

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS PATO BRANCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E
SISTEMAS

ANDREIA DOS SANTOS GOFFI

**USO DA ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA A SELEÇÃO DE
TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES**

DISSERTAÇÃO

PATO BRANCO
2017

ANDREIA DOS SANTOS GOFFI

**USO DA ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA A SELEÇÃO DE
TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de Concentração: Gestão dos Sistemas Produtivos.

Orientador: Prof. Dr. Flavio Trojan

PATO BRANCO
2017

G612u Goffi, Adreia dos Santos.
Uso da análise multicritério para a seleção de tecnologias de tratamento de efluentes / Adreia dos Santos Goffi. -- 2017.
113 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Flavio Trojan
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas.
Pato Branco, PR, 2017.
Bibliografia: f. 100 – 107.

1. Processo decisório. 2. Processo decisório por critério múltiplo. 3. Esgotos - Tratamento. 4. Saneamento. I. Trojan, Flavio, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas. III. Título.

CDD 22. ed. 670.42

Ficha Catalográfica elaborada por
Suélem Belmudes Cardoso CRB9/1630
Biblioteca da UTFPR Campus Pato Branco



TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 14

A Dissertação de Mestrado intitulada "**Uso da Análise Multicritério para a Seleção de Tecnologias de Tratamento de Efluentes**", defendida em sessão pública pela candidata **Andréia dos Santos Goffi**, no dia 1º de junho de 2017, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, área de concentração Gestão dos Sistemas Produtivos, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Flávio Trojan - Presidente – UTFPR _____

Prof. Dr. José Donizetti de Lima – UTFPR _____

Prof. Dr. Marcelo Gonçalves Trentin – UTFPR _____

Profª Drª Ticiane Sauer Pokrywiecki – UTFPR _____

Profª Drª Marcele Elisa Fontana – UFPE (participou através de parecer escrito)

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Pato Branco, ____ de _____ de ____.

Carimbo e Assinatura do Coordenador do Programa

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo seu amor incondicional;

Aos meus pais, Maria Lucia dos Santos Goffi e Adelar Goffi por ser à base de amor que me sustenta;

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

Aos meus amigos, que presentes ou não, sempre contribuíram com palavras de apoio, orações e momentos de descontração, sendo fundamentais nos meus momentos de extrema ansiedade;

Ao meu orientador Prof. Dr. Flávio Trojan, pelas suas contribuições, paciência e cooperação na elaboração deste trabalho;

A todos os professores do PPGEPS pelos ensinamentos ao longo do mestrado;

À Fundação Araucária e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de estudo que proporcionaram a realização deste trabalho;

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela grata satisfação de participar dessa respeitosa comunidade científica;

Aos membros da banca pelas contribuições dadas ao trabalho;

Enfim, a todos que de alguma maneira contribuíram para a concretização deste sonho;

Muito Obrigado!

“Eu não me importo se eu tenho que sentar no chão da sala. Tudo que eu quero é educação.”
Malala Yousafzai

RESUMO

GOFFI, A. S. **Uso da análise multicritério para a seleção de tecnologias de tratamento de efluentes**. 2017. 113 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestre em Engenharia de Produção e sistemas) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

O elevado número de alternativas somado ao número de variáveis, que nem sempre são mensuráveis e muitas vezes são conflitantes, torna a escolha do sistema de tratamento de efluentes um difícil processo de decisão. A fim de assegurar que a melhor alternativa seja selecionada é necessário uma análise aprofundada, que considere o maior número de aspectos relacionados à tomada de decisão. Deste modo, este trabalho forneceu uma nova abordagem para a seleção de tecnologias de tratamento de águas residuais, considerando as dimensões econômicas, sociais, técnicas e ambientais. O modelo seguiu três etapas, sendo a primeira a definição das alternativas do modelo, as quais foram definidas através do estudo da viabilidade econômica de 37 tecnologias usuais no cenário brasileiro. Na segunda etapa, foram definidos dois grupos de critérios, de acordo com a vazão e a população, por meio da utilização do método de Copeland. E na terceira foi aplicado o método PROMETHEE II para ranqueamento das alternativas. Considerando os aspectos avaliados, as tecnologias infiltração lenta, infiltração rápida e lagoa anaeróbia seguida de lagoa facultativa foram as alternativas preferidas para as pequenas comunidades, ao passo que os sistemas UASB, seguido de pós-tratamento foram as opções menos preferidas. Para os centros urbanos as alternativas de destaque foram: infiltração rápida, reator UASB com filtro anaeróbio, já as de menor potencial foram os sistemas de lagoas. Os resultados contribuem para o desenvolvimento do saneamento, uma vez que o trabalho forneceu um processo de determinação mais robusto para seleção de tecnologias de tratamento, avaliando os critérios relevantes, como diretrizes para a determinação.

Palavras-chave: Tomada de Decisão. Multicritério. Tecnologias de Tratamento de Esgotos. Saneamento.

ABSTRACT

GOFFI, A. S. **Use of multicriteria analysis to select the wastewater treatment technologies**. 2017. 113 f. Dissertation. Post-Graduation Program in Production and Systems Engineering, Federal University of Technology - Paraná, Pato Branco, 2017.

The high number of alternatives added to the number of variables, which are not always measurable and often conflicting, makes choosing the wastewater treatment system a difficult decision process. In order to ensure that the best alternative is selected, a depth analysis is required, which considers the greatest number of decision-making aspects. Therefore, this work has provided a new approach for the selection of wastewater treatment technologies, considering the economic, social, technical and environmental dimensions. The model has followed three stages: the first one was the definition of the model alternatives, which were defined through the economic viability study of 37 technologies usual in Brazil; in the second stage, two groups of criteria were defined, according to flow rate and population, using the Copeland method; and in the third one, the PROMETHEE II method was applied in order to rank the alternatives. Considering the aspects evaluated, the technologies as slow and fast infiltration, anaerobic pond followed by facultative pond were the preferred alternatives for small communities, while UASB systems followed by post-treatment were the less preferred options. For the urban groups the preferred alternatives were: fast infiltration, UASB reactor with anaerobic filter, while the ones with the least potential were the pond systems. The results contribute to the sanitation development, since the work has provided a robust determination process for the selection of the treatment technologies, by evaluating the most relevant criteria.

Keywords: Decision Making. Multicriteria. Wastewater Treatment Technologies. Sanitation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Distribuição percentual dos sistemas de tratamento de esgoto utilizados no Brasil.....	30
Figura 2	Distribuição dos trabalhos multicritérios aplicados ao saneamento 1970-2015.....	40
Figura 3	Resumo sobre as características do método de pesquisa.....	49
Figura 4	Resumo da problemática multicritério.....	50
Figura 5	Processo metodológico Proknow-C.....	51
Figura 6	Palavras-Chave.....	52
Figura 7	Delimitações de pesquisa.....	53
Figura 8	Estruturação do desenvolvimento do Modelo.....	55
Figura 9	Modelo econômico.....	57
Figura 10	Critérios para seleção da tecnologia de tratamento subdivididos em aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais.....	60
Figura 11	Fases de priorização dos projetos.....	62
Figura 12	Custo total estimado por unidade de tempo por tecnologia avaliada	64
Figura 13	Coeficientes de variação por tecnologia.....	66
Figura 14	Distribuição dos 10 principais critérios de seleção para cada cenário abordado.....	74
Figura 15	Fases de seleção das tecnologias de tratamento.....	76
Figura 16	Estrutura para a análise das alternativas no modelo - Pequenas Comunidades.....	77
Figura 17	Distribuição das características das alternativas segundo cada critério de avaliação.....	79
Figura 18	Fluxos de superação por alternativa com critérios com mesmo peso.....	82
Figura 19	Fluxos de superação por alternativa considerando diferentes pesos entre os critérios.....	82
Figura 20	GAIA para pequenas comunidades.....	85
Figura 21	Análise de sensibilidade para critério de avaliação com o dobro do peso.....	86
Figura 22	Estrutura para a análise das alternativas no modelo - Centros Urbanos.....	89
Figura 23	Distribuição das características das alternativas segundo cada critério de avaliação.....	90
Figura 24	Fluxos de superação por alternativa considerando mesmos pesos entre os critérios.....	93
Figura 25	Fluxos de superação por alternativa considerando diferentes pesos entre os critérios.....	93
Figura 26	GAIA para Centros Urbanos.....	95
Figura 27	Análise de sensibilidade para critério de avaliação com o dobro do peso.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Características biológicas típicas dos esgotos sanitários.....	20
Tabela 2	Características físico-química dos esgotos sanitários.....	21
Tabela 3	Caracterização dos esgotos sanitários.....	22
Tabela 4	Composição típica do esgoto.....	23
Tabela 5	Níveis de tratamento.....	24
Tabela 6	Operações e processos de tratamento de esgotos	25
Tabela 7	Tecnologias de tratamento de esgoto sanitário.....	26
Tabela 8	Critérios na avaliação econômica de diferentes tecnologias de tratamento.....	32
Tabela 9	Critérios importantes na seleção do sistema de tratamento de esgoto	34
Tabela 10	Elementos da decisão.....	39
Tabela 11	Modelos de apoio à tomada de decisão aplicados ao saneamento..	41
Tabela 12	Representatividade dos critérios econômicos.....	56
Tabela 13	Ordenação econômica das alternativas de tratamento.....	63
Tabela 14	Alternativas do Modelo.....	66
Tabela 15	Critérios para seleção sistema de tratamentos avaliados em pequenas comunidades.....	67
Tabela 16	Critérios para seleção sistema de tratamentos avaliados em Centros Urbanos.....	68
Tabela 17	Matriz de avaliação para a agregação com Copeland para pequenas comunidades.....	70
Tabela 18	Matriz de avaliação para a agregação com Copeland para Centros Urbanos.....	70
Tabela 19	Matriz de Condorcet e ordenação Copeland para pequenas comunidades.....	72
Tabela 20	Matriz de Condorcet e ordenação Copeland para centros urbanos..	73
Tabela 21	Grupo de critérios pra definição das tecnologias de tratamento.....	74
Tabela 22	Modelagem de preferência conforme PROMETHEE II.....	76
Tabela 23	Input para a análise das alternativas para pequenas comunidades...	78
Tabela 24	Hierarquia das alternativas para pequenas comunidade.....	84
Tabela 25	Análise de Sensibilidade pequenas comunidades.....	86
Tabela 26	Input para a análise das alternativas para Centros Urbanos.....	88
Tabela 27	Hierarquia das alternativas para Centros Urbanos.....	94
Tabela 28	Análise de Sensibilidade Centros Urbanos.....	95

