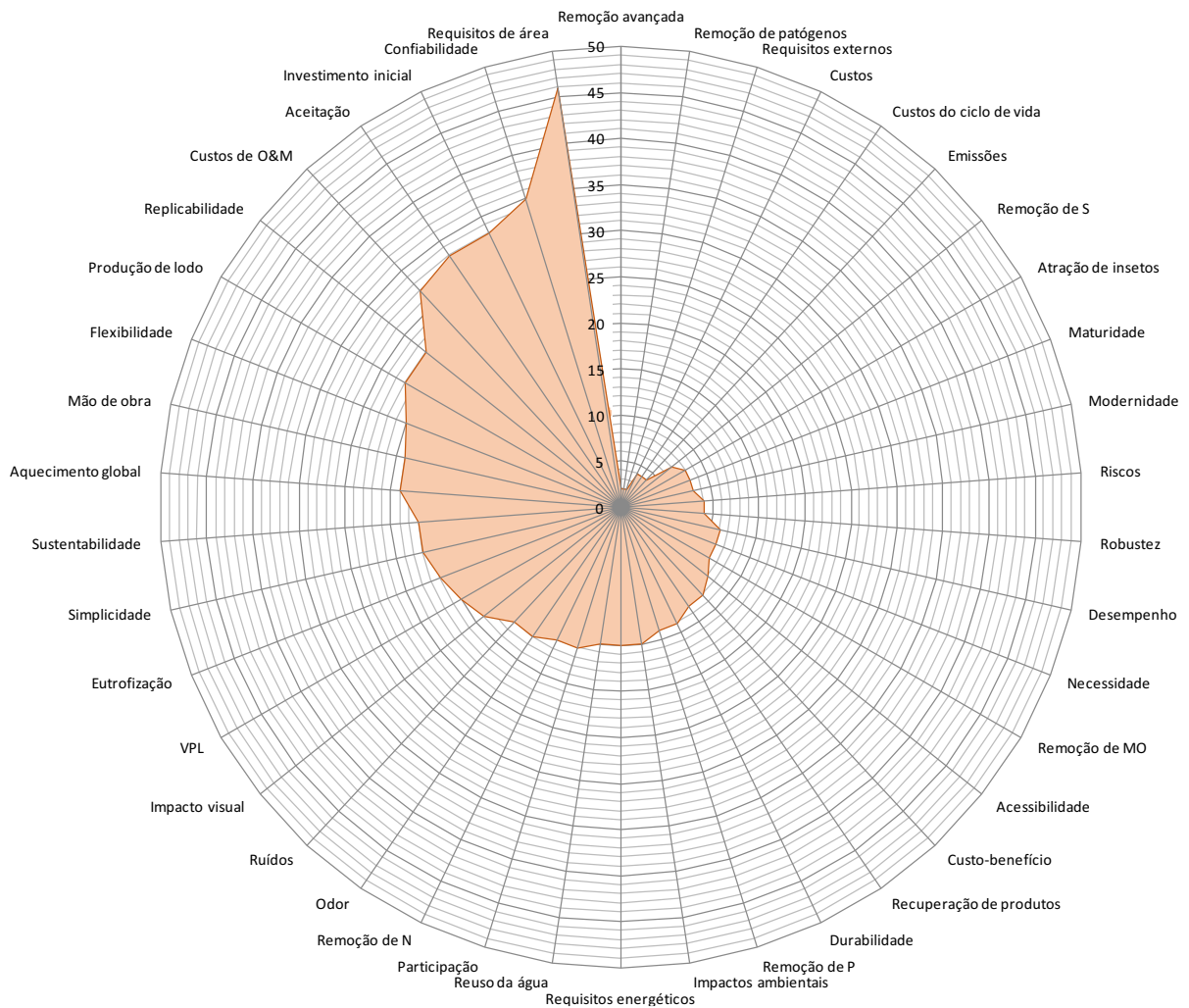
Para o modelo, foi realizada a divisão dos critérios nas categorias: técnica, ambiental, social e econômica. Entretanto, esta divisão não é rigorosa, ou mesmo essencial. Pode haver variação na classificação dos critérios, dependendo do ponto de vista do avaliador. Um critério determinado como técnico pode também ser ambiental, ou o contrário. Assim, em razão das interfaces do saneamento com outras áreas, existe uma dificuldade em se definir fronteiras para

os critérios considerados. Contudo, essas definições são importantes, pois fornecem uma visão mais ampla sobre a dimensão que o empreendimento pode abranger.

Também é importante destacar que a quantidade de critérios é utilizada geralmente como medida de simplificação do problema, sendo que a maioria dos estudos observados apresentou um número reduzido de critérios. Segundo Gomes (2012) não é recomendado o uso de muitos atributos em um mesmo nível de igualdade, pois isso dificulta a percepção das características mais significativas do problema.

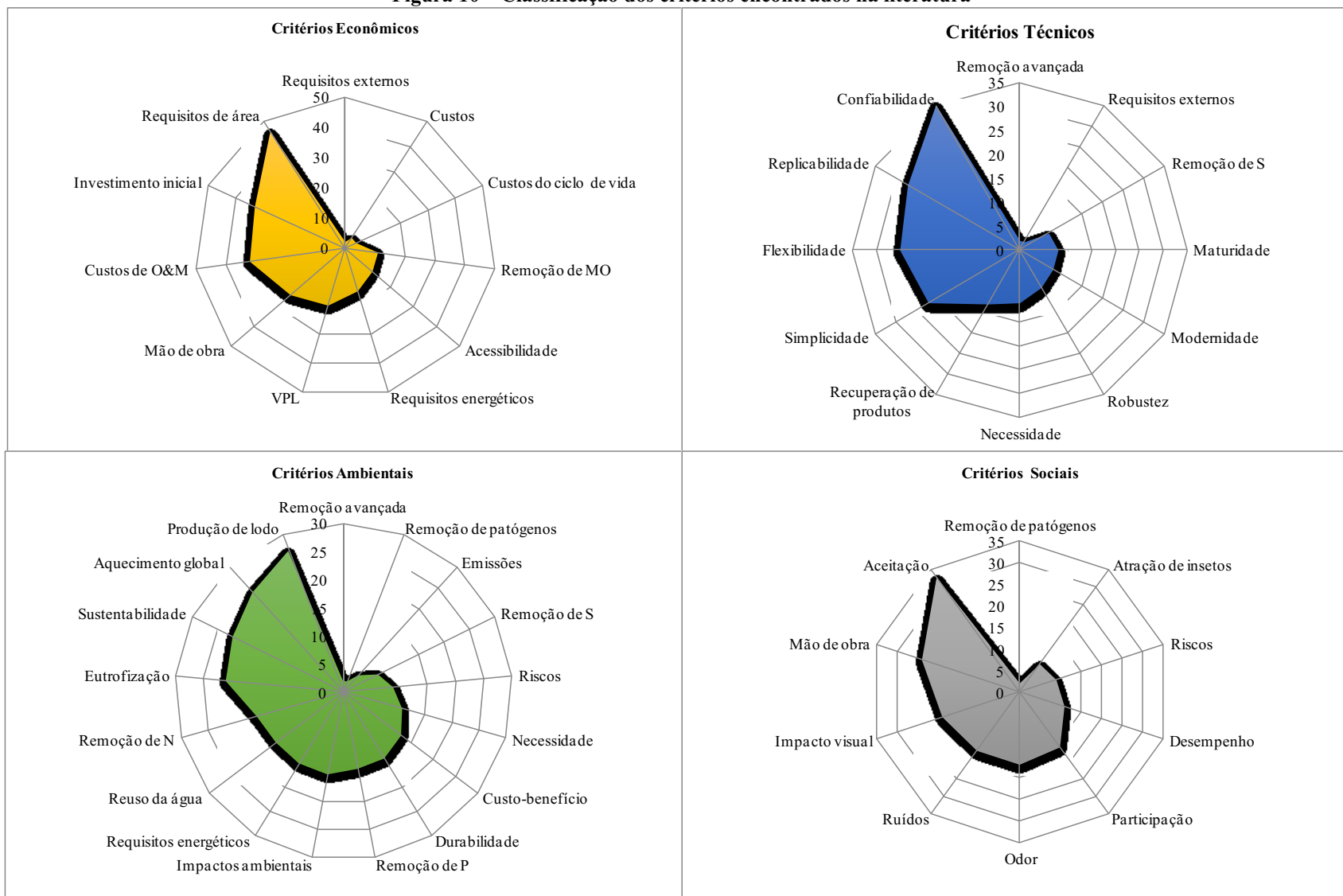
Foram observados 42 critérios na revisão de literatura (Tabela 3) os quais posteriormente foram agrupados em indicadores e classificados em quatro eixos de avaliação de acordo com seus objetivos (Figura 9, 10).

**Figura 9 – Critérios encontrados na literatura de seleção de sistemas de tratamento**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

**Figura 10 – Classificação dos critérios encontrados na literatura**



Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 3 - Critérios para seleção

Critérios	Fq.	Eixo de avaliação				Dir.	Classif.	Métrica
		E	T	A	S			
Investimento inicial	33	x				↓	Quanti	\$
Custos de Operação e Manutenção	32	x				↓	Quanti	\$/m3
Requisitos de área	23	x		x		↓	Quanti	m2/p.e.
Confiabilidade	20		x	x		↑	Quali	+/-
Complexidade	17		x		x	↓	Quali	+/-
Remoção de Fósforo	16		x			↑	Quanti	%
Requisitos energéticos	15	x	x	x		↓	Quanti	KWh/m3
Aceitação	15	x			x	↑	Quali	+/-
Odor	14				x	↓	Quali	+/-
Remoção de matéria orgânica	14		x	x		↑	Quanti	%
Remoção de nitrogênio	13		x	x		↑	Quanti	%
Lodo	13	x	x	x		↓	Quanti	kg/m3
Mão de obra	12	x			x	↓	Quanti	N. de pessoas
Flexibilidade	11		x			↑	Quali	+/-
Robustez	10		x			↑	Quali	+/-
Desempenho	10	x	x	x		↑	Quanti	%
Eutrofização Potencial	10			x		↓	Quanti	kg.P.eq./p.e.
Sustentabilidade	9	x		x		↑	Quali	+/-
Aquecimento global potencial	9			x		↓	Quanti	kg.CO2eq/p.e
Potencial para recuperar produtos	9			x		↑	Quanti	Produção/m3tratado
Impactos ambientais	8			x		↓	Quanti	+/-
Emissões	8			x		↓	Quanti	kgCO2-eq/L
Impacto visual	8				x	↓	Quali	+/-
Ruídos	8				x	↓	Quali	Decibel
Remoção de sólidos	8		x	x		↑	Quanti	%
Replicabilidade	7		x			↑	Quali	+/-
Potencial para o reuso da água	7		x	x		↑	Quali	m3 de água para reuso
Acessibilidade	7	x			x	↑	Quali	+/-
VPL	6	x				↓	Quanti	\$
Custos do ciclo de vida	6	x				↓	Quanti	\$
Participação	6				x	↑	Quali	+/-
Custos	5	x				↓	Quanti	\$
Aplicabilidade	5		x			↑	Quali	+/-
Durabilidade	5		x			↑	Quali	+/-
Riscos	4		x	x	x	↓	Quanti	+/-
Modernidade	3		x			↑	Quali	+/-
Remoção de patógenos	3			x		↑	Quanti	%
Atração de insetos	3				x	↓	Quanti	+/-
Necessidade	3	x				↑	Quali	+/-
Análise de custo-benefício	2	x				↑	Quanti	\$
Maturidade da Tecnologia	2		x			↑	Quanti	+/-
Remoção avançada	2			x		↑	Quanti	%

Fonte: Autoria própria (2022)



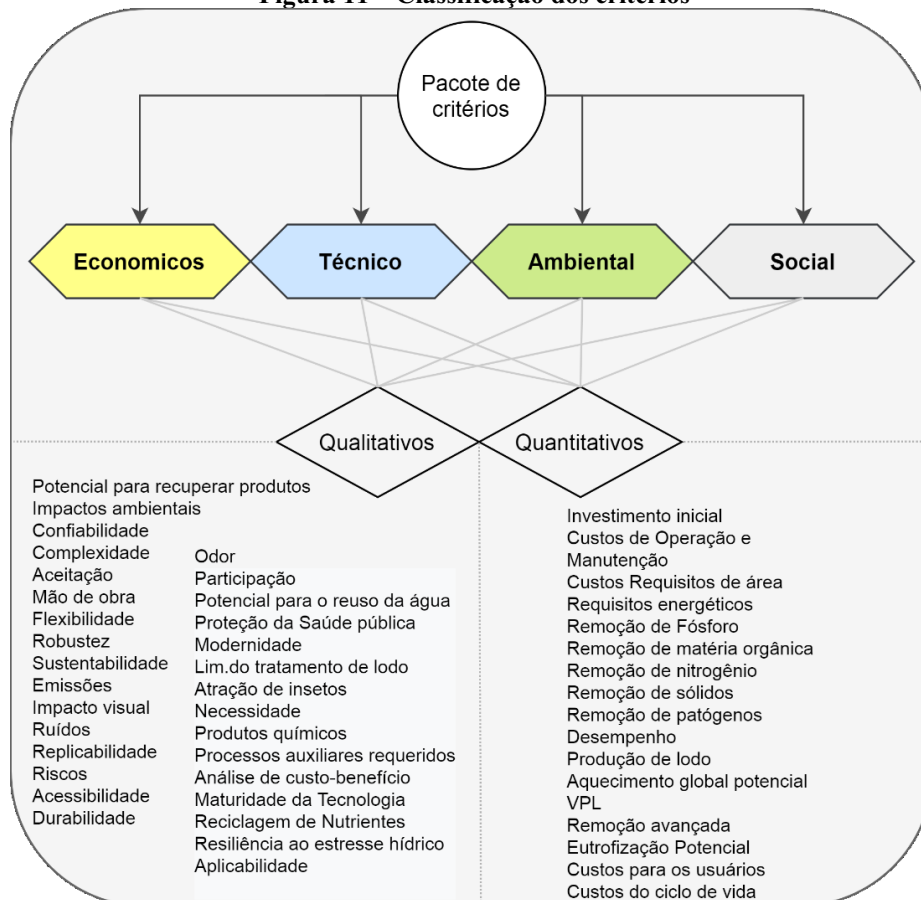
### 4.3 Definição e mensuração dos critérios

Diversos critérios foram levantados, os quais podem ser mensurados, classificados e definidos de diferentes formas. Critérios quantitativos geralmente são estimados através de cálculos, ao passo, que os qualitativos precisam ser definidos pela avaliação subjetiva de especialistas (Figura 11).

Esta avaliação deve sempre considerar a direção de cada critério uma vez que isso demonstra o grau de satisfação referente aos objetivos. Portanto, alguns critérios são positivos (por exemplo, confiabilidade, quanto maior a avaliação deste critério melhor será o desempenho da tecnologia avaliada), enquanto outros são negativos (por exemplo, impactos, quanto menor-melhor). Isso faz diferença na forma como são considerados, avaliados e pontuados.

Portanto, para uma avaliação precisa é necessário que sejam providenciados instrumentos de avaliação. Sendo assim, nos próximos sub ítems são sugeridas formas de mensuração para cada critério abordado no modelo proposto.

**Figura 11 – Classificação dos critérios**



Fonte: Autoria própria (2022)

#### 4.3.1 Critérios qualitativos

Avaliar os aspectos qualitativos referentes a seleção do sistema de tratamento é uma etapa fundamental no processo de planejamento e projeto das estações de tratamento de águas residuais. Com o elevado número de alternativas disponíveis, há uma necessidade crescente de que metodologias sejam elaboradas a fim de ampliar a utilização desses critérios. Uma vez que a caracterização de indicadores qualitativos é geralmente mais difícil (MUGA; MIHELICIC, 2008). Segundo Kalbar *et al.* (2012) a maior parte das abordagens aceitas para quantificar indicadores qualitativos é baseada em consultas com especialistas, contudo a grande maioria dos trabalhos analisados no portfólio, não especifica como esses critérios são avaliados.

Com base nisto, foram elaboradas matrizes de avaliação para cada critério qualitativo, a fim, de padronizar a análise de modo que os decisores possam pontuar cada tecnologia de tratamento com base em suas experiências no contexto ao qual a estação será aplicada (Quadro 2).

Confiabilidade foi o critério qualitativo mais comumente citado (ZENG *et al.*, 2007; ASHLEY *et al.*, 2008; HUNT, 2013; MOLINOS-SENANTE *et al.*, 2014; MOLINOS-SENANTE *et al.*, 2015; JÓZWIAKOWSKI *et al.*, 2015; ZHENG *et al.*, 2016; KALBAR *et al.*, 2016; DURSUN, 2016; PLAKAS *et al.*, 2016; CASTILLO *et al.*, 2016a; CASTILLO *et al.*, 2016b; GARRIDO-BASERBA *et al.*, 2016; MARKOV *et al.*, 2017; REN; LIANG, 2017; ARROYO; MOLINOS-SENANTE, 2018).

A confiabilidade refere-se principalmente à probabilidade de falhas mecânicas, e os impactos destas falhas na qualidade do efluente final (KALBAR *et al.* 2012a; KALBAR *et al.* 2012b; KALBAR *et al.*, 2013). Ou seja, a confiabilidade do sistema pode ser definida como a possibilidade de atingir um desempenho adequado por um determinado período de tempo mesmo sob condições adversas (Von SPERLING; OLIVEIRA, 2007; Von SPERLING, 2014). Singhirunnusorn e Stenstrom (2009) consideram dois aspectos principais de confiabilidade para o processo de tratamento de águas residuais - desempenho da planta e confiabilidade mecânica.

Para avaliar a confiabilidade de uma instalação de tratamento, vários aspectos do tratamento devem ser considerados, incluindo uma avaliação metódica da confiabilidade mecânica e do desempenho da instalação.

Segundo Molinos-Senante *et al.* (2015) a complexidade pode ser um fator chave na seleção de sistemas de tratamento, especialmente em países em desenvolvimento.

A complexidade de um sistema pode ser mensurada considerando diversos fatores, tais como, nível de habilidade e treinamento exigido para o operador, facilidades e dificuldades

envolvidas a operações rotineiras e emergenciais recorrentes ao funcionamento e manutenção da instalação, além dos aspectos de complexidade de construção (OLIVEIRA, 2004; SINGHIRUNNUSORN; STENSTROM, 2009; KARIMI *et al.*, 2011; KALBAR *et al.*, 2012; GARRIDO-BASERBA *et al.*, 2012; HUNT, 2013; MOLINOS-SENANTE *et al.*, 2014; Von SPERLING, 2014; TAN *et al.*, 2014; OUYANG *et al.*, 2015; MOLINOS-SENANTE *et al.*, 2015; JÓZWIAKOWSKI *et al.*, 2015; CASTILLO *et al.*, 2016a; CASTILLO *et al.*, 2016b; GARRIDO-BASERBA *et al.*, 2016; PLAKAS *et al.*, 2016; MARKOV *et al.*, 2017; REN; LIANG, 2017; ARROYO e MOLINOS-SENANTE, 2018).

A acessibilidade esta relacionada à capacidade financeira, bem como os requisitos de espaço e energia, além de considerar a disponibilidade da comunidade para com a planta de tratamento a ser construída (ASHLEY *et al.*, 2008; KALBAR *et al.*, 2012a; KALBAR *et al.*, 2012b; KALBAR *et al.*, 2013; BERNAL, 2018).

Segundo Singhirunnusorn e Stenstrom (2009) a acessibilidade não considera apenas o custo inicial de construção e instalação, mas também a capacidade da comunidade local de pagar pelos custos contínuos de operação e manutenção. Deste modo, este critério deve avaliar a seleção de uma tecnologia pela qual os usuários possam pagar. O custo do tratamento deve refletir o nível de renda e despesas familiares. No contexto dos países em desenvolvimento, a capacidade de pagamento é uma questão de alta relevância.

No trabalho proposto por Refsgaard (2003) este indicador é definido com base nos custos por família, uma vez, que há uma regulamentação no local ao qual o trabalho foi aplicado que exige que os custos do tratamento sejam cobertos pelos próprios habitantes, este critério foi definido pelo prefeito e pelo especialista com critério de alta relevância.

O critério aceitação contabiliza parâmetros como a eficiência do tratamento, desempenho da tecnologia e questões operacionais, odor, atração de insetos, ruídos na vizinhança, desvalorização de terrenos próximos, questões culturais, entre outros aspectos relacionados a forma com que a comunidade irá reagir a tecnologia. Ashley *et al.* (2008); Kalbar *et al.* (2012a); Kalbar *et al.* (2012b); Kalbar *et al.* (2013); Molinos-Senante *et al.* (2014); VonSperling (2014); Kalbar *et al.* (2016); Plakas *et al.* (2016); Zheng *et al.* (2016); Ren e Liang (2017); Arroyo e Molinos-Senante (2018); Bernal (2018); Lisbôa *et al.* (2020).

De acordo com Molinos-Senante *et al.* (2015), a avaliação deste critério deve considerar a opinião e percepção da comunidade local afetada pela estação, através da análise de possíveis fenômenos de oposição social à construção de tais instalações.

Singhirunnusorn e Stenstrom (2009) reforçam que as normas e tradições sociais são importantes na concepção do sistema de tratamento, uma vez que esta visa atender às

necessidades locais. O Quadro 2 apresenta alguns itens que podem auxiliar na avaliação deste critério.

Outro critério de avaliação é Robustez, a qual se refere à capacidade de resistência às variações/ choques, quando o processo é submetido a uma condição crítica, seja quanto à vazão, temperatura, carga orgânica ou outros (ZENG *et al.*, 2007; KARIMI *et al.*, 2011; KALBAR *et al.*, 2012b; KALBAR *et al.*, 2013; HUNT 2013; GARRIDO-BASERBA *et al.*, 2016). Medir a variação da qualidade do efluente reflete a forma como o processo responde às mudanças nas características das águas residuais (METCALF, 2003; Von SPERLING 1996; EISENBERG *et al.* 2001; Von SPERING, 2014).

Tan *et al.* (2014) consideram em seu trabalho dois critérios para avaliação da dimensão tecnológica, um deles foi a robustez, os autores reforçaram a necessidade que a avaliação deste critério considere dados mundiais de operação de estações de tratamento.

Singhirunnusorn e Stenstrom (2009) e Castillo *et al.* (2016a) sugeriram a avaliação deste critério como um aspecto fundamental para avaliação da confiabilidade do sistema. Uma vez que a confiabilidade da operação está relacionada à robustez do processo diante de variações e distúrbios de vazão, bem como alguns outros aspectos que podem comprometer a operação adequada do processo.

Odor é um fator extremamente importante, especialmente, em áreas urbanizadas. De acordo com Molinos-Senante *et al.* (2015) as estações de tratamento podem ser uma fonte de odores questionáveis. Diversos estudos concluíram que as principais queixas de pessoas que vivem perto das estações ou locais de gestão de resíduos estão associadas a odores (STELLACCI *et al.*, 2010; HUNT, 2013).

Segundo Karimi *et al.* (2011) o controle de odores se tornou uma consideração importante na seleção do processo de tratamento de águas residuais, especialmente no que diz respeito à aceitação pública do processo. Portanto, a avaliação deste aspecto é fundamental para garantir uma avaliação holística e sustentável, uma vez que este critério é um dos mais relevantes dentro do contexto social (VIDAL *et al.*, 2002; PLAKAS *et al.*, 2016; MOLINOS-SENANTE *et al.*, 2014; CASTILLO *et al.*, 2016a; CASTILLO *et al.*, 2016b; ARROYO; MOLINOS-SENANTE, 2018; BERNAL, 2018).

Os odores característicos do esgoto são geralmente causados pelos gases formados no processo de decomposição (HUNT, 2013; Von SPERLING, 2014). A avaliação deste critério deve considerar todas as etapas do processo de tratamento. Especialmente, na fase de processamento e tratamento do lodo final (METCALF, 2003; ALEGRE *et al.*, 2007; LEONETI, 2012;

O levantamento deste critério pode ser feito através de inspeções de campo e registros de presença ou ausência de odores, avaliação da comunidade local quanto ao desconforto dos cidadãos afetados, bem como, pela análise química de compostos específicos.

Deve-se notar que tanto odores e ruído, que foram definidos como indicadores qualitativos, podem ser definidos como indicadores quantitativos, uma vez que podem ser medidos em olf e decibéis, respectivamente.

A seleção do sistema de tratamento deve considerar alternativas que sejam adaptáveis a cada contexto (ASHLEY *et al.*, 2008). Sendo assim, o critério flexibilidade versa sobre a capacidade para ajustes, bem como inclusão de processos adicionais ou retrofit da tecnologia de tratamento avaliada (TAN *et al.*, 2014; DURSUN, 2016; MARKOV *et al.*, 2017).

Castillo *et al.* (2016a); Castillo *et al.* (2016b) consideram para avaliação deste critério como o processo pode ser executado em diante diferentes condições operacionais, ou seja perturbações no afluente, como por exemplo, mudanças na taxa de fluxo, carga orgânica, etc. Ao passo que Zheng *et al.* (2016) descreve este critério quanto a flexibilidade de mudança das infraestruturas para futuras adaptações, bem como a agilidade de respostas à mudanças.

Karimi *et al.* (2011) propõe que a alternativa de tratamento seja avaliada em uma condição crítica. Kalbar *et al.* (2012b), Kalbar *et al.* (2013), e Kalbar *et al.* (2016) referem-se a este critério como um indicador de robustez do sistema.

Segundo Kalbar *et al.* (2012a) constantemente são necessárias atualizações em uma estação de tratamento. Este critério específico tenta levar em conta a facilidade com que um determinado tipo de tecnologia passa por essas atualizações.

Replicabilidade ou Aplicabilidade condiz com a facilidade de uma alternativa de ser reutilizada para casos de similar capacidade, bem como, coordenação com instalações locais (KALBAR *et al.*, 2012b; KALBAR *et al.*, 2013; KALBAR *et al.*, 2016; MARKOV *et al.*, 2017). Karimi *et al.* (2011) caracteriza este critério com base em experiências anteriores, dados de plantas em grande escala, dados publicados e estudos de plantas-piloto.

Segundo Kalbar *et al.* (2012a) este indicador tem como objetivo capturar características tais como: design simples, implementação e recursos operacionais da tecnologia. Permitindo que o sistema instalado em um local seja capaz de ser replicada em outros locais com facilidade. Sendo assim, este critério deve verificar se os recursos da solução tecnológica são suficientemente familiares para que possam ser facilmente replicados em outros lugares sem depender de conhecimentos técnicos específicos.

A durabilidade refere-se ao tempo de vida útil da tecnologia de tratamento (ASHLEY *et al.*, 2008; KALBAR *et al.*, 2013; KALBAR *et al.*, 2016). Este critério pode ser considerado

um dos critérios para avaliação da robustez do sistema, junto a indicadores de confiabilidade, e flexibilidade (KALBAR *et al.*, 2012b)

Segundo Kalbar *et al.* (2012a) a durabilidade é um dos critérios importantes na seleção de uma tecnologia de tratamento de efluentes. A tecnologia deve ter pelo menos 40-50 anos de vida tecnológica com a mínima manutenção e requisitos de peças sobressalentes.

O grau de modernização ou grau de inovação da solução, diz respeito aos aspectos relacionados ao nível de automatização dos processos (JÓZWIAKOWSKI *et al.*, 2015; MARKOV *et al.*, 2017)

Garrido-Baserba *et al.* (2016) ressaltam em seu trabalho a importância deste critério para que tecnologias de tratamento inovadoras sejam consideradas, fornecendo aos gestores uma variedade de alternativas, especialmente, para lidar com tipos complexos de águas residuais.

Kalbar *et al.* (2012a), Garrido-Baserba *et al.* (2016) e Ren e Liang (2017) enfatizaram a necessidade de incorporar critérios de sustentabilidade na tomada de decisão com múltiplos critérios. Sustentabilidade é um critério associado à conservação ambiental de recursos naturais. Especialmente, quanto à manutenção da qualidade da água e da biodiversidade (HARDISTY *et al.*, 2013; DURSUN, 2016; ZHENG *et al.*, 2016).

Para Singhirunnusorn e Stenstrom (2009) sustentabilidade também significa atender às necessidades das pessoas da melhor maneira possível considerando a disponibilidade de recursos e a limitação das condições locais. Em termos de sustentabilidade ambiental os autores definem como a manutenção / sobrevivência do próprio meio ambiente. Ou seja, a tecnologia selecionada deve ter o mínimo de efeitos ambientais adversos e deve ser capaz de recuperar recursos, através da reutilização de águas residuais tratadas para irrigação, recarregar águas subterrâneas, produzir biogás e reciclar compostos orgânicos (MASSOUD *et al.*, 2009; KALBAR *et al.*, 2013; KALBAR *et al.*, 2016).

Kalbar *et al.* (2012a) define como critério de sustentabilidade a estimulação de comportamento sustentável. O qual pode ser avaliado pela adaptação do projeto tecnológico de modo que o comportamento sustentável seja promovido. A tecnologia deve promover a sustentabilidade na comunidade, bem como a proteção do meio ambiente (MASSOUD *et al.*, 2009). De acordo com Balkema *et al.* (2002) o comportamento sustentável pode ser estimulado através de ações que envolvem o aumento da consciência, participação e responsabilidade do usuário final.

Similar a sustentabilidade, os impactos ambientais devem ser considerados para avaliação das alternativas de tratamento (JÓZWIAKOWSKI *et al.*, 2015). Contudo, esses

dizem respeito aos impactos adversos diretos causados ao meio ambiente pela descarga do efluente no meio ambiente (ASHLEY *et al.*, 2008; Von SPERLING, 2014), causando impactos tais como a quantidade de água evaporada, a poluição das águas subterrâneas e a geração de aerossóis (KARIMI *et al.*, 2011).

Hardisty *et al.* (2013) destaca a importância deste critério em regiões costeiras e turísticas, onde o descarte do efluente ocasiona preocupações do público quanto a percepção da degradação da qualidade da água costeira e os impactos no turismo, bem como perdas na biodiversidade na baía.

O impacto visual causado pela presença da unidade de tratamento de efluentes na paisagem circundante (MOLINOS-SENANTE *et al.*, 2014; MOLINOS-SENANTE *et al.*, 2015; ARROYO; MOLINOS-SENANTE, 2018). Ou seja, a estética referente à integração de uma alternativa de tratamento na paisagem (JÓZWIAKOWSKI *et al.*, 2015; CASTILLO *et al.*, 2016a, CASTILLO *et al.*, 2016b; PLAKAS *et al.*, 2016; BERNAL, 2018).

Outro critério social fundamental de ser avaliado é ruído, especialmente em áreas urbanizadas (Von SPERLING, 2014). Qualquer tipo de poluição sonora indesejável que o processo venha ocasionar deve ser considerado (HUNT, 2013; MOLINOS-SENANTE *et al.*, 2014; MOLINOS-SENANTE *et al.*, 2015; PLAKAS *et al.*, 2016; CASTILLO *et al.*, 2016b; ARROYO; MOLINOS-SENANTE, 2018; BERNAL, 2018).

Potencial para o reuso da água deve ser estimado de acordo com o potencial das tecnologias de tratamento em atingir um efluente com qualidade suficiente para ser reaproveitado (BAO *et al.*, 2012; ARROYO; MOLINOS-SENANTE, 2018; BERNAL, 2018).

Há também ganhos financeiros advindos deste potencial. Hardisty *et al.* (2013) descrevem esse ganho de valor econômico em três componentes, são eles o valor de uso direto, o valor do suporte ecológico e o valor da opção, ou seja, o valor para a sociedade por ter o recurso disponível para ser usado em algum momento no futuro.

Segundo Massoud *et al.* (2009) a possibilidade de reutilização de água reduz os impactos sobre o meio ambiente e também sobre a saúde pública. Além disso, alguns países incentivaram a reutilização de águas residuais por meio de alguns programas especiais, o que pode ser fator de influencia no peso deste critério de seleção em um determinado cenário.

Neste sentido, é fundamental conhecer o uso final do efluente tratado, a exemplo Molinos-Senante *et al.* (2015) ressalta que em um cenário que o efluente é descartado em áreas sensíveis, ou objetivando o reaproveitamento, é interessante considerar o potencial das tecnologias em atingir um efluente com qualidade suficiente para ser reaproveitado. Bem como

o contrário, quando é assumido que a água tratada será descartada em áreas não sensíveis sem reutilização, esse critério pode ter menor relevância (MOLINOS-SENANTE *et al.*, 2014).

Ainda sobre reuso, há o critério potencial para recuperar produtos, o qual versa sobre o fator diferencial das tecnologias em recuperar subprodutos úteis advindos do tratamento das águas residuais, tais como: energia ou a geração desta, geração de biogás, recuperação de fósforo, nitrogênio ou outros subprodutos (BAO *et al.*, 2012; HUNT, 2013; Von SPERLING, 2014; MOLINOS-SENANTE *et al.*, 2014; CASTILLO *et al.*, 2016; ARROYO; MOLINOS-SENANTE, 2018).

Diferentes tipos de reciclagem são possíveis, Refsgaard (2003) e Maurer *et al.* (2012) utilizam a reciclagem do lodo juntamente com a matéria orgânica para disposição e uso em terras agrícolas para fertilização e irrigação, sendo assim, a avaliação deste critério deu-se no trabalho em função deste potencial.

Para avaliação deste critério Molinos-Senante *et al.* (2015) enfatiza o potencial para recuperação de energia e fósforo, embora considerem esta uma tarefa difícil, nos últimos anos os autores destacam que houve um progresso significativo neste tópico. Lee *et al.* (2013) considera a avaliação deste parâmetro em função da receita gerada com os subprodutos, ou até mesmo os custos evitados, como por exemplo a produção de energia e utilização desta no próprio sistema de tratamento.

A reciclagem de nutrientes também é uma importante forma de recuperação de produtos, a qual versa sobre a capacidade de reposição de nutrientes. Os quais podem ser retirados do efluente e reutilizados (MASSOUD *et al.*, 2009; BERNAL, 2018).

A participação está associada às percepções e preferências do público (KALBAR *et al.*, 2012b; KALBAR *et al.*, 2013; LISBÔA *et al.*, 2020).

Ashley *et al.* (2008) destacam que o envolvimento e participação mais ampla das partes interessadas é considerado bastante importante na União Europeia, onde os sistemas de tratamento são comprados pelas comunidades, e essas compreendem a necessidade e importância do mesmo, essa relação é facilitada promovendo o crescimento econômico, e facilitando a tomada de decisão.

Segundo Kalbar *et al.* (2012a) a participação pública é frequentemente negligenciada no processo de seleção da melhor tecnologia. Embora alguns regulamentos designem uma tecnologia específica, as percepções e preferências do público em relação à seleção e implementação é muito relevante. Sendo assim, segundo os autores, a tecnologia deve promover a participação pública e responsabilizar a comunidade pelo sucesso da implementação do projeto.



No entanto, a participação de um grande grupo de interessados pode tornar-se difícil na vida real, devido a várias situações políticas, práticas e locais (MUGA; MIHELICIC, 2008; KALBAR *et al.*, 2016). Entretanto, a participação das partes interessadas é relevante e pode criar novas oportunidades bem como gerar preferências relacionadas às informações obtidas em campo, por meio de audiências, entrevistas, entre outros.

O critério riscos pode ser avaliado em acordo com diferentes aspectos, tais como: avaliação de segurança dos trabalhadores em diferentes processos (KARIMI *et al.*, 2011); riscos hidrogeológicos durante enchentes (OUYANG *et al.*, 2015); relação entre o número de pessoas expostas ao esgoto, ao corpo receptor e ao lodo e a qualidade destes juntamente com as rotas de contaminação (ASHLEY *et al.*, 2008; Von SPERLING, 2014); bem como, exposição e pressão ao risco financeiro (ASHLEY *et al.*, 2008).

A proteção da saúde pública pode ser um subcritério avaliado em função dos riscos de contaminação (ASHLEY *et al.*, 2008). Ou seja, deve ser avaliado o descarte seguro e higiênico de águas residuais o que evita com que as pessoas adoeçam (MASSOUD *et al.*, 2009, BAO *et al.*, 2012).

Além disso, os poluentes dos esgotos podem vazar para o solo e contaminar tanto o solo como as águas subterrâneas. Falhas estruturais nas unidades, como colapsos, reduzem a confiabilidade do sistema e aumentam os riscos. No caso de sistemas de águas residuais com capacidade insuficiente, as águas receptoras podem sofrer de transbordamento de esgoto combinado, onde águas residuais não tratadas contendo poluentes e patógenos são descarregados diretamente. Todos esses são riscos potenciais para a saúde humana, animais, plantas aquáticas e o ecossistema (ZHENG *et al.*, 2016).

Embora a quantidade de geração de lodo seja um critério quantitativo, as limitações do seu tratamento são de difícil mensuração, e com certa subjetividade. Portanto, este critério pode ser avaliado de forma conjunta ou individual.

Tendo em vista que alguns sistemas podem gerar grande quantidade de lodo com alto custo de tratamento, ou até geração de lodo tóxico com complicações exigidas no seu tratamento, portanto a escolha do sistema de tratamento deve considerar a gerenciabilidade dos resíduos como paralelo para adequar o tratamento deste junto ao tratamento do efluente líquido (MASSOUD *et al.*, 2009; GARRIDO-BASERBA *et al.*, 2012; Von SPERLING, 2014).

A atração de insetos normalmente esta associada ao fator odor, podendo gerar uma série de problemas no tratamento e destinação final do efluente e lodo (HUNT, 2013). Além da geração de problemas sanitários graves e incômodos gerais, tais como, por exemplo, a

proliferação de insetos e vermes (Von SPERLING, 2014). Bernal (2018) sugeriu a avaliação deste critério em conjunto com odor, e ruídos.

Outro critério qualitativo é a Maturidade da tecnologia, a qual se refere ao nível de ampla utilização da tecnologia para tratamento, seja nacionalmente e/ou internacionalmente (REN; LIANG, 2017). Segundo Zeng *et al.* (2007) a maturidade da tecnologia é um fator favorável na obtenção de efluentes estáveis e satisfatórios.

Com base nas características desses critérios qualitativos, foram definidos aspectos de avaliação de cada critério a fim de atribuir a esses uma classificação verbal, através de processos de conceituação e operacionalização, propondo assim indicadores, os quais são componentes ou variáveis que indicam o estado ou condição de cada critério (Quadro 2).

**Quadro 2 - Indicadores para mensuração de critérios qualitativos**

Crit.	Questões ou medidas específicas (indicadores)	Avaliação por Alternativa				
		Alto	Médio	Moderado	Baixo	Muito Baixo
		5	4	3	2	1
Confiabilidade	Qual é a probabilidade de que a planta opere adequadamente ao longo de sua expectativa de vida?					
	Qual é a possibilidade de o efluente atender aos requisitos de forma consistente?					
	Com que frequência os desligamentos podem ocorrer devido a problemas de hardware, processo, ou falhas mecânicas?					
	Qual é a possibilidade de que falhas no sistema possam causar violações da qualidade do efluente?					
	O quanto bem o processo pode responder à variação da vazão?					
	O processo resiste a cargas de choque periódicas?					
	O quanto bem o processo pode responder à variação da carga orgânica?					
	O quanto bem o processo pode responder à Contaminações tóxicas (pesticidas, metais pesados, etc.)					
	Como a variação das características do afluente influenciam na qualidade do efluente?					
Como a variação do clima afeta o desempenho do sistema?						

Crit.	Questões ou medidas específicas (indicadores)	Avaliação por Alternativa				
		Alto	Médio	Moderado	Baixo	Muito Baixo
		5	4	3	2	1
<b>Complexidade</b>	Qual é a complexidade geral da construção da planta?					
	Quão difícil será iniciar o sistema?					
	Quanto tempo é necessário para a construção da planta?					
	Quanto tempo é necessário para a instalação do sistema?					
	Quanto tempo é necessário para partida do sistema?					
	Em caso de falha, quão complexo são as ações corretivas?					
	Complexidade de operação e manutenção rotineira					
	Qual o nível de instrução exigido dos operadores?					
	Tempo para treinamento					
	Requisitos especiais de operação e manutenção					
	Equipamentos especiais fabricados ou importados					
	Disponibilidade de peças para reposição					
<b>Necessidade</b>	Disponibilidade de recursos					
	Nível de tratamento requerido					
	Necessidades específicas do cenário avaliado					
	Possibilidade de reuso					
	Receptor final					
<b>Acessibilidade</b>	Custos totais do sistema					
	Custos por indivíduo					
	Subsídio do governo					
	Capacidade financeira da população					
	Esta tecnologia é acessível?					
<b>Aceitação</b>	Aceitabilidade pública da operação do sistema					
	Aceitabilidade pública quanto a cobrança de taxas de águas residuais					
	Desvalorização das áreas vizinhas					
	Produção de odores					
	Impacto de ruído					
	Reprodução de insetos e outros parasitas					
	Impacto da qualidade da água subterrânea					
	Paisagem / impacto visual					
	Impacto do tráfego					
Geração de empregos fixos e temporários						
<b>Robustez</b>	Como o processo responde à variação da vazão?					
	Como o processo responde à variação da carga orgânica?					
	Como o processo responde à contaminações tóxicas?					
	Como a variação do clima afeta o desempenho do sistema?					
	Quanto as características do afluente influenciam no efluente?					
<b>Odor</b>	Geração de Gás Sulfídrico					
	Geração de Amônia					
	Produção de outros compostos orgânicos geradores de odores					
	Geração de Lodo					
	Nível de percepção da comunidade					
	Nível de desconforto da comunidade					

Crit.	Questões ou medidas específicas (indicadores)	Avaliação por Alternativa				
		Alto	Médio	Moderado	Baixo	Muito Baixo
		5	4	3	2	1
Flexibilidade	Capacidade do processo de funcionar em uma condição crítica					
	Facilidade de a tecnologia passar por atualizações					
	Facilidade para mudanças na infraestrutura da planta					
	Facilidade para mudanças na vazão de entrada					
	Comportamento quanto à mudanças no afluente					
	Facilidade de adição de outros fluxos de processo					
	Agilidade de resposta à mudanças					
	Fácil de atualizar					
	Fatores de limitação (ou seja, custo, terreno e tecnologia) para a atualização ou extensão do sistema					
Replicabilidade	Tecnologia comumente usada para capacidade semelhante					
	Experiências existentes no país					
	Simplicidade de construção e design					
	Necessidade de conhecimentos técnicos específicos					
	As operações unitárias já foram utilizadas satisfatoriamente em condições semelhantes?					
	Coordenação com instalações locais					
	Similaridade com o cenário					
Durabilidade	Vida útil esperada					
	Fenômenos internos e externos de degradação					
	Periodicidade de reposição peças consumíveis					
	Periodicidade de manutenção preventiva					
	Periodicidade de manutenção corretiva					
Modernização	Nível de automatização dos processos					
	Processos avançados de tratamento					
	Custos totais do sistema					
	Design					
	Mão de obra técnica requerido					
Sustentabilidade	Expectativa de vida do sistema					
	Possibilidade de recuperação de recursos					
	Subprodutos (Biogás, reciclagem de nutrientes, reciclagem de matéria orgânica)					
	Qualidade final do efluente tratado					
	Capacidade de reutilizar as águas residuais tratadas					
	Possibilita irrigação direta					
	Possibilita irrigação indireta					
	Conservação dos recursos naturais					
	Recarga de água subterrânea via infiltração de superfície					
	Flexibilidade					

Crit.	Questões ou medidas específicas (indicadores)	Avaliação por Alternativa				
		Alto	Médio	Moderado	Baixo	Muito Baixo
		5	4	3	2	1
Impacto Ambiental	Uso e ocupação do solo					
	Uso de recursos naturais					
	Poluição do ar					
	Alteração da qualidade da água e do solo					
	Estresse hídricos					
	Dificuldade para recuperação da área se um dia desistida a estação					
	Níveis de Ruídos					
	Resíduos sólidos					
	Resíduos gasosos					
	Poluição atmosférica					
	Liberação de agentes patogênicos					
	Liberação de aerossóis					
	Proliferação de vetores					
	Impacto visual	Estética				
Grau de alteração na paisagem natural						
Desvalorização das áreas vizinhas						
Percepção da comunidade quanto a alteração visual						
Ruídos	Potencial de ruído					
	Potencial de vibrações					
	Nível de pressão sonora equivalente					
	Percepção da comunidade quanto ao nível de ruído					
Potencial para o reuso da água	Qualidade do efluente final					
	Possibilidade de uso direto					
	Possibilidade de uso indireto					
	Valor econômico agregado ao reuso da água					
	Grau de inovação					
Potencial para recuperar produtos	Capacidade de remoção de patógenos					
	Capacidade de geração de energia					
	Potencial para geração de biogás					
	Recuperação de nitrogênio					
	Recuperação de fósforo					
	Reciclagem do lodo juntamente com a matéria orgânica para adubação					
	Geração de recursos financeiros advindos de subprodutos					
	Custos para recuperação e comercialização					
Participação	Proporciona oportunidades para a participação das partes interessadas					
	Nível de participação necessário para implementar o sistema					
	Nível de participação necessário para gerenciar o sistema					
	Geração de empregos temporários					
	Geração de empregos fixos					
Pressão financeira para a comunidade						

Crit.	Questões ou medidas específicas (indicadores)	Avaliação por Alternativa				
		Alto	Médio	Moderado	Baixo	Muito Baixo
		5	4	3	2	1
Riscos	Riscos de acidentes com trabalhadores nas diferentes etapas de tratamento					
	Riscos hidro geológicos durante enchentes					
	Relação entre o número de pessoas expostas ao esgoto, ao corpo receptor e lodo					
	Riscos de contaminação de animais, plantas aquáticas e o ecossistema					
	Riscos de falhas estruturais, colapsos, ou capacidade insuficiente					
	Exposição e pressão ao risco financeiro					
	Proteção da saúde pública					
Limitações do tratamento de lodo	Custo de tratamento					
	Geração de lodo tóxico					
	Problemas com a disposição do lodo gerado na estação					
	Formas de tratamento do lodo					
	Potencial para reuso do lodo					
	Geração de produtos indesejáveis					
Atração de insetos	Odor gerado					
	Existência de fontes luminosas					
	Geração de lodo					
	Facilidade para limpeza ou retrolavagem das unidades de tratamento					
	Exposição do esgoto					
	Vida útil de materiais filtrantes					
Maturidade	Utilização da tecnologia em cenários relacionados					
	Prévia utilização na cidade, estado, país					
	Quantidade de estudos piloto					
	Desempenho geral demonstrado pelo sistema					

Fonte: Autoria própria (2022)

#### 4.3.2 Critérios quantitativos

Indicadores quantitativos são geralmente de mais fácil mensuração, pois podem ser avaliados de acordo com escalas cardinais, as quais atribuem valores numéricos, tais como números, intervalos, proporções, entre outros (KALBAR *et al.*, 2012a). Contudo, é imprescindível compreender e estabelecer parâmetros de avaliação. O Quadro 3 apresenta a descrição dos critérios quantitativos abordados neste trabalho, bem como define a mensuração destes.

**Quadro 3 – Parametros para mensuração dos critérios quantitativos de avaliação**

<b>Critério</b>	<b>Descrição</b>	<b>Como mensurar</b>	<b>Ref.</b>
Investimento Inicial	Os custos de implementação são compostos pelas despesas monetárias necessárias para construção da estação de tratamento, como terra, construção, máquinas, equipamentos, instalações e tubulações.	$CAPEX = \frac{(\Delta A - \Delta P + d)}{p.e}$ <p>CAPEX = Despesas de capital (\$);            ΔA = Variação dos Ativos (\$);            ΔP = Ativos Passivos (\$);            d = Depreciação (\$);            p.e = População equivalente.</p>	Markov <i>et al.</i> (2018); Lisboa <i>et al.</i> (2017); Bernal (2020)
Custos de Operação e Manutenção	Os custos relativos à operação e manutenção estão relacionados à gestão das estações de tratamento e geralmente incluem os seguintes itens de custo: energia, pessoal, reagentes, gestão e manutenção de resíduos.	$OPEX = \frac{\sum M\&OC}{m^3}$ <p>OPEX = Despesas de manutenção e operação (\$);            ΣM&amp;OC = Somatório de todos os custos de manutenção e operação do sistema (\$);            m<sup>3</sup> = Metro cúbico de água tratada (m<sup>3</sup>).</p>	Ren e Liang (2018); Lisboa <i>et al.</i> (2017); Bernal (2020)
Requisitos de área	Refere-se aos custos do terreno que atendam às especificações e restrições para o tipo de estação a ser implantada, incluindo valores de desapropriação, se necessário, além da verificação quanto à disponibilidade do terreno deve ser avaliada a facilidade ou dificuldade de se utilizar tais áreas para o sistema de tratamento, considerando fatores como custo, características e propriedade.	$A_{Req} = \frac{m^2}{p.e}$ <p>A<sub>req</sub> = Área requerida (m<sup>2</sup>)            p.e = População equivalente.</p>	Arroyo e Molinos-Senante (2018); Bernal (2018); Lisboa <i>et al.</i> (2020)
Custos	Este critério é composto por todos os custos associados à implementação e à gestão do sistema de tratamento de esgotos.	$C = \sum_i^n M\&OC + CAPEX$ <p>M&amp;OC = Custos de manutenção e operação do sistema (\$);            CAPEX = Despesas de capital (\$);            i / n = horizonte de projeto (anos).</p>	Bao <i>et al.</i> (2012); Zheng <i>et al.</i> (2016)
Requisitos energéticos	Além da identificação do consumo de energia elétrica para cada sistema de tratamento e o custo anual resultante deverá ser verificado se a cidade possui fontes de energia com quantidade e confiabilidade necessárias ao sistema de tratamento a ser implantado.	$E = \frac{E_c - E_g}{m^3}$ <p>E = Consumo de energia (KWh);            E<sub>c</sub> = Energia consumida (KWh);            E<sub>g</sub> = Energia gerada (KWh);            m<sup>3</sup> = Metro cúbico de água tratada (m<sup>3</sup>)</p>	Arroyo e Molinos-Senante (2018); Lisboa <i>et al.</i> (2020)

Remoção de Fósforo	<p>O fósforo é um dos principais responsáveis pelo enriquecimento nutricional de mananciais de abastecimento público, desencadeando o fenômeno de eutrofização e a floração de grupos de algas tóxicas, sendo deste modo a remoção é de grande significado para a saúde pública e para o meio ambiente.</p>	$E_P = \frac{P_0 - P}{P_0} \times 100$ <p><math>E_P</math>= Eficiência de remoção de fósforo (%);  <math>P_0</math>= Concentração de Fósforo inicial (mg/L);  <math>P</math>= Concentração de Fósforo final (mg/L).</p>	Arroyo e Molinos-Senante (2018); Lisboa <i>et al.</i> (2020)
Remoção de matéria orgânica	<p>A qualidade dos efluentes pode definida diretamente pela porcentagem de remoção da matéria orgânica em termos de remoção de DQO e DQO.</p>	$E_{MO} = \frac{MO_0 - MO}{MO_0} \times 100$ <p><math>E_{MO}</math>= Eficiência de remoção de matéria orgânica (%);  <math>MO_0</math>= Concentração de remoção de matéria orgânica inicial (mg/L);  <math>MO</math>= Concentração de remoção de matéria orgânica final (mg/L).</p>	Arroyo e Molinos-Senante (2018); Lisboa <i>et al.</i> (2020)
Remoção de nitrogênio	<p>O crescimento excessivo de algas gera o aumento de despesas com o tratamento da água e alta toxicidade são fatores relacionados ao lançamento de efluentes com excesso de nitrogênio, sendo assim, a remoção deste um fator importante para a seleção de uma tecnologia de tratamento.</p>	$E_N = \frac{N_0 - N}{N_0} \times 100$ <p><math>E_N</math>= Eficiência de remoção de nitrogênio (%);  <math>N_0</math>= Concentração de nitrogênio inicial (mg/L);  <math>N</math>= Concentração de nitrogênio final (mg/L).</p>	Arroyo e Molinos-Senante (2018); Lisboa <i>et al.</i> (2020)
Remoção de sólidos	<p>A remoção de sólidos é também um parâmetro relevante para a seleção adequada de uma tecnologia de tratamento, uma vez que este possui alto poder poluidor podendo gerar problemas estéticos, adsorção de poluentes, além de proteção dos patógenos.</p>	$E_S = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100$ <p><math>E_S</math>= Eficiência de remoção de sólidos (%);  <math>S_0</math>= Concentração de sólidos inicial (mg/L);  <math>S</math>= Concentração de sólidos final (mg/L).</p>	Arroyo e Molinos-Senante (2018); Lisboa <i>et al.</i> (2020)
Remoção de patógenos	<p>O processo de desinfecção de esgotos é inativação seletiva de espécies de microrganismos, principalmente aquelas que ameaçam a saúde humana, observando os padrões de qualidade estabelecidos para remoção de patógenos.</p>	$E_{micro} = \frac{micro_0 - micro}{micro_0} \times 100$ <p><math>E_S</math>= Eficiência de remoção de microrganismos (%);  <math>micro_0</math>= Concentração de microrganismos inicial (NMP/mL);  <math>micro</math> = Concentração de microrganismos final (NMP/mL).</p>	Von Sperling (2014); Ouyang <i>et al.</i> (2015)
Desempenho	<p>O desempenho é geralmente medido em termos de qualidade do efluente e sua variabilidade, que deve ser consistente com os requisitos de descarga do efluente, sendo, as alternativas avaliadas de acordo com a qualidade final dos efluentes.</p>	$D = \sum E_i$ <p><math>D</math>= Desempenho (%);  <math>E</math>= Eficiência (%);  <math>i</math>= Indicadores, tais como N, P, MO e S.</p>	Ashley <i>et al.</i> (2008); Singhrammison e Stenstrom (2009)



Produção de lodo	Lodo é um subproduto inevitavelmente produzido em ETEs. O processamento, reutilização e a eliminação do lodo representam problemas muito complexos enfrentados no tratamento, portanto alternativas devem ser avaliadas tendo em conta o montante de lodo produzido por cada processo de tratamento.	$P_L = \frac{L_p}{m^3}$ $P_L = \text{Produção de lodo (Kg/m}^3\text{)};$ $L_p = \text{Lodo produzido (Kg)};$ $m^3 = \text{Metro cúbico de água tratada (m}^3\text{)}$	Arroyo e Molinos-Semante (2018); Lisbôa et al. (2020)
Aquecimento global potencial	Este critério representa principalmente o consumo de energia durante a fase operacional das usinas ao longo de seus ciclos de vida.	$GWP = \frac{\sum[\text{CO}_2];[\text{CH}_4]}{\text{ano}}$ $GWP = \text{Aquecimento global potencial};$ $[\text{CO}_2] = \text{Concentração de gás carbônico};$ $[\text{CH}_4] = \text{Concentração de gás metano}.$	Kalbar et al. (2016); Castillo et al. (2016a)
VPL	O VPL calcula os diferentes valores descontados dos custos de investimento e custos operacionais, levando em consideração a estrutura dos investimentos de capital e, conseqüentemente, o tamanho e o tempo dos custos de reposição de capital.	$VPL = -CF_0 + \sum_{j=1}^n \frac{CF_j}{(1+i)^j}$ $VPL = \text{valor presente líquido (\$)};$ $CF_0 = \text{O valor esperado dos benefícios (\$)};$ $CF_j = \text{O valor dos benefícios (\$)};$ $i = \text{refere-se à taxa de juros (\%)};$ $j = \text{refere-se ao período de tempo (t)}.$	Castillo et al. (2016b); Markov et al. (2017); Goffi et al. (2018)
Remoção avançada	Remoção avançada de xenobióticos, metais pesados, compostos recalcitrantes e tóxicos, entre outros.	$E_x = \frac{x_0 - x}{x_0} \times 100$ $E_s = \text{Eficiência de remoção (\%)};$ $x_0 = \text{Concentração inicial};$ $x = \text{Concentração final}.$	Kalbar et al. (2013); Plakas et al. (2016)
Eutrofização Potencial	Aumento potencial da concentração de nutrientes dissolvidos num ecossistema aquático.	$EP = \frac{[\text{PO}_4^{-3}]}{p.e \times \text{ano}}$ $EP = \text{Eutrofização Potencial};$ $\text{PO}_4^{-3} = \text{Concentração de fosfato (kg/L)}$ $p.e = \text{População equivalente}.$	Castillo et al. (2016a); Garrido-Baserba et al. (2016)

Fonte: Autoria própria (2022)

#### 4.4 Triagem dos critérios para a seleção em cada cenário de avaliação

Nesta etapa foi conduzida uma triagem inteligente/especializada de critérios para a seleção das tecnologias de tratamento de águas residuais. Vale ressaltar que este sistema de avaliação e seleção foi desenvolvido considerando as particularidades apontadas na etapa inicial do modelo, mas os usuários podem adicionar mais critérios ou excluir critérios para medição de cada aspecto avaliado, de acordo com os interesses e requisitos das partes interessadas.

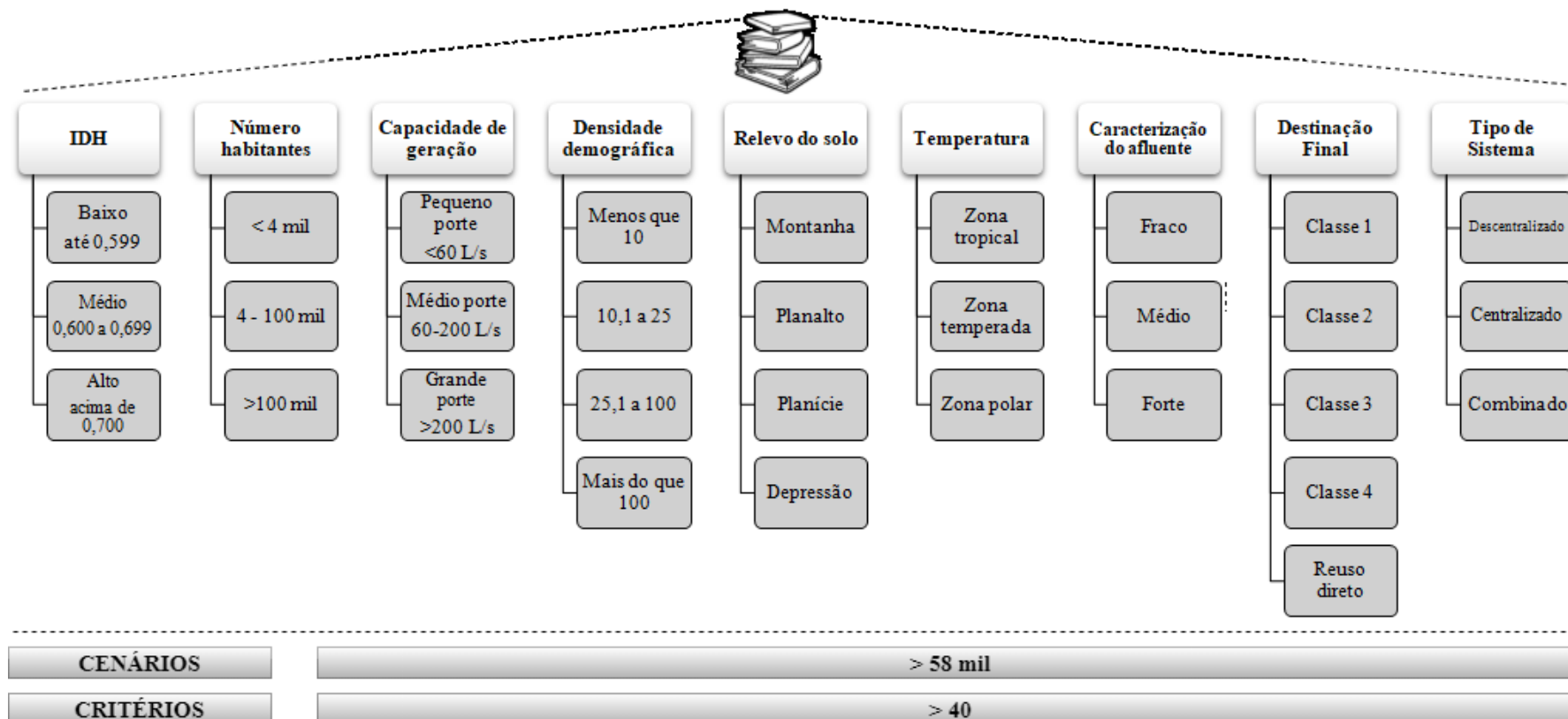
Não há uma solução única, os decisores devem avaliar o pacote de critérios sugeridos e fazer adaptações, para particularidades não incluídas no modelo. 41 critérios foram incluídos na avaliação. O conhecimento usado para conduzir a seleção foi retirado da literatura técnica e científica, bem como de entrevistas com especialistas e engenheiros ambientais e sanitários. Sendo assim, tanto o conhecimento empírico quanto o teórico foram considerados nesta análise.

Conforme sugerido por Ashley *et al.* (2008) existem vantagens e desvantagens quanto a utilização de critérios predefinidos, embora haja necessidade de uma estrutura de apoio às decisões, a estrutura de seleção de critérios deve ser flexível. Este requisito foi considerado fundamental no desenvolvimento deste modelo.

A seleção dos critérios foi realizada de acordo com 73 cenários observados no portfólio bibliográfico (Apêndice B), os quais foram avaliados e categorizados em função das particularidades de cada local, para então definição dos critérios priorizados no modelo proposto pelos autores.

O método de Copeland foi utilizado nesta etapa para definir os principais critérios que devem ser utilizados para a escolha do sistema de tratamento. Os critérios foram definidos para cada cenário de acordo com os trabalhos obtidos por meio da revisão sistemática da literatura (D1), sendo, portanto, aplicado o método de votação de Copeland, no qual os critérios mais preferidos pelos autores de acordo com a variação de cada particularidade observada foram apontados com marcador “1” (Quadro 4).

Figura 12 – Construção dos cenários avaliados por particularidade observada



Fonte: Autoria própria (2022)

Quadro 4 - Matriz de seleção e avaliação de critérios: Decisor 1

Particularidade	Índice	Critérios de Avaliação																																												
		Custo de Implantação	Custos de O&M	Requisitos de área	Custo-benefício	Requisitos energéticos	Custos do ciclo de vida	VPL	Acessibilidade	Maturidade	Modernidade	Requisitos externos	Necessidade	Riscos	Durabilidade	Participação	Aplicabilidade	Reuso da água	Impactos ambientais	Emissões	Impacto visual	Desempenho	Remoção de MO	Remoção de S	Remoção de N	Remoção de P	Remoção de patógenos	Remoção avançada	Sustentabilidade	Aquecimento global	Recuperação de	Robustez	Eutrofização	Flexibilidade	Mão de obra	Produção de lodo	Aceitação	Odor	Atração de insetos	Ruídos	Simplicidade	Confiabilidade				
IDH	Baixo: até 0,599	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0					
	Médio: 0,600 a 0,699	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1		
	Alto: acima de 0,700	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1		
Número habitantes	< 4 mil	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0				
	4 - 100 mil	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
	>100 mil	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1		
Capacidade de geração	Pequeno porte: <60 L/s	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1		
	Médio porte: 60-200 L/s	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
	Grande porte: >200 L/s	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Densidade demográfica	Menos que 10	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1		
	10,1 a 25	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
	25,1 a 100	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	Mais do que 100	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	
Relevo do solo	Montanha	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1		
	Planalto	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
	Planície	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Depressão	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Temperatura	Zona tropical	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Zona temperada	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	2	1	2	0	1	1	1	1	1	0	1	1		
	Zona polar	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Caracterização do afluente	Fraco	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	Médio	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	
	Forte	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Destinação Final	Classe 1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1		
	Classe 2	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1		
	Classe 3	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1		
	Classe 4	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	Reuso direto	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	
Tipo de Sistema	Descentralizado	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1		
	Centralizado	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	
	Combinado	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1		

Fonte: Autoria própria (2022)

Dos cenários avaliados aproximadamente 70% consideraram o critério requisito de área imprescindível de ser avaliado, portanto este critério foi apontado com o marcador '1', para praticamente todas as particularidades, especialmente em função do número de habitantes, capacidade de geração e densidade demográfica alta (KALBAR *et al.*, 2012a; PLAKAS *et al.*, 2016; BERNAL 2018; LISBÔA *et al.*, 2020). Os autores Molinos-Senante *et al.*, (2012); Kalbar *et al.* (2013a); Tan *et al.* (2014); Garrido-Baserba *et al.* (2014); e Molinos-Senante *et al.*, (2015), não consideraram este critério para cenários com baixo número de habitantes, capacidade reduzida de geração, e baixa densidade demográfica, portanto para essas particularidades foi utilizado o marcador '0'.

Cerca de 53% dos cenários observados consideraram o critério confiabilidade para avaliação do sistema. Segundo Kalbar *et al.* (2012a) tanto confiabilidade, flexibilidade, aquecimento global, deve ser considerado independente do cenário, quanto à particularidades tais como, capacidade de geração, número de habitantes, e destinação final.

Segundo Kalbar *et al.* (2012a), a aceitabilidade é um critério importante de ser avaliado em áreas semi urbanizadas, com enfoque maior em áreas rurais. Quanto menor a população atendida maior é a proximidade com o sistema de tratamento, portanto maior deve ser a aceitação (KALBAR *et al.*, 2016). Os autores sugeriram o mesmo para os critérios aplicabilidade, participação, sustentabilidade e durabilidade. Esses critérios foram avaliados em 50%, 41%, 40%, 34%, e 23%, respectivamente, dos trabalhos do portfolio bibliográfico.

Os critérios Mão de obra e VPL devem ser especialmente avaliados em locais com menor número de habitantes, uma vez considerada limitada disponibilidade de recursos financeiros e técnicos (KALBAR *et al.*, 2012a). Assim como o critério capacidade financeira está relacionado diretamente aos recursos obtidos em esfera nacional, e como eles são geridos e disponibilizados aos investimentos em saneamento. Sendo assim Lisbôa *et al.* (2020) destaca a importância do critério, bem como a variabilidade deste em função do número de habitantes e distribuição orçamentária para cada estado e município.

Molinos-Senante *et al.* (2014) e Molinos-Senante *et al.*, (2015) avaliaram os mesmos cenários, pequenas comunidades, com baixa volume de geração de efluentes e mesma destinação final, contudo com diferentes decisores. É possível verificar que em ambos os trabalhos alguns critérios foram comumente selecionados, são eles: confiabilidade, aceitação, investimento inicial, custos de O&M, produção de lodo, simplicidade, impacto visual, odor, ruídos, remoção de nutrientes, sólidos e matéria orgânica. Portanto, esses critérios obtiveram marcador '1' para essas particularidades.

A avaliação conduzida por Arroyo e Molinos-Senante (2018) não integrara variáveis econômicas como fatores iniciais. Essa abordagem é um diferencial do trabalho, e pode sugerir uma nova forma de avaliação. Isso ocorre porque os autores entendem que os critérios financeiros são na verdade restrições para o projeto, sendo assim, não deve ser considerado um fator inicial na primeira rodada do processo de tomada de decisão, ou então eles podem ser previamente definidos, uma vez que os recursos monetários normalmente disponíveis para um projeto específico são limitados anteriormente a esta etapa.

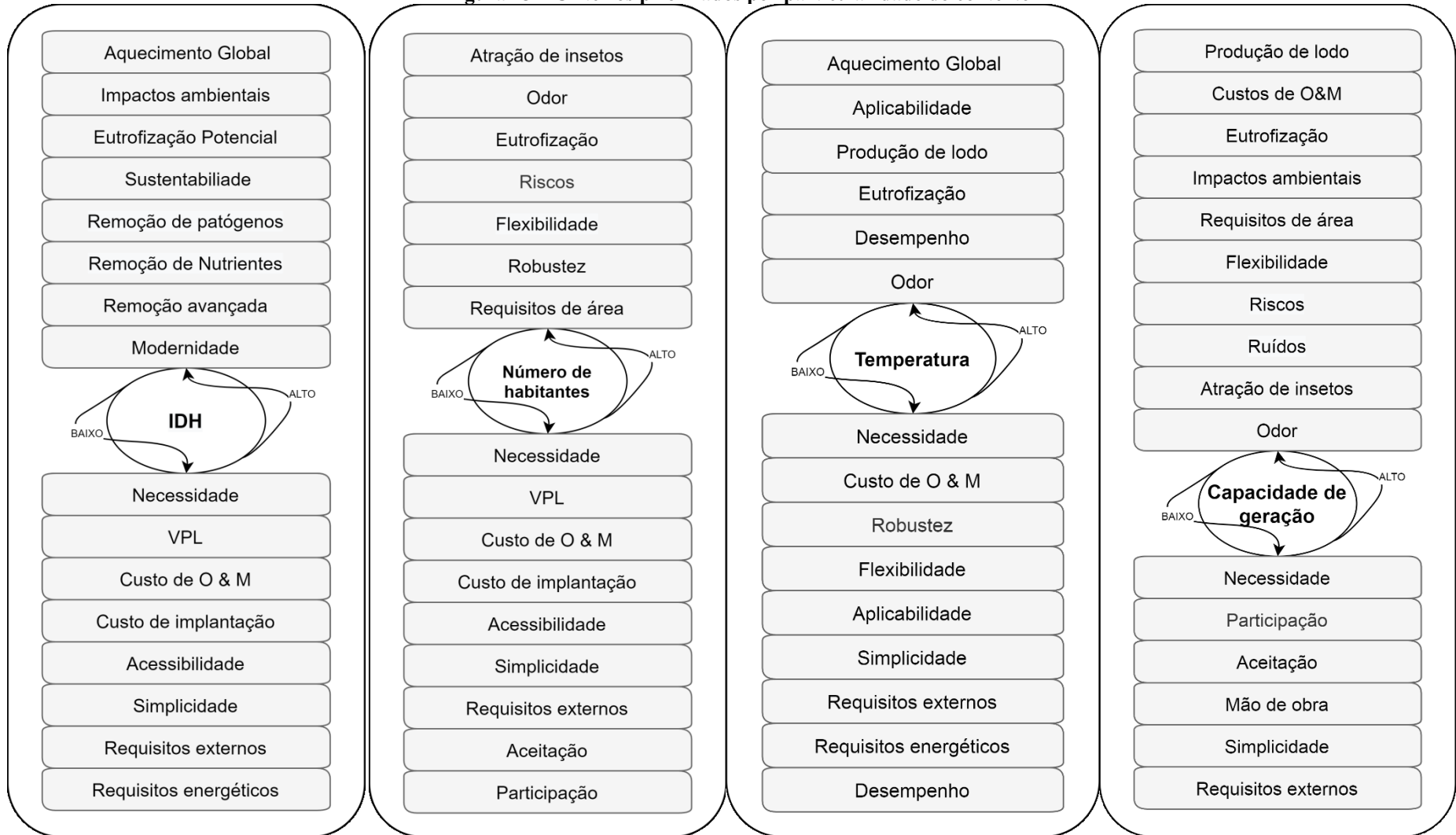
Sendo assim, em países com IDH alto e sem restrições financeiras, os critérios econômicos podem assumir marcador '0', ao passo que em cenários com recursos limitados esses aspectos são todos marcados com '1', a fim de garantir a avaliação deste critério, o qual pode ser também uma restrição de projeto. Segundo Yao *et al.* (2019) um país em desenvolvimento ou subdesenvolvido com baixo IDH deve priorizar critérios econômicos, uma vez que os recursos são limitados, enquanto os países desenvolvidos observam preferencialmente critérios de desempenho para avaliação de tecnologias.