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- ALC – Alcalinidade à Bicarbonato; $[M].[L]^{-3}$
- ABBR – Anaerobic Sequencing Batch Biofilm Reactor;
- ADM – Apoio Multicritério à Decisão
- AHP – *Analytic Hierarchy Process*
- CO₂ – Gás Carbônico;
- CT – Coliformes totais;
- CF – Coliformes fecais;
- DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; $[M].[L]^{-3}$
- DP – Desvio-padrão;
- DQO – Demanda Química de Oxigênio; $[M].[L]^{-3}$
- DTR – Distribuição de Tempo de Residência;
- ELECTRE I – *Elimination and Choice Expressing Reality I*
- ELECTRE III – *Elimination and Choice Expressing Reality III*
- ELECTRE IV – *Elimination and Choice Expressing Reality IV*
- ETE – Estação de Tratamento de Esgoto;
- EC – *Escherichia coli*;
- FB – Filtro Biológico;
- H₂ – Hidrogênio;
- GAIA – *Graph Alignment Identification and Analysis*;
- GRA – *Grey relational analysis*;
- ND – Informação não Disponível;
- NT – Nitrogênio Total;
- N-NTK – Nitrogênio total Kjeldahl;
- N-Amon – Nitrogênio amoniacal;
- N-Org – Nitrogênio orgânico;
- N-NO²⁻ – Nitrito; $[M].[L]^{-3}$
- N-NO³⁻ – Nitrato; $[M].[L]^{-3}$
- MCDM – *Multicriteria decision making*;
- Máx – Valor máximo;
- Mín – Valor mínimo;
- NaOH – Hidróxido de Sódio;

PB – Portifólio Bibliográfico;

PROMETHEE II-*Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations II*;

P – Fósforo; [M].[L]⁻³

P – Org - Fósforo Orgânico; [M].[L]⁻³

P – Inor - Fósforo Inorgânico; [M].[L]⁻³

pH – Potencial Hidrogênio;

Q – Vazão média afluente; [M³]. [T⁻¹]

RAC – Reator Anaeróbio Compartimentado;

RAHLF – Reator Anaeróbio Horizontal de Leito Fixo;

ST – Sólidos Totais; [M].[L]⁻³

STF – Sólidos Totais Fixos; [M].[L]⁻³

STV – Sólidos Totais Voláteis; [M].[L]⁻³

SST – Sólidos Suspensos Totais; [M].[L]⁻³

SSF – Sólidos Suspensos Fixos; [M].[L]⁻³

SSV – Sólidos Suspensos Voláteis; [M].[L]⁻³

SNSIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento;

SMC – Simulação de Monte Carlo;

t – Tempo;

T – Temperatura; (°C)

TOPSIS – *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*

TDH – Tempo de Detenção Hidráulico;

UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*;

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná;

VPL – Valor Presente Líquido;

VPLA – Valor Presente Líquido Anualizado;

x – Média.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.2 PROBLEMÁTICA	16
1.4 OBJETIVOS	16
1.4.1 OBJETIVO GERAL	16
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.5 JUSTIFICATIVA	17
1.6 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 PANORAMA DO SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL	19
2.2 CARACTERIZAÇÃO DE EFLUENTES LÍQUIDOS URBANOS	20
2.3 SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO	24
2.4 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO	26
2.4 CRITÉRIOS PARA A ESCOLHA DO TIPO DE TRATAMENTO	32
2.4.1 CRITÉRIOS ECONÔMICOS	32
2.4.2 CRITÉRIOS SUSTENTÁVEIS	34
2.5 MODELOS E TÉCNICAS MULTICRITÉRIO DE APOIO À DE DECISÃO.....	39
2.6 MODELOS DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO APLICADOS AO SANEAMENTO.....	41
2.7 MÉTODOS UTILIZADOS COMO APOIO AO TRABALHO	47
2.7.1 SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO	47
2.7.2 COPELAND.....	48
2.7.3 PROMETHEE & GAIA.....	48
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
3.1 ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO	50
3.2 PROCEDIMENTOS DA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	52
3.3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO.....	55
3.3.2 DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS.....	60
4 MODELO DE TOMADA DE DECISÃO NA SELEÇÃO DOS SISTEMAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	63
4.1 PRIORIZAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO	63
4.1.1 SELEÇÃO DAS ALTERNATIVAS	63
4.1.2 SELEÇÃO DOS CRITÉRIOS	67
4.1.3 MÉTODO MULTRICRITÉRIO DE APOIO	75
5 APLICAÇÃO DO MODELO.....	77
5.1 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO PARA PEQUENAS COMUNIDADES	77
5.2 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO PARA CENTROS URBANOS	87
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	97
6.1 CONCLUSÕES	97
6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS.....	100
REFERÊNCIAS	101
APÊNDICE A	109
APÊNDICE B (Continua).....	110
APÊNDICE C (Continua).....	112
APÊNDICE D	114

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a contextualização sobre o tema tratamento de efluentes no saneamento básico e as dificuldades evidentes no processo para determinação de tecnologias de tratamento de esgotos sanitários em pequenas e grandes cidades, bem como a lacuna existente na literatura associada a esse tema. São destacados os trabalhos que evidenciam a importância de se identificar tecnologias eficazes para cada cenário característico, inerente aos municípios que pretendem evoluir as questões ambientais relacionadas ao saneamento básico.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Juntamente com o crescimento populacional e industrial há também a intensificação do uso dos recursos hídricos, e por consequência, aumento da geração de efluentes, especialmente os esgotos sanitários e águas residuais. O lançamento desses efluentes, quando feito de forma inadequada, gera uma série de impactos adversos, tais como: riscos de contaminação, transmissão de doenças, problemas estéticos e de lazer, maus odores, mortalidade de peixes, problemas resultantes da toxicidade das algas, aumento da complexidade e custos do tratamento de água. Em função destes impactos, o gerenciamento dos esgotos tem se tornado um dos maiores desafios, especialmente em países em desenvolvimento. Vários autores têm destacado esses problemas ao longo dos anos em suas publicações. Dentre eles é possível citar: Von Sperling e Chernicharo (2002), Metcalf e Eddy (2003), Passeto (2004), Libânio (2005), Neto (2007), Kalbar *et al.* (2012a), Kalbar *et al.* (2012b) e Von Sperling (2014).

Outros pesquisadores ainda destacam a necessidade de investimentos para a implantação e ampliação dos sistemas de tratamento de esgoto. Neste sentido, várias investigações têm sido realizadas na busca por configurações mais modernas e mais eficientes de estações de tratamento. Algumas dessas investigações podem ser encontradas em: Garrido *et al.* (2011), Kalbar *et al.* (2012a), Garrido *et al.* (2012), Molinos *et al.* (2014) e Molinos *et al.* (2015).

Contudo, o processo de determinação do sistema de tratamento ideal para um determinado local tem se tornado uma tarefa complexa, pois este processo envolve um vasto número de alternativas somado a um elevado número de variáveis, que nem sempre são

mensuráveis e que muitas vezes são conflitantes, o que torna a escolha do sistema de tratamento um processo de tomada de decisão difícil (OLIVEIRA, 2004; LEONETI, 2009; GARRIDO *et al.*, 2012; HUNT, 2013; TAN *et al.*, 2014; MOLINOS *et al.*, 2015).

A fim de garantir a escolha do sistema de tratamento mais adequado é importante que sejam considerados o maior número de variáveis intrínsecas aos processos de tratamento de esgoto (ZENG *et al.*, 2007; LEONETI *et al.*, 2010; HAKANEN *et al.*, 2011; NETTO, ZAIAT, 2012; MAURER *et al.*, 2012; VON SPERLING, 2014; MOLINOS *et al.*, 2015).

Ainda ocorre no Brasil, a afirmação de autores como Von Sperling e Chernicharo (2002) e Von Sperling (2014), de que a determinação das tecnologias para tratamento de esgotos tem sido realizada de maneira precária e pouco estruturada, analisando por muitas vezes apenas dados econômicos e de eficiência das tecnologias.

Neste contexto, percebe-se que esse assunto é bastante discutido, especialmente no cenário internacional, e com notória relevância. O processo de seleção de tecnologias de tratamento não segue uma metodologia adequada, desconsiderando critérios relacionados ao cenário. A utilização de modelos e métodos de suporte à tomada de decisão tem potencial para conduzir para uma definição mais adequada de um sistema de tratamento de esgoto, possibilitando assim encontrar alternativas com os melhores compromissos, que consideram critérios relacionados às características do ambiente e às preferências dos decisores envolvidos no processo.

Diante das numerosas possibilidades, técnicas e de abordagens aplicáveis à tomada de decisão nesse processo, especialmente no contexto do saneamento básico relacionado ao tratamento de esgotos sanitários, é importante ressaltar os caminhos escolhidos, bem como os limites de pesquisa e aplicações desta.

Deste modo, o estudo limitou-se às questões relacionadas à fase de planejamento de estações de tratamento de esgoto do tipo doméstico, na qual é definida a tecnologia de tratamento ou o conjunto de processos e operações unitárias empregadas para o tratamento dos efluentes em locais com características específicas. Sendo, portanto, considerada a problemática da ordenação dos sistemas de tratamento, dentro da fase de planejamento das unidades de tratamento de efluentes.

1.2 PROBLEMÁTICA

A problemática de definição de alternativas pode levar em consideração como encontrar um subconjunto de alternativas, que em uma primeira fase da análise pode atender ao objetivo proposto. Porém, outras características ainda vão aprimorar esse processo de decisão até que se tenha uma alternativa ideal para o cenário explorado pelo modelo.

O elevado número de alternativas atualmente disponíveis, somado ao elevado número de critérios e subcritérios implícitos à decisão, tem tornado a determinação do sistema de tratamento cada vez mais complexa, especialmente se esta não for conduzida por especialistas.

Toda avaliação neste nível precisa ser feita considerando múltiplos critérios, não apenas aspectos econômicos e requisitos legais, pois isto pode, e tem ocasionado no Brasil, um desempenho insatisfatório dos projetos para infraestruturas públicas. Conseqüentemente isso gera desperdício dos recursos públicos, além dos ambientais. Sendo, portanto de extrema importância à análise detalhada dos objetivos do projeto, considerando o maior número de variáveis como critérios técnicos, ambientais, sociais, políticos além dos econômicos.