Os critérios eutrofização potencial, modernidade, remoção de nutrientes, matéria orgânica, sólidos, patógenos, remoção avançada, e desempenho geral do sistema são critérios comumente selecionados para destinação final do efluente tratado em áreas sensíveis (GARRIDO-BASERBA *et al.*, 2016; ARROYO; MOLINOS-SENANTE, 2018). Bem como, confiabilidade segundo Castillo *et al.* (2016b) e modernidade (GARRIDO-BASERBA *et al.*, 2016), esses critérios foram marcados com índice '1' para esta particularidade. Os mesmos critérios foram considerados relevantes para cenários com reuso (KALBAR *et al.*, 2012a; KALBAR *et al.*, 2012a; BAO *et al.*, 2013; TAN *et al.*, 2014; KALBAR *et al.*, 2016; CASTILLO *et al.*, 2016a), bem como os critérios potencial para reuso e riscos inerentes ao sistema (MASSOUD *et al.*, 2009; ARROYO; MOLINOS-SENANTE, 2018).

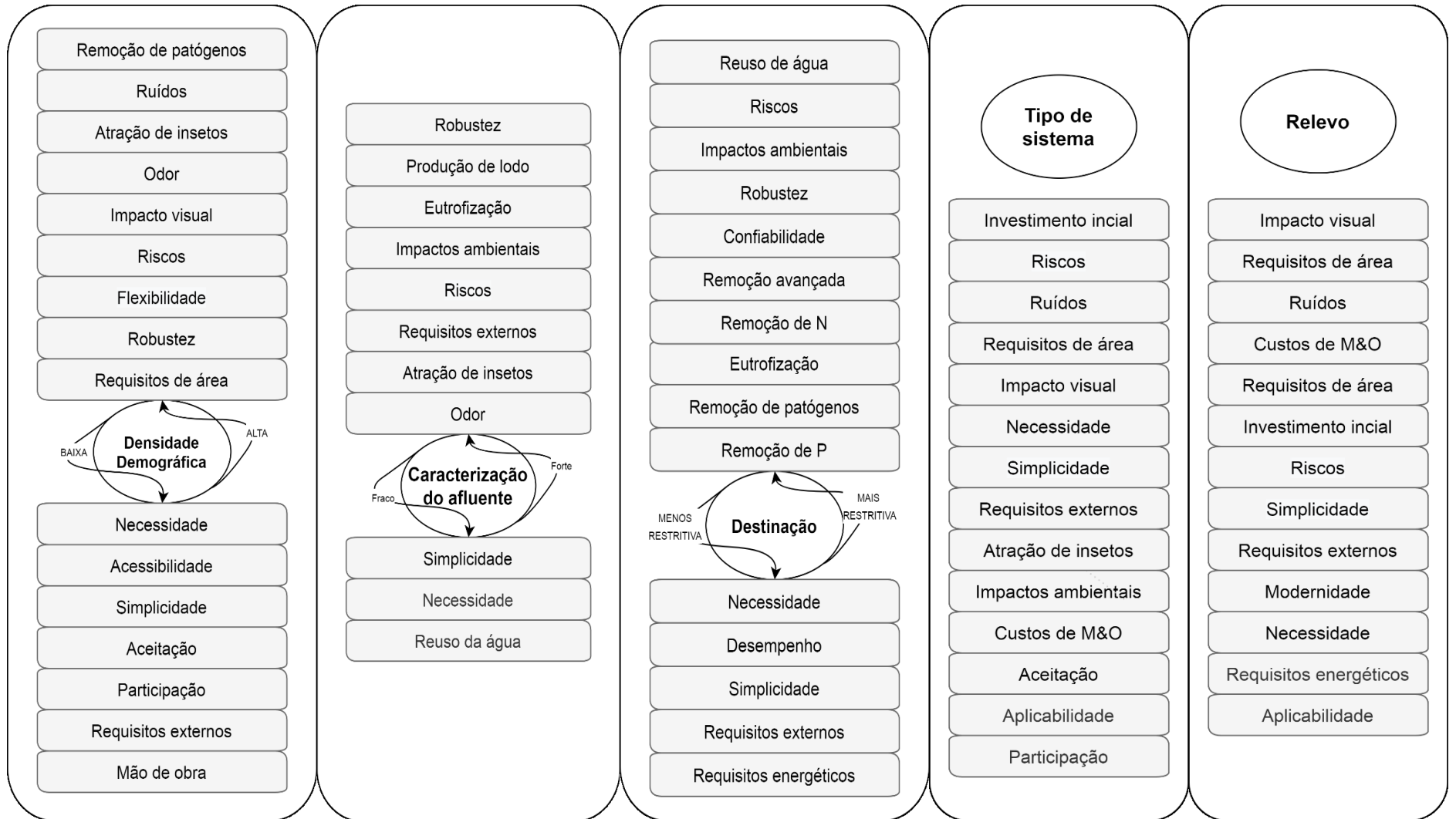
Foram também considerados de alta importância ('1') os critérios maturidade, aplicabilidade, sustentabilidade, impacto ambiental, para essas duas particularidades avaliadas em função do tipo de destinação final (KALBAR *et al.*, 2012a; KALBAR *et al.*, 2012b; KALBAR *et al.*, 2013b; KALBAR *et al.*, 2016; HUANG *et al.*, 2015; OUYANG *et al.*, 2015; BERNAL, 2018).

Cada particularidade avaliada pode ser decisiva na seleção ou não dos critérios (KALBAR *et al.*, 2016), tendo isso em mente, foram solicitados aos especialistas os principais critérios de acordo com cada particularidade, esses foram assinalados com marcador "2" (Figura 13; Quadro 5). E por fim Quadro 6, critérios com pontuação 3, de acordo com a lista de critérios essenciais, segundo Von Sperling (2014).

Figura 13 – Critérios priorizados por particularidade do contexto



**Figura 13 – Critérios priorizados por particularidade do contexto**



Fonte: Autoria própria (2022)



Quadro 5 - Matriz de seleção e avaliação de critérios: D 1 + D 2

Particularidade	Índice	Custo de Implantação	Custos de O&M	Requisitos de área	Custo-benefício	Requisitos energéticos	Custos do ciclo de vida	VPL	Acessibilidade	Maturidade	Modernidade	Requisitos externos	Necessidade	Riscos	Durabilidade	Participação	Aplicabilidade	Reuso da água	Impactos ambientais	Emissões	Impacto visual	Desempenho	Remoção de MO	Remoção de S	Remoção de N	Remoção de P	Remoção de patógenos	Remoção avançada	Sustentabilidade	Aquecimento global	Recuperação de produtos	Robustez	Eutrofização	Flexibilidade	Mão de obra	Produção de lodo	Aceitação	Odor	Atração de insetos	Ruídos	Simplicidade	Confiabilidade		
		IDH	Baixo: até 0,599	2	2	0	1	2	1	2	2	1	0	2	2	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	2	0
Médio: 0,600 a 0,699	1		1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1
Alto: acima de 0,700	0		0	1	1	0	0	0	0	0	2	1	0	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
Número habitantes	< 4 mil	2	2	0	1	1	1	2	2	0	0	2	2	1	1	2	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	1	2	0	
	4 - 100 mil	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	>100 mil	1	1	2	0	0	1	0	0	1	1	1	1	2	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	0	1	0	2	2	0	0	1		
Capacidade de geração	Pequeno porte: <60 L/s	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	2	1	0	2	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	2	1	
	Médio porte: 60-200 L/s	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Grande porte: >200 L/s	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	1	1		
Densidade demográfica	Menos que 10	1	2	0	0	1	0	0	2	0	0	2	1	1	1	2	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	2	0	0	1	2	1
	10,1 a 25	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	
	25,1 a 100	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Mais do que 100	1	1	2	1	1	0	1	1	0	0	1	0	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	0	1	0	1	2	1	2	1	1	1	2	2	2	0	1		
Relevo do solo	Montanha	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	2	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	
	Planalto	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	2	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	
	Planície	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Depressão	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Temperatura	Zona tropical	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	2	0	2	1	1	1	1	1	0	0	2	0	1	2	1	0	2	1	2	1	0	1	1		
	Zona temperada	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	2	1	2	0	1	1	1	1	0	1	1		
	Zona polar	1	2	1	2	1	1	1	1	1	2	2	0	1	0	2	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2	1	
Caracterização do afluente	Fraco	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	2	0	0	0	1	2	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
	Médio	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1		
	Forte	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	2	1	2	0	0	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	0	2	2	1	1	2		
Destinação Final	Classe 1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	2	0	0	1	2	2	1	0	1	1	1	2	2	2	2	1	1	0	2	1	1	0	1	0	1	1	0	0	2		
	Classe 2	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	
	Classe 3	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	Classe 4	1	1	1	1	2	0	1	0	0	0	2	2	0	0	0	1	0	0	0	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
	Reuso direto	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	2	0	1	1	2	1	0	0	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	2
Tipo de Sistema	Descentralizado	2	2	0	1	1	0	1	1	0	0	2	2	0	0	2	2	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	2	1	
	Centralizado	2	1	2	1	1	0	1	0	0	1	1	0	2	1	0	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	2	0	1	2	2	1	2		
	Combinado	2	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1		

Fonte: Autoria própria (2022)

Quadro 6 - Matriz de seleção e avaliação de critérios: D 1 + D 2 + D 3

Particularidade	Índice	Custo de Implantação	Custos de O&M	Requisitos de área	Custo-benefício	Requisitos energéticos	Custos do ciclo de vida	VPL	Accessibilidade	Maturidade	Modicidade	Requisitos externos	Necessidade	Riscos	Durabilidade	Participação	Aplicabilidade	Reuso da água	Impactos ambientais	Emissões	Impacto visual	Desempenho	Remoção de MO	Remoção de S	Remoção de N	Remoção de P	Remoção de patógenos	Remoção avançada	Sustentabilidade	Aquecimento global	Recuperação de produtos	Robustez	Eutrofização	Flexibilidade	Mão de obra	Produção de lodo	Aceitação	Odor	Atração de insetos	Ruídos	Simplicidade	Confiabilidade			
		IDH	Baixo: até 0,599	3	3	1	1	2	1	2	2	1	0	2	2	1	1	0	1	0	1	0	0	2	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	3
Médio: 0,600 a 0,699	2		2	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	2	0	0	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	2	2		
Alto: acima de 0,700	1		1	2	1	0	0	0	0	0	2	1	0	1	1	1	1	1	3	1	1	2	1	1	2	2	2	2	3	2	1	1	2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	
Número habitantes	< 4 mil	3	3	1	1	1	1	2	2	0	0	2	2	1	1	2	1	1	1	0	1	2	1	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	1	3	1			
	4 - 100 mil	2	2	2	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	0	0	2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2		
	>100 mil	2	2	3	0	0	1	0	0	1	1	1	1	2	0	0	0	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	2	0	1	0	2	2	0	1	2			
Capacidade de geração	Pequeno porte: <60 L/s	2	2	1	1	0	1	1	1	0	0	2	1	0	2	1	0	1	0	0	2	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	3	2			
	Médio porte: 60-200 L/s	2	2	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	2	1	0	2	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2		
	Grande porte: >200 L/s	2	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	3	1	1	3	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	2	1	2	2	2	2	2			
Densidade demográfica	Menos que 10	2	3	1	0	1	0	0	2	0	0	2	1	1	1	2	1	1	1	0	1	2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	2	0	0	1	3	2				
	10,1 a 25	2	2	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	2	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	2	2			
	25,1 a 100	2	2	2	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	2	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	2	2		
	Mais do que 100	2	2	3	1	1	0	1	1	0	0	1	0	2	1	1	1	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2	0	2	0	1	2	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2			
Relevo do solo	Montanha	2	2	2	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	2	1	2	0	1	2	1	1	1	1	0	0	2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	2	2		
	Planalto	2	2	2	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	2	1	2	0	1	2	1	1	1	1	0	0	2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	2	2	
	Planície	2	2	2	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
	Depressão	2	2	2	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
Temperatura	Zona tropical	2	2	2	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	2	2	0	3	1	1	1	1	1	0	1	2	0	1	2	1	2	1	0	2	1	2	1	0	2	2	
	Zona temperada	2	2	2	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	0	2	1	1	1	1	1	0	1	1	0	2	1	1	2	0	2	1	1	0	0	0	3	2	
	Zona polar	2	3	2	1	2	1	1	1	1	2	2	0	1	0	2	0	2	0	2	0	1	2	1	1	0	0	0	0	1	1	1	2	0	2	1	1	0	0	0	0	3	2		
Caracterização do afluente	Fraco	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	2	0	0	0	1	2	1	0	0	2	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3	1		
	Médio	2	2	2	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	2	1	1	2	1	1	1	0	0	0	2	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	2	2			
	Forte	2	2	2	1	1	0	1	1	1	0	2	1	2	0	0	1	1	3	2	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	1	1	2	0	2	2	1	2	3			
Destinação Final	Classe 1	2	2	2	1	0	0	1	0	1	1	0	1	2	0	0	1	2	3	1	0	2	1	1	2	2	2	2	2	1	0	2	1	1	0	1	0	1	1	0	1	3			
	Classe 2	2	2	2	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	2	0	0	2	1	1	1	1	1	1	2	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	2			
	Classe 3	2	2	2	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	2	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	2	2			
	Classe 4	2	2	2	1	2	0	1	0	0	2	2	0	0	0	1	0	1	0	0	0	3	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1		
	Reuso direto	2	2	2	1	1	1	1	0	1	1	1	1	2	0	1	1	2	2	0	0	2	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	2	3		
Tipo de Sistema	Descentralizado	3	3	1	1	1	0	1	1	0	0	2	2	0	0	2	2	0	1	0	1	2	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	3	2	
	Centralizado	3	2	3	1	1	0	1	0	0	1	1	0	2	1	0	2	1	3	2	1	2	1	1	1	1	1	0	2	1	0	1	1	1	1	2	0	1	2	2	2	3			
	Combinado	3	2	2	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	2	1	1	2	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	2	2	

Fonte: Autoria própria (2022)

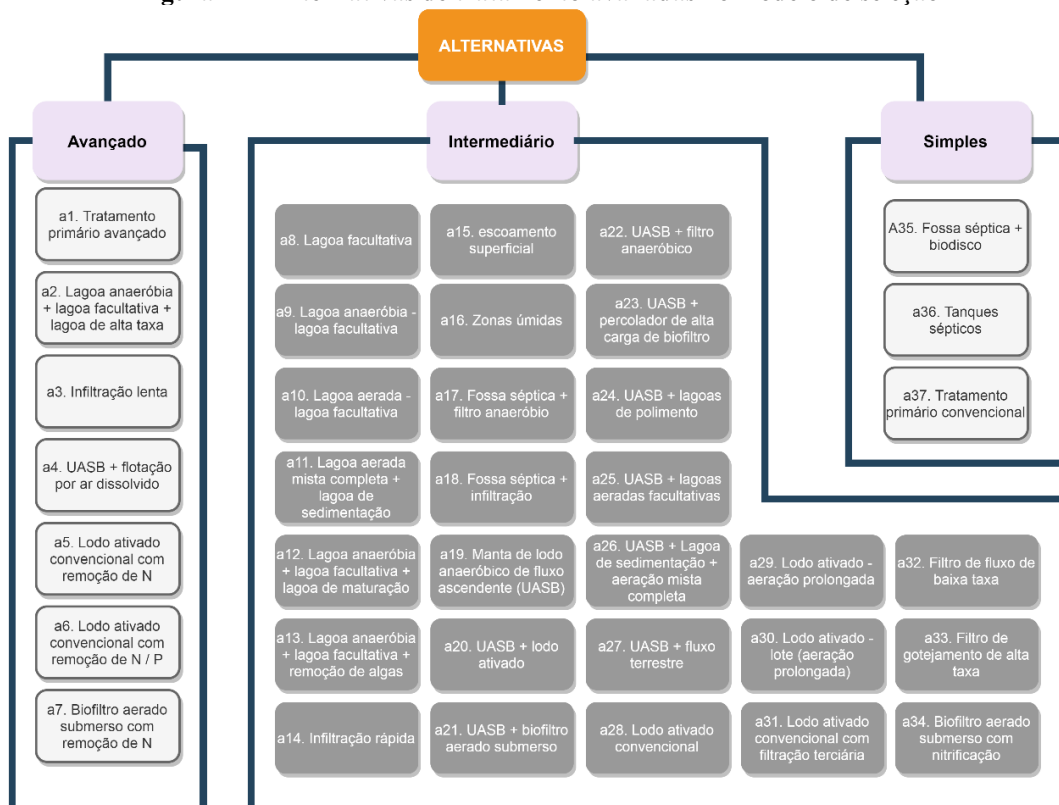
### 4.5 Definição das alternativas

Definir as tecnologias de tratamento que compõem o sistema é essencial para inclusão das alternativas no modelo. Esta definição pode ser realizada com base nas tecnologias disponíveis no país de aplicação do estudo ou nos objetivos iniciais do projeto (KALBAR *et al.*, 2012b; MOLINOS-SENANTE *et al.*, 2014).

O processo típico de tratamento pode ser dividido em simples que representa um processo de sedimentação realizado antes do sistema de tratamento secundário ou principal, o qual consiste da remoção da matéria orgânica e nutrientes presente nas águas residuais. E tratamento avançado, o qual é utilizado para remoção de componentes adicionais específicos (CHERNICHARO *et al.*, 2015).

As alternativas de tratamento foram distribuídas em classes (GOFFI *et al.*, 2018). A Figura 14 apresenta as alternativas de tratamento avaliadas nas 3 aplicações realizadas neste trabalho, com base no nível de tratamento intermediário. Este arranjo envolveu os principais critérios de desempenho descritos por Von Sperling (2014). As características para avaliação de cada tecnologia foram definidas e estão apresentadas no Apêndice A.

Figura 14 – Alternativas de tratamento avaliadas no modelo de seleção



Fonte: Autoria própria (2022)

## 5 APLICAÇÃO DO MODELO DE SELEÇÃO

### 5.1 Cenário

Foram definidos três cenários para aplicação do modelo. Os cenários foram caracterizados de acordo com suas particularidades, conforme descrito no Quadro 7.

**Quadro 7 – Caracterização dos Cenários em que o modelo foi previamente aplicado**

CENÁRIO A		CENÁRIO B		CENÁRIO C	
Particularidade	Índice	Particularidade	Índice	Particularidade	Índice
IDH	Baixo: até 0,599	IDH	Baixo: até 0,599	IDH	Baixo: até 0,599
	Médio: 0,600 a 0,699		Médio: 0,600 a 0,699		Médio: 0,600 a 0,699
	Alto: acima de 0,700		Alto: acima de 0,700		Alto: acima de 0,700
Número habitantes	< 4 mil	Número habitantes	< 4 mil	Número habitantes	< 4 mil
	4 - 100 mil		4 - 100 mil		4 - 100 mil
	>100 mil		>100 mil		>100 mil
Capacidade de geração	Pequeno porte: <60 L/s	Capacidade de geração	Pequeno porte: <60 L/s	Capacidade de geração	Pequeno porte: <60 L/s
	Médio porte: 60-200 L/s		Médio porte: 60-200 L/s		Médio porte: 60-200 L/s
	Grande porte: >200 L/s		Grande porte: >200 L/s		Grande porte: >200 L/s
Densidade demográfica	Menos que 10	Densidade demográfica	Menos que 10	Densidade demográfica	Menos que 10
	10,1 - 25		10,1 - 25		10,1 - 25
	25,1 - 100		25,1 - 100		25,1 - 100
	Mais do que 100		Mais do que 100		Mais do que 100
Relevo do solo	Montanha	Relevo do solo	Montanha	Relevo do solo	Montanha
	Planalto		Planalto		Planalto
	Planície		Planície		Planície
	Depressão		Depressão		Depressão
Temperatura	Zona tropical	Temperatura	Zona tropical	Temperatura	Zona tropical
	Zona temperada		Zona temperada		Zona temperada
	Zona polar		Zona polar		Zona polar
Caracterização do afluente	Fraco	Caracterização do afluente	Fraco	Caracterização do afluente	Fraco
	Médio		Médio		Médio
	Forte		Forte		Forte
Destinação Final	Classe 1	Destinação Final	Classe 1	Destinação Final	Classe 1
	Classe 2		Classe 2		Classe 2
	Classe 3		Classe 3		Classe 3
	Classe 4		Classe 4		Classe 4
	Reuso direto		Reuso direto		Reuso direto
Tipo de Sistema	Descentralizado	Tipo de Sistema	Descentralizado	Tipo de Sistema	Descentralizado
	Centralizado		Centralizado		Centralizado
	Combinado		Combinado		Combinado

Fonte: Autoria própria (2022)

### 5.2 Critérios

A seleção de critério foi feita em função das particularidades do cenário avaliado (Quadro 8). Foram definidos os principais critérios citados e então aplicado o método de COPELAND (Quadro 9). A partir dele foi calculado a soma das vitórias menos as derrotas, em uma votação por maioria simples. As alternativas/critérios de avaliação foram então ordenadas pelo resultado dessa soma. O método de COPELAND tem como vantagem sempre fornecer uma ordenação total.

**Quadro 8 – Votação de critérios pelos decisores em função das particularidades**

Particularidade	Índice	Custo de Implantação	Custos de O&M	Requisitos de área	Custo-benefício	Requisitos energéticos	Custos do ciclo de vida	VPL	Accessibilidade	Maturidade	Modernidade	Requisitos externos	Necessidade	Riscos	Durabilidade	Participação	Aplicabilidade	Reuso da água	Impactos ambientais	Emissões	Impacto visual	Desempenho	Remoção de MO	Remoção de S	Remoção de N	Remoção de P	Remoção de patógenos	Remoção avançada	Sustentabilidade	Aquecimento global	Recuperação de produtos	Robustez	Eutrofização	Flexibilidade	Mão de obra	Produção de lodo	Aceitação	Odor	Atração de insetos	Ruídos	Simplicidade	Confiabilidade		
		CENÁRIO A	IDH	Alto	1	1	2	1	0	0	0	0	2	1	0	1	1	1	1	1	3	1	1	2	1	1	2	2	2	2	3	2	1	1	2	1	0	1	2	1	1	1	1	2
Número habitantes	< 4 mil		3	3	1	1	1	1	2	2	0	0	2	2	1	1	2	1	1	0	1	2	1	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	3	1	0	1	3	1		
Capacidade de geração	Pequeno porte		2	2	1	1	0	1	1	1	0	0	0	2	1	0	2	1	0	1	0	0	2	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	3	2	
Densidade demográfica	10,1 - 25		2	2	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	2	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	2	2		
Relevo do solo	Planalto		2	2	2	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	2	1	2	0	1	2	1	1	1	1	0	0	2	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	2	2		
Temperatura	Zona temperada		2	2	2	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	0	2	1	1	1	1	1	0	1	1	0	2	1	2	0	1	1	1	1	0	2	2	
Caract. do afluente	Fraco		1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	2	0	0	0	1	2	1	0	0	2	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3	1	
Destinação Final	Classe 3		2	2	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	2	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	2	2	
Tipo de Sistema	Descentralizado		3	3	1	1	1	0	1	1	0	0	2	2	0	0	2	2	0	1	0	1	2	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	3	2	
CENÁRIO B	IDH	Alto	1	1	2	1	0	0	0	0	2	1	0	1	1	1	1	1	3	1	1	2	1	1	2	2	2	2	3	2	1	1	2	1	0	1	2	1	1	1	1	2		
	Número habitantes	4 - 100 mil	2	2	2	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	0	0	2	0	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	2	
	Capacidade de geração	Médio porte	2	2	2	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	2	1	0	2	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	
	Densidade demográfica	Mais do que 100	2	2	3	1	1	0	1	1	0	0	1	0	2	1	1	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1	2	0	2	0	1	2	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2	
	Relevo do solo	Planalto	2	2	2	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	2	1	2	0	1	2	1	1	1	1	0	0	2	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	2	2	
	Temperatura	Zona temperada	2	2	2	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	0	2	1	1	1	1	1	0	1	1	0	2	1	2	0	1	1	1	1	0	2	2	
	Caract. do afluente	Médio	2	2	2	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	2	1	1	2	1	1	1	0	0	0	2	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	2	2
	Destinação Final	Classe 3	2	2	2	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	2	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	2	2	
	Tipo de Sistema	Centralizado	3	2	3	1	1	0	1	0	0	1	1	0	2	1	0	2	1	3	2	1	2	1	1	1	1	1	0	2	1	0	1	1	1	1	1	2	0	1	2	2	2	3
CENÁRIO C	IDH	Alto	1	1	2	1	0	0	0	0	2	1	0	1	1	1	1	1	3	1	1	2	1	1	2	2	2	2	3	2	1	1	2	1	0	1	2	1	1	1	1	2		
	Número habitantes	>100 mil	2	2	3	0	0	1	0	0	1	1	1	1	2	0	0	0	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	2	0	1	1	2	2	0	1	2		
	Capacidade de geração	Grande porte	2	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	3	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2		
	Densidade demográfica	Mais do que 100	2	2	3	1	1	0	1	1	0	0	1	0	2	1	1	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1	2	0	2	0	1	2	1	2	1	1	1	2	2	2	1	2	
	Relevo do solo	Planalto	2	2	2	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	2	1	2	0	1	2	1	1	1	1	0	0	2	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	2	2	
	Temperatura	Zona tropical	2	2	2	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	2	2	0	3	1	1	1	1	1	0	1	2	0	1	2	1	0	2	1	2	1	0	2	2	
	Caract. do afluente	Forte	2	2	2	1	1	0	1	1	1	0	2	1	2	0	0	1	1	3	2	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	1	1	2	0	2	2	1	2	3	
	Destinação Final	Classe 3	2	2	2	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	2	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	2	2	
	Tipo de Sistema	Centralizado	3	2	3	1	1	0	1	0	0	1	1	0	2	1	0	2	1	3	2	1	2	1	1	1	1	1	0	2	1	0	1	1	1	1	1	2	0	1	2	2	2	3

Fonte: Autoria própria (2022)

**Quadro 9 – COPELAND para os critérios selecionados em cada cenário avaliado**

Ordem Copeland	Critério	D1	D2	D3	Ordem Copeland	Critério	D1	D2	D3	Ordem Copeland	Critério	D1	D2	D3
1°	Desempenho	1	6	4	1°	Custos de O&M	3	3	2	1°	Requisitos de área	1	1	1
2°	Simplicidade	4	2	1	2°	Aplicabilidade	1	5	4	2°	Custo de Implatação	6	6	2
3°	Custo de Implatação	3	4	2	3°	Custo de Implatação	4	4	3	3°	Robustez	4	4	4
4°	Custos de O&M	5	5	3	4°	Robustez	2	1	8	4°	Custos de O&M	7	7	3
5°	Confiabilidade	6	8	5	5°	Requisitos de área	7	7	9	5°	Flexibilidade	5	5	10
6°	Requisitos de área	9	9	6	6°	Atração de insetos	6	2	1	6°	Produção de lodo	2	2	7
7°	Impactos ambientais	10	10	7	7°	Confiabilidade	8	8	10	7°	Sustentabilidade	3	3	6
8°	Sustentabilidade	11	11	8	8°	Produção de lodo	5	6	5	8°	Desempenho	8	8	5
9°	Aplicabilidade	2	1	9	9°	Simplicidade	12	12	6	9°	Emissões	14	14	8
10°	Aceitação	7	7	11	10°	Riscos	13	13	7	10°	Aplicabilidade	9	9	15
11°	Necessidade	8	3	10	11°	Desempenho	9	9	11	11°	Impactos ambientais	12	12	12
					12°	Flexibilidade	10	10	12	12°	Rem.de patógenos	15	15	9
					13°	Impactos ambientais	11	11	13	13°	Confiabilidade	10	10	16
					14°	Sustentabilidade	14	14	14	14°	Eutrofização	17	17	14
										15°	Atração de insetos	13	13	11
										16°	Riscos	11	11	17
										17°	Odor	16	16	13

Fonte: Autoria própria (2022)

### 5.3 Definição dos parâmetros de ponderação

De forma a definir os pesos, ou seja, expressar preferência entre critérios foram utilizados dois métodos, o método AHP e o método de Simos. Dessa maneira, relações de preferência foram propostas para apoiar os tomadores de decisão no processo de definição das prioridades.

Nos Quadros 10, 11 e 12 são exibidos os resultados da associação entre julgamentos e a escala de intensidade de importância utilizada, na avaliação par a par dos critérios selecionados para cada cenário, para o método AHP.

Para o método AHP, foi conduzido o teste de consistência, pelo qual a comparação pareada dos critérios obteve, respectivamente, uma relação de consistência de 0,029, 0,041, e 0,027 para cada cenário avaliado, o que atende ao requisito de Saaty de inconsistência aceitável menor ou igual a 0,1.

Nos Quadros 13, 14 e 15 são apresentados os resultados da aplicação do método de Simos para definição de pesos.