Com base nisso, pode-se definir como principal questão de pesquisa: Como determinar um sistema de tratamento de esgoto que responda melhor aos requisitos ambientais, econômicos, sociais e técnicos pré-estabelecidos?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GERAL

Este estudo tem por objetivo desenvolver um modelo para auxiliar na seleção de tecnologias para tratamento de esgoto doméstico no Brasil, por meio da ordenação de alternativas, considerando os aspectos sociais, ambientais, técnicos e econômicos.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos corresponderam a:

- Gerar um banco de dados com informações dos sistemas de tratamento mais utilizados no Brasil;

- Caracterizar os modelos e métodos empregados na tomada de decisão para os sistemas de tratamentos já implementados;
- Levantar os critérios que são priorizados no Brasil para a definição prévia dos sistemas e tecnologias de tratamento;
- Definir critérios de acordo com a literatura denominados ideais para pequenas e grandes comunidades;
- Realiza a análise de sensibilidade para verificar como a robustez do modelo; e
- Elaborar um sistema auxiliar para apoiar pequenos e grandes municípios na determinação do sistema de tratamento de esgoto sanitário.

1.5 JUSTIFICATIVA

Considerando a importância do tratamento dos esgotos sanitários no Brasil, os pesquisadores têm publicado sobre o desenvolvimento e avaliação de diferentes tecnologias e processos de tratamento deste tipo de resíduos. Entretanto, pouco se tem sobre o processo de tomada de decisão e metodologia para determinação da tecnologia que deverá ser empregada em um determinado local, a fim de garantir a máxima eficiência na definição do sistema de tratamento.

Neste sentido, propor uma ferramenta que auxiliará de forma efetiva na etapa de planejamento do gerenciamento de resíduos líquidos urbanos, é de extrema relevância, haja vista a carência de aplicações de ferramentas de apoio à gestão dos processos e suporte à tomada de decisões que visem manter a qualidade dos serviços e combater as perdas de eficiência e recursos atrelados aos sistemas sanitários.

Desta forma, este trabalho contribui de forma direta e significativa ao setor de saneamento básico, frente às dificuldades relativas à determinação do sistema de tratamento, devido, principalmente, à falta de informações e direções para a tomada desta importante decisão. Portanto, pretende-se com este trabalho preencher esta lacuna. Avaliando questões importantes como a eficiência e a eficácia das metodologias já propostas, elaborando um sistema auxiliar para a tomada de decisão dos sistemas de tratamento de esgoto sanitário, por meio de uma análise crítica dos métodos e modelos de tomada de decisão, bem como dos diferentes tipos de sistemas de tratamento. A fim de facilitar a determinação das tecnologias que apresentam viabilidade econômica, boa aceitação, aplicabilidade demonstrada, simplicidade de implementação, manutenção e operação e eficácia nos resultados obtidos.

1.6 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é estruturada em cinco capítulos, sendo o primeiro a introdução e o último composto pelas conclusões. No primeiro capítulo, “Introdução”, encontram-se as motivações e objetivos do trabalho, origem do estudo, bem como a 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, percorrendo sobre o cenário de saneamento no Brasil, os principais fatores para análise de projetos, bem como, apresenta 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 primeiros resultados referentes à determinação das tecnologias de tratamento e critérios utilizados no modelo de decisão. Ao passo que no Capítulo 5 são apresentados os “Resultados e Discussão”, que 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, bem como as recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a base conceitual que dá suporte ao entendimento do trabalho, discorrendo sobre o cenário de saneamento no Brasil, bem como, apresentados os conceitos relevantes ao apoio à decisão multicritério, assim como as principais metodologias multicritério de apoio à decisão, aplicadas ao saneamento.

2.1 PANORAMA DO SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL

O lançamento de esgotos sanitários e de efluentes industriais está entre as principais fontes de poluição dos corpos hídricos, tanto pela elevada quantidade produzida em núcleos urbanos quanto por suas características altamente poluidoras (PHILIPPI, 2005; VON SPERLING, 2014). A falta de tratamento adequado causa como consequência a eutrofização dos cursos de água, além de acarretar sérios problemas de saúde pública, propagando várias doenças de veiculação hídrica, uma vez que a qualidade de vida da população está ligada diretamente a boas condições sanitárias (NETO, 2007; VON SPERLING, 2014).

Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2014) 82,5% dos brasileiros são atendidos com abastecimento de água tratada, desses apenas 56,6% têm acesso à coleta de esgoto, sendo que apenas 40,8% do esgoto gerado no país é tratado. Quando observada a taxa de atendimento por região a situação sanitária demonstra-se ainda mais preocupante. Ainda de acordo com os dados apresentados pelo SNIS (2014), na região Norte apenas 14,4% do esgoto é tratado, sendo, a região com maior déficit entre todas as regiões. Já na região Nordeste apenas 28,8% do esgoto é tratado. Por outro lado, o Sudeste e o Sul possuem índices similares de aproximadamente 43,9%. No Centro-Oeste 46,4% do esgoto é tratado, sendo esta a região com melhor desempenho, mas com índice ainda bastante insatisfatório, uma vez que não atinge nem a metade da população.

De acordo com Oliveira *et al.* (2016) apenas dois municípios brasileiros apresentam 100% de coleta de esgoto (Franca - SP e Belo Horizonte - MG). Já que outros dois municípios tem índice mínimo da população atendida com serviço de coleta de esgoto (0%), que é o caso dos municípios de Ananindeua - PA e Santarém - PA, de acordo com o Índice de Atendimento Urbano de Esgoto (Indicador IN024). Dos municípios que tem coleta dos efluentes apenas três municípios apresentaram valor máximo de tratamento de esgoto (Limeira - SP, Piracicaba - SP e São José dos Campos - SP). Ao passo que cinco municípios

apresentam índice de tratamento de 0% (Ananindeua - PA, Governador Valadares - MG, Porto Velho - RO, Santarém - PA e São João de Meriti -RJ) de acordo com o índice de esgoto tratado referido à água consumida (Indicador IN046) (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

Oliveira *et al.* (2016) obtiveram como indicador médio de coleta de esgotos pelos municípios aproximadamente 71,4% de acordo com os parâmetros avaliados pelos autores, o que demonstra, no geral, que os municípios considerados possuem coleta de esgoto maior que a média total do Brasil reportada no SNIS (2014), que é de 57,6%. Embora o índice de coleta seja relativamente alto, o indicador médio de tratamento de esgoto dos municípios ainda é muito baixo, sendo apenas 50,3%. O que reintegra a necessidade de expansão dos serviços e sistemas de tratamento de esgotos uma vez que conhecida a complexidade e os impactos adversos do lançamento dos esgotos domésticos sem tratamento.

Todavia a crescente conscientização ambiental, principalmente com relação à preservação dos corpos de água, tem contribuído para o desenvolvimento de novas tecnologias de tratamento para águas residuárias e gerado maiores discussões quanto às problemáticas ambientais. Contudo, a situação do saneamento básico no Brasil é ainda bastante precária, especialmente em termos de volume de esgotos lançados na natureza (LEONETI, 2009, OLIVEIRA *et al.*, 2016).

É importante ressaltar a carência e desatualização das informações específicas sobre os serviços de saneamento, especialmente considerando que os dados estatísticos versam sobre o acesso à rede coletora de esgoto, ou que represente apenas a existência do serviço no município, desconsiderando importantes fatores como a extensão da rede, a qualidade do atendimento e a destinação final do esgoto coletado (SAIANI, 2007; LEONETI, 2009; SNIS, 2014; BNDES, 2015).

2.2 CARACTERIZAÇÃO DE EFLUENTES LÍQUIDOS URBANOS

Os esgotos domésticos são misturas complexas de sólidos e componentes dissolvidos, os quais normalmente são resultantes de 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.

Conhecer os compostos dos quais a água residuária é constituída é de alta complexidade. Contudo, a caracterização dos resíduos e esgotos sanitários tem elevada importância, especialmente para a definição das tecnologias de tratamento e por consequência a preservação dos recursos naturais. Deste modo, 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).

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. Por outro lado, sólidos totais (em suspensão, dissolvidos e sedimentáveis), matéria orgânica (DBO₅, 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. Por fim, os parâmetros relacionados às bactérias, fungos, protozoários, vírus e helmintos são utilizados para caracterização biológica do afluente.

A Tabela 1 apresenta um resumo das características biológicas típicas quanto aos organismos patogênicos e indicadores encontrados nos esgotos domésticos brutos. Ao passo que, na Tabela 2 são apresentados alguns dos principais parâmetros para determinação das características físicas e químicas para esgotos, predominantemente, domésticos.

Tabela 1 – Características biológicas típicas dos esgotos sanitários

Parâmetro	Organismo	Concentração (Org/100mg)	Doenças relacionadas
Bactérias	Coliformes totais	10 ⁶ -10 ¹⁰	Disenteria bacilar; Enterite por <i>Campylobacter</i> ; Cólera; Gastroenterite; Leptospirose; Febre paratifoide; Salmonella; Febre tifoide
	Coliformes fecais	10 ⁶ -10 ⁹	
	<i>E. Coli</i>	10 ⁶ -10 ⁹	
	Enterococos	10 ⁴ -10 ⁵	
	Enterococos fecais	10 ⁴ -10 ⁷	
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	10 ³ -10 ⁶	
	<i>Shingella</i>	10 ⁰ -10 ³	
Helmintos	<i>Salmonella</i>	10 ² -10 ⁴	Ascariíase; Tricuríase
	Helmintos	10 ⁰ -10 ³	
Vírus	Áscaris Lumbricoides	10 ² -10 ³	Hepatite infecciosa; Doenças respiratórias; Meningite; Poliomielite
	Virus entérococ	10 ² -10 ⁴	
Protozoários	Colifagos	10 ³ -10 ⁴	Disenteria amebiana; Giardíase; Criptosporidiose; Balantidíase
	<i>Cryptosporidium parvum</i>	10 ¹ -10 ³	
	<i>Entamoeba histolytica</i>	10 ¹ -10 ⁵	
	<i>Giardia lamblia</i>	10 ¹ -10 ⁴	

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2014).

Tabela 2 – Características físico-química e toxicidade dos esgotos sanitários

Parâmetro	Descrição	Parâmetro de medida	Faixa de variação	Unidade	Consequências
Temperatura	Normalmente acima da água de abastecimento, com variações conforme a estação do ano.	T	20 a 23	(°C)	Atividade microbiológica; solubilidade dos gases; velocidade das reações químicas; viscosidade do líquido.
pH	Indicador de características ácidas ou básicas do esgoto.	pH	6 a 8	-	Os processos de oxidação biológica tende a reduzir o pH.
Sólidos	Constituído de componentes minerais e orgânicos podem ser classificados de acordo com suas características físicas (tamanho), químicas e de decantabilidade.	ST	700 a 1350	mg.L ⁻¹	Atividade microbiológica; relacionado a organismos patogênicos.
		SS	200 a 450		
		SSF	40 a 100		
		SSV	165 a 350		
		SD	500 a 900		
		SDF	300 a 550		
Matéria Orgânica	Mistura heterogênea de componentes orgânicos tais como proteínas, carboidratos e lipídios, podem ser verificadas de forma direta ou indireta.	DQO	450 a 800	mg.L ⁻¹	Um dos principais causadores de poluição. Portanto, é um indicador do grau de poluição.
		DBO	350 a 600		
Nitrogênio	Inclui o nitrogênio orgânico, amônia, nitrito e nitrato. No esgoto bruto as formas predominantes são o nitrogênio orgânico e a amônia.	NT	35 a 60	mgN.L ⁻¹	Nutriente indispensável para o desenvolvimento de microrganismos no tratamento biológico; pode ser tóxico, associação com doenças; diretamente relacionado à eutrofização dos copos d'água.
		N-Org	15 a 25		
		N-Amo	20 a 35		
		N-NO ₂	≈ 0		
Fosfóro	Pode ser observado na forma orgânica e inorgânica.	N-NO ₃	0 a 1	mgP.L ⁻¹	Indispensável no tratamento biológico; altamente poluidor; um dos causadores do fenômeno de eutrofização em lagos e represas.
		P	4 a 15		
		P-Org	1 a 6		
Alcalinidade	Indicador de capacidade tampão do meio, capacidade de resistência à variações do pH; resultante da presença de bicarbonato, carbonato e íon hidroxila.	P-Inor	3 a 9	(mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	Parâmetro importante na verificação do ciclo do nitrogênio.
		Alc.B	100 a 250		
Toxicidade	A toxicidade ou ecotoxicidade pode não ser o resultado da ação de apenas uma substância isolada, mas da interação e magnitude de vários agentes presentes em um determinado ambiente.	CE	0-22	%	Conhecer a toxicidade permite avaliar possíveis danos nos ecossistemas além de prever impactos futuros na microflora do sistema de tratamento ou até mesmo após o lançamento do efluente em um determinado ambiente.

Legenda: Temperatura (T); Potencial Hidrogênico (pH); Demanda Biológica de Oxigênio (DBO); Demanda Química de Oxigênio (DQO); Sólidos Totais (ST); Sólidos Suspensos (SS); Sólidos Suspensos Fixos (SSF); Sólidos Suspensos Voláteis (SSV); Sólidos Dissolvidos (SD); Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF); Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV); Nitrogênio Total (NT); Nitrogênio total Kjeldahl (N-NTK); Nitrogênio amoniacal (N-Amon); Nitrogênio orgânico (N-Org); Nitrito (N-NO₂) e Nitrato (N-NO₃); Fósforo (P); Fósforo Orgânico (P-Org); Fósforo Inorgânico (P-Inor); Coliformes totais (CT); Coliformes fecais (CF); Escherichia coli (EC); Alcalinidade à Bicarbonato (Alc.B); Concentração Efetiva (CE).

Fonte: Adaptado de Hamada (2008) e Von Sperling (2014).

Um resumo das principais características físico-químicas de resíduos líquidos urbanos previamente observados em estudos práticos é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização dos esgotos sanitários

Autores	Parâmetros						
	pH	Alc. (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	DBO (mg.L ⁻¹)	DQO (mg.L ⁻¹)	SS (mg.L ⁻¹)	NT (mgN.L ⁻¹)	P (mgP.L ⁻¹)
Zanella (1999)	6,7	123	255	595	199	ND	5,1
Pontes <i>et al.</i> (2003)	6,5	ND	332	546	222	ND	ND
Garbosa (2006)	6,8	56	ND	373	110	36	ND
Netto (2007)	6,8	115	ND	622	195	38	ND
Abreu e Zaiat (2008)	7,6	143	ND	445	122	35	ND
Almeida (2010)	6,8	115	453	561	135	66	10,9
Matsumoto e Sánchez (2013)	6,9	ND	295	686	286	ND	6,4
Prata (2015)	ND	ND	447	602	243	56	7,8
Barbosa (2016)	ND	ND	260	625	ND	85	6

Legenda: Alcalinidade à Bicarbonato (Alc.); Demanda Biológica de Oxigênio (DBO); Demanda Química de Oxigênio (DQO); Sólidos Totais (ST); Sólidos Suspensos (SS); Nitrogênio Total (NT); Fósforo (P); Informação não Disponível (ND).

Pode-se observar que de modo geral, as características dos efluentes de origem sanitária apresentadas na Tabela 3 apresentam pequenas variações de acordo com a classificação sugerida por Metcalf e Eddy (2003) – Tabela 4. Estas variações na composição dos efluentes sanitários acontecem, principalmente, de acordo com o uso ao qual a água foi submetida. Podendo, portanto variar de acordo com a contribuição per capita do poluente em função do consumo per capita de água o que pode gerar esgotos mais ou menos concentrados, ou seja, com valores acima ou abaixo dos ditos típicos para esgotos predominantemente domésticos mencionados na literatura.

Por estar diretamente relacionada ao consumo de água, a produção de esgoto pode apresentar uma alta variabilidade na sua composição. Essas alterações podem acontecer mais frequentemente em diferentes estações ou períodos do ano, dias da semana e horas do dia. Deste modo, contribui com as alterações das características dos esgotos sanitários, não só relacionados à taxa de fluxo, mas também em termos de composição e concentração (MACKENZIE, 2010; VON SPERLING, 2014; LOPES, 2015).

Metcalf e Eddy (2003) definem alguns dos principais parâmetros utilizados para avaliar e caracterizar o esgoto sanitário bruto classificando estes em fraco, médios e fortes conforme pode ser observado na Tabela 4. Essa caracterização é essencial para avaliar quais sistemas, processos e métodos de tratamento são requeridos.

Tabela 4- Composição típica do esgoto

Parâmetro (mg.L ⁻¹)	Esgoto Sanitário		
	Fraco	Médio	Forte
DQO	250	430	800
DBO	110	190	350
ST	390	720	1230
STD	270	500	860
SDF	160	300	520
SDV	110	200	340
SST	120	210	400
SSF	25	50	85
SSV	95	160	315

Fonte: Adaptado de Metcalf e Eddy (2003)

Para atuar na prevenção da poluição, é importante avaliar os impactos de qualquer novo composto e verificar se este pode ser tratado de forma eficaz de acordo com as tecnologias existentes. Portanto, caracterizar os esgotos e identificar os diversos poluentes presentes é fundamental para a escolha de um sistema de tratamento

2.3 SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Os sistemas de tratamento de esgoto são utilizados com o objetivo de simular os fenômenos naturais de degradação que ocorrem em um corpo d'água após o lançamento de despejos, garantindo condições controladas e taxas mais elevadas de tratamento (RICHTER, 2007; VON SPERLING, 2014).

Para a adequada seleção de um sistema de tratamento 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. O tratamento de esgotos é normalmente dividido em diferentes níveis de tratamento são eles: preliminar, primário, secundário e terciário ou também conhecido como avançado (VON SPERLING, 2014), conforme descrito na Tabela 5.

Outra classificação importante ao sistema de tratamento é quanto aos processos e operações unitárias, os quais podem ser aplicados individualmente ou simultaneamente em uma mesma unidade de tratamento. Na Tabela 6 são descritos os principais processos e operações unitárias, bem como seus principais exemplos, de acordo com Metcalf e Eddy (2003) e Von Sperling (2014).

Tabela 5- Níveis de tratamento

Nível	Remoção	Eficiência de remoção	Mecanismo predominante	Aplicação	Unidade de Tratamento
Preliminar	Sólidos em suspensão grosseiros, materiais de maiores dimensões, areia e gorduras	-	Físico	Montante de elevatória Etapa inicial de todos os processos de tratamento	Grade, Desarenador, Medidor de vazão
Primário	Sólidos em suspensão sedimentáveis DBO em suspensão (matéria orgânica em suspensão componente dos sólidos em suspensão sedimentáveis)	SS: 60-70% DBO:25-30% Coliformes: 30-40%	Físico	Tratamento parcial Etapa intermediária de tratamento mais complexo	Tanques de decantação, tanques sépticos
Secundário	DBO em suspensão (DBO associada à matéria orgânica em suspensão) DBO em suspensão finamente particulada (DBO associada à matéria orgânica em suspensão não sedimentável) DBO solúvel (matéria orgânica na forma de sólidos dissolvidos) Eventualmente nutrientes Eventualmente patógenos	DBO: 60-80% Coliformes 60-99%	Biológico	Tratamento mais complexo objetivando a remoção de matéria orgânica	Lagoas de estabilização e variantes, Processos de disposição sobre o solo, reatores anaeróbios, lodos ativados e variantes, reatores aeróbios com biofilmes
Terciário ou Avançado	Nutrientes Organismos patogênicos Compostos não biodegradáveis Sólidos inorgânicos dissolvidos Sólidos em suspensão remanescentes Substâncias tóxicas Metais pesados	-	Biológico ou Físico-químico	Tratamento avançado objetivando a remoção de nutrientes e patógenos	Lagoas de estabilização e variantes, Processos de disposição sobre o solo, lodos ativados e reatores aeróbios com biofilmes, lagoas de maturação e polimento, cloração, ozonização, radiação UV, membranas

Fonte: Adaptado de Metcalf , Eddy (2003) e Von Sperling (2014).