**Quadro 10 - Matriz de decisão de pesos AHP: Cenário A**

i	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	Rank	Crítérios	i	Peso
C1	1	1.00	3.00	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	1.00	2.00	2.00	1	Custos de O&M	C2	13,20%
C2	1.00	1	4.00	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	1.00	2.00	2.00	2	Custo de Implatação	C1	12,50%
C3	0.33	0.25	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	3	Necessidade	C4	11,90%
C4	1.00	1.00	1.00	1	1.00	2.00	2.00	2.00	1.00	2.00	2.00	4	Aplicabilidade	C5	10,60%
C5	1.00	1.00	1.00	1.00	1	2.00	1.00	2.00	1.00	2.00	1.00	5	Aceitação	C9	8,80%
C6	1.00	1.00	1.00	0.50	0.50	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	6	Desempenho	C7	8,20%
C7	0.50	0.50	1.00	0.50	1.00	1.00	1	2.00	1.00	2.00	1.00	7	Impactos ambientais	C6	7,80%
C8	0.50	0.50	1.00	0.50	0.50	1.00	0.50	1	1.00	1.00	1.00	8	Simplicidade	C10	7,20%
C9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1	1.00	1.00	9	Confiabilidade	C11	7,10%
C10	0.50	0.50	1.00	0.50	0.50	1.00	0.50	1.00	1.00	1	1.00	10	Sustentabilidade	C8	6,30%
C11	0.50	0.50	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1	10	Requisitos de área	C3	6,30%

Fonte: Autoria própria (2022)

**Quadro 11 - Matriz de decisão de pesos AHP: Cenário B**

i	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	Rank	Critérios	i	Peso
C1	1	1.00	3.00	2.00	2.00	2.00	1.00	2.00	3.00	2.00	2.00	3.00	3.00	1.00	1	Custos de O&M	C2	12,20%
C2	1.00	1	3.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2	Custo de Implatação	C1	12,10%
C3	0.33	0.33	1	1.00	1.00	1.00	1.00	2.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	3	Riscos	C4	11,60%
C4	0.50	0.50	1.00	1	2.00	2.00	2.00	3.00	2.00	2.00	3.00	3.00	6.00	2.00	4	Desempenho	C7	9,70%
C5	0.50	0.50	1.00	0.50	1	1.00	1.00	2.00	1.00	1.00	3.00	2.00	3.00	1.00	5	Aplicabilidade	C5	7,20%
C6	0.50	0.50	1.00	0.50	1.00	1	1.00	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	2.00	1.00	6	Robustez	C9	7,10%
C7	1.00	0.50	1.00	0.50	1.00	1.00	1	2.00	2.00	2.00	5.00	5.00	3.00	1.00	7	Impactos ambientais	C6	6,30%
C8	0.50	0.50	0.50	0.33	0.50	1.00	0.50	1	1.00	2.00	1.00	2.00	2.00	1.00	8	Requisitos de área	C3	6,00%
C9	0.33	0.50	1.00	0.50	1.00	1.00	0.50	1.00	1	2.00	2.00	4.00	4.00	1.00	9	Confiabilidade	C14	5,90%
C10	0.50	0.50	1.00	0.50	1.00	1.00	0.50	0.50	0.50	1	1.00	2.00	2.00	1.00	10	Sustentabilidade	C8	5,40%
C11	0.50	0.50	1.00	0.33	0.33	0.50	0.20	1.00	0.50	1.00	1	1.00	2.00	1.00	11	Flexibilidade	C10	5,20%
C12	0.33	0.50	1.00	0.33	0.50	0.50	0.20	0.50	0.25	0.50	1.00	1	1.00	1.00	12	Produção de lodo	C11	4,30%
C13	0.33	0.50	1.00	0.17	0.33	0.50	0.33	0.50	0.25	0.50	0.50	1.00	1	1.00	13	Atração de insetos	C12	3,60%
C14	1.00	0.50	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1	14	Simplicidade	C13	3,30%

Fonte: Autoria própria (2022)



Quadro 12 - Matriz de desisão de pesos AHP: Cenário C

i	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	Rank	Crítérios	i	Peso
C1	1	1.00	1.00	1.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.00	2.00	2.00	3.00	2.00	2.00	3.00	3.00	3.00	1	Requisitos de área	C3	14,70%
C2	1.00	1	1.00	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	3.00	3.00	2.00	3.00	2.00	2.00	2	Custo de Implatação	C1	10,70%
C3	1.00	1.00	1	2.00	3.00	5.00	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	5.00	3.00	3.00	5.00	3.00	3.00	3	Custos de O&M	C2	9,50%
C4	1.00	1.00	0.50	1	2.00	2.00	3.00	3.00	2.00	1.00	2.00	3.00	2.00	1.00	2.00	2.00	2.00	4	Riscos	C4	8,40%
C5	0.33	0.50	0.33	0.50	1	2.00	2.00	2.00	1.00	1.00	2.00	2.00	2.00	1.00	1.00	2.00	1.00	5	Desempenho	C10	8,30%
C6	0.33	0.50	0.20	0.50	0.50	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	6	Aplicabilidade	C5	5,60%
C7	0.33	0.50	0.20	0.33	0.50	1.00	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	7	Robustez	C9	4,90%
C8	0.33	0.50	0.20	0.33	0.50	1.00	1.00	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	8	Flexibilidade	C17	4,20%
C9	0.50	0.50	0.33	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1	1.00	1.00	2.00	2.00	1.00	1.00	2.00	1.00	9	Confiabilidade	C14	4,20%
C10	0.50	0.50	0.33	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	1.00	10	Odor	C15	4,00%
C11	0.50	0.50	0.33	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	0.25	1	1.00	1.00	1.00	1.00	2.00	1.00	11	Produção de lodo	C11	4,00%
C12	0.33	0.33	0.20	0.33	0.50	1.00	1.00	1.00	0.50	0.25	1.00	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	12	Impactos ambientais	C6	3,90%
C13	0.50	0.33	0.33	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	0.50	0.25	1.00	1.00	1	1.00	1.00	1.00	1.00	13	Emissões	C7	3,80%
C14	0.50	0.50	0.33	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.25	1.00	1.00	1.00	1	1.00	1.00	1.00	13	Sustentabilidade	C8	3,80%
C15	0.33	0.33	0.20	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.25	1.00	1.00	1.00	1.00	1	3.00	1.00	15	Eutrofização	C13	3,60%
C16	0.33	0.50	0.33	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	0.50	0.25	0.50	1.00	1.00	1.00	0.33	1	1.00	16	Rem.de patógenos	C16	3,30%
C17	0.33	0.50	0.33	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1	17	Atração de insetos	C12	3,30%

Fonte: Autoria própria (2022)

**Quadro 13 - Simos para decisão de pesos: Cenário A**

Ordem Copeland	Critério	D1	D2	D3	Peso Final	Rank (r)	Critério no rank (r)	Número de critérios no rank r	Posições (p)	Peso não normalizado (kr)	Peso normalizado *(kr)	Total *(kr)*p
1 °	Desempenho	1	6	4	12,63	0	6,7,8,10	4	1+2+3+4	2,50	1,32	5,26
2 °	Simplicidade	4	2	1	18,95							
3 °	Custo de Implatação	3	4	2	18,95	1	1,9,3,2,4	5	5+6+7+8+9	7,00	3,68	18,42
4 °	Custos de O&M	5	5	3	18,95							
5 °	Confiabilidade	6	8	5	8,95	2	9,2,11,3,4	5	10+11+12+13+14	12,00	6,32	31,58
6 °	Requisitos de área	9	9	6	1,32							
7 °	Impactos ambientais	10	10	7	1,32	3	2,3,4,1,5	5	15+16+17+18+19	17,00	8,95	44,74
8 °	Sustentabilidade	11	11	8	1,32							
9 °	Aplicabilidade	2	1	9	10,00	$\Sigma$ das posições			190	38,50	20,26	100,00
10 °	Aceitação	7	7	11	1,32							
11 °	Necessidade	8	3	10	6,32							

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Quadro 14 - Simos para decisão de pesos: Cenário B

Ordem Copeland	Critério	D1	D2	D3	Peso Final	Rank (r)	Critério no rank (r)	Número de critérios no rank r	Posições (p)	Peso não normalizado (kr)	Peso normalizado *(kr)	Total *(kr)*p
1 °	Custos de O&M	3	3	2	15,50	0	9,10,11,12,13,14	6	1+2+3+4+5+6	3,50	1,17	7,00
2 °	Aplicabilidade	1	5	4	15,50							
3 °	Custo de Implatação	4	4	3	15,50	1	2, 4, 1, 3, 5, 6	6	7+8+9+10+11+12	9,50	3,17	19,00
4 °	Robustez	2	1	8	8,33							
5 °	Requisitos de área	7	7	9	8,33	2	4, 5, 1, 3, 2, 8	6	13+14+15+16+17+18	15,50	5,17	31,00
6 °	Atração de insetos	6	2	1	10,33							
7 °	Confiabilidade	8	8	10	3,17	3	4, 6, 1, 3, 2, 10	6	19+20+21+22+23+24	21,50	7,17	43,00
8 °	Produção de lodo	5	6	5	5,17							
9 °	Simplicidade	12	12	6	5,17	$\Sigma$ das posições			300	50,00	16,67	100,00
10 °	Riscos	13	13	7	8,33							
11 °	Desempenho	9	9	11	1,17							
12 °	Flexibilidade	10	10	12	1,17							
13 °	Impactos ambientais	11	11	13	1,17							
14 °	Sustentabilidade	14	14	14	1,17							

Fonte: Autoria própria (2022)

**Quadro 15 - Simos para decisão de pesos: Cenário C**

Ordem Copeland	Critério	D1	D2	D3	Peso Final	Rank (r)	Critério no rank (r)	Número de critérios no rank r	Posições (p)	Peso não normalizado (kr)	Peso normalizado *(kr)	Total *(kr)*p
1 °	Requisitos de área	1	1	1	14,68	0	13,14,15,16,17	5	1+2+3+4+5	4,00	1,06	5,29
2 °	Custo de Implatação	6	6	2	14,68							
3 °	Robustez	4	4	4	14,68	1	9,10,11,12	4	6+7+8+9	7,50	1,98	7,94
4 °	Custos de O&M	7	7	3	6,48							
5 °	Flexibilidade	5	5	10	8,20	2	1,6,8,3,5,2	6	10+11+12+13+14+15	12,50	3,31	19,84
6 °	Produção de lodo	2	2	7	8,20							
7 °	Sustentabilidade	3	3	6	11,38	3	1,6,7,3,5,2	6	16+17+18+19+20+21	18,50	4,89	29,37
8 °	Desempenho	8	8	5	9,79							
9 °	Emissões	14	14	8	1,98	4	1,2,4,3,8,7	6	22+23+24+25+26+27	24,50	6,48	38,89
10 °	Aplicabilidade	9	9	15	1,98							
11 °	Impactos ambientais	12	12	12	1,98	$\Sigma$ das posições			378	67,00	17,72	100,00
12 °	Rem.de patógenos	15	15	9	1,98							
13 °	Confiabilidade	10	10	16	0,79							
14 °	Eutrofização	17	17	14	0,79							
15 °	Atração de insetos	13	13	11	0,79							
16 °	Riscos	11	11	17	0,79							
17 °	Odor	16	16	13	0,79							

Fonte: Autoria própria (2022)

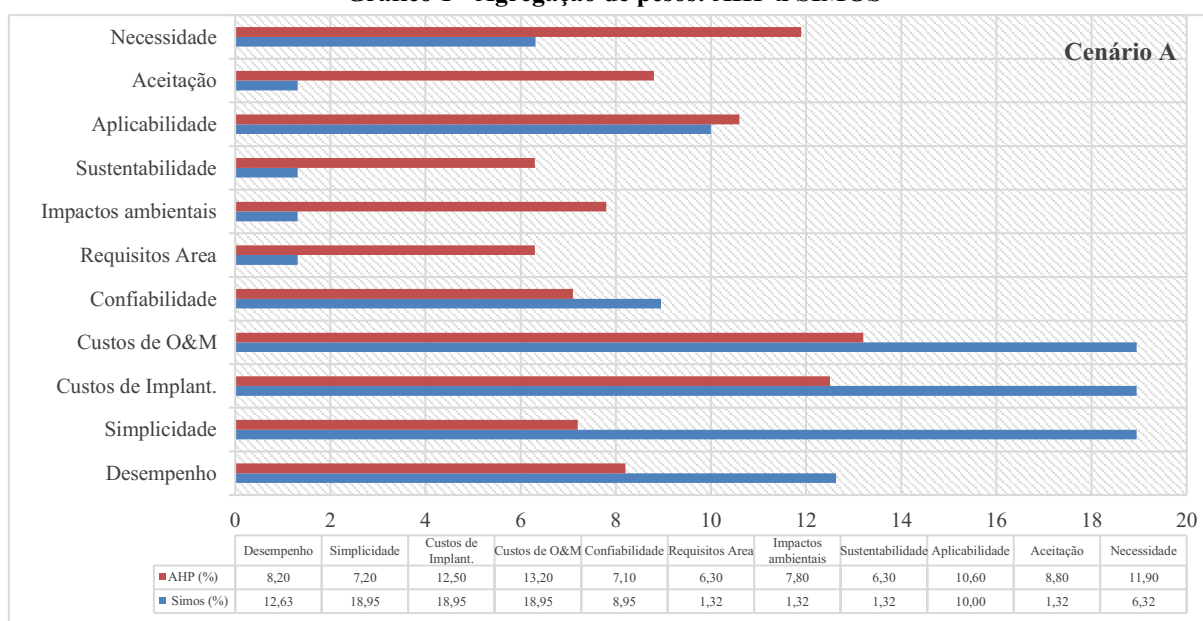
Ao agregar as preferências dos decisores, diferentes abordagens podem ser seguidas, mas duas são mais comumente usadas, são elas: agregar os julgamentos individuais para cada conjunto de comparações de pares em uma hierarquia, ou agregar as prioridades individuais, em uma abordagem que sintetiza cada uma das hierarquias individuais e agrega as prioridades resultantes (BERNASCONI *et al.*, 2014).

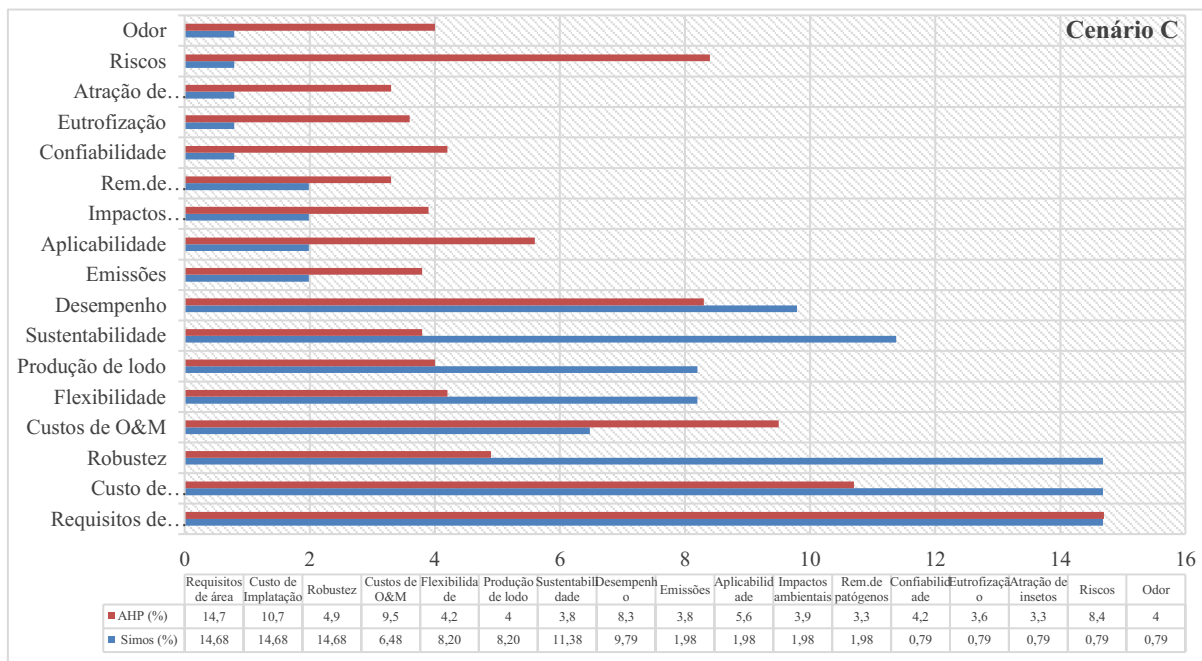
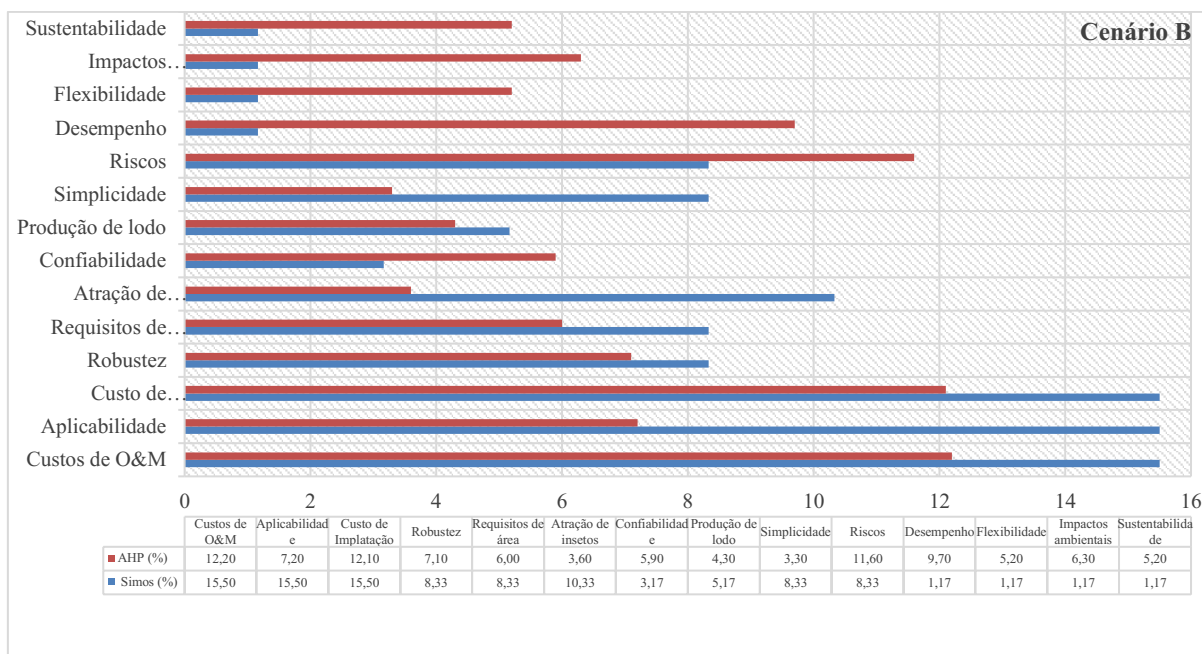
Com base nisto, em nosso estudo devido ao grande número de variáveis consultadas, e decisores avaliados foi realizada a comparação dos resultados finais obtidos pela utilização dos dois métodos, AHP e Simos (Gráfico 1 e Gráfico 2), a fim de avaliar possíveis diferenças entre esses, bem como, vantagens e desvantagens para o modelo global de seleção de tecnologias de tratamento.

O procedimento de Simos foi escolhido como um procedimento de agregação, por ser uma técnica que permite a qualquer tomador de decisão pensar e expressar a forma como deseja hierarquizar os diferentes critérios em um determinado contexto, de forma simples e prática. Portanto, o procedimento é indicado para adquirir a importância relativa e os pesos dos critérios, em futuras aplicações.

E o método AHP estabelece pesos de forma flexível, permitir verificar inconsistências possibilita reconhecer se um indicador é mais importante do que outro, mesmo no caso de indicadores qualitativos (LOGHMANPOOR *et al.*, 2013). Assim, neste estudo, a técnica AHP também foi empregada para atribuir pesos a cada indicador, pois permite que as preferências dos especialistas sejam incluídas de forma intuitiva.

**Gráfico 1 - Agregação de pesos: AHP x SIMOS**





Fonte: Autoria própria (2022)

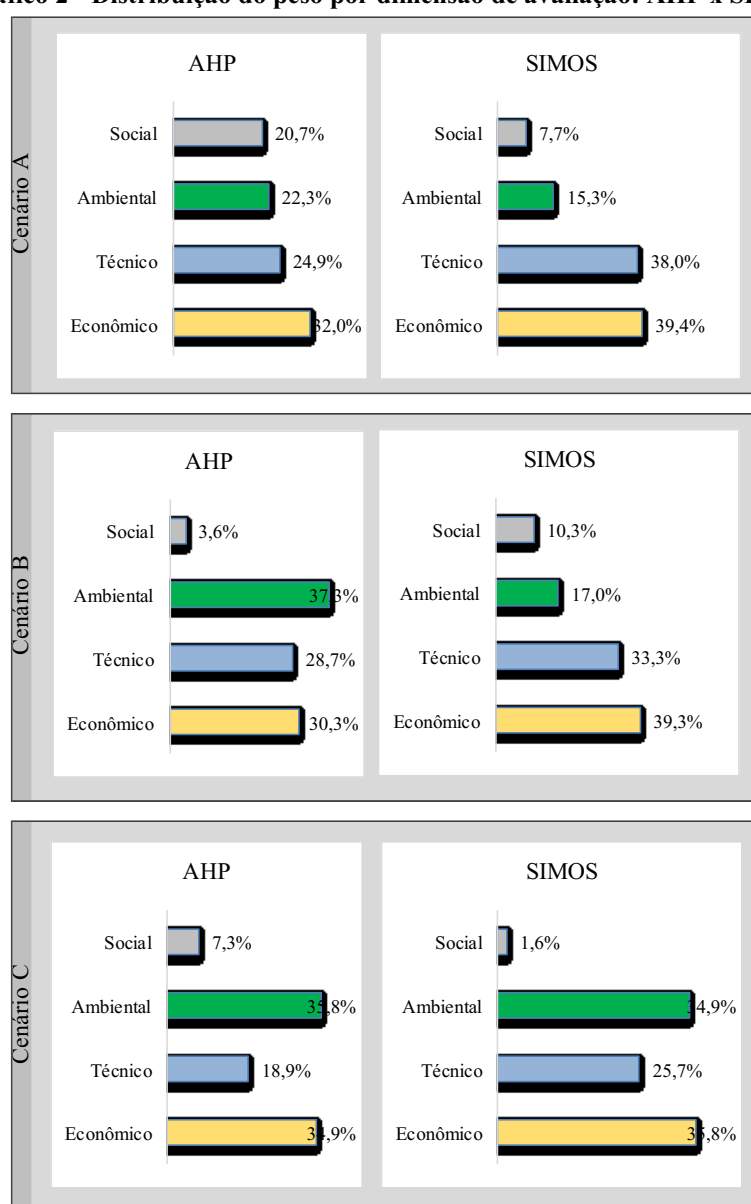
A atribuição de peso aos critérios é etapa essencial para rodar o modelo e então chegar ao resultado final. Os critérios envolvidos são mais ou menos importantes para a tomada de decisão e, na maioria das vezes, são conflitantes ou interagem muitas vezes de modo não óbvio. Embora uma classificação parcial dos critérios seja fornecida neste trabalho é imprescindível que uma técnica de agregação de pesos seja integrada ao modelo.

Analisando as duas técnicas empregadas, AHP e Simos, é possível avaliar através dos gráficos apresentados, coerência nos valores obtidos ao final do ranqueamento dos critérios,

para ambas as metodologias utilizadas, especialmente para cenários com menor número de critérios (Cenário A e B).

O mesmo pode ser observado no Gráfico 2, onde os métodos AHP e Simos apresentaram peso global similar por dimensão de avaliação. Esta análise é essencial para apoiar a tomada de decisão, uma vez que a classificação das alternativas se baseia em tais elementos, especialmente considerando que os aspectos envolvidos na seleção do sistema de tratamento compõem um problema multidimensional.

**Gráfico 2 - Distribuição do peso por dimensão de avaliação: AHP x SIMOS**



Fonte: Autoria própria (2022)

Em todos os cenários avaliados a dimensão econômica obteve acima de 30% do peso para avaliação, seguido respectivamente da dimensão ambiental, técnica e com menor valor a dimensão social. Segundo Molinos-Senante *et al.*, (2014) a atribuição do menor peso aos aspectos sociais é comum, esse aspecto tem maior peso de decisão em cenários onde há busca por tecnologias individuais, o que justifica o maior peso para esta dimensão no cenário A.

A maioria dos estudos que avaliaram a sustentabilidade das tecnologias de tratamento de efluentes domésticos têm se concentrado predominantemente em aspectos ambientais e/ou econômicos, omitindo a dimensão social (RODRIGUEZ-GARCIA *et al.*, 2011; HARDISTY *et al.*, 2013).

#### 5.4 Seleção da melhor alternativa

Para a modelagem do problema foram analisadas 27 alternativas (Classe de tecnologias classificadas para tratamento intermediário, item 4.5). Essas tecnologias foram aplicadas em três cenários diferentes, previamente descritos no item 5.1. Para cada cenário analisado, um grupo de critérios foi sugerido (item 5.2), bem como, os pesos destes foram definidos de acordo com as particularidades de cada cenário (item 5.3). Os critérios foram modelados de acordo com cada alternativa (Apêndice C), só então foram inseridos na matriz de avaliação Promethee.

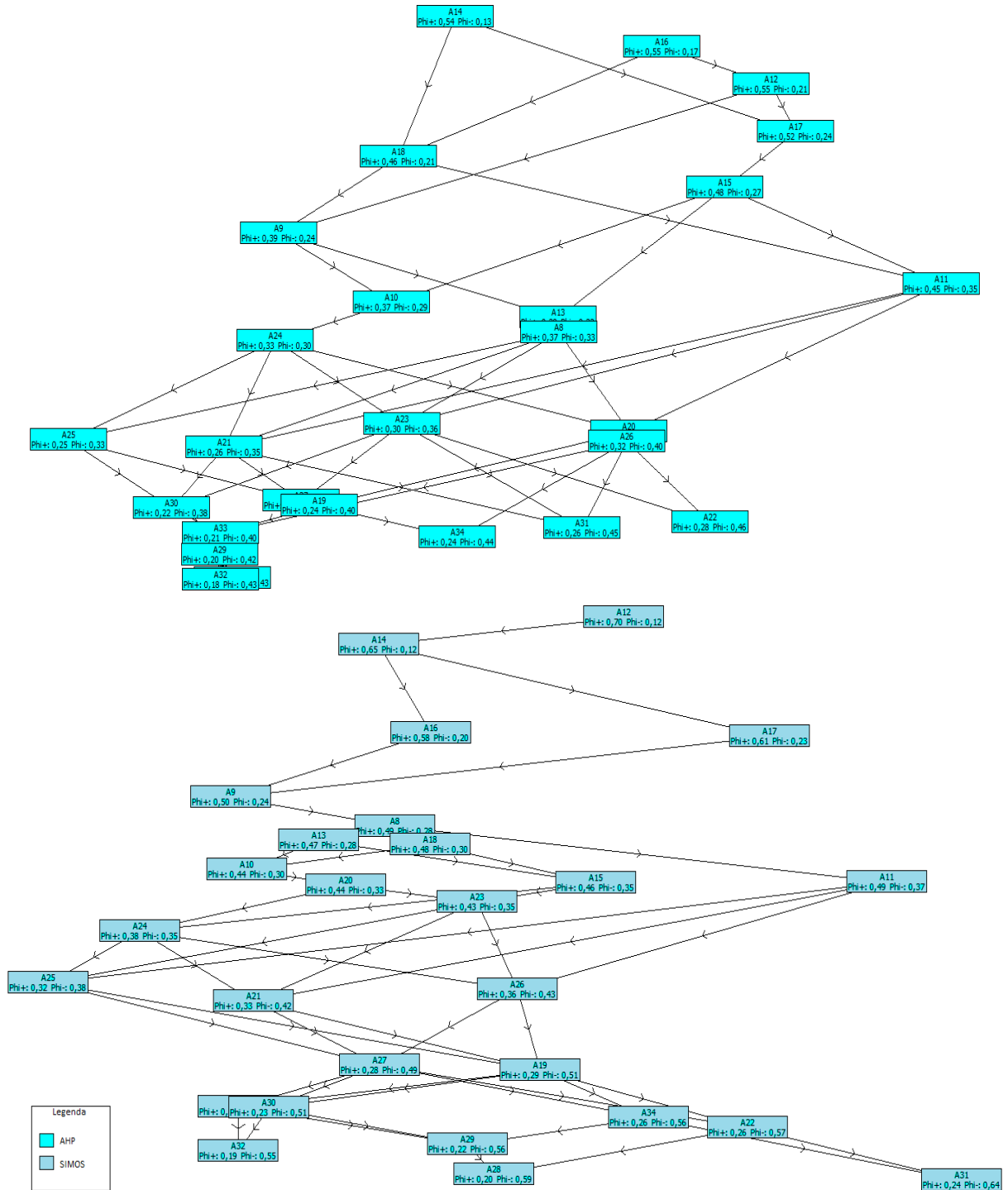
A aplicação do método Promethee foi conduzida no software Visual Promethee. No Apêndice D são listadas as métricas de desempenho computadas para cada uma das 27 alternativas analisadas de acordo com os critérios de seleção, para cenário A, B, e C.

Os fluxos de preferência são apresentados nos Figuras 15, 16 e 17 indicando o fluxo positivo ( $\Phi^+$ ), o fluxo negativo ( $\Phi^-$ ) e o fluxo líquido ( $\Phi$ ) obtido pela diferença entre os parâmetros analisados. O fluxo líquido demonstra diretamente qual alternativa possui maiores vantagens em relação às outras. O fluxo  $\Phi$  positivo apresenta o quanto a solução proposta possui de vantagem em relação às outras e o  $\Phi$  negativo traduz o quanto a solução proposta possui de desvantagem. Além disto, com base na dinâmica dos fluxos é possível avaliar a similaridade entre as alternativas, bem como, as diferenças quanto aos critérios avaliados.

Através desta representação gráfica as alternativas são apresentadas como nós e as setas são desenhadas para indicar as preferências, e as incomparabilidades são facilmente detectadas.



Figura 15 - Fluxos de preferência para o cenário A



Fonte: Autoria própria (2022)

Conforme fluxos de preferência para o cenário A, foi possível observar que indiferente ao método de avaliação dos pesos as 4 primeiras alternativas preferidas se mantiveram as mesmas. Sendo elas a Infiltração rápida (A14), Sistema wetlands (A16), Tanques sépticos

seguido de filtro anaeróbio (A17), e conjunto de Lagoas anaeróbia, facultativa e lagoa de maturação (A12).

Podemos ver que as alternativas que estão no topo do ranking foram muito bem em praticamente todos os critérios avaliados. Resultado em acordo com o observado por Molinos-Senante *et al.* (2014), Molinos-Senante *et al.* (2015), e Kalbar *et al.* (2013) para aplicações com particularidades similares ao cenário A, tais como: efluente fraco, baixo volume de geração, pequena comunidade rural, grande disponibilidade de área, e poucos recursos financeiros disponíveis. Em ambos os trabalhos, os autores apotaram a combinação de lagoas e o sistema wetland como preferível para comunidades com até 1500 habitantes, e geração diária de esgoto de até 400 m<sup>3</sup>/dia. Além disso, os autores destacaram que uma das desvantagens destes sistemas é a necessidade de grandes áreas, especialmente para os sistemas de lagoas, o que não é um problema em locais similares ao cenário A, que não possuem restrição quanto ao uso de área.

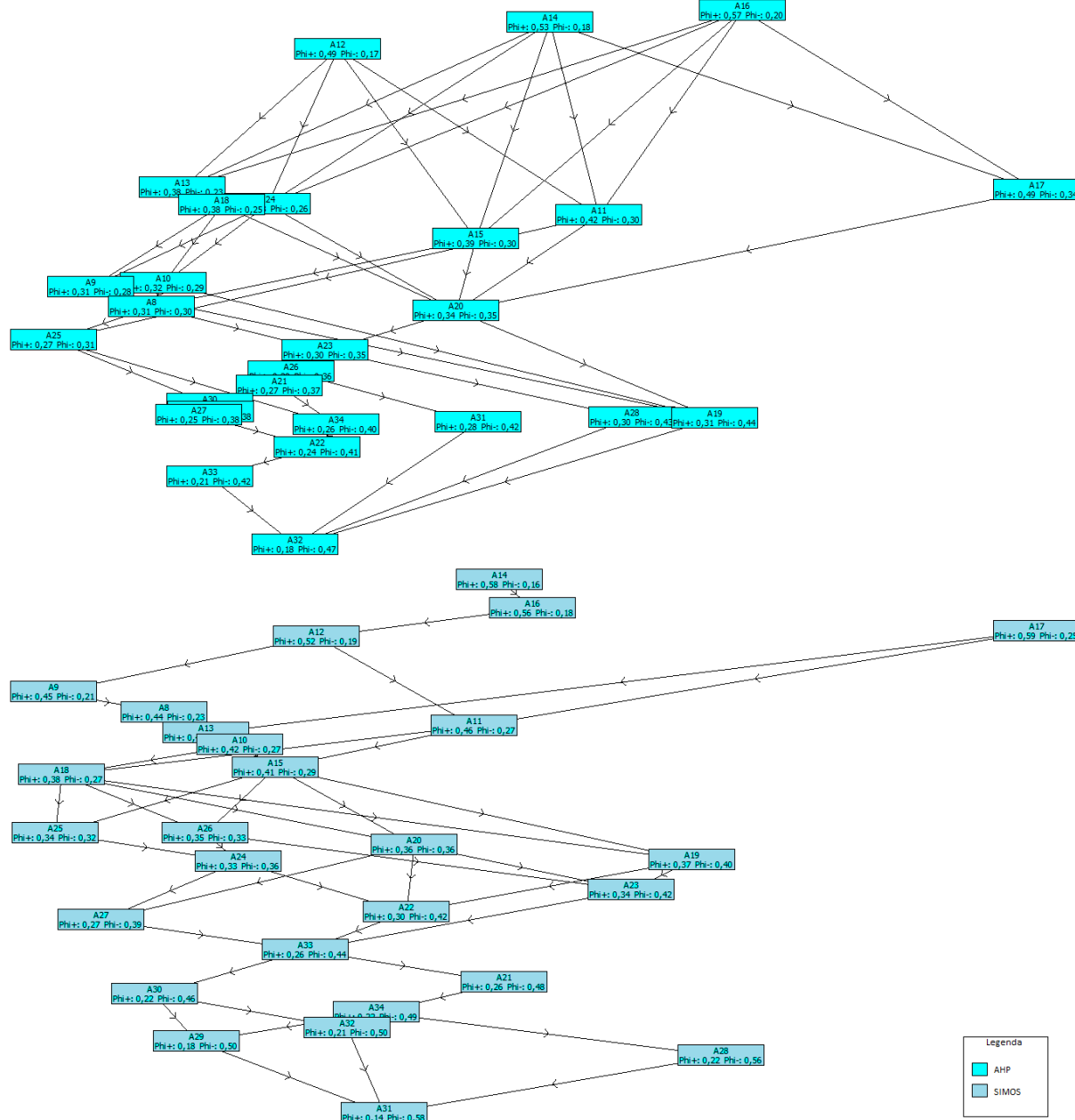
Segundo Molinos-Senante *et al.* (2014) embora os sistemas wetlands e os sistemas de lagoas sejam tecnologias classificadas com menor sustentabilidade ambiental, há também estudos que relatam que essas tecnologias são ecologicamente mais corretas do que tecnologias intensivas em função da pouca demanda de energia e demais demandas para gestão do sistema (KALBAR *et al.*, 2012; YILDIRIM; TOPKAYA, 2012). Aliado a estes fatores, a dimensão ambiental teve menor representatividade na decisão final (22,3%-AHP; 15,3%-SIMOS), provavelmente por se tratar de uma unidade de tratamento com menor geração, consequentemente, menor carga de poluentes e menor pressão, logo, menor impacto direto ao meio ambiente.

As alternativas menos preferidas para ambos as metodologias de ponderação de peso foram Lodo ativado com aeração prolongada (A29), Lodo ativado convencional com filtração terciária (A31), Filtro biológico percolador de baixa carga (A32) e alta carga (A33). A dimensão com maior peso neste cenário foi a econômica (32%-AHP; 39,4-SIMOS).

Do ponto de vista econômico, tecnologias extensivas são mais atrativas do que tecnologias intensivas (GOFFI *et al.*, 2018). Deste modo, os altos custos devem ser observados, sendo do ponto de vista econômico é pouco desejável. Uma das principais vantagens destes sistemas é a baixa demanda de área, critério com menor peso no cenário avaliado, ao passo que apresenta elevado custo de instalação do sistema, critério com maior peso, justificando assim, a posição destas alternativas no ranque de avaliação. Resultado similar ao observado por Arroyo *et al.* (2018). Os autores também ressaltaram a posição de sistemas envolvendo filtros a baixa confiabilidade e problemas associados a vida útil.

Na Figura 16 são apresentados os fluxos de preferências para o cenário B.

Figura 16 - Fluxos de preferência para o cenário B



Fonte: Autoria própria (2022)

As alternativas preferidas para o cenário B foram similares as observadas no cenário A. As 3 primeiras alternativas preferidas se mantiveram, sendo elas Infiltração rápida (A14), Sistema wetlands (A16), e conjunto de Lagoas anaeróbia, facultativa e lagoa de maturação (A12).

Segundo Kalbar *et al.* (2013) o sistema wetland é geralmente o preferido quando pesos e critérios são similares, independente do cenário avaliado, devido suas características de alta

performance, especialmente para critérios qualitativos, tais como: sustentabilidade, replicabilidade, aceitabilidade.