Tabela 6- Operações e processos de tratamento de esgotos

Operação/ processo unitário	Descrição	Exemplo
Operação físicas unitárias	Método de tratamento no qual predomina a aplicação de forças físicas	Gradeamento, mistura, floculação, sedimentação, flotação, filtração
Processos químicos unitários	Método de tratamento no qual a remoção ou conversão de contaminantes ocorre pela adição de produtos químicos ou devido a reações químicas	Precipitação, adsorção, desinfecção
Processos biológicos unitários	Método de tratamento no qual a remoção de contaminantes ocorre por meio de atividade biológica	Remoção de matéria orgânica carbonácea, nitrificação, desnitrificação, digestão do lodo e oxidação biológica

Fonte: Adaptado de Metcalf e Eddy (2003) e Von Sperling (2014).

2.4 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Novas configurações de tratamento vêm sendo desenvolvidos a fim de se obter sistemas de tratamento mais eficientes, com menor volume total, melhor utilização do volume útil reacional, conseqüentemente, atingindo melhorias da estabilidade, eficiência e facilidade de operação (VAN HAANDEL, MARAIS, 1999; CHERNICHARO, 2001; NETTO, 2007). A evolução nas pesquisas tem se direcionado para sistemas cada vez mais simplificados e eficientes, que apresentem baixos custos e simplicidade operacional (CALLADO, FORESTI, 2001; SILVA, 2001; MENDONÇA, 2002; SILVA, NOUR, 2005; ARAÚJO, 2006).

A Tabela 7 apresenta um resumo das principais formas de tratamento de efluentes sanitários utilizadas no Brasil e suas características quanto à remoção de matéria orgânica em termos de DQO.

Tabela 7 – Tecnologias de tratamento de esgoto sanitário (Continua)

Sistemas	Vantagens	Desvantagens	DQO (%)	Fonte
Tratamento primário	Remoção parcial de sólidos em suspensão e sólidos grosseiros em consequência remoção parcial de MO; baixos requisitos na área e energia; baixos custos de implantação e operação; tolerância a variações de carga orgânica; simples operação e manutenção.	Baixa remoção de MO e sólidos; remoção nula de nutrientes e patógenos; não atende aos requisitos legais de lançamento.	25-75	Von Sperling (2014).
Lagoas Facultativas	É o sistema mais simples de lagoas de estabilização; simplicidade de operação e manutenção; baixo custo; alta eficiência do sistema equiparando com aos demais tratamentos primários; remoção do lodo apenas após 20 anos de operação; resistência a choques de carga orgânica; ausência de equipamentos mecânicos; razoável eficiência de patógenos.	Retenção dos esgotos por um longo período de tempo; altos requisitos de área; depende de variáveis ambientais, tal como radiação solar e chuvas; normalmente atuam no pós-tratamento, baixa remoção de MO; dificuldades para atender os padrões de lançamentos; pode causar a proliferação de insetos.	65-80	Von Sperling (2014).
Lagoas anaeróbia - facultativas	Alta simplicidade operacional e de manutenção; baixo custo; aceita maiores profundidades, portanto requer menor área comparada as lagoas facultativas apenas.	Longo período de tempo; requisitos de área; depende de variáveis ambientais, tal como radiação solar; baixa remoção de MO; possibilidade de geração de maus odores; gastos com tubulações uma vez que requer afastamento das residências.	65-80	Von Sperling (2014).
Lagoa aerada facultativa	Tempo de detenção menor comparado as lagoas anteriores; Menos requisitos de área.	Consumo de energia para aeradores consequentemente elevação dos custos; operação e manutenção menos simples comparadas às lagoas facultativas e anaeróbia facultativa.	65-80	Von Sperling (2014).
Lagoa de mistura completa + sedimentação	Maior área concentração no meio líquido o que permite a redução da área demanda; Tempo de detenção inferior as lagoas descritas anteriormente; requisitos de energia similar às demais lagoas aeróbias.	Maior complexidade operacional; carregamento de biomassa do reator no efluente; necessidade de unidade complementar para sedimentação; geração de lodo.	65-80	Von Sperling (2014).
Processos anaeróbio	Baixo requisito de área; tratamento eficaz; podem ser utilizados tanto em pequenas comunidades como em centros urbanos.	Necessita de rigoroso controle; requer mão de obra qualificada; precisa de área para disposição, controle e tratamento do lodo.	30-70	Von Sperling (2014); Cornelli <i>et al.</i> (2014).
Reator anaerobio-aerobio de fluxo horizontal (RAALF)	Obtenção de efluente clarificado e com baixa concentração de matéria orgânica; baixa potência de aeração requerida na fase aeróbia; menor produção de lodo biológico; baixo custo de implantação e operação; menor perda dos sólidos biológicos no efluente; resistência às variações da vazão afluente, além da liberdade de projeto em termos de configurações e dimensões.	São relativamente sensíveis a descargas tóxicas; possuem menor estabilidade operacional; apresentam possibilidade de obstrução dos interstícios, por meio de entupimento ou colmatação do leito.	70 – 95	Wang <i>et al.</i> (1986); Zanela (1999); Silva e Nour (2005); Netto (2007); Almeida (2010).

Tabela 7 – Tecnologias de tratamento de esgoto sanitário (Continuação)

Sistemas	Vantagens	Desvantagens	DQO (%)	Fonte
Infiltração	Sistema totalmente natural; elevada eficiência de remoção de DBO, alta remoção de organismos patogênicos; alta assimilação de nutrientes pelas plantas tais como N e P; baixo custo; não produção de lodo; atuam como fertilizantes; boa resistência às variações de cargas.	Requer grande área superficial por unidade de água tratada; riscos de contaminação do solo; do corpo hídrico e dos trabalhadores quando manejados de forma inadequada; possibilidade de maus odores; influenciado por variações climáticas e ambientais; dependente das características do solo; alta atração de insetos.	70-83	Von Sperling (2014).
Reator anaeróbio de manta de lodo (UASB)	Razoável eficiência na remoção de DBO; baixos requisitos na área e energia; baixos custos de implantação e operação; tolerância a afluentes bem concentrados em matéria orgânica; não necessita de meio suporte; construção, operação e manutenção simples; baixíssima produção de lodo; estabilização do lodo no próprio reator; rápido reinício após períodos de paralisação.	Dificuldade em satisfazer padrões de lançamento; baixa eficiência na remoção de coliforme; remoção de n e p praticamente nula; possibilidade de geração de maus odores, porém controláveis; a partida do processo é geralmente lenta; relativamente sensível a variações de carga e compostos tóxicos; usualmente necessita pós-tratamento.	55 – 75	Lettinga <i>et al.</i> (1980); Foresti (2002); Netto (2007); Pontes <i>et al.</i> (2009); Von Sperling (2014).
UASB+ pós tratamento	Manutenção das vantagens do reator UASB; manutenção das vantagens do pós tratamento; redução do volume total das unidades de tratamento; redução da quantidade de lodo gerado.	Manutenção das desvantagens do reator UASB e do pós tratamento; maior dificuldade na remoção biológica de nutrientes no pós tratamento; custos elevados; maior complexidade operacional;	70-90	Von Sperling (2014).
Tanques sépticos	Flexibilidade quanto à carga orgânica; Tratamento preliminar para redução de carga; ótima opção para usos individuais, especialmente em comunidades rurais; simples operação e manutenção; baixo custo de construção, operação e manutenção.	Dificuldade em satisfazer padrões de lançamento; ineficaz redução de coliformes e nutrientes; maus odores; problemas de entupimento; inadequado para efluentes de baixas concentrações de sólidos; gastos de energia com bombas, pós tratamento e disposição do lodo; riscos de contaminação do solo e água.	25-35	Von Sperling (2014); Cornelli <i>et al.</i> (2014).
Tanques sépticos + filtro anaeróbico (TSC)	Boa adaptação a diferentes tipos e concentrações de esgotos; boa resistência a variações de carga; razoável eficiência na remoção de DBO; baixos requisitos na área e energia; baixos custos de implantação e operação; construção, operação e manutenção simples.	Baixa eficiência na remoção de coliformes; remoção de N e P praticamente nula; possibilidade de geração de efluente com aspecto desagradável; possibilidade de geração de maus odores; riscos de entupimento; restrito ao tratamento de afluentes com concentrações de sólidos não elevados.	70-80	Philippi (2005); Colares (2013); Von Sperling (2014).

Tabela 7 – Tecnologias de tratamento de esgoto sanitário (Continuação)

Sistemas	Vantagens	Desvantagens	DQO (%)	Fonte
Filtros anaeróbios	Efluente clarificado; efluente com baixa concentração de matéria orgânica; sem consumo de energia; remoção significativa da matéria orgânica dissolvida; baixa produção de lodo; pode ser disposto no solo; resiste bem às variações de vazão afluente; não exigem grandes alturas ou escavações profundas; construção e operação simples; não necessita de lodo inoculador; não necessita de recirculação de lodo; liberdade de projeto em termos de configurações e dimensões.	Efluente rico em sais minerais; grande quantidade de microorganismos patogênicos; risco de obstrução dos interstícios (entupimento ou colmatação do leito); volume grande devido ao espaço ocupado pelo meio suporte.	65- 80	Figueiredo <i>et al</i> (1990); Couto e Figueiredo (1992); Pinto e Chernicharo (1996); Àvila (2005).
Filtro biológico percolador de baixa carga (FB-B)	Elevada eficiência na remoção de DBO; nitrificação frequente; requisitos de área relativamente baixos; índice de mecanização relativamente baixo; estabilização do lodo no próprio filtro; mais simples conceitualmente do que lodos.	Baixa eficiência na remoção de coliformes; menor flexibilidade operacional que lodos ativados; elevados custos de implantação; requisitos de área mais elevados do que os FB-A; relativa dependência da temperatura do ar; Sensível a descargas tóxicas; necessidade de remoção da umidade do lodo e da sua disposição final (embora mais simples que FB-A); possíveis problemas com moscas; elevada perda de carga.	80-90	Philippi (2005); Von Sperling (2014).
Filtro biológico percolador de alta carga (FB-A)	Baixos requisitos de área; elevada eficiência na remoção de DBO (embora inferior que o FP-B); simplicidade; maior flexibilidade que os FB-B; melhor resistência a variações de carga que os filtros de baixa carga; reduzidas possibilidades de maus odores.	Baixa eficiência na remoção de coliformes; elevados custos de implantação; relativa dependência da temperatura do ar; necessidade de tratamento completo do lodo; elevada perda de carga.	70-87	Von Sperling (2014).
Biofiltros aerados submersos	Requisitos de área bastante baixos; elevada eficiência na remoção DBO; reduzidas possibilidades de maus odores; reduzida perda de carga; nitrificação opcional; alta velocidade de sedimentação e por consequência maior clarificação do efluente; grande superfície para crescimento de microorganismos; unidades compactas; alta idade do lodo.	Necessidade do tratamento completo do lodo; operação ligeiramente sofisticada; elevado consumo de energia; baixa eficiência na remoção de coliformes; necessidade de operação um pouco mais cuidadosa que os filtros percoladores; difícil controle da espessura do biofilme; problemas de entupimento; longo tempo de partida.	83-90	Von Sperling (2014); Cornelli <i>et al.</i> (2014).
Biodisco	Elevada eficiência na remoção DBO; nitrificação frequente; baixo requisito de área; adequado principalmente para pequenas populações; equipamento mecânico simples; reduzidas possibilidades de maus odores; reduzida perda de carga; mais simples conceitualmente do que lodos ativados.	Baixa eficiência na remoção de coliformes; elevados custos de implantação e operação; relativa dependência da temperatura do ar; necessidade do tratamento completo do lodo; cobertura dos discos usualmente necessária.	83-90	Von Sperling (2014).

Tabela 7 – Tecnologias de tratamento de esgoto sanitário (Conclusão)

Sistemas	Vantagens	Desvantagens	DQO (%)	Fonte
Lodos ativados convencional	Elevada eficiência na remoção de DBO; nitrificação usualmente obtida; possibilidade de remoção N e P; baixos requisitos de área; processo confiável; reduzidas possibilidades de maus odores, insetos e vermes; flexibilidade operacional; pode ser utilizado tanto em grandes como pequenas comunidades.	Baixa eficiência na remoção de coliformes; elevados custos de implantação e operação; elevado consumo de energia; necessidade de operação sofisticada; elevado índice mecanização; relativamente sensível a descargas tóxicas; necessidade do tratamento completo do lodo; possíveis problemas ambientais com ruídos e aerossóis.	80-90	Philippi (2005); Von Sperling (2014); Cornelli <i>et al.</i> (2014).
Lodos ativados aeração prolongada	Elevada eficiência na remoção de DBO; nitrificação consistente; baixa geração de lodo; estabilização do lodo no próprio reator; elevada resistência a variações de cargas tóxicas; satisfatória independência das condições climáticas.	Baixa eficiência na remoção de coliformes; Elevados custos de implantação e operação; Elevado índice de mecanização; Necessidade de remoção da humidade do lodo.	83-93	Von Sperling (2014).
Sistemas de fluxo intermitente (RBS)	Elevada eficiência na remoção de DBO; satisfatória remoção de N e possivelmente P; baixos requisitos de área; menos equipamentos que os demais sistemas; flexibilidade operacional; usualmente mais competitivo economicamente para populações pequenas a médias.	Baixa eficiência na remoção de coliformes; elevados custos de implantação e operação; maior potência instalada que os demais sistemas de lodos; necessidade do tratamento e da disposição do lodo.	83-93	Von Sperling (2014).
Biorreator de membrana (MBR)	Requer pouca área; alta qualidade no efluente final; alta tolerância a variações de carga; opera em temperatura ambiente; promove a remoção de nitrogênio; baixa geração de lodo; fácil operação.	Manutenção complicada; elevado custo de operação, manutenção e instalação; geração de ruídos; operação em alta pressão; utilização de substâncias químicas para limpeza das membranas; alto consumo de energia; não elimina o contaminante.	70-99	Subtil (2007); Cornelli <i>et al.</i> (2014).
Wetlands	Baixo custo de implantação; simplicidade de operação; autossustentável; alta capacidade de remoção de matéria orgânica, sólidos, nutrientes e patógenos; indicada no tratamento de efluentes de pequenas comunidades; distribuição de esgoto bruto numa área maior de entrada; uso de volume de filtro mais eficiente; alta eficiência dos processos aeróbios; menores problemas quanto a colmatação do filtro; não há geração de lodo; pode gerar renda através da utilização da biomassa produzida; baixa produção de odores.	Necessidade de grandes áreas para tratamento de grandes volumes quando comparados a filtros biológicos; potencialmente criadores de mosquitos e outros artrópodes; o efluente líquido pode não apresentar um aspecto agradável; longo tempo de detenção hidráulica; é afetado pelas condições climáticas; demanda tratamento prévio do esgoto; é susceptível a entupimentos; necessita de água; custo de substratos; custo de manejo das macrófitas.	75-85	Almeida <i>et al.</i> (2007); Monteiro (2009); Calijuri <i>et al.</i> (2009); Ormonde (2012); Von Sperling (2014);

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).

É possível observar na Tabela 7 que alguns dos sistemas de tratamento apresentam elevados valores de eficiência de remoção de matéria orgânica em termo de DQO, além de apresentarem uma série de vantagens, especialmente os sistemas combinados de tratamento. Contudo, todos os sistemas demonstraram desvantagens quanto a sua utilização, o que reforça a importância de que esses fatores tanto as vantagens e desvantagens, bem como os níveis já observados de desempenho dos sistemas, sejam considerados e analisados cuidadosamente para a escolha ideal do sistema de tratamento.

Hunt (2013) apresentou em seu trabalho um breve levantamento das principais tecnologias de tratamento utilizadas no território brasileiro, como pode ser observado na Figura 1.

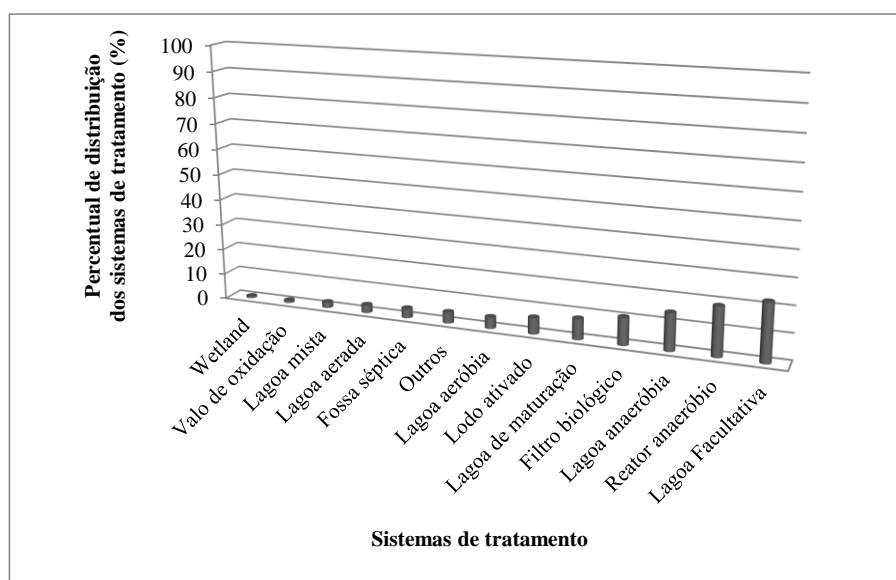


Figura 1- Distribuição percentual dos sistemas de tratamento de esgoto utilizados no Brasil

Fonte: Hunt (2013).

Diversas são as tecnologias de tratamento, entretanto, pode-se observar na Figura 1 a maior utilização de sistemas simplificados e de baixo custo, tais como lagoas. Também se verifica que a utilização dos sistemas combinados ainda não é amplamente empregado no Brasil.

Considerando a elevada diversidade de tecnologias de tratamento e suas respectivas diferenças é extremamente importante que sejam definidos critérios e métodos de auxílio para a definição de quais sistemas apresentam maiores vantagens, ou benefícios para uma dada necessidade. Por isso, o processo de definição e levantamento de critérios é de suma importância no estudo de tecnologias de tratamento e suas aplicações.

2.4 CRITÉRIOS PARA A ESCOLHA DO TIPO DE TRATAMENTO

A adequada definição dos critérios de avaliação é fundamental para garantir a qualidade da decisão, uma vez que esses são os atributos que compõem o eixo de avaliação (CAMPOS, 2011). Com base nisso, este trabalho buscou realizar o levantamento de dois eixos de avaliação. O primeiro considerando os aspectos econômicos, e o segundo amparado nos princípios da sustentabilidade.

2.4.1 CRITÉRIOS ECONÔMICOS

Os critérios para seleção do sistema de tratamento devem ser escolhidos de modo extremamente cauteloso. Contudo, a escolha de elevado número de critérios irá requerer maior número de dados e por consequência a solução do problema exigirá maior tempo e também maior custo (KALBAR *et al.*, 2012 a). Outro aspecto importante é o nível de aprofundamento dado ao tratamento dos critérios, a fim de que se garanta a tomada de decisão mais apropriada (LEONETI *et al.*, 2010).

Segundo Von Sperling (2014), os aspectos de importância na seleção dos sistemas de tratamento, nos países desenvolvidos e em desenvolvimento, apresentam algumas particularidades. Nos países desenvolvidos, os critérios que são considerados críticos são a eficiência, a confiabilidade, a disposição do lodo e a área necessária. Em contrapartida nos países em desenvolvimento, os itens críticos são os custos de construção, a sustentabilidade, os custos operacionais e a simplicidade da tecnologia.

Embora tamanha complexidade envolvida no processo de decisão, muitos países tem realizado a seleção de maneira pouco minuciosa. Isso resulta em decisões inapropriadas com alto impacto tanto em termos de eficiência de tratamento bem como relativa a custos que resultam em pressão econômica, mesmo em países desenvolvidos (TSAGARAKIS *et al.*, 2002; KALBAR *et al.*, 2012a).

Com base nisso, o estudo detalhado do critério de custo e seus subcritérios é extremamente relevante. De acordo com 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, no qual 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. Segundo 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.

Na Tabela 8 são apresentados os principais critérios de custo considerados em trabalhos aplicados à escolha da tecnologia de tratamento.