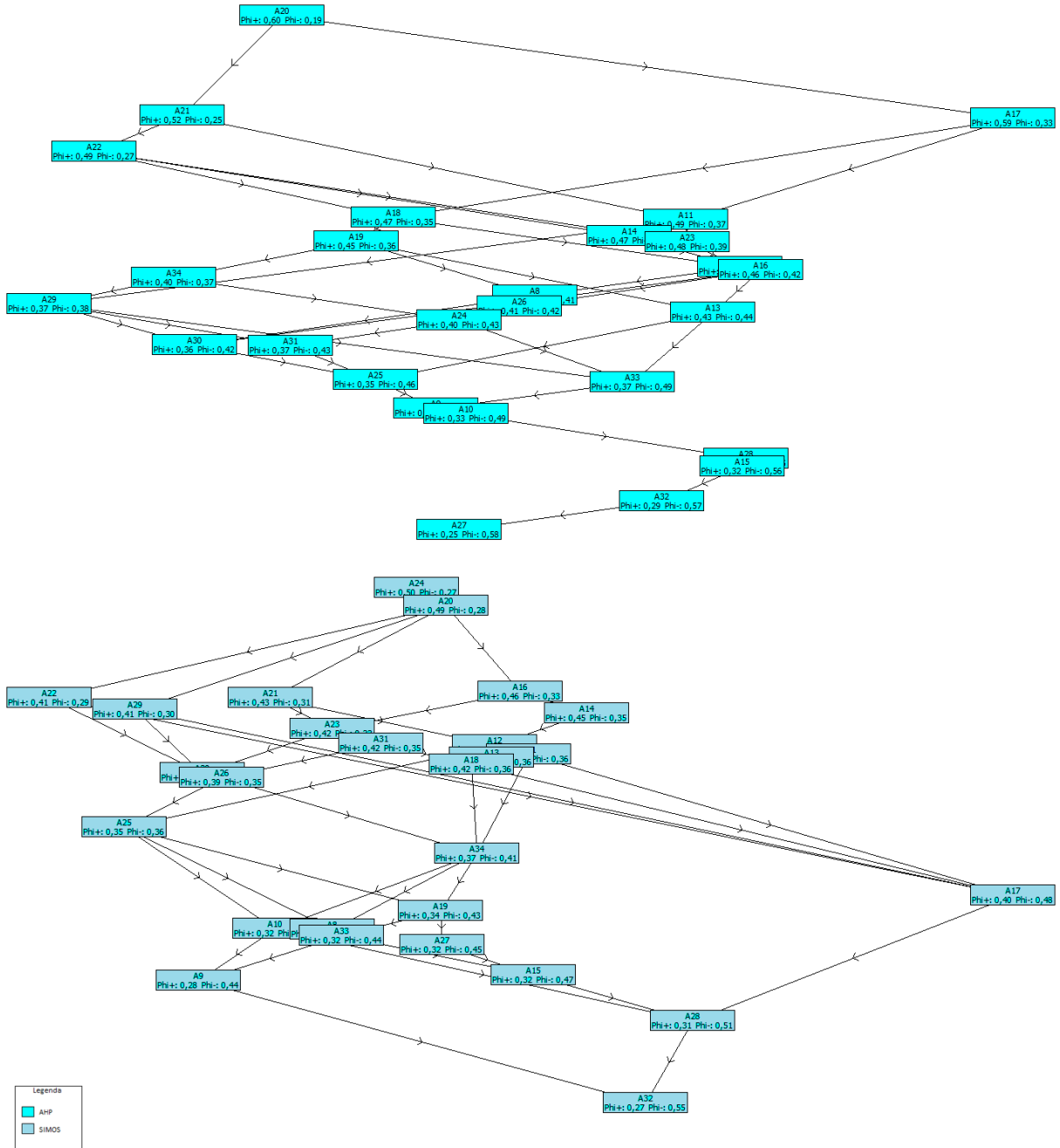
Vale destacar que a alternativa A17 (Tanque séptico seguido de filtro anaeróbio) embora esteja entre as primeiras (terceira posição Simos e quinta com os pesos definidos no AHP), é uma alternativa que fica bem distantes das demais, demonstrando assim possível incomparabilidade. Além disto, fazendo o estudo individual desta alternativa, esta teve valores Phi negativos para vários critérios, tais como: sustentabilidade, desempenho, flexibilidade, impacto ambiental, produção de lodo, confiabilidade, robustez, e atração de insetos. Sendo o Phi positivo para os critérios relacionados à custos (custo de implantação, operação e manutenção), aplicabilidade ao cenário avaliado, e simplicidade.

As alternativas menos preferidas variaram neste cenário. Sendo Filtro biológico percolador de baixa carga (A32), FB-alta carga (A33), e UASB seguido de filtro anaeróbio (A22) as alternativas menos preferidas na aplicação AHP. Lodo ativado convencional com filtração terciária (A31), Lodo ativado convencional (A28), e Lodo ativado com aeração prolongada (A29) menos indicadas pela aplicação Simos.

Além dos custos de implantação, manutenção e operação mais elevados em comparação a outras alternativas, todas possuem alta capacidade de geração de lodo, um problema que demanda pós tratamento, conseqüentemente, maiores custos envolvidos, maior impacto ambiental, alta atração de insetos, e geração de odores, itens que também são avaliados para a seleção ou não do sistema de tratamento adequado. Além disto, sistemas de filtros e UASB necessitam de equipamentos extras para o tratamento, o que implica em menor simplicidade e impactam na durabilidade do sistema como um todo.

Na Figura 17 são apresentados os fluxos de preferências para o cenário C.

Figura 17 - Fluxos de preferência para o cenário C



Fonte: Autoria própria (2022)

Embora a avaliação do cenário C tenha sido realizada com a maior diferença entre os pesos de decisão, os resultados obtidos para ambas as metodologias foram similares, sendo 3 das quatro primeiras alternativas sistemas UASB seguido de pós tratamento. A alternativa UASB seguido de lodo ativado (A20) e UASB mais filtro anaeróbico (A22) foram comuns nos dois ranques de preferência gerados.

Segundo Kalbar *et al.* (2014) o UASB é uma tecnologia de tratamento muito sustentável pelo baixo consumo de energia, alto potencial de recuperação do biogás do processo de tratamento, possibilidade de participação da comunidade para implementação e a facilidade de operação da tecnologia.

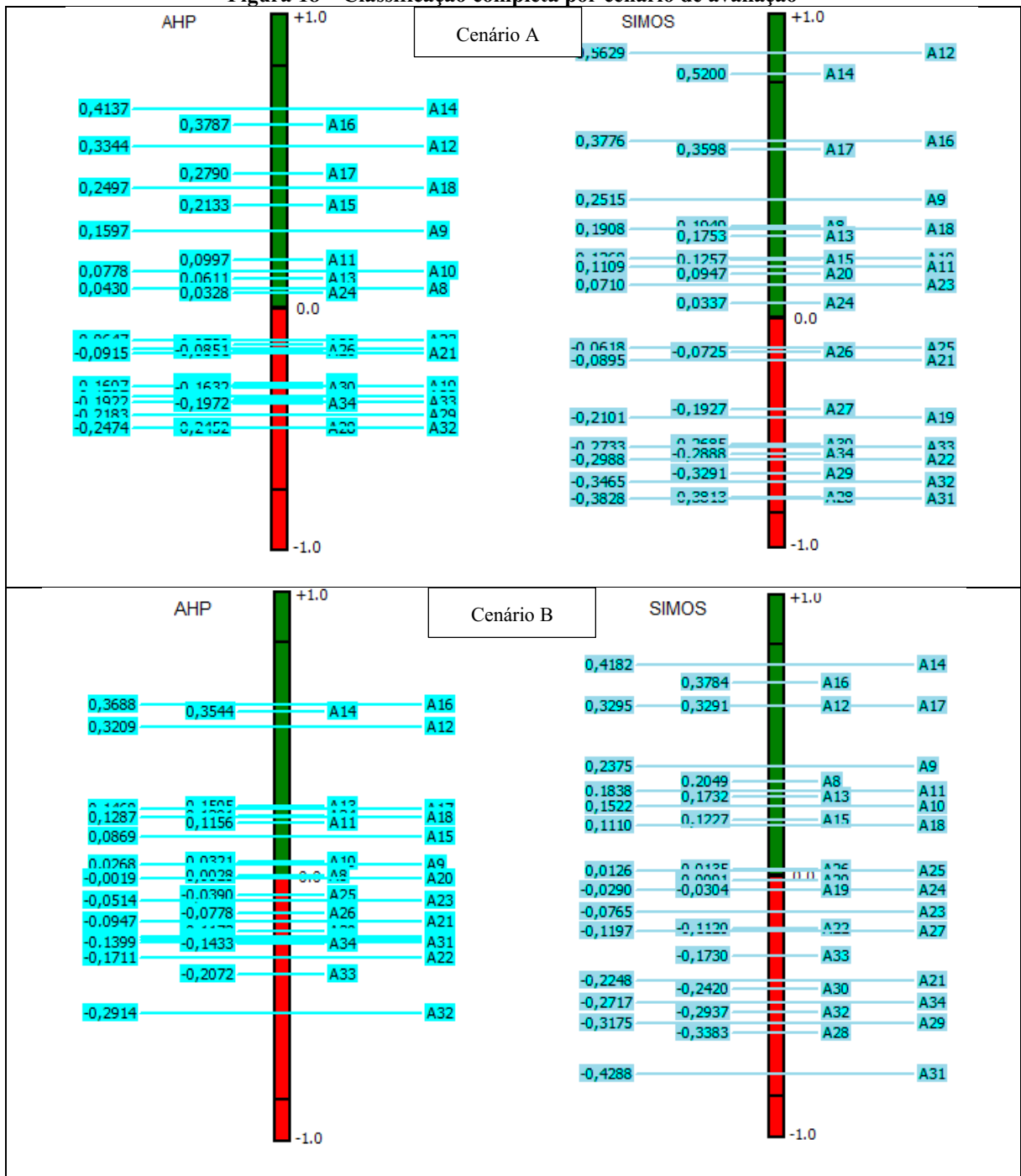
De acordo com Cornelli *et al.* (2015) e Lisbôa *et al.* (2020) alternativas envolvendo UASB, lodos ativados e lagoas são as mais utilizadas no Brasil. Lisbôa *et al.* (2020) em seu estudo verificou que para uma estação de tratamento com mais de 190 mil habitantes e recursos financeiros limitados, o sistema UASB seguido de lagoa (A26) é o indicado com o melhor custo-benefício, seguido do sistema UASB com lodo ativados (A20).

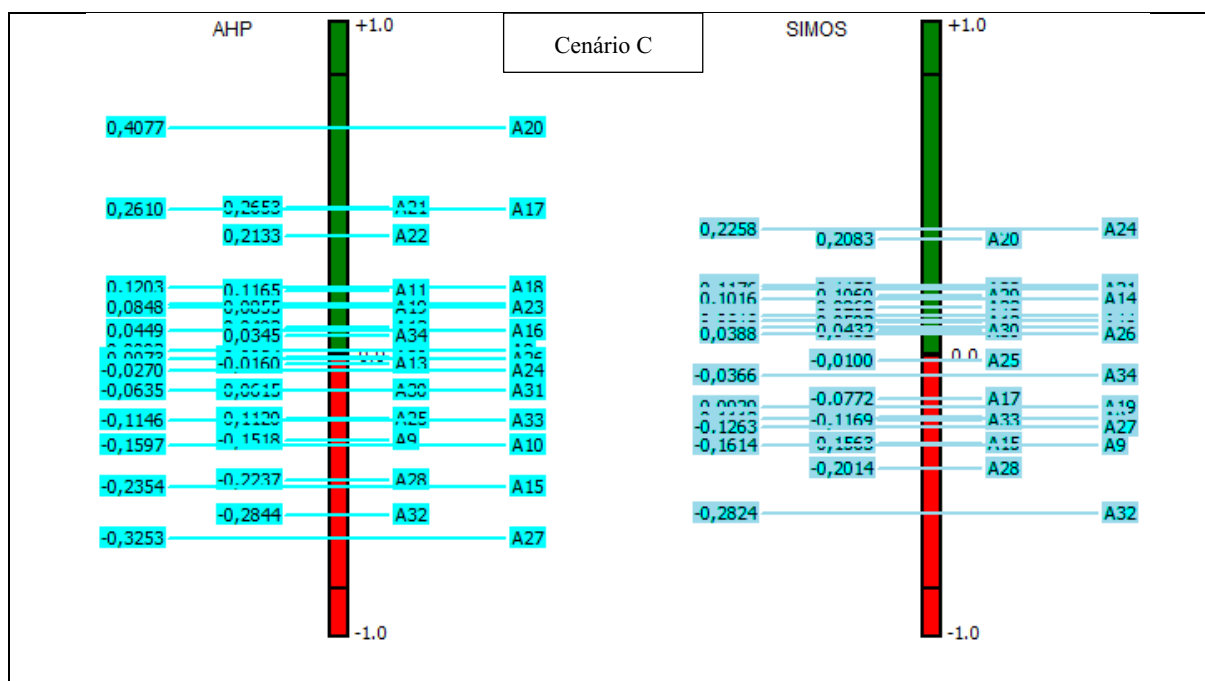
Garrido-Baserba *et al.* (2016) avaliou em seu estudo um cenário com população acima de 100 mil habitantes, afluente com baixa carga carbono/nitrogênio e descarga final em áreas sensíveis. Neste cenário a alternativa selecionada deveria ter alta confiabilidade, simples operação, e ser ambientalmente amigável. De acordo com o ranque obtido, a tecnologia de lodos ativados foi a com melhor resposta.

Por outro lado, as alternativas que mais se afastaram dos objetivos idealizados pelos decisores foram Filtro biológico percolador de baixa carga (A32), UASB mais escoamento superficial (A27), Escoamento superficial (A15), e Lodo ativado convencional (A28). O que pode ser justificado em função da demanda de área para alternativas que demandam escoamento, uma vez que o cenário avaliado tem volume de geração elevado. O sistema de lodos ativados também foi observado por Lisbôa *et al.*, (2020) como solução mais distante da ideal em um cenário similar ao avaliado neste trabalho, corroborando para esta análise.

A partir da informação dos fluxos líquidos, obtêm-se os rankings de cada decisor, ordenando as alternativas de acordo com a ordem decrescente dos respectivos fluxos líquidos. Sendo assim, na Figura 18 é apresentada a classificação final das alternativas para os dois métodos utilizados para definição dos pesos, para cada cenário avaliado. Além disso, é possível verificar o fluxo de superação, que pode ser usado para avaliar interativamente a classificação final de cada alternativa, bem como mostra o ponto de inversão, em vermelho, onde as alternativas passam a não atender as expectativas dos decisores.

Figura 18 – Classificação completa por cenário de avaliação





Fonte: Autoria própria (2022)

Nessa representação gerada pelo PROMETHE-II, as incomparabilidades desaparecem e as alternativas são ordenadas da melhor para a pior. Como pode ser visto, a parte verde do eixo vertical apresenta as alternativas que obtiveram maiores fluxos positivos e a parte vermelha representa as alternativas com maiores fluxos negativos. É feito um balanço entre o poder de superar cada alternativa bem como sua fraqueza relativa.

O Sistema wetland (A16) foi observado em todos os ranques entre as primeiras alternativas. Conforme avaliado em seu estudo Kalbar *et al.* (2016) destaca que os critérios confiabilidade, durabilidade, flexibilidade e robustez deste sistema podem manter essa tecnologia entre as mais preferidas. Os sistemas mecanizados de tratamento tais como filtros, UASB, ou alternativas que demandam aeração, foram considerados menos atrativos pela avaliação dos especialistas consultados no estudo por haver uma maior chance de falha associada ao uso de equipamentos.

Conforme o Gráfico 3 (cenário A) é possível observar que as alternativas que ficaram acima da linha (A14, A16, A12, A17, A18, A15, A9, A11, A10, A13, A8, A24) apresentam menores custos de operação e manutenção, média total de R\$1,57 por pessoa, e implantação R\$23,3 por pessoa.ano. Bem como, maior simplicidade (média de 4,2). Ao passo que as alternativas que ficaram abaixo da linha (A23, A20, A25, A26, A21, A27, A28, A32) apresentaram média total de custos de O&M de R\$4,7 por pessoa, e implantação R\$39,2 por pessoa.ano, e simplicidade média de 2,4. Critérios com peso elevado em função das particularidades avaliadas neste cenário.

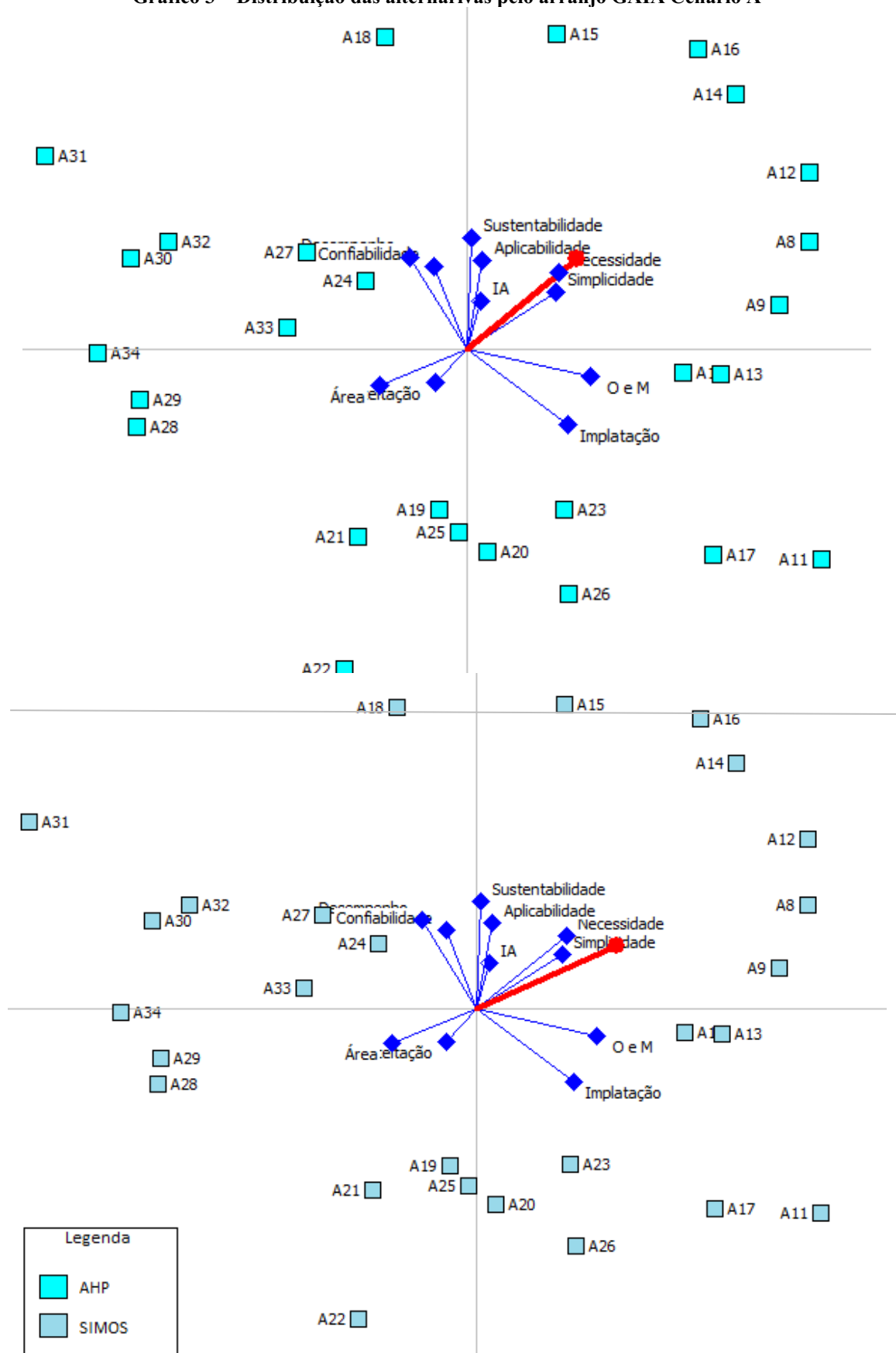


No cenário B as alternativas que ficaram com fluxo positivo tanto para a avaliação feita com os pesos AHP e Simos foram: A16, A12, A14, A9, A13, A11, A10, A15, A18, A17. E as alternativas que ficaram negativas foram: A32, A31, A33, A22, A34, A21, A23, A19, A30, A27, A28, A29. Comparando os dois grupos é possível notar que as alternativas positivas apresentam menor Custo de O&M, média de R\$1,50 por habitante para o primeiro grupo e R\$4,50 para o segundo. Custo de implantação médio de R\$22,93 enquanto as alternativas do segundo grupo R\$42,96. Outro critério com significativa diferença foi geração de lodo, no segundo grupo cerca de 7,1 vezes maior do que as alternativas com fluxo positivo. Critérios tais como: Desempenho, Robustez, Impactos ambientais, Confiabilidade, e Sustentabilidade tiveram médias similares para ambos os grupos.

O cenário C foi o com maior número de divergência entre a aplicação com pesos gerados no AHP e pelo método de Simos. Essa diferença influenciou de forma direta no fluxo líquido de avaliação de cada alternativa, e por fim no ranqueamento final das mesmas. As alternativas que obtiveram fluxos positivos em ambos as metodologias foram: A11, A12, A14, A16, A18, A20, A21, A22, A23. Essas alternativas positivas têm em comum entre si a baixa capacidade de geração de odores, baixa produção de lodo (3,5 vezes menor que as alternativas negativas), baixo potencial eutrofizador, alta capacidade de remoção de patógenos (razão 1,5 acima das alternativas negativas). E as alternativas que tiveram fluxo negativo foram: A9, A10, A15, A25, A27, A28, A32, A33.

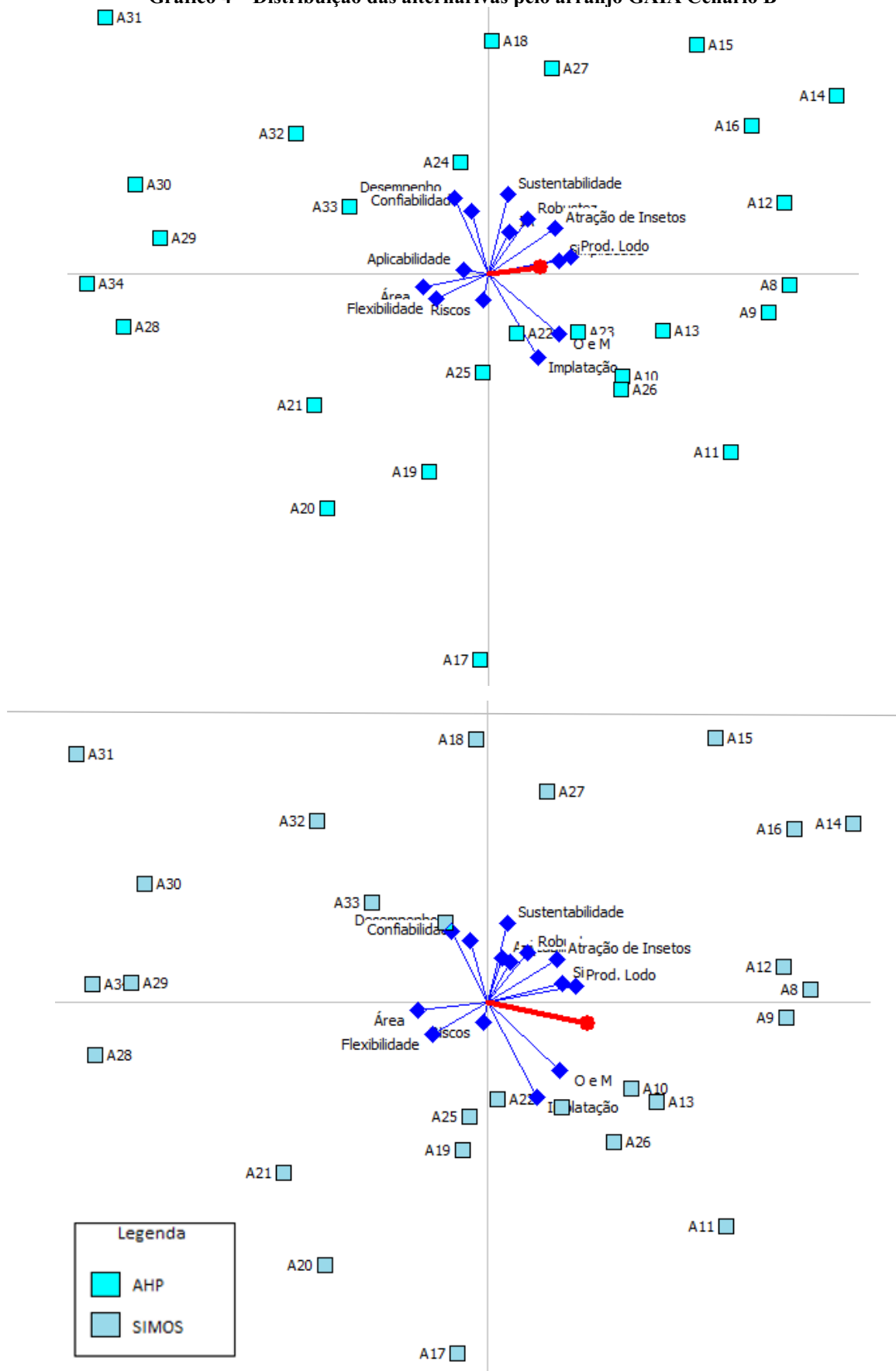
Nos Gráficos 3, 4, e 5 são exibidos os gráficos gerados na extensão gráfica GAIA referentes aos resultados para o cenário A, B e C, respectivamente.

Gráfico 3 – Distribuição das alternativas pelo arranjo GAIA Cenário A



Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 4 – Distribuição das alternativas pelo arranjo GAIA Cenário B



Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 5 – Distribuição das alternativas pelo arranjo GAIA Cenário C



Fonte: Autoria própria (2022)

A extensão gráfica GAIA permite a análise comparativa entre a influência do peso dos atributos sobre os resultados de desempenho das tecnologias (CAMPOS, 2011). Deste modo, proporciona de forma mais detalhada a visualização da distribuição das alternativas considerando os critérios preconizados para a seleção das tecnologias de tratamento.

Com base nos Gráficos 3, 4, e 5 é possível verificar a variabilidade entre as alternativas pela análise da distribuição gráfica das tecnologias. A maior diferença entre observada é entre as alternativas A11 e A31, que estão mais dispersas entre si. A alternativa Lodo ativado convencional com filtração terciária (A31) tem custo de operação e manutenção 8,3 vezes maior que a Lagoa aerada mista completa seguida de lagoa de sedimentação (A11), e custo de implantação 3,2 vezes acima. Critérios com alto peso em todas as aplicações. Outra diferença significativa entre as alternativas é a simplicidade do sistema de lagoas em comparação a alternativa A31 e a menor produção de lodo do sistema.

A alternativa A12, e A21 também ficaram bastante distante em todos os cenários de avaliação. O que pode ser justificado pelas características de cada um desses sistemas, uma vez que a alternativa 12 é conjunto de lagoas anaeróbia, facultativa e de maturação, ao passo que a alternativa 21 é tratamento UASB seguido de biofiltro aerado submerso. Embora as alternativas apresentem desempenhos similares, a primeira precisa de 10 vezes mais área do que a segunda, outra diferença é o custo de operação da segunda que é cerca de 2,2 vezes maior que a primeira, critério com alto peso de decisão em ambas as aplicações. Outros dois critérios com significativa diferença entre as alternativas é aplicabilidade e simplicidade.

A16 e A22 também são alternativas distantes entre si, indicando diferença entre as propriedades das alternativas. Quando analisadas as métricas de cada alternativa é possível verificar que A16 requer 10 vezes mais área do que a A22, enquanto a A22 demanda de mais investimentos financeiros, cerca de 1,8 vezes acima dos custos de operação e manutenção quando comparado com A16. Dursun (2016) também apontou essas diferenças entre as tecnologias, além de ressaltar que A16 apresenta menor flexibilidade, em função de fatores externos, os quais influenciam o desenvolvimento e eficiência com que as plantas atuam no sistema.

No cenário A, quanto à posição dos critérios pode-se observar que em ambas aplicações, AHP ou Simos, o critério necessidade, e simplicidade apresentaram mesma direção da reta vermelha, o que demonstra similaridade com a linha de preferência dos decisores considerados. É possível notar também que os critérios confiabilidade e desempenho

apresentam mesma direção de preferência demonstrando possível relação, assim como os critérios de custos, implantação e M&O.

Quanto a reta de decisão na aplicação AHP é possível notar ela mais próxima dos critérios: produção de lodo, simplicidade e atração de insetos. Ao passo que na aplicação SIMOS a reta fica posicionada entre os critérios previamente citados acima e os critérios de custos de M&O e implantação, para o cenário B.

No Gráfico 5, Cenário C, é observado que a reta de decisão fica entre os critérios riscos e os custos na aplicação AHP, já para aplicação Simos não aparece uma reta de decisão, provavelmente em função dos pesos dos critérios serem similares entre os critérios.

Embora as classificações das alternativas ideais possam ser sensíveis as variações nos valores de entrada foi possível observar ao final deste trabalho que os resultados obtidos se mantiveram constantes, para os 3 cenários avaliados, tanto para os pesos levantados pelo método AHP, ou pelo método de Simos.

As alterações nos escores de preferência praticamente não afetaram a hierarquização. Confirmando assim, a importância de que os critérios sejam bem selecionados e mensurados na etapa anterior à definição de pesos. As alternativas que foram melhor classificadas em cada critério dominaram os rankings para as variações nos escores de preferência, indicando que essas configurações são robustas e se mantiveram relativamente dentro das expectativas do grupo. Portanto, o ranqueamento final das alternativas de tratamento foi consistente para o método de avaliação aqui proposto, confirmando assim robustez da solução do problema.

## 6 CONCLUSÕES FINAIS

As limitações de recursos técnicos e financeiros fazem com que a estruturação do processo de decisão em projetos de saneamento seja essencial, especialmente em países em desenvolvimento, desta forma, fica evidente a necessidade de métodos e modelos para auxiliar no processo de tomada de decisões no âmbito sanitário. Sendo assim, esse trabalho desenvolveu uma ferramenta de apoio à priorização dos sistemas de tratamento de esgoto sanitário para diferentes cenários. Portanto, neste item serão abordadas as principais conclusões do estudo desenvolvido.

### 6.1 Conclusões

O planejamento de estações de tratamento de efluentes é um exercício complexo, que deve considerar uma ampla gama de objetivos a fim de selecionar combinações viáveis para atingir o efluente final com qualidade, reduzindo assim os impactos adversos deste fenômeno natural que é a geração de esgoto doméstico.

Com a aplicação deste método de avaliação de projetos é possível promover a melhoria contínua na qualidade dos processos de tratamento de efluentes, através da otimização da tomada de decisão por parte dos gestores e pessoas diretamente ou indiretamente envolvidas nas etapas de planejamento da unidade de tratamento. A metodologia proposta tem potencial para reduzir a subjetividade na escolha dos processos de tratamento de esgotos, garantindo que aspectos essenciais sejam considerados.

Considerando a existência de um grande número de critérios na seleção de tecnologias, este trabalho destaca a importância do uso de ferramentas multicritério para a tomada de decisão, uma vez que a escolha de um sistema com base em critérios inadequados pode ter consequências graves a longo prazo. Além disto, na etapa de seleção de critérios é importante garantir que diferentes dimensões sejam abordadas concomitantemente em uma análise multicritério, não se limitando a critérios econômicos. Sendo assim, no presente trabalho foram considerados aspectos ambientais, sociais, econômicos e tecnológicos.

Desta forma, este estudo contribui para aumentar o conhecimento acerca de diferentes critérios que podem ser usados na seleção de sistemas de tratamento de águas residuais, promovendo uma análise aprofundada das particularidades e variáveis inerentes a cada cenário de instalação de uma unidade de tratamento.

Três aplicações práticas foram empregadas para ilustrar o uso da metodologia multicritério desenvolvida neste trabalho, a fim de operacionalizar o processo de seleção do sistema de tratamento de efluentes. Nos três cenários avaliados, o modelo de seleção de critérios se mostrou robusto e de fácil aplicação. Nos três cenários, onde o modelo foi integralmente aplicado, as alternativas selecionadas foram assertivas e bem ajustadas as particularidades do cenário, demonstrando a aplicabilidade e funcionalidade do modelo.

A metodologia apresentada neste trabalho é uma diretriz para profissionais, planejadores e projetistas, que devem possuir conhecimento básicos dos processos de tratamento de efluentes. A combinação das diferentes ferramentas multicritério permitiu uma avaliação cuidadosa dos cenários identificados, onde seus pontos fortes e fracos foram detectados e uma classificação final foi fornecida, o que facilita a seleção final para o tomador de decisão. A abordagem proposta aqui para definição de pesos pode ser aplicada a outras situações de forma a evitar subjetividade e aleatoriedade na seleção do tipo de tratamento a ser aplicado em cada cenário.

Essa metodologia pode ser aplicada a qualquer cenário, pois leva em consideração as condições locais e particulares por meio da análise dos dados de entrada, cerca de 58 mil cenários são possíveis. Esses dados devem ser coletados com precisão no campo. Para garantir a escolha do sistema de tratamento mais adequado devem ser levadas em consideração as restrições climáticas, ambientais, locais e demais particulares que podem ter influência na seleção. A coleta de dados apropriados e precisos é essencial para a aplicação da metodologia, bem como as definições dos objetivos globais da estação de tratamento.

Outro ponto forte da metodologia são as orientações de como selecionar a tecnologia mais adequada quando várias alternativas de tratamento são possíveis. A análise dos critérios quantitativos e qualitativos, sua classificação, e o guia aqui fornecido permite distinguir e decidir com clareza a tecnologia mais adequada.

A metodologia foi testada para três cenários diferentes. Vinte e sete tecnologias de tratamento foram avaliadas, e previamente mensuradas, permitindo que trabalhos futuros sejam avaliados. O processo de tratamento wetland foi observado em todos os ranques entre as primeiras alternativas, em função da sua confiabilidade, durabilidade, flexibilidade e robustez.

No cenário A é possível observar que as alternativas preferidas apresentam menores custos e maior simplicidade. Já os sistemas mecanizados de tratamento tais como filtros, UASB, ou alternativas que demandam aeração, foram considerados menos atrativos pela avaliação dos especialistas para este cenário.



No cenário B as alternativas que ficaram com fluxo positivo apresentam menores custos e menor geração de lodo, contudo alto desempenho, robustez, confiabilidade, sustentabilidade e baixo impacto ambiental.

O cenário C foi o com maior número de divergência de pesos. Contudo embora diferença significativa as primeiras alternativas preferidas foram as mesmas em ambas as aplicações, tendo em comum baixa capacidade de geração de odores, baixa produção de lodo, baixo potencial eutrofizador, alta capacidade de remoção de patógenos, e baixa demanda de área.

Os resultados encontrados foram satisfatórios, uma vez observado em outros estudos resultados similares. Demonstrando assim que as tecnologias selecionadas são adequadas e normalmente implementadas para cenários parecidos, reforçando deste modo a robustez da metodologia aqui proposta.

## **6.2 Sugestões para futuros estudos**

O modelo proposto neste trabalho alcançou resultados promissores, contudo, faz-se necessário que outros estudos sejam conduzidos em diferentes cenários, surgindo à oportunidade de que futuras pesquisas sejam realizadas a fim de propor novas aplicações para avaliação das respostas do modelo.

O modelo pode ser aprimorado quanto à identificação dos objetivos e os agentes da decisão, buscando a estruturação e inclusão de todas as partes interessadas, possibilitando a interação destas. Outros objetivos podem ser abordados como o reúso da água residuária na agricultura, recarga de aquíferos, para uso urbano não potável, nas indústrias e aquicultura, bem como ganho financeiro com a produção de biogás ou subprodutos gerado nos processos de tratamento.

Outra análise que pode ser conduzida é quanto à forma de abordagem dos decisores, através da aplicação numérica ou qualitativa dos critérios, por meio da aplicação de diferentes métodos multicritério. É possível assim considerar diferentes perspectivas, avaliando assim a diferença entre as preferências individuais dos parâmetros de decisão.

Vale também ressaltar a importância da avaliação quando a sobrecarga de informação para aplicações com o método AHP, podendo ser desenvolvido estudos similares para avaliar a influência do número de critérios de decisão. Também é possível que em trabalhos futuros

seja sugerido a agregação de critérios por categoria de avaliação a fim de facilitar e garantir que a avaliação dos decisores seja feita de forma concisa.

## REFERÊNCIAS

ABDON, B. Projeto do sistema de esgotamento sanitário da área urbana do município de Abdon Batista. Memorial descritivo. SANETAL. 2009.

AB'SABER, A. N. Da necessidade de uma pluralidade de critérios para melhor classificação do Relevo Brasileiro. **Notícia Geomorfológica**, n9 6. Campinas. 1960.

ALMEIDA, A. T. **Conhecimento e Uso de Métodos Multicritério de Apoio a Decisão**. [S.l.]: Editora Universitária, 2009.

ALI, Y.; PERVEZ, H.; KHAN, J. Selection of the Most Feasible Wastewater Treatment Technology in Pakistan Using Multi-Criteria Decision-Making (MCDM). **Water Conservation Science and Engineering**, v. 5, n. 3, p. 199-213, 2020.

ALMEIDA, A. T.; COSTA, A.P.C.S. **Aplicações com Métodos Multicritério de Apoio a Decisão**. v. 14, Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2003.

ASHLEY, R., BLACKWOOD, D., BUTLER, D., JOWITT, P., DAVIES, J., SMITH, H., & OLTEAN-DUMBRAVA, C. Making asset investment decisions for wastewater systems that include sustainability. **Journal of Environmental Engineering**, v. 134, n. 3, p. 200-209, 2008.

ALSINA, F. X., RODRÍGUEZ-RODA, I., SIN, G., & GERNAEY, K. V. 2008 Multi-criteria evaluation of wastewater treatment plant control strategies under uncertainty. **Water Research** 42 (17), 4485–4497.

BALKEMA, A. J., PREISIG, H. A., OTTERPOHL, R., & LAMBERT, F. J. Indicators for the sustainability assessment of wastewater treatment systems. **Urban water**, v. 4, n. 2, p. 153-161, 2002.

BELTON, V., STEWART, T. **Multiple Criteria Decision Analysis: an Integrated Approach**. Springer US, 2002.

BERNAL, D. 2018 A Conceptual Model for Decentralized Municipal Wastewater Management. **Water Practice and Technology**.13 (1), 134–42.

BERNASCONI, M., CHOIRAT, C., SERI, R. Empirical properties of group preference aggregation methods employed in AHP: theory and evidence. **Eur J Oper Res** 2014;232(3): 584–92.

BOGDANOVIC, D., NIKOLIC, D., & ILIC, I. Mining method selection by integrated AHP and PROMETHEE method. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 84(1), 219-233. 2012.

CAUCHICK, P. A.; FLEURY, A.; MELLO, P. H. P. NAKANO, D. N.; LIMA, E. P.; TURRIONI J. B.; HO, L. L.; MORABITO, R.; MARTINS, R. A. SOUZA, R.; COSTA, S. E. G.; PUREZA, Z. **Metodologia da pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

CAMPOS, V. R. **Modelo de apoio à decisão multicritério para priorização de projetos de saneamento**. Tese (Doutorado – programa de pós-graduação em engenharia de produção). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos. 175p. 2011.

CASTILLO, A. F.; PORRO M. J.; GARRIDO, B.; ROSSO, B.; RENZI, D. C; FATONE, F. D.; OMEZ, V. V; COMAS, J.; POCH, A. E. M. Validation of a decision support tool for wastewater treatment selection. **Journal of Environmental Management**. v. 184. p.409-418. 2016.

CHERNICHARO, C. A. L.; VAN LIER, J. B.; NOYOLA, A.; BRESSANI R. T. Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. **Rev Environ Sci Bio technol**. v. 14, p. 649-679, 2015.

CORNELLI, R., AMARAL, F. G., DANILEVICZ, Â. D. M. F., DE MACEDO GUIMARÃES, L. B. Métodos de tratamento de esgotos domésticos: Uma revisão sistemática. **Revista de Estudos Ambientais**, 16(2), 20-36. 2015.

DURSUN, M. A Fuzzy Approach for the Assessment of Wastewater Treatment Alternatives. **Engineering Letters**, v. 24, n. 2, 2016.

FARIA, A. P. Classificação de montanhas pela altura. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 6, n. 2, 2005.

FREITAS, H., OLIVEIRA, M., SACCOL, A. Z., & MOSCAROLA, J. O método de pesquisa survey. **Revista de Administra & ccdeil**. Universidade de São Paulo, 35, 3. 2000.

FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHROGOTT, M. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys; **Springer**, New York, NY, USA, pp. 1–1045. 2005.

GARRIDO-BASERBA, M., REIF, R., HERNÁNDEZ, F., POCH, M. Implementation of a knowledge-based methodology in a decision support system for the design of suitable wastewater treatment process flow diagrams. **Journal of environmental management**, v. 112, p. 384-391, 2012.

GARRIDO-BASERBA, M., HOSPIDO, A., REIF, R., MOLINOS-SENANTE, M., COMAS, J., POCH, M. Including the environmental criteria when selecting a wastewater treatment plant. **Environmental modelling & software**, v. 56, p. 74-82, 2014.

GARRIDO-BASERBA, M., REIF, R., MOLINOS-SENANTE, M., LARREA, L., CASTILLO, A., VERDAGUER, M., POCH, M. Application of a multi-criteria decision model to select of design choices for WWTPs. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 18, n. 4, p. 1097-1109, 2016.

GOFFI, A. S., TROJAN, F., DE LIMA, J. D., LIZOT, M., THESARI, S. S. Economic feasibility for selecting wastewater treatment systems. **Water Science and Technology**, v. 78, n. 12, p. 2518-2531, 2018.

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

HAKANEN, J., MIETTINEN, K., SAHLSTEDT, K. Wastewater treatment: New insight provided by interactive multiobjective optimization. **Decision Support Systems**, v. 51, n. 2, p. 328-337, 2011.

HARDISTY, P. E.; SIVAPALAN, M.; HUMPHRIES, R. Determining a sustainable and economically optimal wastewater treatment and discharge strategy. **Journal of Environmental Management**, v. 114, p. 285-292, 2013.

HUNT, C. C. **Modelo multicritério de apoio à decisão aplicado à seleção de sistema de tratamento de esgoto para pequenos municípios**. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2013.

JAVAHERI, H., NASRABADI, T., JAFARIAN, M., ROWSHAN, G., KHOSHNAM, H. Site selection of municipal solid waste landfills using analytical hierarchy process method in a geographical information technology environment in Giroft. **J. Environ. Health Sci. Eng.** 3 (3), 177e184. 2006.

KALBAR, P. P., KARMAKAR, S., ASOLEKAR, S. R. Selection of an appropriate wastewater treatment technology: A scenario-based multiple-attribute decision-making approach. **Journal of environmental management**, v. 113, p. 158-169, 2012a.

KALBAR, P. P., KARMAKAR, S., ASOLEKAR, S. R. Technology assessment for wastewater treatment using multiple-attribute decision-making. **Technology in Society**, v. 34, n. 4, p. 295-302, 2012b.

KALBAR, P. P., KARMAKAR, S., ASOLEKAR, S. R. The influence of expert opinions on the selection of wastewater treatment alternatives: A group decision-making approach. **Journal of environmental management**, v. 128, p. 844-851, 2013.

KALBAR, P. P., KARMAKAR, S., ASOLEKAR, S. R. Life cycle-based decision support tool for selection of wastewater treatment alternatives. **Journal of Cleaner Production**, v. 117, p. 64-72, 2016.

KARIMI, A. R., MEHRDADI, N., HASHEMIAN, S. J., NABI BIDHENDI, G. R., TAVAKKOLI MOGHADAM, R. Selection of wastewater treatment process based on the analytical hierarchy process and fuzzy analytical hierarchy process methods. **International Journal of Environmental Science & Technology**, v. 8, n. 2, p. 267-280, 2011.

KANWAL, S., SAJJAD, M., GABRIEL, H. F., HUSSAIN, E. Towards sustainable wastewater management: A spatial multi-criteria framework to site the Land-FILTER system in a complex urban environment. **Journal of Cleaner Production**. V. 266, p. 121987, 2020.

KHATTIYAVONG, C., LEE, H. S. Performance Simulation and Assessment of an Appropriate Wastewater Treatment Technology in a Densely Populated Growing City in a Developing Country: A Case Study in Vientiane, Laos. **Water**, v. 11, n. 5, p. 1012, 2019.

LACERDA, R. T., ENSSLIN, L. Research opportunities in strategic management field : a performance measurement approach. **Int. J. Business Performance Management** 15(2), 158–174. 2014.

LEE, E. J., CRIDDLE, C. S., BOBEL, P., FREYBERG, D. L. Assessing the Scale of Resource Recovery for Centralized and Satellite Wastewater Treatment. **Environ. Sci. Technol.** 47, 10762–10770. 2013.

LEONETI, A. B., OLIVEIRA, S. V. W. B. DE, OLIVEIRA, M. M. B. 2010 The Nash equilibrium as a solution to the conflict between efficiency and cost in the choice of sanitary sewage treatment systems with the aid of a decision-making model. **Engenharia Sanitaria & Ambiental** 15(1), 53–64.

LEME, F.P. **Planejamento e Projeto dos Sistemas Urbanos de Esgotos Sanitários**. Cetesb. 213 p. São Paulo. 1977.

LETTINGA, G.; DE MAN, A. W. A.; VAN DER LAST, A. R. M.; WIEGANT, W.; KNIPPENBERG, K.; FRIJNS, J.; VAN BUUREN, J. C. L. Anaerobic treatment of domestic sewage and wastewater. **Water Sci. Technol.** v.27, p. 67–73, 1993

LISBÔA, E. G., LISBÔ, É. G., LOBO, M. A. A., TOURINHO, H. L. Z., BELLO, L. A. L., & BORGES, F. Q. Aplicação de um modelo Multicriterial para auxiliar a seleção de tecnologias

de tratamento de águas residuais em zonas urbanas. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 20739-20768, 2020.

LONGARAY, A. A., ENSSLIN, L., MUNHOZ, P., TONDOLO, V., QUADRO, R., DUTRA, A., ENSSLIN, S. A systematic literature review regarding the use of multicriteria methods towards development of decision support systems in health management. **Procedia Computer Science**, v. 100, p. 701-710, 2016.

LOGHMANPOOR, M, VARDANIAN, Z., ELAHI, M. Evaluation the sustainability of two forest regions under both Participatory and Governmental Management system using AHP. **Ecol Environ Conserv**, 2013;19(3):661–71.

MASSOUD, M. A.; TARHINI, A.; NASR, J. A. Decentralized approaches to wastewater treatment and management: applicability in developing countries. **Journal of environmental management**, v. 90, n. 1, p. 652-659, 2009.

MARZOUK, M.; NOUH, A.; EL-SAID, M. Developing green bridge rating system using Simos' procedure. **HBRC Journal**, v. 10, n. 2, p. 176-182, 2014.

MARKOV, Z.; JOVANOSKI, I.; DIMITROVSKI, D. Multi-criteria analysis approach for selection of the most appropriate technology for municipal wastewater treatment. **Journal of Environmental Protection and Ecology**, v. 18, n. 1, p. 289-303, 2017.

METCALF, E. **Ingeniería Sanitaria - Redes de Alcantarillado y Bombeo de Aguas Residuales**. Ed. Labor S.A. 446 p. Barcelona. 2003.

MOLINOS-SENANTE, M.; GÓMEZ, T.; CABALLERO, R.; HERNÁNDEZ-SANCHO, F.; SALA-GARRIDO, R. Assessment of wastewater treatment alternatives for small communities: An analytic network process approach. **Sci. Total Environ.**532, 676–687, 2015.

MOLINOS-SENANTE, M.; GÓMEZ, T.; GARRIDO, B. M.; CABALLERO, R.; SALA-GARRIDO, R. Assessing the sustainability of small wastewater treatment systems: a composite indicator approach. **Sci. Total Environ.**497-498, 607–17, 2014.

MOLINOS-SENANTE, M.; GARRIDO, B. M.; REIF, R.; HERNÁNDEZ-SANCHO, F.; POCH, M. Assessment of wastewater treatment plant design for small communities: Environmental and economic aspects. **Sci. Total Environ**, v. 427–428, p. 11–18, 2012.

MUNGRAY, A. K., MURTHY, Z. V. P., & TIRPUDE, A. J. MUNGRAY, ARVIND KUMAR; MURTHY, Z. V. P.; TIRPUDE, ASHWIN J. Post treatment of up-flow anaerobic sludge blanket based sewage treatment plant effluents: a review. **Desalination and Water Treatment**, v. 22, n. 1-3, p. 220-237, 2010.

MUGA, H. E.; MIHELICIC, J. Sustainability of Wastewater Treatment Technologies. **Journal of Environmental Management**. 3. p. 437–47.2008.

NETO, A. **Manual de Hidráulica**. Edgard Blucher Ltda, v 2, 724 p, 6 ed., São Paulo. 1996.

NAGEL, C., MEYER, P. Caught between ecology and economy: end-of-life aspects of environmentally conscious manufacturing. **Computers & Industrial Engineering**, 36(4), 781-792. 1999.

NHAPI, I.A Framework for the decentralized management of wastewater in Zimbabwe. **Elsevier: Physics and Chemistry of the Earth**, v.29. p. 1265 – 1273, 2004.

NUCASE. Núcleo Sudeste de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental. Processos de tratamento de esgotos: guia do profissional em treinamento: nível 2 / Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). Brasília: Ministério das Cidades, 2008.

NUVOLARI, A. (COORD.) Esgoto Sanitário. Coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola. São Paulo: Edgard Blucher, vários autores. 1a. edição. ISBN 85-212-0314-4. 520 p. 2003.

OLIVEIRA, J. J. L. Tratamento descentralizado de águas residuárias domésticas: uma estratégia de inclusão social. **LIRA, WS. and CÂNDIDO, GA., orgs.** Gestão sustentável dos recursos naturais: uma abordagem participativa. Campina Grande: EDUEPB, p. 213-232, 2013.

PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, Luis Mauricio. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, v. 105, n. 3, p. 2109-2135, 2015.

RAHIMI, S., HAFEZALKOTOB, A., MONAVARI, S.M., HAFEZALKOTOB, A., RAHIMI, R., Sustainable landfill site selection for municipal solid waste based on a hybrid decision-making approach: fuzzy group BWM-MULTIMOORA-GIS. **J. Clean. Prod.**, 119186. 2019.

REZENDE, A. J., SLOMSKI, V., CORRAR, L. A gestão pública municipal e a eficiência dos gastos públicos: uma investigação empírica entre as políticas públicas e o índice de desenvolvimento humano (IDH) dos municípios do Estado de São Paulo. **Revista Universo Contábil**, v. 1, n. 1, p. 24-40, 2005.

REFSGAARD, K. Process-guided multicriteria analysis in wastewater planning. **Environ. Plan. C Gov. Policy** 24, 191–213, 2006.



ROSS, J. Relevô brasileiro: uma nova proposta de classificaçãõ. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 4, p. 25-39, 1985.

SAATY, T. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **Interfaces**, v. 24, n. 6, p. 19-43, 1994.

SANTOS, S. L. D., HAANDEL, A. V. Influência da temperatura sobre o desempenho do tratamento anaeróbio de esgoto. **Revista DAE**. 216, v- 67, 2019.

SALA-GARRIDO, R.; MOLINOS-SENANTE, M.; HERNÁNDEZ-SANCHO, F. Comparing the efficiency of wastewater treatment technologies through a DEA metafrontier model. **Chemical Engineering Journal**, v. 173, n. 3, p. 766-772, 2011.

SIMOS, J., 1990a. L'evaluation environnementale: Un processus cognitif negocié. **These de doctorat**, DGF-EPFL, Lausanne.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 181 p. 2018.

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. **Process Safety and Environmental Protection**. v. 92. p. 467–475. 2014.

THOKALA, P., DUENAS, A. Multiple criteria decision analysis for health technology assessment. **Value Health**, 15 (8), 1172-1181, 2012.

TSUTIYA, M. T., P. A. SOBRINHO. **Coleta e Transporte de Esgoto Sanitário**. 1º Ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

UJANG, Z.; HENZE, M. **Municipal Wastewater Management in Developing Countries**; IWA Publishing, London, UK, 2006.

USEPA. United States environmental protection agency. **Handbook for Managing Onsite and Clustered (Decentralized) wastewater treatment systems. An introduction to management tools and information for implementing EPA's Management guidelines**. USEPA: EPA No. 832-B-05-001. 2005.

VASILOGLOU, V.; LOKKAS, F.; GRAVANIS, G. New tool for wastewater treatment units location. **Desalination**. 248, p.1039–1048. 2009.

VON SPERLING, M. **Introduction to Wastewater Quality, Principle of Biological wastewater Treatment**. In Desa, Belo Horizonte, Brasil, 4, 338-356.2014.

VON SPERLING, M., DE LEMOS CHERNICHARO, C. A. Urban wastewater treatment technologies and the implementation of discharge standards in developing countries. **Urban water**, v. 4, n. 1, p. 105-114, 2002.

WU, S., KUSCHK, P., BRIX, H., VYMAZAL, J., DONG, R. Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: a nitrogen and organic matter targeted review. **Water Res.** 57, 40e55. 2014.

YAO, L., XU, Z., LV, C., HASHIM, M. Incomplete interval type-2 fuzzy preference relations based on a multi-criteria group decision-making model for the evaluation of wastewater treatment technologies. **Measurement**, v. 151, p. 107137, 2020.

ZENG, G., JIANG, R., HUANG, G., XU, M., & LI, J. Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis. *Journal of Environmental Management* **82**(2), 250–259. 2007.

ZHANG, T., SHAO, M.-F., YE, L. Pyrosequencing reveals bacterial diversity of activated sludge from 14 sewage treatment plants. **ISME J.** 6 (6), 1137. 2012.

ZHANG, L., ZHOU, P., NEWTON, S., FANG, J. X., ZHOU, D. Q., & ZHANG, L. P. Evaluating clean energy alternatives for Jiangsu, China: An improved multi-criteria decision making method. **Energy**, v. 90, p. 953-964, 2015.

**APÊNDICE A - ALTERNATIVAS DE TRATAMENTO**

## Alternativas de tratamento (Continua)

Alternativas	Eficiência de remoção (%)				Descrição	
	MO	S	N	P		
a1. Tratamento primário convencional	33	30	30	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remoção parcial de sólidos em consequência remoção parcial de MO;</li> <li>• Baixos requisitos na área e energia;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa remoção de MO e sólidos;</li> <li>• Remoção nula de nutrientes e patógenos;</li> <li>• Não atende aos requisitos legais de lançamento.</li> </ul>
a2. Tratamento primário avançado	60	65	30	83	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixos custos de implantação e operação;</li> <li>• Tolerância a variações de carga orgânica;</li> <li>• Simples operação e manutenção.</li> </ul>	
a3. Lagoa facultativa	80	73	60	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• É o sistema mais simples de lagoas de estabilização;</li> <li>• Simplicidade de operação e manutenção;</li> <li>• Baixo custo;</li> <li>• Alta eficiência do sistema;</li> <li>• Remoção do lodo apenas após 20 anos de operação;</li> <li>• Resistência a choques de carga orgânica;</li> <li>• Ausência de equipamentos mecânicos;</li> <li>• Razoável eficiência de patógenos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Retenção dos esgotos por longo período de tempo;</li> <li>• Altos requisitos de área;</li> <li>• Depende de variáveis ambientais;</li> <li>• Baixa remoção de MO;</li> <li>• Dificuldades para atender os padrões de lançamentos;</li> <li>• Pode causar a proliferação de insetos.</li> </ul>
a4. Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa	80	73	60	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta simplicidade operacional e de manutenção;</li> <li>• Baixo custo;</li> <li>• Aceita maiores profundidades, portanto requer menor área.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longo período de tempo;</li> <li>• Requisitos de área;</li> <li>• Depende de variáveis ambientais;</li> <li>• Possibilidade de geração de maus odores;</li> <li>• Gastos com tubulações.</li> </ul>
a5. Lagoa aerada - lagoa facultativa	80	73	30	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo de detenção menor comparado as lagoas anteriores;</li> <li>• Menos requisitos de área.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo de energia para aeradores;</li> <li>• Operação e manutenção menos simples comparadas as outras lagoas.</li> </ul>
a6. Lagoa aerada mista completa + lagoa de sedimentação	80	73	30	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior área concentração no meio líquido o que permite a redução da área demanda;</li> <li>• Tempo de detenção inferior as lagoas descritas anteriormente;</li> <li>• Requisitos de energia similar às demais lagoas aeróbias.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior complexidade operacional;</li> <li>• Carregamento de biomassa do reator no efluente;</li> <li>• Necessidade de unidade complementar para sedimentação;</li> <li>• Geração de lodo.</li> </ul>
a7. Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação	83	77	58	50	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das vantagens da lagoa anaeróbia;</li> <li>• Manutenção das vantagens da lagoa facultativa;</li> <li>• Manutenção das vantagens da lagoa de maturação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longo período de tempo;</li> <li>• Requisitos de área;</li> <li>• Depende de variáveis ambientais;</li> <li>• Possibilidade de geração de maus odores;</li> <li>• Necessidade de remoção de vegetação.</li> </ul>

a8. Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de alta taxa	83	77	85	55	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das vantagens da lagoa anaeróbia;</li> <li>• Manutenção das vantagens da lagoa facultativa;</li> <li>• Manutenção das vantagens da lagoa de alta taxa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longo período de tempo;</li> <li>• Requisitos de área;</li> <li>• Depende de variáveis ambientais;</li> <li>• Possibilidade de geração de maus odores.</li> </ul>
a9. Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas	88	79	60	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das vantagens da lagoa anaeróbia;</li> <li>• Manutenção das vantagens da lagoa facultativa;</li> <li>• Remoção de algas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longo período de tempo;</li> <li>• Requisitos de área;</li> <li>• Depende de variáveis ambientais.</li> </ul>
a10. Infiltração lenta	95	90	75	85	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema totalmente natural;</li> <li>• Elevada eficiência de remoção de DBO;</li> <li>• Alta remoção de organismos patogênicos;</li> <li>• Alta assimilação de nutrientes pelas plantas;</li> <li>• Baixo custo;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requer grande área superficial por unidade de água tratada;</li> <li>• Riscos de contaminação do solo, do corpo hídrico e dos trabalhadores;</li> <li>• Possibilidade de maus odores;</li> <li>• Influenciado por variações climáticas e ambientais;</li> <li>• Dependente das características do solo;</li> <li>• Alta atração de insetos.</li> </ul>
a11. Infiltração rápida	92	87	65	50	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não produção de lodo;</li> <li>• Atuam como fertilizantes;</li> <li>• Boa resistência às variações de cargas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dependente das características do solo;</li> <li>• Alta atração de insetos.</li> </ul>
a12. Escoamento superficial	85	80	65	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das vantagens dos processo de infiltração;</li> <li>• Baixa dependência das características do solo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das desvantagens dos processo de infiltração;</li> <li>• Dependência da declividade do solo.</li> </ul>
a13. Wetlands	85	80	60	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo custo de implantação;</li> <li>• Simplicidade de operação;</li> <li>• Auto-sustentável;</li> <li>• Alta capacidade de remoção de matéria orgânica, sólidos, nutrientes e patógenos;</li> <li>• Indicado para pequenas comunidades;</li> <li>• Distribuição de esgoto bruto numa área maior de entrada;</li> <li>• Uso de volume de filtro mais eficiente;</li> <li>• Alta eficiência dos processos aeróbios;</li> <li>• Menores problemas quanto a colmatação do filtro;</li> <li>• Não há geração de lodo;</li> <li>• Pode gerar renda pela utilização da biomassa;</li> <li>• Baixa produção de odores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessidade de grandes áreas para tratamento de grandes volumes;</li> <li>• Potencialmente criadores de mosquitos e outros artrópodes;</li> <li>• O efluente líquido pode não apresentar um aspecto agradável;</li> <li>• Longo tempo de detenção hidráulica;</li> <li>• É afetado pelas condições climáticas;</li> <li>• Demanda tratamento prévio do esgoto;</li> <li>• É susceptível a entupimentos;</li> <li>• Necessita de água;</li> <li>• Custo de substratos;</li> <li>• Custo de manejo das macrófitas.</li> </ul>

a14. Tanques sépticos	33	30	30	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flexibilidade quanto à carga orgânica;</li> <li>• Tratamento preliminar para redução de carga;</li> <li>• Ótima opção para usos individuais;</li> <li>• Simples operação e manutenção;</li> <li>• Baixo custo de construção, operação e manutenção.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificuldade em satisfazer padrões de lançamento;</li> <li>• Ineficaz redução de coliformes e nutrientes;</li> <li>• Maus odores;</li> <li>• Problemas de entupimento;</li> <li>• Inadequado para efluentes de baixas concentrações de sólidos;</li> <li>• Gastos de energia, pós tratamento e disposição do lodo;</li> <li>• Riscos de contaminação do solo e água.</li> </ul>
a15. Tanques sépticos + filtro anaeróbico (TSC)	83	75	60	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adaptação a diferentes tipos e concentrações de esgotos;</li> <li>• Resistência a variações de carga; razoável eficiência na remoção de DBO;</li> <li>• Baixos requisitos na área e energia;</li> <li>• Baixos custos de implantação e operação;</li> <li>• Construção, operação e manutenção simples.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa eficiência na remoção de coliformes;</li> <li>• Remoção de N e P praticamente nula;</li> <li>• Possibilidade de geração de efluente com aspecto desagradável;</li> <li>• Possibilidade de geração de maus odores;</li> <li>• Riscos de entupimento;</li> <li>• Restrito ao tratamento de afluentes com concentrações de sólidos não elevados.</li> </ul>
a16. Tanques sépticos + infiltração	94	90	65	50	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das vantagens dos tanques sépticos;</li> <li>• Manutenção das vantagens dos sistemas de infiltração.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilidade de geração de maus odores;</li> <li>• Problemas de entupimento;</li> <li>• Inadequado para efluentes de baixas concentrações de sólidos;</li> <li>• Riscos de contaminação do solo e água.</li> </ul>
a17. Tanques sépticos + biodisco	92	87	60	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das vantagens dos tanques sépticos;</li> <li>• Manutenção das vantagens do biodisco.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ineficaz redução de coliformes e nutrientes;</li> <li>• Maus odores;</li> <li>• Problemas de entupimento.</li> </ul>
a18. Manta de lodo anaeróbico de fluxo ascendente (UASB)	68	63	60	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Razoável eficiência na remoção de DBO;</li> <li>• Baixos requisitos na área e energia;</li> <li>• Baixos custos de implantação e operação;</li> <li>• Tolerância a alta concentração de matéria orgânica;</li> <li>• Não necessita de meio suporte;</li> <li>• Construção, operação e manutenção simples;</li> <li>• Baixíssima produção de lodo;</li> <li>• Estabilização do lodo no próprio reator;</li> <li>• Rápido reinício após períodos de paralisação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificuldade em satisfazer padrões de lançamento;</li> <li>• Baixa eficiência na remoção de coliforme;</li> <li>• Remoção de N e P praticamente nula;</li> <li>• Possibilidade de geração de maus odores;</li> <li>• Partida geralmente lenta;</li> <li>• Relativamente sensível a variações de carga e compostos tóxicos;</li> <li>• Usualmente necessita pós-tratamento.</li> </ul>

a19. UASB + lodo ativado	88	82	60	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das vantagens do UASB;</li> <li>• Manutenção das vantagens do lodo ativado;</li> <li>• Redução do tempo de detenção (TDH);</li> <li>• Maior remoção de MO e sólidos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ineficaz remoção de nutrientes;</li> <li>• Manutenção das desvantagens dos dois processos;</li> <li>• Maiores custos.</li> </ul>
a20. UASB + biofiltro aerado submerso	88	82	60	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das vantagens do UASB;</li> <li>• Manutenção das vantagens do biofiltro aerado submerso;</li> <li>• Atender aos padrões de lançamento;</li> <li>• Tempos de detenção hidráulica muito curtos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das desvantagens dos dois processos;</li> <li>• Maiores custos.</li> </ul>
a21. UASB + filtro anaeróbico	81	75	60	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das vantagens do UASB;</li> <li>• Manutenção das vantagens do filtro anaeróbico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das desvantagens dos dois processos;</li> <li>• Maiores custos.</li> </ul>
a22. UASB + biofiltro percolador de alta carga	87	81	60	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das vantagens do UASB;</li> <li>• Manutenção das vantagens do biofiltro percolador de alta carga.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das desvantagens dos dois processos;</li> <li>• Maiores custos.</li> </ul>
a23. UASB + flotação por ar dissolvido	88	87	30	82	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das vantagens do UASB;</li> <li>• Manutenção das vantagens da flotação por ar dissolvido.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das desvantagens dos dois processos;</li> <li>• Maiores custos.</li> </ul>
a24. UASB + lagoas de polimento	82	77	58	50	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das vantagens do UASB;</li> <li>• Manutenção das vantagens das lagoas de polimento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das desvantagens dos dois processos;</li> <li>• Maiores custos.</li> </ul>
a25. UASB + lagoas aeradas facultativas	80	73	30	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das vantagens do UASB;</li> <li>• Manutenção das vantagens das lagoas aeradas facultativas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das desvantagens dos dois processos;</li> <li>• Maior tempo de detenção;</li> <li>• Maiores custos.</li> </ul>
a26. UASB + Lagoa de sedimentação + aeração mista completa	80	73	30	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das vantagens do UASB;</li> <li>• Manutenção das vantagens das lagoas aeradas facultativas;</li> <li>• Manutenção das vantagens da aeração mista completa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das desvantagens dos dois processos;</li> <li>• Maior tempo de detenção;</li> <li>• Maiores custos.</li> </ul>
a27. UASB + escoamento superficial	84	78	65	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das vantagens do UASB;</li> <li>• Manutenção das vantagens do escoamento superficial.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das desvantagens dos dois processos;</li> <li>• Maiores custos.</li> </ul>

a28. Reator anaerobio- aerobio de fluxo horizontal (RAALF)	95	88	70	50	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obtenção de efluente clarificado e com baixa concentração de matéria orgânica;</li> <li>• Baixa potência de aeração requerida na fase aeróbia;</li> <li>• Menor produção de lodo biológico;</li> <li>• Baixo custo de implantação e operação;</li> <li>• Menor perda dos sólidos biológicos no efluente;</li> <li>• Resistência às variações da vazão afluyente, além da liberdade de projeto em termos de configurações e dimensões.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• São relativamente sensíveis a descargas tóxicas;</li> <li>• Possuem menor estabilidade operacional;</li> <li>• Apresentam possibilidade de obstrução dos interstícios, por meio de entupimento ou colmatação do leito.</li> </ul>
a29. Lodo ativado convencional	89	85	60	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevada eficiência na remoção de DBO;</li> <li>• Nitrificação usualmente obtida;</li> <li>• Possibilidade de remoção N e P;</li> <li>• Baixos requisitos de área;</li> <li>• Processo confiável;</li> <li>• Reduzidas possibilidades de maus odores, insetos e vermes;</li> <li>• Flexibilidade operacional;</li> <li>• Pode ser utilizado tanto em grandes como pequenas comunidades.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa eficiência na remoção de coliformes;</li> <li>• Elevados custos de implantação e operação;</li> <li>• Elevado consumo de energia;</li> <li>• Necessidade de operação sofisticada;</li> <li>• Elevado índice mecanização;</li> <li>• Relativamente sensível a descargas tóxicas;</li> <li>• Necessidade do tratamento completo do lodo;</li> <li>• Possíveis problemas ambientais com ruídos e aerossóis.</li> </ul>
a30. Lodo ativado - aeração prolongada	94	88	60	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevada eficiência na remoção de DBO;</li> <li>• Nitrificação consistente;</li> <li>• Baixa geração de lodo;</li> <li>• Estabilização do lodo no próprio reator;</li> <li>• Elevada resistência a variações de cargas tóxicas;</li> <li>• Satisfatória independência das condições climáticas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa eficiência na remoção de coliformes;</li> <li>• Elevados custos de implantação e operação;</li> <li>• Elevado índice de mecanização;</li> <li>• Necessidade de remição da humidade do lodo.</li> </ul>
a31. Lodo ativado - aeração com remoção biológica de N	89	85	75	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das vantagens do Lodo ativado convencional;</li> <li>• Remoção biológica de N.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das desvantagens do lodo ativado convencional.</li> </ul>
a32. Lodo ativado convencional com remoção biológica de N / P	89	85	75	82	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das vantagens do Lodo ativado convencional;</li> <li>• Remoção biológica de N e P.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das desvantagens do lodo ativado convencional.</li> </ul>
a33. Lodo ativado convencional com filtração terciária	96	93	60	55	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das vantagens do Lodo ativado convencional;</li> <li>• Manutenção das vantagens do filtro.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção das desvantagens do lodo ativado convencional;</li> <li>• Manutenção das desvantagens do filtro.</li> </ul>



a34. Sistemas de fluxo intermitente (RBS)	95	90	60	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevada eficiência na remoção de DBO;</li> <li>• Satisfatória remoção de N e possivelmente P;</li> <li>• Baixos requisitos de área;</li> <li>• Menos equipamentos que os demais sistemas;</li> <li>• Flexibilidade operacional;</li> <li>• Usualmente mais competitivo economicamente para populações pequenas a médias.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa eficiência na remoção de coliformes;</li> <li>• Elevados custos de implantação e operação;</li> <li>• Maior potência instalada que os demais sistemas de lodos;</li> <li>• Necessidade do tratamento e da disposição do lodo.</li> </ul>
a35. Filtros anaeróbios	73	87	55	30	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efluente clarificado;</li> <li>• Efluente com baixa concentração de matéria orgânica;</li> <li>• Sem consumo de energia;</li> <li>• Remoção significativa da matéria orgânica dissolvida;</li> <li>• Baixa produção de lodo;</li> <li>• Pode ser disposto no solo;</li> <li>• Resiste bem às variações de vazão afluente;</li> <li>• Não exigem grandes alturas ou escavações profundas;</li> <li>• Construção e operação simples;</li> <li>• Não necessita de lodo inoculador;</li> <li>• Não necessita de recirculação de lodo;</li> <li>• Liberdade de projeto em termos de configurações e dimensões.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efluente rico em sais minerais;</li> <li>• Grande quantidade de microorganismos patogênicos;</li> <li>• Risco de obstrução dos interstícios (entupimento ou colmatção do leito);</li> <li>• Volume grande devido ao espaço ocupado pelo meio suporte.</li> </ul>
a36. Filtro biológico percolador de baixa carga (FB-B)	89	85	60	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevada eficiência na remoção de DBO;</li> <li>• Nitrificação frequente;</li> <li>• Requisitos de área relativamente baixos;</li> <li>• Índice de mecanização relativamente baixo;</li> <li>• Estabilização do lodo no próprio filtro;</li> <li>• Mais simples conceitualmente do que lodos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa eficiência na remoção de coliformes;</li> <li>• Menor flexibilidade operacional que lodos ativados;</li> <li>• Elevados custos de implantação;</li> <li>• Requisitos de área mais elevados;</li> <li>• Relativa dependência da temperatura do ar;</li> <li>• Sensível a descargas tóxicas;</li> <li>• Necessidade de remoção da umidade do lodo e da sua disposição final;</li> <li>• Possíveis problemas com moscas;</li> <li>• Elevada perda de carga.</li> </ul>
a37. Filtro biológico percolador de alta carga (FB-A)	85	79	60	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixos requisitos de área;</li> <li>• Elevada eficiência na remoção de DBO;</li> <li>• Simplicidade;</li> <li>• Flexibilidade;</li> <li>• Melhor resistência a variações de carga que os filtros de baixa carga;</li> <li>• Reduzidas possibilidades de maus odores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa eficiência na remoção de coliformes;</li> <li>• Elevados custos de implantação;</li> <li>• Relativa dependência da temperatura do ar;</li> <li>• Necessidade de tratamento completo do lodo;</li> <li>• Elevada perda de carga.</li> </ul>

a38. Biodisco	92	90	60	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevada eficiência na remoção DBO;</li> <li>• Nitrificação frequente;</li> <li>• Baixo requisito de área;</li> <li>• Adequado para pequenas populações;</li> <li>• Equipamento mecânico simples;</li> <li>• Reduzidas possibilidades de maus odores;</li> <li>• Reduzida perda de carga;</li> <li>• Simplicidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa eficiência na remoção de coliformes;</li> <li>• Elevados custos de implantação e operação;</li> <li>• Relativa dependência da temperatura do ar;</li> <li>• Necessidade do tratamento completo do lodo;</li> <li>• Cobertura dos discos usualmente necessária.</li> </ul>
a38. Biorreator de membrana (MBR)	85	95	55	30	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requer pouca área;</li> <li>• Alta qualidade no efluente final;</li> <li>• Alta tolerância a variações de carga;</li> <li>• Opera em temperatura ambiente;</li> <li>• Promove a remoção de nitrogênio;</li> <li>• Baixa geração de lodo;</li> <li>• Fácil operação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutenção complicada;</li> <li>• Elevado custo de operação, manutenção e instalação;</li> <li>• Geração de ruídos;</li> <li>• Operação em alta pressão;</li> <li>• Utilização de substâncias químicas para limpeza das membranas;</li> <li>• Alto consumo de energia;</li> <li>• Não elimina contaminantes.</li> </ul>
a40. Biofiltro aerado submerso com nitrificação	92	87	60	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requisitos de área bastante baixos;</li> <li>• Elevada eficiência na remoção DBO;</li> <li>• Reduzidas possibilidades de maus odores;</li> <li>• Reduzida perda de carga;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessidade do tratamento completo do lodo;</li> <li>• Operação ligeiramente sofisticada;</li> <li>• Elevado consumo de energia;</li> <li>• Baixa eficiência na remoção de coliformes;</li> </ul>
a41. Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N	92	87	75	35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nitrificação opcional;</li> <li>• Alta velocidade de sedimentação;</li> <li>• Clarificação do efluente;</li> <li>• Grande superfície para crescimento de microorganismos;</li> <li>• Unidades compactas;</li> <li>• Alta idade do lodo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessidade de operação um pouco mais cuidadosa que os filtros percoladores;</li> <li>• Dificil controle da espessura do biofilme;</li> <li>• Problemas de entupimento;</li> <li>• Longo tempo de partida.</li> </ul>

Legenda: Eficiência de remoção média de matéria orgânica em termos de Demanda Química de Oxigênio (DQO); Eficiência de remoção média de matéria orgânica em termos de Demanda biológica de Oxigênio (DBO); Eficiência de remoção de Nitrogênio (N); Eficiência de remoção de Fósforo (P).