Tabela 8- Critérios na avaliação econômica de diferentes tecnologias de tratamento

Descrição	Fonte
Custos de implantação	Vidal <i>et al.</i> (2002); Oliveira (2004); Von Sperling (2014); Zeng <i>et al.</i> (2007); Alegre <i>et al.</i> (2007); Muga e Mihelcic (2008); Leoneti (2012); Hunt (2013); Molinos <i>et al.</i> (2014); Molinos <i>et al.</i> (2015).
Custos para os usuários	Leoneti (2012).
Custos de manutenção	Vidal <i>et al.</i> (2002); Zeng <i>et al.</i> (2007); Alegre <i>et al.</i> (2007); Muga e Mihelcic (2008); Garrido <i>et al.</i> (2011); Karimi <i>et al.</i> (2011); Leoneti (2012); Hunt (2013); Molinos <i>et al.</i> (2014); Von Sperling (2014); Molinos <i>et al.</i> (2015).
Custos operacionais	Vidal <i>et al.</i> (2002); Oliveira (2004); Von Sperling (2005); Alegre <i>et al.</i> (2007); Muga e Mihelcic (2008); Garrido <i>et al.</i> (2011); Karimi <i>et al.</i> (2011); Leoneti (2012); Molinos <i>et al.</i> (2014); Von Sperling (2014); Molinos <i>et al.</i> (2015).
Custos do ciclo de vida	Kalbar <i>et al.</i> (2012a); Kalbar <i>et al.</i> (2012b).
Custos da disposição do lodo	Von Sperling (2014); Karimi <i>et al.</i> (2011).
Transporte	Garrido <i>et al.</i> (2013).
Consumo de reagentes	Garrido <i>et al.</i> (2013).
Requisitos energéticos	Vidal <i>et al.</i> (2002); Refsgaard (2003); Oliveira (2004); Von Sperling (2007); Alegre <i>et al.</i> (2007); Muga e Mihelcic (2008); Karimi <i>et al.</i> (2011); Leoneti (2012); Hunt (2013); Garrido <i>et al.</i> (2013); Molinos <i>et al.</i> (2014); Von Sperling (2014).
Requisitos de área	Vidal <i>et al.</i> (2002); Oliveira (2004); Von Sperling (2005); Zeng <i>et al.</i> (2007); Karimi <i>et al.</i> (2011); Leoneti (2012); Kalbar <i>et al.</i> (2012a); Kalbar <i>et al.</i> (2012b); Garrido <i>et al.</i> (2012); Hunt (2013); Von Sperling (2014); Molinos <i>et al.</i> (2014).

A aplicação de métodos econômicos para definição das alternativas para o modelo visa proporcionar meios de visualizar o problema sobre diferentes aspectos, sem minimizar a importância do custo para países em desenvolvimento.

2.4.2 CRITÉRIOS SUSTENTÁVEIS

A proteção do meio ambiente, o desenvolvimento social e econômico são três elementos chaves da sustentabilidade (PHILIPPI, 2005; MOLINOS *et al.*, 2014). Neste sentido, o tratamento eficiente e adequado de efluentes desempenha papel fundamental para a garantia dos aspectos da sustentabilidade (ASHLEY *et al.*, 2008; GARRIDO *et al.*, 2013).

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 sociais e ambientais (MOLINOS *et al.*, 2013). Alsina *et al.* (2008) enfatiza a necessidade de que a tomada de decisão deve considerar simultaneamente os critérios econômicos sociais e ambientais e também incluir os aspectos técnicos como sendo parte fundamental na avaliação das alternativas.

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 *et al.*, 2014).

Portanto, é de extrema relevância no processo de decisão a identificação dos critérios e/ou atributos de decisão. Deste modo, foram levantados os principais aspectos e critérios fundamentais na seleção do sistema de tratamento de esgotos (Tabela 9).

Tabela 9 – Critérios importantes na seleção do sistema de tratamento de esgotos (Continua)

Critérios	Descrição	Fonte
Custos	Este critério é composto por todos os custos associados à implementação e à gestão do sistema de tratamento de esgotos.	Vidal <i>et al.</i> (2002); Refsgaard (2003); Garrido <i>et al.</i> (2012)
Custos de implantação/ Custos de investimento	Os custos de implementação são compostos pelas despesas monetárias necessárias para construção da estação de tratamento, como terra, construção, máquinas, equipamentos, instalações e tubulações.	Vidal <i>et al.</i> (2002); Oliveira (2004); Sperling (2005); Zeng <i>et al.</i> (2007); Alegre <i>et al.</i> (2007); Muga and Mihelcic (2008); Leoneti (2012); Hunt (2013); Molinos <i>et al.</i> (2014); Molinos <i>et al.</i> (2015)
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.	Vidal <i>et al.</i> (2002); Oliveira (2004); Zeng <i>et al.</i> (2007); Alegre <i>et al.</i> (2007); Muga and Mihelcic (2008); Garrido <i>et al.</i> (2011); Karimi <i>et al.</i> (2011); Leoneti (2012); Hunt (2013); Molinos <i>et al.</i> (2014); Von Sperling (2014); Molinos <i>et al.</i> (2015)
Requisitos de produtos químicos	Quais são as quantidades mínimas necessárias para a operação do sistema escolhido a fim de garantir níveis satisfatórios de tratamento.	Garrido <i>et al.</i> (2013); Von Sperling (2014)
Requisitos energéticos/ Consumo de energia	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.	Vidal <i>et al.</i> (2002); Refsgaard (2003); Oliveira (2004); Sperling (2005); Alegre <i>et al.</i> (2007); Muga and Mihelcic (2008); Karimi <i>et al.</i> (2011); Leoneti (2012); Garrido <i>et al.</i> (2013); Molinos <i>et al.</i> (2014)
Área requerida/ 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.	Vidal <i>et al.</i> (2002); Oliveira (2004); Zeng <i>et al.</i> (2007); Karimi <i>et al.</i> (2011); Leoneti (2012); Kalbar <i>et al.</i> (2012a); Kalbar <i>et al.</i> (2012b); Kalbar <i>et al.</i> (2013); Garrido <i>et al.</i> (2012); Hunt (2013); Molinos <i>et al.</i> (2014); Von Sperling (2014)
Custos da disposição do lodo	Análise dos custos relativos à geração de lodo e os requisitos de tratamento e disposição.	Karimi <i>et al.</i> (2011)
Processos auxiliares requeridos	Quais são os processos auxiliares requeridos pelo processo de tratamento e o quanto esses afetam a qualidade final do efluente quando inoperantes.	Von Sperling (2014)
Custos do ciclo de vida	É o valor de custos descontados (investimento inicial menos valor capital residual, custos de operação, manutenção e substituição) menos os benefícios descontados (Receita e custo evitado resultante da recuperação de recursos).	Kalbar <i>et al.</i> (2012a); Kalbar <i>et al.</i> (2012b); Lee <i>et al.</i> (2013)
Legislação e regulamentação	Refere-se às particularidades legais apresentadas em cada localidade.	Vasiloglou <i>et al.</i> (2008)
Nível do tratamento requerido	Versa sobre a capacidade dos processos de atingir os padrões de efluentes.	Karimi <i>et al.</i> (2011)

Tabela 9 – Critérios importantes na seleção do sistema de tratamento de esgotos (Continuação)

Critérios	Descrição	Fonte
Características do afluente	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)
Aplicabilidade/ Maturidade da Tecnologia	A aplicabilidade de um processo é avaliada com base em experiências passadas, dados de plantas em grande escala, dados publicados e estudos de plantas piloto. Se forem encontradas condições novas ou incomuns, estudos de plantas piloto são essenciais.	Metcalf e Eddy (2003); Zeng <i>et al.</i> (2007); Karimi <i>et al.</i> (2011); Von Sperling (2014)
Aspectos Climáticos/ Condições naturais	Restrições climáticas devem ser consideradas uma vez que elas podem comprometer e afetar o desempenho dos sistemas de tratamento. A temperatura é um exemplo, ela 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); Karimi <i>et al.</i> (2011); Hunt (2013); Von Sperling (2014)
Aspectos do solo	Dados como taxa de percolação, profundidade e espessura do solo, profundidade do lençol freático, declividade do terreno e camada impermeável do solo em função das rochas são alguns dados de caracterização do solo que precisam ser avaliados para escolha de algumas tecnologias para alguns tipos de tecnologias específicas.	Hunt (2013)
Confiabilidade	Confiabilidade refere-se à probabilidade de falhas mecânicas de operação e processo e o impacto das falhas na qualidade do efluente.	Zeng <i>et al.</i> (2007); Kalbar <i>et al.</i> (2012a); Kalbar <i>et al.</i> (2012b); Kalbar <i>et al.</i> (2013); Hunt (2013); Von Sperling (2014); Molinos <i>et al.</i> (2015)
Complexidade/ Gerenciabilidade/ Simplicidade operacional e de manutenção	A complexidade de um sistema pode ser mensurada considerando diversos fatores, tais como, nível de habilidade e treinamento exigido do 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); Karimi <i>et al.</i> (2011); Kalbar <i>et al.</i> (2012); Garrido <i>et al.</i> (2012); Hunt (2013); Molinos <i>et al.</i> (2014); Von Sperling (2014); Molinos <i>et al.</i> (2015)
Riscos	Este critério é utilizado para avaliação de segurança dos trabalhadores em diferentes processos.	Karimi <i>et al.</i> (2011)
Acessibilidade	Esta normalmente 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 <i>et al.</i> , (2008); Kalbar <i>et al.</i> (2012a); Kalbar <i>et al.</i> (2012b); Kalbar <i>et al.</i> (2013)
Durabilidade	Este parâmetro refere-se ao tempo de vida tecnológica da tecnologia de tratamento.	Kalbar <i>et al.</i> (2012a); Kalbar <i>et al.</i> (2012b); Kalbar <i>et al.</i> (2013)
Robustez/ Flexibilidade	Refere-se 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.	Karimi <i>et al.</i> (2011); Kalbar <i>et al.</i> (2012a); Kalbar <i>et al.</i> (2012b); Kalbar <i>et al.</i> (2013); Hunt (2013); Von Sperling (2014)
Desempenho/ Eficiência	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, portanto as alternativas avaliadas de acordo com a qualidade final dos efluentes.	Vidal <i>et al.</i> (2002); Karimi <i>et al.</i> (2011); Von Sperling (2014)

Tabela 9 – Critérios importantes na seleção do sistema de tratamento de esgotos (Continuação)