Fonte: Chernicharo (1996); Gongalves *et al.* (1998); Philippi (2005); Subtil (2007); Netto (2007); Calijuri *et al.*(2009); Almeida (2010); Von Sperling (2014); Cornelli *et al.*(2014).

**APÊNDICE B - INFERÊNCIAS DO PORTIFÓLIO BIBLIOGRÁFICO**

## Artigos finais sobre a seleção WTS após a aplicação da MethodiOrdinatio

Rank	Fonte	Título	IF	Ano	Ci	InOrdinatio
1°	Massoud <i>et al.</i> (2009)	Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries	4005	2009	724	708
2°	Zeng <i>et al.</i> (2007)	Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis	4010	2007	261	225
3°	Kalbar <i>et al.</i> (2012a)	Selection of an appropriate wastewater treatment technology: A scenario-based multiple-attribute decision-making approach	4010	2012	192	206
4°	Molinos-Senante <i>et al.</i> (2014)	Assessing the sustainability of small wastewater treatment systems: A composite indicator approach	4610	2014	94	129
5°	Molinos-Senante <i>et al.</i> (2012)	Assessment of wastewater treatment plant design for small communities: Environmental and economic aspects	6551	2012	107	124
6°	Molinos-Senante <i>et al.</i> (2015)	Assessment of wastewater treatment alternatives for small communities: An analytic network process approach	4900	2015	73	118
7°	Tan <i>et al.</i> (2014)	Fuzzy AHP approach to selection problems in process engineering involving quantitative and qualitative aspects	2905	2014	81	114
8°	Garrido-Baserb <i>et al.</i> (2014)	Including the environmental criteria when selecting a wastewater treatment plant	4807	2014	66	101
9°	Kalbar <i>et al.</i> (2013a)	Assessment of wastewater treatment technologies: life cycle approach	1426	2013	77	98
10°	Arroyo, Molinos-Senante (2018)	Selecting appropriate wastewater treatment technologies using a choosing-by-advantages approach	4900	2018	21	96
11°	Gherghel <i>et al.</i> (2020)	Sustainable design of large wastewater treatment plants considering multi-criteria decision analysis and stakeholders' involvement	4010	2020	0	94
12°	Ren, Liang (2019)	Multi-criteria group decision-making based sustainability measurement of wastewater treatment processes	3094	2017	29	92
13°	Lisbôa <i>et al.</i> (2020)	Application of a Multicriteria model to assist in the selection of wastewater treatment technologies in urban areas	0,903	2020	0	90
14°	Józwiakowski <i>et al.</i> (2015)	The use of multi-criteria analysis for selection of technology for a household WWTP compatible with sustainable development	0,708	2015	49	89
15°	Kalbar <i>et al.</i> (2016)	Life cycle-based decision support tool for selection of wastewater treatment alternatives	5715	2016	33	89
16°	Plakas <i>et al.</i> (2016)	Sustainability assessment of tertiary wastewater treatment technologies: A multi-criteria analysis	1197	2016	37	88
17°	Khattiyavong, Lee (2018)	Performance Simulation and Assessment of an Appropriate Wastewater Treatment Technology in a Densely Populated Growing City in a Developing Country: A Case Study in Vientiane, Laos	2,544	2019	7	87
18°	Karimi <i>et al.</i> (2011)	Selection of wastewater treatment process based on the analytical hierarchy process and fuzzy analytical hierarchy process methods	1915	2011	84	86
19°	Ouyang <i>et al.</i> (2015)	Development of the integrated fuzzy analytical hierarchy process with multidimensional scaling in selection of natural wastewater treatment alternatives	2914	2015	41	84

20°	Yao <i>et al.</i> (2020)	Incomplete interval type-2 fuzzy preference relations based on a multi-criteria group decision-making model for the evaluation of wastewater treatment technologies	2914	2019	4	84
21°	Kalbar <i>et al.</i> (2013b)	The influence of expert opinions on the selection of wastewater treatment alternatives: A group decision-making approach	4010	2013	58	82
22°	Zheng <i>et al.</i> (2016)	A scenario-based MCDA framework for wastewater infrastructure planning under uncertainty	4010	2016	27	81
23°	Garrido-Baserba <i>et al.</i> (2016)	Application of a multi-criteria decision model to select of design choices for WWTPs	3331	2016	23	76
24°	Bernal (2018)	A conceptual model for decentralized municipal wastewater management	0,32	2018	2	72
25°	Castillo <i>et al.</i> (2016a)	An integrated knowledge-based and optimization tool for the sustainable selection of wastewater treatment process concepts	4177	2016	16	70
26°	Castillo <i>et al.</i> (2016b)	Validation of a decision support tool for wastewater treatment selection	4010	2016	14	68
27°	Abdullah, Rahman (2017)	Analytic Network Process for Developing Relative Weight of Wastewater Treatment Technology Selection	0,202	2017	8	68
28°	Markov <i>et al.</i> (2017)	Multi-criteria analysis approach for selection of the most appropriate technology for municipal wastewater treatment	0,774	2017	3	63
29°	Dursun (2016)	A fuzzy approach for the assessment of wastewater treatment alternatives	0,63	2016	12	62
30°	Lee <i>et al.</i> (2013)	Assessing the scale of resource recovery for centralized and satellite wastewater treatment	6653	2013	35	62
31°	Garrido-Baserba <i>et al.</i> (2012)	Implementation of a knowledge-based methodology in a decision support system for the design of suitable wastewater treatment process flow diagrams	5647	2012	42	58
32°	Haider <i>et al.</i> (2015)	Sustainability Evaluation of Surface Water Quality Management Options in Developing Countries: Multicriteria Analysis Using Fuzzy UTASTAR Method	2,924	2015	17	57
33°	Kalbare <i>et al.</i> (2012b)	Technology assessment for wastewater treatment using multiple-attribute decision-making	1500	2012	45	57
34°	Huang <i>et al.</i> (2015)	An integrated model for structure optimization and technology screening of urban wastewater systems	4,053	2015	14	54
35°	Hardisty <i>et al.</i> (2013)	Determining a sustainable and economically optimal wastewater treatment and discharge strategy	4010	2013	26	50
36°	Abdullah (2015)	Developing Decision on Suitable Wastewater Treatment Technology Using fuzzy Simple Additive Weighting	0,636	2015	4	44
37°	Bao <i>et al.</i> (2013)	Assessment of stakeholders' preferences towards sustainable sanitation scenarios	1063	2013	21	42
38°	Mirabi <i>et al.</i> (2014)	Risk-based evaluation of wastewater treatment projects: A case study in Niasar city, Iran	8,086	2014	12	42
39°	Ashley <i>et al.</i> (2008)	Making Asset Investment Decisions for Wastewater Systems That Include Sustainability	1,12	2008	70	40
40°	Ilangkumaran <i>et al.</i> (2014)	Waste water treatment technology selection using FAHP and GRA approaches	0,19	2014	9	39
41°	Singhirunnusorn, Stenstrom (2009)	Appropriate wastewater treatment systems for developing countries: Criteria and indicator assessment in Thailand	1197	2009	47	28

## Estudos multicritério aplicados ao saneamento (Continua)

Ref.	Objetivo do estudo	Método	Dimensão	ST	Características
Ashley <i>et al.</i> (2008)	O trabalho procurou abordar os conceitos de avaliação de sustentabilidade aplicando-os em dois estudos de caso para ilustrar como o sistema multicritério de apoio à decisão pode melhorar a avaliação de sustentabilidade.	Model SWARD	Econômico (4); Técnico (4); Ambiental (3); Social (5).	Sistemas locais	A utilização dos processos e critérios de sustentabilidade do modelo SWARD auxiliou na avaliação da sustentabilidade relacionada aos diferentes cenários de tomada de decisão. A estrutura SWARD foi desenvolvida para complementar os atuais processos de tomada de decisão usados no setor de água e pode ajudar as aspirações de sustentabilidade para prestadores de serviços, reguladores e partes interessadas em água urbana.
Massoud, Tahrini, Nasr (2009)	Este artigo apresenta uma revisão das abordagens descentralizadas para o tratamento e gestão de águas residuais. Também mostra os diferentes fatores que podem afetar a seleção da tecnologia mais adequada.	-	Econômico (5); Ambiental (4); Social (4).	FL; AL; AnL; AoL; SG; SBR; AG; CW.	Embora o trabalho não tenha aplicado nenhuma ferramenta multicritério, ele reiterou a necessidade de diretrizes para a seleção de pequenos sistemas de tratamento de águas residuais comunitárias, a fim de facilitar a tomada de decisões.
Singhirunusorn, Stenstrom (2009)	Este trabalho apresenta uma abordagem abrangente para auxiliar na seleção de sistemas de tratamento de efluentes, em países em desenvolvimento. Nesta abordagem, o artigo identifica princípios, critérios e indicadores como os principais elementos essenciais para a seleção de WTS.	RRM; RM	Econômico (2); Técnico (3); Ambiental (1); Social (1).	-	O trabalho apresenta um conjunto de 14 critérios, 61 indicadores e 74 variáveis, que podem ser utilizados para avaliar os sistemas operacionais de tratamento de efluentes. Esses valores evidenciam a complexidade dessa tomada de decisão.
Karimiet <i>al.</i> (2011)	O processo de hierarquia analítica difusa foi proposto para lidar com a imprecisão dos julgamentos dos tomadores de decisão na seleção do melhor processo de tratamento de efluentes.	AHP; FuzzyAHP	Econômico (4); Técnico (9); Ambiental (5).	EA; AB; IFAS; SBR; AL.	O método AHP foi fácil de usar e compreendido por especialistas. Ao lidar com muitos critérios em um problema, era melhor usar o AHP e aplicar o software de escolha especializada para simplificar o cálculo.
Kalbareet <i>al.</i> , (2012a)	A tecnologia utilizada no trabalho buscou auxiliar na escolha das tecnologias de tratamento de efluentes adequadas para as diferentes situações de tomada de decisão encontradas no gerenciamento de efluentes.	TOPSIS	Econômico (3); Técnico (4); Ambiental (3); Social (2).	ASP; SBR; UASB-FAL; CW.	O método utilizado para a classificação foi simples de entender e fácil de implementar em um ambiente computacional amigável, adequado para situações de decisão uma vez que os tomadores de decisão na vida real sempre consideram os aspectos (positivos e negativos) das alternativas e selecionam a melhor alternativa disponível.

Kalbareet <i>al.</i> ,(2012b)	Uma estrutura multicritério para avaliar a melhor tecnologia para o tratamento de águas residuais é proposta neste trabalho. Para validar a metodologia, ela foi aplicada em um estudo de caso de seleção de tecnologia para edifícios altos em centros urbanos da Índia.	CP; CGT; TOPSIS; ELECTRE-I	Econômico (3); Técnico (4); Ambiental (3); Social (2).	AS; SBR; MBR.	Os critérios analisados foram derivados da avaliação do ciclo de vida, custo do ciclo de vida, restrições de recursos, robustez do sistema e aspectos de sustentabilidade. Por fim, o trabalho validou a teoria de que é a situação de decisão que decide a tecnologia mais adequada e não a tecnologia em si.
Maureret <i>al.</i> (2012)	O artigo trata da geração de potenciais alternativas no campo do planejamento e tomada de decisão em sistemas de saneamento. Fornecendo uma maneira de determinar o conjunto de alternativas de sistema de saneamento tecnicamente viáveis ou potenciais.	SanSys	Econômico (1); Técnico (1); Ambiental (1).	ST; TF; UASB; PS; CW; AS; A; DB; Co; ABR; CUS.	O trabalho reforça que as alternativas devem ser melhor descritas e avaliadas. A metodologia envolve a geração de todas as combinações possíveis de sistemas e a identificação das alternativas potenciais com elementos compatíveis. Assim, o trabalho enfatizou a necessidade de um conjunto de atributos para auxiliar na seleção de alternativas.
Kalbareet <i>al.</i> ,(2013)	Apresentar uma nova abordagem para incorporar opiniões de especialistas no processo de tomada de decisão com base em cenários, visto que a consultoria de especialistas desempenha um papel importante na seleção de tecnologias de tratamento de águas residuais.	AHP	Econômico (3); Técnico (4); Ambiental (3); Social (2).	ASP; SBR; UASB-FAL; CW.	O AHP foi aplicado de forma eficiente para conciliar múltiplos atributos qualitativos, onde os julgamentos dos especialistas foram quantificados por meio de matrizes de comparação de pares baseadas na escala de Saaty.
Lee <i>et al.</i> (2013)	Neste estudo foram avaliados e classificados as opções de recuperação de água e energia para um caso de teste simplificado em três configurações de escala. Essas configurações são comparadas com a metodologia de superação.	PROMETHEE I and II	Econômico (4); Técnico (1); Ambiental (1).	CS; H1; H2.	Os dois métodos atendem às necessidades requeridas para resolver o problema estudado.
Hardisty, Sivapalan, Humphries (2013)	Diferentes opções de tratamento e descarga de águas residuais foram examinadas sob a perspectiva da sustentabilidade. O trabalho foi aplicado a uma combinação de 6 sistemas de tratamento e disposição.	EESA	Econômico (2); Ambiental (4); Social (1).	FL; PS; AST; TT.	A EESA monetizou todos os custos e benefícios a fim de comparar a gama de alternativas possíveis. O estudo reforça a ideia de que nem sempre a alternativa mais econômica é também a melhor. O trabalho também destaca que a sustentabilidade, embora amplamente aceita, ainda é pouco utilizada de fato.

Bao, Aramaki, Hanaki (2013)	Este estudo propôs um instrumento para a seleção de sistemas de saneamento adequados e sustentáveis para o tratamento de águas residuais municipais, envolvendo vários critérios com preferências conflitantes das partes interessadas.	AHP	Econômico (1); Técnico (1); Ambiental (1); Social (2).	ST; PS; BAST.	Um conjunto de critérios multidimensionais e AHP tem demonstrado uma ótima metodologia para o processo de tomada de decisão. O AHP foi uma ferramenta eficaz para elicitare preferências entre diferentes grupos de partes interessadas, bem como, para a comparação entre diferentes cenários.
Molinos-Senante <i>et al.</i> (2014)	Este artigo propôs uma nova metodologia para avaliar a sustentabilidade de sistemas de tratamento com base em indicadores que abrangem aspectos econômicos, ambientais e sociais. Dessa forma, o trabalho proporciona a seleção da alternativa de tratamento mais sustentável.	AHP	Econômico (2); Ambiental (10); Social (5).	CW; PS; EA; MBR; RBC; TF; SBR.	O artigo apresenta uma metodologia inovadora, que avaliou sete cenários diferentes, por meio de uma avaliação baseada nos princípios da sustentabilidade. O trabalho observou que os resultados para a dimensão ambiental são opostos aos da dimensão econômica.
Tan <i>et al.</i> (2014)	Desenvolver uma abordagem fuzzy AHP para aplicar em problemas de engenharia, aplicando em 3 problemas diferentes.	Fuzzy AHP	Econômico (2); Técnico (1); Ambiental (1).	CAS; SBR; MBR.	A abordagem tem se mostrado eficiente na seleção de alternativas ótimas com base em múltiplos critérios, que podem ser quantitativos ou qualitativos, a partir do julgamento de especialistas.
Molinos-Senante <i>et al.</i> (2015)	A pesquisa visa aplicar o processo de rede analítica (ANP) para classificar um conjunto de tecnologias para tratamento de esgoto secundário em pequenas comunidades.	ANP	Econômico (2); Técnico (1); Ambiental (8); Social (5).	CW; EA; MBR; PS; RBC; SBR; TF.	O método ANP melhora o processo de tomada de decisão, proporcionando maior rigor e robustez científica, e contribui para um melhor entendimento do complexo processo de tomada de decisão com múltiplas interdependências, auxiliando os tomadores de decisão a refletir e apresentar suas preferências.
Józwiaowski <i>et al.</i> (2015)	Este artigo considera a análise multicritério como ferramenta para selecionar a melhor tecnologia para uma estação de tratamento de águas residuais domésticas, considerando critérios de desenvolvimento sustentável.	CP	Econômico (2); Técnico (3); Ambiental (2); Social (1).	TF, AS, CW	Ele considera cinco soluções de tratamento municipal para a análise dos critérios. O artigo destacou a predominância de critérios econômicos. Além disso, mostrou também as mudanças na tecnologia selecionada de acordo com a dimensão analisada.
Ouyang <i>et al.</i> (2015)	Este artigo desenvolve o processo integrado de hierarquia analítica difusa (AHP) com abordagem de escalonamento multidimensional (MDS) para melhorar os métodos atuais para determinar a alternativa ótima.	Fuzzy AHP	Econômico (3); Técnico (2); Ambiental (7); Gestão (2).	P1; P2; P3; CW; SP.	O método AHP fuzzy integrado com MDS apresentado neste artigo teve um ótimo desempenho no tratamento da questão dos processos de tomada de decisão multicritério.



Plakas, Karabelas, Georgiadis	O método participativo denominado técnica de classificação multi-atributo simples explorando classificações foi empregado para atribuir pesos a indicadores de sustentabilidade selecionados.	MCA	Econômico (2); Ambiental (7); Social (3).	PACUF; RO; O3/UV;hybrid TiO2/UV-A.	A estrutura MCA desenvolvida no presente estudo pode facilitar o complicado processo de tomada de decisão ao fornecer uma visão geral multidimensional das alternativas.
Kalbareit <i>al.</i> , (2016)	Este estudo se concentra na implementação da tomada de decisão de atributos múltiplos "baseada em cenário" (MADM). A ferramenta incorpora vários cenários para lidar com situações complexas de tomada de decisão.	TOPSIS	Econômico (3); Técnico (4); Ambiental (3); Social (2).	ASP; SBR; UASB-FAL; CW.	Os aplicativos sugerem que a ferramenta é eficiente, simples, fácil de usar e capaz de fornecer suporte à decisão de outras organizações para a seleção do tratamento de esgoto adequado.
Zheng, Egger, Lienert (2016)	Este artigo fornece uma ferramenta prática para apoiar decisões relacionadas ao tratamento de águas residuais. Ele procurou eliciar as preferências das partes interessadas, bem como identificar alternativas.	SMAA/ MCs	Econômico (1); Técnico (1); Ambiental (2); Social (1).	CS; SCS; DS.	O trabalho reitera a importância do planejamento da engenharia para incluir os stakeholders, as incertezas e os critérios de sustentabilidade. Outro ponto destacado no trabalho foi a complexidade desse problema de seleção, reforçando a importância da recomendação de ferramentas de MCDA.
Garrido-Baserbaet <i>al.</i> (2016)	Este artigo construiu um Sistema de Apoio à Decisão Ambiental (EDSS), com o objetivo principal de identificar e avaliar a tecnologia de tratamento de efluentes mais adequada, para novos projetos, bem como para a modernização de plantas obsoletas.	EDSS	Econômico (2); Operacional (5); Ambiental (2).	IFAS; MBR; TF; PS; D; B; BAF; SBR; GSBR; AS; CW; AnoxAn.	A integração de técnicas de inteligência artificial combinadas com diferentes metodologias de análise de decisão com critérios (MCDA) resultou no software Novedar_EDSS. Quatro cenários foram avaliados, aplicando diferentes critérios ou requisitos do usuário. Grandes resultados foram obtidos.
Castilloet <i>al.</i> (2016a)	A classificação das tecnologias de tratamento, neste estudo, ocorreu por meio da análise de diversos critérios, em conjunto com modelos matemáticos. 5 tecnologias potenciais foram selecionadas primeiramente pelos especialistas. Em seguida, selecionava-se a alternativa de tratamento mais adequada para cada cenário avaliado.	Novedar_EDSS	Econômico (2); Técnico (3); Ambiental (1).	SBR; OxD; MLE; IFAS; MBR.	A metodologia integrada aplicada à seleção da configuração WTS mostrou-se eficiente. Os autores destacaram em seu trabalho os benefícios potenciais da integração do NOVEDAR_EDSS e da otimização com base na superestrutura.

Castillo <i>et al.</i> (2016b)	Este artigo tem como objetivo verificar a viabilidade do Novedar_EDSS testando-o em casos reais. ou para esse fim, foram selecionados 4 estudos de caso de projetos reais para validar os resultados no EDSS, comparando-os com os do estudo de alternativas realizado pelos decisores.	Novedar_EDSS	Econômico (2); Operacional (6); Ambiental (4).	IFAS variations; BNR.	Novedar_EDSS recomenda tratamentos semelhantes aos aplicados em projetos reais, classificando-os na mesma ordem. Portanto, esta ferramenta pode ser utilizada no estudo de alternativas para apoiar os tomadores de decisão na seleção de alternativas adequadas de tratamento a serem aplicadas em instalações de esgoto, para novas e retrofit.
Dursun (2016)	O artigo mostrou uma tomada de decisão multicritério difusa com vários critérios. Os pesos dos critérios considerados para a avaliação alternativa foram calculados por meio de julgamento usando DEMATEL, em seguida, TOPSIS foi usado para classificar as alternativas.	DEMATEL TOPSIS	Econômico (3); Técnico (2); Ambiental (3).	AS; UASB+FL; SBR; CW.	A estrutura proposta permitiu aos gestores um melhor manejo das informações e, portanto, permite a utilização de diversos recursos pelos tomadores de decisão. A aplicação da metodologia proposta foi ilustrada por meio de um estudo de caso.
Ren, Liang (2017)	Este estudo tem como objetivo desenvolver um método MADA baseado em IFST que permite que vários DMs participem do processo e lhes permita empregar dados fuzzy intuicionistas em vez de dados nítidos para priorização da sustentabilidade dos processos de tratamento de águas residuais.	Fuzzy AHP	Econômico (2); Técnico (3); Ambiental (2); Social (3).	AAO; TOD; ASD; SBR.	As inovações do método proposto permitem que diferentes tomadores de decisão participem do processo de medição da sustentabilidade. A medição da sustentabilidade também pode ser realizada mesmo que os tomadores de decisão não possuam os dados correspondentes para a tomada de decisão. Assim, o método proposto pode atingir a avaliação da sustentabilidade sob incertezas.
Markov, Jovanoski, Dimitrovski	O objetivo deste artigo é dar uma visão geral da seleção do processo de tratamento, como uma ferramenta de orientação para a seleção da tecnologia de tratamento mais adequada para qualquer cenário de caso.	CBA	Questões gerais (6); Operacional (6); Processo (5); Lodo (3).	PrdN; SBR; MBR.	Esta metodologia pode ser aplicada a qualquer caso
Arroyo & Molinos-Senante	Este estudo examina uma abordagem de escolha por vantagens (CBA) para classificar sete tecnologias WTS para WTS secundário.	AHP/ CBA	Econômico (2); Técnico (3); Ambiental (5).	CW; TF; PS; RBC; MBR; EA; SBR.	cenário, porque está levando em consideração as condições locais particulares por meio da análise dos dados de entrada.

Bernal, 2018	Este artigo propõe um modelo conceitual para a seleção do nível de centralização da gestão de águas residuais em áreas urbanas, que está associado aos coletores principais de esgoto e estações de tratamento de águas residuais.	AHP/CBA	Econômico (7); Técnico (11); Ambiental (4); Social (5).	AL; UASB;AW; PS; PP; ST; DFL.	O artigo mostrou os benefícios do uso da abordagem CBA para apoiar o processo de tomada de decisão. Ao contrário da maioria dos outros métodos de tomada de decisão, o CBA é transparente em sua incorporação de aspectos subjetivos
Gherghelet al. (2020)	Este trabalho fornece uma abordagem sustentável para identificar o melhor sistema de tratamento para uma grande estação de tratamento de águas residuais. O estudo considera múltiplos critérios para análise de decisão e aplica a abordagem a seis esquemas alternativos de tratamento.	SAW-PCT	Econômico (4); Técnico (1); Ambiental (1).	AS; EA; ASS; Sed; ASD, SI.	Os critérios analisados foram derivados da avaliação do ciclo de vida, custo do ciclo de vida, restrições de recursos, robustez do sistema e aspectos de sustentabilidade. Por fim, o trabalho validou a teoria de que é a situação de decisão que decide a tecnologia mais adequada e não a tecnologia em si.
Yao et al. (2020)	Considerando a importância da seleção adequada do sistema de tratamento de efluentes, este trabalho propôs uma nova estrutura para a tomada de decisão. Para isso, vários critérios envolvendo diferentes aspectos para WTS foram	MCGDM Type-2 fuzzy	Econômico (2); Técnico (3); Ambiental (2); Social (1).	AAO; TOD; ASD; SBR.	O trabalho reforça que as alternativas devem ser melhor descritas e avaliadas. A metodologia envolve a geração de todas as combinações possíveis de sistemas e a identificação das alternativas potenciais com elementos compatíveis. Assim, o trabalho enfatizou a necessidade de um conjunto de atributos para auxiliar na seleção de alternativas.

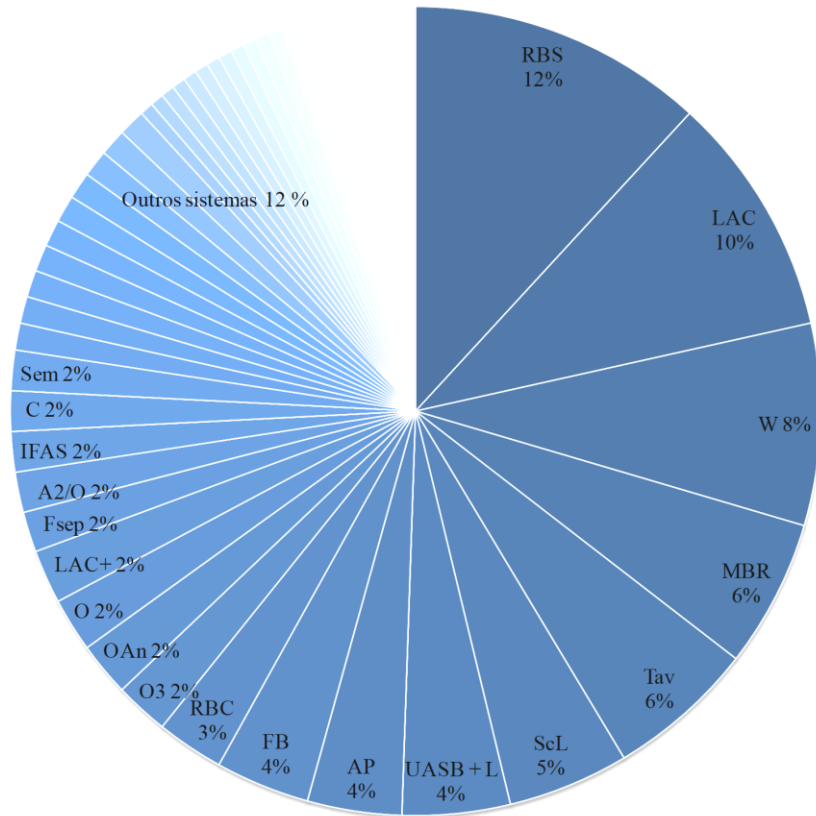
Onde: Teoria dos jogos corporativos (CGT); Avaliação da sustentabilidade ambiental e econômica (EESA); Programação de compromisso (CP); Sistema de apoio à decisão ambiental (EDSS); Processo de hierarquia analítica (AHP); Ponderação de aditivo simples - Técnica de comparação em pares (SAW-PCT); Análise relacional Gray (GRA); Método de classificação regular (RRM); Método de classificação (RM); Análise de aceitabilidade multicritério estocástica (SMAA); Simulação de Monte Carlo (MSc); Lodo ativado (AS); Manta anaeróbica de fluxo ascendente (UASB); Sistemas de lagoas (PS), zonas húmidas construídas (CW); Lagoas com plantas (PP); Fossas sépticas (ST); Sistemas de drenagem de campo (DFS); Carvão ativado em pó com separação por membrana de ultrafiltração (PACUF); Osmose reversa (RO), oxidação de ozônio / luz ultravioleta (O<sub>3</sub> / UV); um novo (híbrido TiO<sub>2</sub> / UV-A), Anaeróbio-Anóxico-Óxido (AAO); Vala de Oxidação Tripla (TOD); Oxidação anaeróbica de fosso único (ASD); Sistema de tratamento de solo com infiltração rápida (P1); Sistemas de tratamento de solo em baixa taxa (P2); Terreno de fluxo superficial (P3); Lagoa de estabilização (SP); Lodo ativado de filme fixo integrado (IFAS); Biorreator de membrana (MBR); Processo estendido de aeração com lodo ativado com pré-anóxico (PrdN); Aeração estendida (EA); Absorção-biooxidação (AB); Lagoa aerada (AL); Híbrido 1 (H1); Híbrido 2 (H2); Crescimento suspenso (SG); Crescimento anexado (AG); Lagoas facultativas (FL); Lagoas anaeróbicas (AnL); Lagoas aeróbicas (AoL); Reator de lote de sequenciação (SBR); Processos granulares aeróbicos operados como reatores em lote sequenciados (GSBR); Filtro de gotejamento (TF); Precipitação (P); Desamonificação (D); Filtro aerado de biofilme (BAF); Processo Bardenpho (B); Remoção de nutrientes biológicos (BNR); Ludzack-Ettinger modificado (MLE); Vala de oxidação (OxD); Filtro anaeróbio (BAST); Sistema centralizado (CS); Sistema semicentralizado (SCS); Sistema totalmente descentralizado (DS); Contator biológico rotativo (RBC); Tratamento Secundário Avançado (AST); Tratamento Terciário (TT); Aquicultura (A); Leito de secagem (DB); Compostagem (Co); Reator de biogás anaeróbio (ABR); Armazenamento centralizado de urina (CUS) Estabilização aeróbia de lodo (ASS); Sedimentação (Sed); Digestão anaeróbia de lodo (ASD); Incineração de lodo (SI).

Fonte	Massoudet al. (2009)	Zeng et al. (2007)	Kalbar et al. (2012a)	Molinos-Senante et al. (2014)	Molinos-Senante et al. (2012)	Molinos-Senante et al. (2015)	Tan et al. (2014)	Garrido-Baserba et al. (2014)	Kalbar et al. (2013a)	Arroyo, Molinos-Senante (2018)	Gherghel et al. (2020)	Ren, Liang (2019)	Lisbôa et al. (2020)	Józwiakowski et al. (2015)	Kalbar et al. (2016)	Plakaset al. (2016)	Khattiyavong, Lee (2018)	Karimiet al. (2011)	Ouyang et al. (2015)	Yao et al. (2020)	Kalbar et al. (2013b)	Zheng et al. (2016)	Garrido-Baserba et al. (2016)	Bernal (2018)	Castillo et al. (2016a)	Castillo et al. (2016b)	Abdullah, Rahman (2017)	Markovetal., (2017)	Dursun (2016)	Lee et al. (2013)	Garrido-Baserba et al. (2012)	Haider et al. (2015)	Kalbar et al. (2012b)	Huang et al. (2015)	Hardisty et al. (2013)	Abdullah (2015)	Bao et al. (2013)	Mirabiet al. (2014)	Ashley et al. (2008)	Ilangkumaran et al (2014)	Singhirunusorn (2009)								
AHP	1			1			1			1			1					1	1																														
ANP					1																							1																					
IT2FS																				1																													
GRA	1																																																
ELECTRE							1																																										
PROMETHEE																															1																		
TOPSIS			1												1	1																																	
DEMATEL																															1																		
SMARTER																						1																											
MAUT																																																	
EDSS					1																			1	1																								
SAW											1															1	1																						
IFS												1																																					
PC													1																																				
NSGA- II														1																																			
CDW																																																	
UTASTAR																																																	
EESA																																																	
OWA																																																	
Não integra	1							1	1																																								

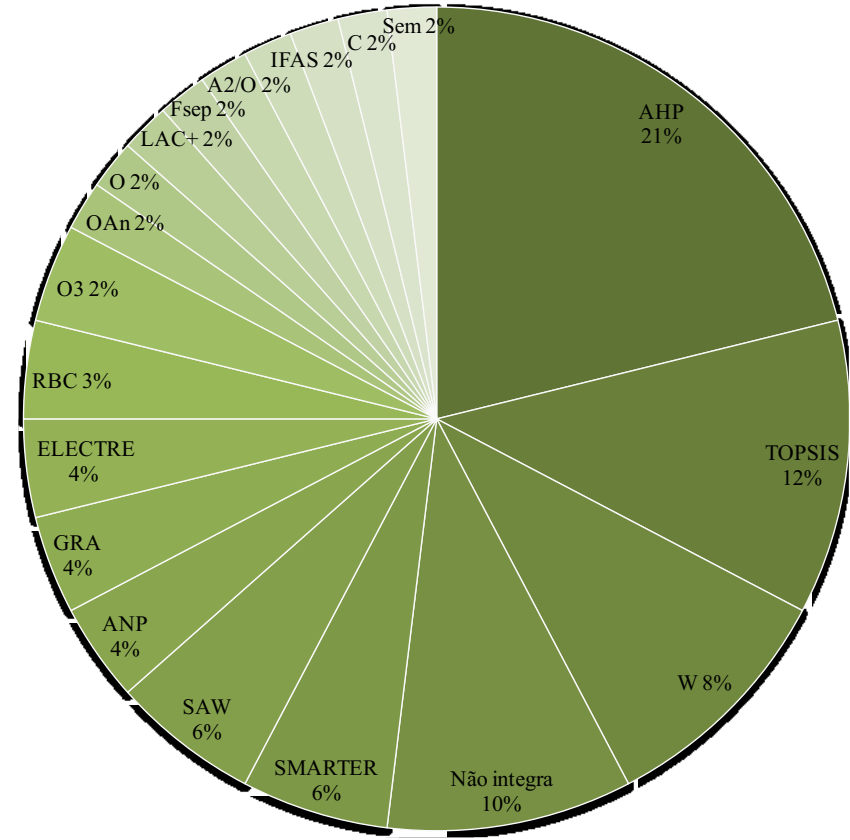
Onde: Programação de compromisso (PC); Incomplete interval type-2 fuzzy (IT2FS); Analytic network process (ANP); Criteria direct – weighing (CDW); Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II); Metodo de avaliação da capacidade econômica e ambiental (EESA); Simple additive weighting (SAW); Média ponderada ordenada (OWA)







**Alternativas de tratamento avaliadas**



**Métodos de avaliação**

**Particularidades que descrevem o cenário ao qual artigos do portfólio foram aplicados.**







**APÊNDICE C - MÉTRICAS DE DESEMPENHO**

métricas de desempenho por Alternativa

Alternativas	Custo de Implantação		Custos de O&M		Requisitos energéticos		Requisitos de área		VPL		Quali Mão de obra	Quali Acessibilidade	Quali Maturidade	Quali Modernidade	Quali Requisitos externos	Quali Durabilidade	Quali Robustez	Quali Simplicidade	*Aplicabilidade	Quali Flexibilidade	Desempenho		Remoção de MO		Remoção de S		Remoção de N		Remoção de P		Remoção de patógenos		Remoção avançada		Quali Reuso da água	Quali Impactos ambientais	Quali Emissões	Quali Sustentabilidade	Recuperação de produtos	Produção de lodo		Quali Aceitação	Quali Impacto visual	Quali Odor	Quali Ruídos	Quali Atração de insetos	Quali *Necessidade		
	\$/pessoa		\$/pessoa.ano		\$/W.pessoa		\$/m².pessoa		\$												%		%		%		%		CF und.log		Quali		Quali							L.hab.ano									
	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx											A	B	C	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min						Máx	Min							Máx	Min
Lagoa facultativa A8	13,3	26,7	0,67	1,33	0	0	3	5	\$1728868,26	\$2827022,05	1	2	4	3	0	3	3	4	5	5	3	1	2	33,8	63,8	65	80	70	80		60		35	1	2	1	3	3	3	3	5	35	90	4	5	3	5	2	5
Lagoa anaeróbia- lagoa facultativa A9	13,3	24	0,93	1,6	0	0,3	2	3,5	\$1170821,51	\$2006761,10	2	2	4	3	1	3	3	4	5	5	3	1	2	33,8	63,8	65	80	70	80		60		35	1	2	2	4	3	4	3	5	55	160	3	4	1	5	2	5
Lagoa aerada- lagoa facultativa A10	13,3	24	0,93	1,6	0	0	1,7	3,2	\$1016555,46	\$1843432,22	2	2	4	3	1	2	3	4	4	5	3	1	3	33,8	56,3	65	80	70	80		30		35	1	2	2	4	3	3	3	5	30	220	3	4	4	1	3	5
Lagoa aerada mista completa + lagoa de sedimentação A11	5,33	16	0,27	0,8	0	0	10	50	\$5753093,37	\$27700868,62	3	2	4	3	1	3	3	3	3	3	3	1	3	36,3	58	65	80	80	87		30		35	1	2	2	4	2	3	3	3	55	360	3	4	3	1	2	5
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação A12	8	18,7	0,4	0,93	0	0	1	6	\$612812,96	\$3371890,43	3	1	4	3	1	3	3	4	5	3	3	1	2	48,3	70,3	70	83	73	83	50	65		50	3	5	2	7	3	3	4	5	55	160	4	4	3	5	2	5
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas A13	10,7	21,3	0,53	1,07	0	0	2	3,5	\$1166620,05	\$1992680,93	3	1	4	4	1	2	3	4	3	3	3	1	3	41,3	44,5	75	83	90		60		35	3	4	3	7	3	3	3	3	69	120	4	4	3	5	2	5	
Infiltração rápida A14	13,3	21,3	0,67	1,07	0	0	3	5	\$1722858,35	\$2828813,56	2	2	4	3	0	4	4	4	4	5	3	1	1	72	23,3	80	93	93		65		50		4	5	2	7	3	1	4	5	0	0	4	4	2	5	2	5
Escoamento superficial A15	21,3	34,7	1,6	2,67	0	0	0,2	0,35	\$193795,51	\$297072,88	2	2	4	3	0	4	3	4	5	5	3	1	2	38,8	69,5	75	85	80	93		65		35	2	3	2	5	2	1	4	5	0	0	4	4	2	5	2	5
Wetlands A16	16	26,7	0,8	1,33	0	0	1	1,5	\$614834,30	\$894840,59	3	2	3	5	0	2	3	4	5	5	3	1	2	40,5	68,3	75	85	87	93		60		35	3	4	3	7	2	1	4	5	0	0	3	3	2	5	2	5
Tanques sépticos + filtro anaeróbico (TSC) A17	8	13,3	0,67	0,93	0	0	0,03	0,1	\$47749,10	\$93892,41	1	1	4	1	1	2	2	3	4	5	1	1	2	37,5	66,3	70	80	80	90		60		35	1	2	3	5	4	3	3	4	180	1000	3	2	2	4	4	5
Tanques sépticos + infiltração A18	18,7	29,3	1,87	3,2	1,8	3,5	0,08	0,2	\$154704,97	\$240604,98	2	2	4	1	0	2	3	4	4	5	1	1	2	73,3	23,8	85	95	93		65		50		4	5	2	7	3	2	4	5	110	360	3	2	2	4	2	5
Manta de lodo anaeróbico de fluxo ascendente (UASB) A19	17,3	26,7	1,87	3,2	1,8	3,5	0,05	0,15	\$136552,26	\$207079,35	4	2	5	3	1	3	2	3	4	5	5	3	2	30	61,3	55	70	65	80		60		35	1	1	2	3	3	4	3	4	70	220	3	2	2	4	4	5
UASB + lodo ativado A20	12	18,7	0,93	1,47	0	0	0,05	0,15	\$74175,84	\$137971,76	4	1	5	4	1	3	2	4	3	3	5	5	3	40,5	69	75	88	87	93		60		35	1	2	2	4	4	5	3	5	180	400	4	2	4	4	4	5
UASB + biofiltro aerado submerso A21	16	24	1,33	2	0	0	0,1	0,2	\$116258,15	\$184630,20	4	2	4	4	1	2	2	4	3	1	5	5	3	40,5	69	75	88	87	93		60		35	1	2	2	4	3	4	3	5	180	400	4	2	5	2	4	5
UASB + filtro anaeróbico A22	16	24,3	1,6	2,4	1	1,5	0,05	0,15	\$108339,67	\$174323,01	4	2	4	4	1	2	3	3	3	1	5	5	2	37,5	66,3	70	80	80	90		60		35	1	2	3	5	3	5	3	5	150	300	3	2	1	4	2	5
UASB + biofiltro percolador de alta carga A23	10,7	21,3	1,2	1,87	0	0	1,5	2,5	\$890931,54	\$1446162,15	4	1	4	5	1	2	3	4	4	1	5	5	2	40	69	73	88	87	93		60		35	1	2	3	5	3	4	3	5	180	400	4	2	4	4	3	5
UASB + lagoas de polimento A24	10,7	24	1,33	2,4	0,3	0,6	0,15	0,3	\$144489,88	\$247492,23	4	1	4	4	1	3	3	4	3	3	3	1	3	60,8	57,8	70	83	73	83	50	65	50		3	5	2	7	3	4	4	5	150	250	3	2	3	4	3	5
UASB + lagoas aeradas facultativas A25	10,7	24	1,33	2,4	0,5	0,9	0,1	0,3	\$118004,41	\$252800,80	4	1	4	4	1	2	3	4	4	3	3	1	3	33,8	56,3	65	80	70	80		30		35	1	2	2	4	3	4	3	5	150	300	3	2	4	1	3	5
UASB + Lagoa de sedimentação + aeração mista completa A26	10,7	24	1,33	1,87	0	0	1,5	3	\$898551,91	\$1730549,58	4	1	4	4	1	2	3	3	4	3	3	1	3	36,3	58	65	80	80	87		30		35	1	2	2	4	3	5	3	5	150	300	2	2	2	1	2	5
UASB + escoamento superficial A27	26,7	42,7	2,67	5,33	2,5	4,5	0,12	0,25	\$224274,48	\$326395,72	4	3	4	4	1	3	3	4	5	3	3	1	2	37,5	69,5	70	85	80	93		65		35	2	3	2	5	3	4	4	5	70	220	3	2	2	4	2	5
Lodo ativado convencional A28	24	32	2,67	5,33	3,5	5,5	0,12	0,25	\$231758,76	\$319311,99	4	3	5	3	1	3	2	4	1	3	3	3	41,8	69,5	80	90	87	93		60		35	1	2	2	4	3	4	3	1	1100	3000	3	2	4	1	4	5	
Lodo ativado - aeração prolongada A29	24	32	2,67	5,33	4,5	6	0,12	0,25	\$238958,66	\$326346,75	4	3	4	3	1	2	3	4	2	3	3	3	4	42,5	70,3	83	93	87	93		60		35	1	2	2	4	3	4	3	2	1200	2000	3	2	5	1	4	5
Sistemas de fluxo intermitente (RBS) A30	29,3	45,3	2,67	5,87	2,2	4,2	0,12	0,25	\$234225,92	\$334450,12	5	3	4	4	1	2	3	4	3	5	5	5	4	42,5	70,3	83	93	87	93		60		35	1	2	2	4	3	4	3	2	1200	2000	3	2	3	1	4	5
Lodo ativado convencional com filtração terciária A31	34,7	50,7	4	6,67	2,2	4,4	0,12	0,25	\$260769,88	\$366398,07	5	4	4	3	1	1	3	5	1	3	3	3	58,3	78	90	95	93	97		60	50	60	3	5	4	9	3	4	4	2	1200	3100	3	2	3	1	4	5	
Filtro biológico percolador de baixa carga (FB-B) A32	34,7	50,7	4	6,67	2,5	4,5	0,15	0,3	\$282788,51	\$393499,34	4	4	4	5	1	1	2	4	3	5	5	5	2	41,8	69,5	80	90	87	93		60		35	1	2	3	5	3	3	3	2	360	1100	3	2	4	4	2	5
Filtro biológico percolador de alta carga (FB-A) A33	32	40	2,67	4	0	0	0,15	0,3	\$205379,37	\$299930,22	4	3	4	5	1	1	3	4	3	5	5	5	2	39,3	68,8	70	87	87	93		60		35	1	2	3	5	3	3	3	1	500	1900	4	2	4	4	3	5
Biofiltro aerado submerso com nitrificação A34	32	40	2,67	4	0	0	0,12	0,25	\$189502,63	\$270572,30	4	3	3	5	1	1	2	4	2	5	5	5	4	42,5	69,5	83	90	87	93		60		35	1	2	4	6	3	3	3	1	1100	3000	4	2	5	2	4	5

Sustentabilidade											
Alternativas	Expectativa de vida do sistema	Qualidade final do efluente tratado	Possibilidade de recuperação de recursos	Geração de Subprodutos	Capacidade de reutilizar as águas residuais tratadas	Possibilita irrigação direta	Possibilita irrigação indireta	Conservação dos recursos naturais	Recarga de água subterrânea via infiltração de superfície	Flexibilidade	
Lagoa facultativa A8	3	4	2	5	2	3	5	1	5	2	
Lagoa anaeróbia- lagoa facultativa A9	3	4	2	5	2	3	5	2	5	2	
Lagoa aerada- lagoa facultativa A10	2	3	2	5	2	3	5	2	5	3	
Lagoa aerada mista completa + lagoa de sedimentação A11	3	3	2	3	2	3	5	2	5	3	
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação A12	3	5	2	5	5	6	5	2	5	2	
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas A13	2	2	3	3	4	5	5	2	5	3	
Infiltração rápida A14	4	1	2	5	5	6	5	2	5	1	
Escoamento superficial A15	4	5	2	5	3	4	5	2	5	2	
Wetlands A16	2	4	3	5	4	5	5	3	5	2	
Tanques sépticos + filtro anaeróbico (TSC) A17	2	4	1	4	2	3	3	4	3	2	
Tanques sépticos + infiltração A18	2	1	1	5	5	6	5	4	5	2	
Manta de lodo anaeróbico de fluxo ascendente (UASB) A19	3	4	3	4	1	2	3	4	3	2	
UASB + lodo ativado A20	3	4	3	5	2	3	3	4	3	3	
UASB + biofiltro aerado submerso A21	2	4	3	5	2	3	3	4	3	3	
UASB + filtro anaeróbico A22	2	4	3	5	2	3	3	4	3	2	
UASB + biofiltro percolador de alta carga A23	2	4	3	5	2	3	3	4	3	2	
UASB + lagoas de polimento A24	3	3	3	5	5	6	3	4	3	3	
UASB + lagoas aeradas facultativas A25	2	3	3	5	2	3	3	4	3	3	
UASB + Lagoa de sedimentação + aeração mista completa A26	2	3	3	5	2	3	3	4	3	3	
UASB + escoamento superficial A27	3	5	3	5	3	4	5	4	5	2	
Lodo ativado convencional A28	3	5	3	1	2	3	4	4	4	3	
Lodo ativado - aeração prolongada A29	2	5	3	2	2	3	3	4	3	4	
Sistemas de fluxo intermitente (RBS) A30	2	5	2	2	2	3	3	4	3	4	
Lodo ativado convencional com filtração terciária A31	1	5	2	2	5	6	4	4	4	3	
Filtro biológico percolador de baixa carga (FB-B) A32	1	5	2	2	2	3	4	4	4	2	
Filtro biológico percolador de alta carga (FB-A) A33	1	4	2	1	2	3	4	4	4	2	
Biofiltro aerado submerso com nitrificação A34	1	5	2	1	2	3	4	4	4	4	

Impacto Ambiental (IA)														
Alternativas	Uso e ocupação do solo		Uso de recursos naturais	Poluição do ar	Alteração da qualidade da água e do solo	Estresse hídricos	Dificuldade para recuperação da área se um dia desistada a estação	Níveis de Ruídos	Resíduos sólidos	Resíduos gasosos	Poluição atmosférica	Liberação de agentes patogênicos	Liberação de aerossóis	Proliferação de vetores
Lagoa facultativa A8	5	1	3	3	2	1	5	2	2	3	4	5	2	
Lagoa anaeróbia- lagoa facultativa A9	4	2	4	3	2	1	5	3	3	3	4	5	2	
Lagoa aerada- lagoa facultativa A10	4	2	3	3	3	1	1	2	2	4	4	1	3	
Lagoa aerada mista completa + lagoa de sedimentação A11	4	2	3	3	3	2	1	2	2	3	3	1	2	
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação A12	5	2	3	2	1	2	5	3	3	3	2	5	2	
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas A13	4	2	3	2	4	2	5	3	3	3	2	5	2	
Infiltração rápida A14	4	2	1	3	5	2	5	1	1	2	4	5	2	
Escoamento superficial A15	4	2	1	2	1	2	5	1	1	2	4	5	2	
Wetlands A16	3	3	1	1	2	2	5	1	0	2	2	5	2	
Tanques sépticos + filtro anaeróbico (TSC) A17	4	4	3	4	2	2	4	3	2	3	5	4	4	
Tanques sépticos + infiltração A18	2	4	2	4	5	2	4	2	1	2	5	4	2	
Manta de lodo anaeróbico de fluxo ascendente (UASB) A19	1	4	4	3	2	3	4	2	4	3	3	5	4	
UASB + lodo ativado A20	1	4	5	3	2	4	4	3	4	5	3	5	4	
UASB + biofiltro aerado submerso A21	1	4	4	3	2	4	2	3	4	5	2	5	4	
UASB + filtro anaeróbico A22	1	4	5	3	2	4	4	3	4	3	3	5	2	
UASB + biofiltro percolador de alta carga A23	2	4	4	3	2	4	4	3	4	4	3	5	3	
UASB + lagoas de polimento A24	3	4	4	3	3	4	4	2	4	4	2	5	3	
UASB + lagoas aeradas facultativas A25	3	4	4	3	3	4	1	3	4	4	4	5	3	
UASB + Lagoa de sedimentação + aeração mista completa A26	4	4	4	3	3	4	1	3	4	4	4	5	2	
UASB + escoamento superficial A27	4	4	4	2	1	4	4	2	4	3	3	5	2	
Lodo ativado convencional A28	2	4	4	2	1	4	1	4	3	4	3	5	4	
Lodo ativado - aeração prolongada A29	2	4	4	2	1	4	1	5	3	5	3	5	4	
Sistemas de fluxo intermitente (RBS) A30	1	4	4	2	1	4	1	5	2	4	4	5	4	
Lodo ativado convencional com filtração terciária A31	2	4	4	2	1	4	1	5	2	4	2	5	4	
Filtro biológico percolador de baixa carga (FB-B) A32	1	4	3	2	1	3	4	4	2	4	3	4	2	
Filtro biológico percolador de alta carga (FB-A) A33	1	4	3	2	2	3	4	4	2	4	3	4	3	
Biofiltro aerado submerso com nitrificação A34	1	4	3	2	1	3	2	4	2	4	3	5	4	

## **APÊNDICE D - APLICAÇÃO PROMETHEE**

### Dados para seleção da melhor alternativa para cenário A

Cenário A	O e M	Implatação	Necessidade	Aplicabilidade	Aceitação	Desempenho	IA	Simplicidade	Confiabilidade	Sustentabilid...	Área
Unit	R\$/pessoa.ano	R\$/pessoa	Quali	Quali	Quali	%	Quali	Quali	Quali	Quali	R\$/m2.pessoa
Cluster/Group	◆ Eco	◆ Eco	◆ Soc	◆ Tec	◆ Soc	◆ Amb	◆ Amb	◆ Tec	◆ Tec	◆ Amb	◆ Eco
<b>Preferences</b>											
Min/Max	min	min	max	max	min	max	min	max	max	max	min
Weight	0,13	0,13	0,12	0,11	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06
Minimum	0,80	13,30	2	1	2	30	2	1	3	3	0,00
Maximum	6,70	50,70	5	5	4	73	4	5	5	4	10,00
Average	2,87	28,74	4	4	3	43	3	4	4	3	1,06
Standard Dev.	1,83	9,94	1	1	0	11	0	1	0	0	1,97
<b>Evaluations</b>											
A8	1,33	26,70	5	5	4	34	3	5	4	3	3,00
A9	1,60	24,00	5	5	3	34	3	5	4	3	2,00
A10	1,60	24,00	4	5	3	34	3	4	4	3	1,70
A11	0,80	16,00	4	3	3	36	2	3	3	3	10,00
A12	0,90	18,70	5	3	4	48	3	5	4	4	1,00
A13	1,07	21,30	5	3	4	41	3	3	4	3	2,00
A14	1,07	21,30	5	5	3	72	3	4	4	4	3,00
A15	2,67	34,70	5	5	3	39	2	5	4	4	0,20
A16	1,33	26,70	5	5	3	41	2	5	4	4	1,00
A17	0,93	13,30	5	5	3	38	4	4	3	3	0,00
A18	3,20	29,30	5	5	3	73	3	4	4	4	0,10
A19	3,20	26,70	3	5	3	30	3	4	3	3	0,10
A20	1,50	18,70	3	3	4	41	4	3	4	3	0,10
A21	2,00	24,00	3	1	3	41	3	3	4	3	0,10
A22	2,40	24,30	3	1	2	38	3	3	3	3	0,10
A23	1,90	21,30	3	1	3	40	3	4	4	3	1,50
A24	2,40	24,00	3	3	3	61	3	3	4	4	0,20
A25	2,40	24,00	3	3	3	34	3	4	4	3	0,10
A26	1,90	24,00	3	3	2	36	3	4	3	3	1,50
A27	5,30	42,70	3	3	3	38	3	5	4	4	0,10
A28	5,30	32,00	3	3	3	42	3	1	4	3	0,10
A29	5,30	32,00	3	3	3	43	3	2	4	3	0,10
A30	5,90	45,00	3	5	3	43	3	3	4	3	0,10
A31	6,70	50,70	3	3	3	58	3	1	5	4	0,10
A32	6,70	50,70	3	5	3	42	3	3	4	3	0,20
A33	4,00	40,00	3	5	3	39	3	3	4	3	0,20
A34	4,00	40,00	2	5	3	43	3	2	4	3	0,10

Dados para seleção da melhor alternativa para cenário B

Cenário B	O e M	Implatação	Aplicabilidade	Desempenho	IA	Simplicidade	Confiabilidade	Sustentabilid...	Área	Riscos	Robustez	Flexibilidade	Prod. Lodo	Atração de I...
Unit	R\$/pessoa.ano	R\$/pessoa	Quali	%	Quali	Quali	Quali	Quali	R\$/m2.pessoa	unit	unit	unit	L/hab.ano	unit
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
<b>Preferences</b>														
Min/Max	min	min	max	max	min	max	max	max	min	min	max	max	min	min
Weight	0,12	0,12	0,07	0,10	0,06	0,03	0,06	0,05	0,06	0,12	0,07	0,05	0,04	0,04
<b>Statistics</b>														
Minimum	0,80	13,30	1	30	2	1	3	3	0,00	2	2	1	0	2
Maximum	6,70	50,70	5	73	4	5	5	4	10,00	3	4	4	2150	4
Average	2,87	28,74	4	43	3	4	4	3	1,06	3	3	3	554	3
Standard Dev.	1,83	9,94	1	11	0	1	0	0	1,97	0	0	1	689	1
<b>Evaluations</b>														
A8	1,33	26,70	5	34	3	5	4	3	3,00	3	3	2	63	2
A9	1,60	24,00	5	34	3	5	4	3	2,00	3	3	2	108	2
A10	1,60	24,00	5	34	3	4	4	3	1,70	3	3	3	125	3
A11	0,80	16,00	3	36	2	3	3	3	10,00	3	3	3	208	2
A12	0,90	18,70	3	48	3	5	4	4	1,00	3	3	2	108	2
A13	1,07	21,30	3	41	3	3	4	3	2,00	3	3	3	95	2
A14	1,07	21,30	5	72	3	4	4	4	3,00	3	4	1	0	2
A15	2,67	34,70	5	39	2	5	4	4	0,20	3	3	2	0	2
A16	1,33	26,70	5	41	2	5	4	4	1,00	2	3	2	0	2
A17	0,93	13,30	5	38	4	4	3	3	0,00	2	2	2	590	4
A18	3,20	29,30	5	73	3	4	4	4	0,10	3	3	2	235	2
A19	3,20	26,70	5	30	3	4	3	3	0,10	2	2	2	145	4
A20	1,50	18,70	3	41	4	3	4	3	0,10	3	2	3	290	4
A21	2,00	24,00	1	41	3	3	4	3	0,10	3	2	3	290	4
A22	2,40	24,30	1	38	3	3	3	3	0,10	3	3	2	225	2
A23	1,90	21,30	1	40	3	4	4	3	1,50	3	3	2	290	3
A24	2,40	24,00	3	61	3	3	4	4	0,20	3	3	3	200	3
A25	2,40	24,00	3	34	3	4	4	3	0,10	3	3	3	225	3
A26	1,90	24,00	3	36	3	4	3	3	1,50	3	3	3	225	2
A27	5,30	42,70	3	38	3	5	4	4	0,10	3	3	2	145	2
A28	5,30	32,00	3	42	3	1	4	3	0,10	2	2	3	2050	4
A29	5,30	32,00	3	43	3	2	4	3	0,10	3	3	4	1600	4
A30	5,90	45,00	5	43	3	3	4	3	0,10	3	3	4	1600	4
A31	6,70	50,70	3	58	3	1	5	4	0,10	3	3	3	2150	4
A32	6,70	50,70	5	42	3	3	4	3	0,20	3	2	2	730	2
A33	4,00	40,00	5	39	3	3	4	3	0,20	3	3	2	1200	3
A34	4,00	40,00	5	43	3	2	4	3	0,10	3	2	4	2050	4



Dados para seleção da melhor alternativa para cenário C

cenário C	O e M	Implantação	Aplicabilidade	Desempenho	IA	Confiabilidade	Sustentabilid...	Área	Riscos	Robustez	Flexibilidade	Prod. Lodo	Atração de I...	Emissões	Rem. Patog.	Eutrofização	Odor	
Unit	R\$/pessoa.ano	R\$/pessoa	Quali	%	Quali	Quali	Quali	R\$/m2.pessoa	unit	unit	unit	L/hab.ano	unit	unit	CF und.log	unit	unit	
Cluster/Group																		
<b>Preferences</b>																		
Min/Max	min	min	max	max	min	max	max	min	min	max	max	min	min	min	max	min	min	
Weight	0,95	0,11	0,06	0,08	0,04	0,04	0,04	0,15	0,08	0,05	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	
Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	
<b>Statistics</b>																		
Minimum	0,80	13,30	1	30	2	3	3	0,00	2	2	1	0	2	1,0	1	1	1	
Maximum	6,70	50,70	5	73	4	5	4	10,00	3	4	4	2150	4	5,0	5	4	5	
Average	2,87	28,74	4	43	3	4	3	1,06	3	3	3	554	3	3,4	3	4	3	
Standard Dev.	1,83	9,94	1	11	0	0	0	1,97	0	0	1	689	1	1,1	1	1	1	
<b>Evaluations</b>																		
A8		1,33	26,70	5	34	3	4	3	3,00	3	3	2	63	2	3,0	2	4	3
A9		1,60	24,00	5	34	3	4	3	2,00	3	3	2	108	2	4,0	2	4	1
A10		1,60	24,00	5	34	3	4	3	1,70	3	3	3	125	3	3,0	2	4	4
A11		0,80	16,00	3	36	2	3	10,00	3	3	3	3	208	2	3,0	2	4	3
A12		0,90	18,70	3	48	3	4	4	1,00	3	3	2	108	2	3,0	4	4	3
A13		1,07	21,30	3	41	3	4	3	2,00	3	3	3	95	2	3,0	4	3	3
A14		1,07	21,30	5	72	3	4	4	3,00	3	4	1	0	2	1,0	5	1	2
A15		2,67	34,70	5	39	2	4	4	0,20	3	3	2	0	2	1,0	3	4	2
A16		1,33	26,70	5	41	2	4	4	1,00	2	3	2	0	2	1,0	4	4	2
A17		0,93	13,30	5	38	4	3	3	0,00	2	2	2	590	4	3,0	2	4	2
A18		3,20	29,30	5	73	3	4	4	0,10	3	3	2	235	2	2,0	5	4	2
A19		3,20	26,70	5	30	3	3	3	0,10	2	2	2	145	4	4,0	1	4	2
A20		1,50	18,70	3	41	4	4	3	0,10	3	2	3	290	4	5,0	2	4	4
A21		2,00	24,00	1	41	3	4	3	0,10	3	2	3	290	4	4,0	2	4	5
A22		2,40	24,30	1	38	3	3	3	0,10	3	3	2	225	2	5,0	2	4	1
A23		1,90	21,30	1	40	3	4	3	1,50	3	3	2	290	3	4,0	2	4	4
A24		2,40	24,00	3	61	3	4	4	0,20	3	3	3	200	3	4,0	4	4	3
A25		2,40	24,00	3	34	3	4	3	0,10	3	3	3	225	3	4,0	2	4	4
A26		1,90	24,00	3	36	3	3	3	1,50	3	3	3	225	2	5,0	2	4	2
A27		5,30	42,70	3	38	3	4	4	0,10	3	3	2	145	2	4,0	3	4	2
A28		5,30	32,00	3	42	3	4	3	0,10	2	2	3	2050	4	4,0	2	4	4
A29		5,30	32,00	3	43	3	4	3	0,10	3	3	4	1600	4	4,0	2	4	5
A30		5,90	45,00	5	43	3	4	3	0,10	3	3	4	1600	4	4,0	2	4	3
A31		6,70	50,70	3	58	3	5	4	0,10	3	3	3	2150	4	4,0	4	3	3
A32		6,70	50,70	5	42	3	4	3	0,20	3	2	2	730	2	3,0	2	4	4
A33		4,00	40,00	5	39	3	4	3	0,20	3	3	2	1200	3	3,0	2	4	4
A34		4,00	40,00	5	43	3	4	3	0,10	3	2	4	2050	4	4,0	2	4	5

**APÊNDICE E - TERMINOLOGIAS**

<b>Alternativas</b>	Opções avaliadas pelo modelo de decisão. Na primeira fase do trabalho os critérios de seleção, foram avaliados como alternativas do modelo, posteriormente, as alternativas foram os sistemas de tratamento de efluentes urbanos.
<b>Critério</b>	Parâmetro usado para estabelecer uma comparação, escolha, julgamento, avaliação, ou base para uma decisão (GOMES <i>et al.</i> , 2012).
<b>Eficiência</b>	Capacidade de remoção de uma determinada substância após processo de tratamento.
<b>Efluente</b>	Efluente é o resíduo proveniente das atividades humanas, como processos industriais e rede de esgoto, que são lançados no meio ambiente, na forma de líquidos ou de gases (CHERNICHARO <i>et al.</i> , 2015).
<b>Indiferença</b>	Existem razões claras que justificam a equivalência entre duas ações, portanto, nenhum é preferida a outra (GOMES <i>et al.</i> , 2012).
<b>Incomparabilidade</b>	Quando as ações não possuem mesmas características, impossibilitando que essas sejam avaliadas e comparadas entre si (GOMES <i>et al.</i> , 2012).
<b>Metodologias</b>	Procedimentos que compõem o processo para se atingir um determinado objetivo final.
<b>Método</b>	Procedimento ou técnica estruturada com sequência pré-definida e bem estabelecida já aceita na comunidade científica (FREITAS <i>et al.</i> , 2000).
<b>Método multicritério</b>	Os métodos multicritérios são técnicas de apoio à decisão, que ajudam a solucionar problemas que possuem vários objetivos frequentemente conflitantes, com múltiplas ações possíveis, incertezas, várias etapas, e diversos indivíduos afetados pela decisão (GOMES <i>et al.</i> , 2012).
<b>Modelo</b>	Conjunto de métodos que buscam estruturar a avaliação de um problema, no qual as alternativas são analisadas por múltiplos critérios, os quais são conflitantes.

<b>Preferência fraca</b>	Existem razões claras que conduzem a uma preferência contudo não estrita em favor de uma das ações (GOMES <i>et al.</i> , 2012).
<b>Preferência forte</b>	Existem razões claras que justificam a preferência sem dúvida em favor de uma das ações (GOMES <i>et al.</i> , 2012).
<b>Solução ótima</b>	É a solução resposta à procura da solução de melhor compromisso, ou seja, a solução mais adequada ao cenário avaliado (ALMEIDA, 2009).
<b>Sistemas</b>	Conjunto de tecnologias de tratamento de efluentes aplicadas em sequência para garantir melhor eficiência final do processo de tratamento.
<b>Tratamento de efluentes</b>	O processo de tratamento de efluente consiste na remoção de impurezas das águas residuais, de diferentes naturezas, com diferentes características, antes que alcancem aquíferos ou corpos d'água naturais (Von Sperling, 2014).
<b>Tratamento de esgoto urbano</b>	O processo de tratamento de águas residuais com características e particularidades previamente conhecidas, advindas principalmente de usos domésticos.
<b>Variáveis discretas</b>	Estas são variáveis numéricas que têm um número contável de valores entre quaisquer dois valores.
<b>Variáveis contínuas</b>	Variáveis contínuas são variáveis numéricas que têm um número infinito de valores entre dois valores quaisquer.