Critérios	Descrição	Fonte
Remoção de DQO	A qualidade dos efluentes é definida diretamente pela porcentagem de remoção da demanda química de oxigênio (DQO).	Refsgaard (2003); Alegre <i>et al.</i> (2007); Muga and Mihelcic (2008); Garrido <i>et al.</i> (2011); Karimi <i>et al.</i> (2011); Leoneti (2012); Garrido <i>et al.</i> (2013); Hunt (2013); Molinos <i>et al.</i> (2014); Molinos <i>et al.</i> (2015)
Remoção DBO	Cada sistema de tratamento apresenta uma faixa média de remoção da DBO podendo, portanto esta ser outro critério para seleção da tecnologia.	Molinos <i>et al.</i> (2015)
Remoção de sólidos (S)	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.	Karimi <i>et al.</i> (2011); Hunt (2013); Von Sperling (2014); Molinos <i>et al.</i> (2014); Molinos <i>et al.</i> (2015)
Remoção de nitrogênio (N)	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, portanto a remoção deste um fator importante para a seleção de uma tecnologia de tratamento.	Zeng <i>et al.</i> (2007); Alegre <i>et al.</i> (2007); Muga and Mihelcic (2008); Garrido <i>et al.</i> (2011); Karimi <i>et al.</i> (2011); Leoneti (2012); Garrido <i>et al.</i> (2013); Hunt (2013); Molinos <i>et al.</i> (2014); Molinos <i>et al.</i> (2015)
Remoção de Fósforo (P)/ Eutrofização Potencial	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 à remoção é de grande significado para a saúde pública e para o meio ambiente.	Refsgaard (2003); Zeng <i>et al.</i> (2007); Alegre <i>et al.</i> (2007); Muga and Mihelcic (2008); Garrido <i>et al.</i> (2011); Karimi <i>et al.</i> (2011); Leoneti (2012); Kalbar <i>et al.</i> (2012); Hunt (2013); Garrido <i>et al.</i> (2013); Molinos <i>et al.</i> (2014); Molinos <i>et al.</i> (2015)
Remoção de patógenos/ Patogenicidade	O processo de desinfecção de esgotos é inativação seletiva de espécies de organismos, principalmente aquelas que ameaçam a saúde humana, observando os padrões de qualidade estabelecidos para remoção de patógenos.	Hunt (2013); Von Sperling (2014)
Geração de subprodutos	Alguns subprodutos do tratamento podem ser benéficos gerando produtos de valor, tais como geração de energia, ou extração de produtos químicos, entre outros, ou prejudiciais e difícil tratamento, portanto é importante considerar estes na análise.	Hunt (2013); Von Sperling (2014)
Produção de lodo / Geração 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.	Metcalf e Eddy (2004); Zeng <i>et al.</i> (2007); Alegre <i>et al.</i> (2007); Karimi <i>et al.</i> (2011); Leoneti (2012); Molinos <i>et al.</i> (2014); Molinos <i>et al.</i> (2015)
Limitações do tratamento de lodo	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 esse fator e definir em paralelo o tratamento deste junto ao tratamento do efluente líquido.	Garrido <i>et al.</i> (2013); Von Sperling (2014)

Tabela 9 – Critérios importantes na seleção do sistema de tratamento de esgotos (Conclusão)

Critérios	Descrição	Fonte
Potencial para recuperar produtos/ Potencial para o reuso	Usualmente o efluente é descartado sem reutilização, um fator diferencial a ser considerado é o potencial das tecnologias para alcançar efluentes com alta qualidade ao ponto de permitir a reutilizados, bem como o potencial para recuperar energia ou a geração desta bem como recuperação de fósforo ou outros subprodutos do tratamento das águas residuais.	Refsgaard (2003); Maurer <i>et al.</i> (2012); Molinos <i>et al.</i> (2014); Molinos <i>et al.</i> (2015)
Impactos ambientais/ Sustentabilidade	Os impactos ambientais tais como a quantidade de água evaporada, a poluição das águas subterrâneas e a geração de aerossóis, devem ser considerados para avaliação de processos.	Karimi <i>et al.</i> (2011); Kalbar <i>et al.</i> (2012a); Kalbar <i>et al.</i> (2012b); Von Sperling (2014)
Emissões/ Aquecimento global potencial/ <i>Carbon footprint</i>	Conjuntos totais do potencial de emissões de gases de efeito estufa (GEE) envolvendo as emissões diretas e indiretas. As emissões diretas envolvem principalmente emissões relacionadas aos processos biológicos realizados na ETE, ao passo que as indiretas referem-se à utilização de eletricidade para operar a instalação e demais emissões referentes ao transporte de resíduos entre outros.	Kalbar <i>et al.</i> (2012a); Kalbar <i>et al.</i> (2012b); Garrido <i>et al.</i> (2013); Hunt (2013); Von Sperling (2014); Molinos <i>et al.</i> (2015)
Contaminação do solo, águas superficiais e subterrâneas	Altamente relacionado ao tipo de tratamento do esgoto e da disposição final dos subprodutos do tratamento, bem como dos processos empregados.	Von Sperling (2014)
Aceitação pública/ Aceitabilidade	O critério de aceitabilidade contabilizam parâmetros como a eficiência do tratamento, desempenho da tecnologia e questões operacionais, além de problemas de odor, atração de insetos, ruídos na vizinhança, desvalorização de terrenos próximos, entre outros fatores associados.	Kalbar <i>et al.</i> (2012); Molinos <i>et al.</i> (2014); Von Sperling (2014); Molinos <i>et al.</i> (2015)
Odor	Fator extremamente importante em áreas urbanizadas. Deve se considerar todas as etapas do processo de tratamento e os possíveis geradores de odor para que estes sejam minimizados. Especialmente na fase de processamento e tratamento do lodo final.	Vidal <i>et al.</i> (2002); Metcalf and Eddy (2003); Alegre <i>et al.</i> (2007); Karimi <i>et al.</i> (2011); Leoneti (2012); Hunt (2013); Molinos <i>et al.</i> (2014); Von Sperling (2014); Molinos <i>et al.</i> (2015)
Atração de insetos	Normalmente esta condição esta associada ao fator odor, podendo gerar uma serie de problemas no tratamento e destinação final do lodo. Além da geração de problemas sanitários graves.	Hunt (2013); Von Sperling (2014)
Impacto visual/ Estética	Proporção referente à perturbação causada pela presença da unidade de tratamento de efluentes na paisagem circundante.	Molinos <i>et al.</i> (2014); Molinos <i>et al.</i> (2015)
Ruídos	Qualquer tipo de poluição sonora que o processo venha ocasionar deve ser considerado, especialmente, em áreas urbanas.	Von Sperling (2014); Hunt (2013); Molinos <i>et al.</i> (2014)
Custos para os usuários	Este indicador estima o valor médio da tarifa por cada sistema individual ao ano.	Leoneti (2012)
Geração de empregos	Esta relacionado aos empregos gerados direta ou indiretamente com a implementação e operação da estação de tratamento em um determinado local.	Muga and Mihelcic (2008); Leoneti (2012)
Riscos sanitários	O risco sanitário é a relação entre o número de pessoas expostas ao esgoto, ao corpo receptor e ao lodo e a qualidade destes juntamente com as rotas de infecção.	Von Sperling (2014)

A análise da Tabela 9 demonstra a complexidade do problema de seleção da tecnologia visto tamanha variedade de critérios que pode ser utilizada nesse processo. Além do que é possível observar que não há uma priorização de um critério quando comparado a outro pela bancada acadêmica.

2.5 MODELOS E TÉCNICAS MULTICRITÉRIO DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO

A utilização de modelos e técnicas de apoio à tomada de decisão permite as organizações testar, previamente, os resultados de suas decisões antes mesmo de colocá-las em prática, podendo, maximizar benefícios, considerando variáveis como custo e simplicidade, além de poder assim reduzir problemas, ou possíveis impactos negativos.

A utilização desses modelos permite as organizações características de pró-atividade frente às problemáticas que envolvem o entorno organizacional, independente da área de atuação da organização. Em síntese, Gomes (2012) define como sendo à base da teoria da decisão como um conjunto de procedimentos e métodos de análise que buscam garantir a coerência, a eficácia e a eficiência das decisões, tomadas em função das informações disponíveis, fazendo sempre previsão, e antecipação de resultados.

O número de técnicas e métodos de apoio à decisão é diverso e eles variam de ferramentas mais sofisticadas como argumentação lógica e conjuntos ordenados a ferramentas mais simples (BOUYSSOU *et al.*, 2000). A utilização de cada método depende diretamente da complexidade do problema, de seus critérios, atributos e de suas alternativas de solução.

Segundo Leoneti (2009), árvores de decisão, análise de sensibilidade e diagrama de tornado são algumas das ferramentas que tem sido amplamente empregada na análise e cálculo de alternativas no processo de tomada de decisão. Ao passo que alguns tipos de problemas mais complexos, principalmente àqueles com múltiplos critérios e objetivos, exigem uma abordagem diferenciada.

De acordo com Tchemra (2009), os métodos multicritérios podem ser diferenciados pela capacidade de considerar tanto critérios quantitativos como qualitativos, além disso, permitem a análise da decisão e ainda testam sua confiabilidade. Outro aspecto característico das metodologias de apoio à tomada de decisão é a fase de estruturação do problema na qual são levantadas todas as ações juntamente com os aspectos positivos e negativos destas, seguido da fase de avaliação do problema aonde são realizadas as compensações entre os pontos positivos e negativos (CAMPOS, 2011).

Na Tabela 10 são apresentados alguns dos principais elementos envolvidos ao apoio multicritério à decisão e suas definições.

Tabela 10 – Elementos da decisão

Atores			
Grupo de indivíduos ou entidades que tem interesse na decisão			
Decisor			
Grupo de indivíduos ou entidades que tem o mais importante papel na decisão			
Analista ou Especialista			
Pessoa ou equipe especialista em um dado assunto que tem função de auxiliar no processo decisório. Busca sistematizar o processo e modelar as preferências			
Facilitador			
Contribui para o processo auxiliando no esclarecimento, negociação e comunicação. Também auxilia na busca de informações para o especialista			
Alternativas			
Reais: ações que se concretizam	Fictícias: ações idealizadas	Realista: caracteriza-se por um projeto viável	Irrealista: caracteriza-se por um projeto inviável
Critérios e Atributos			
São os objetivos buscados. São utilizados como parâmetro de avaliação entre as alternativas			
Escalas			
Escala nominal: São atribuídos nomes aos elementos. Impossibilidade de operações matemáticas	Escala ordinal: Organiza os elementos em uma ordem predefinida. Ranqueamento	Escala intervalar: É atribuída por transformação linear	Escala de razão: É a quantificação associada a um ponto zero fixo
Matriz de avaliação			
Demonstra a relação entre as alternativas e os critérios de avaliação			
Tipos de problemáticas			
Seleção α ($P\alpha$): seleciona a melhor ou subconjunto de melhores alternativas	Classificação β ($P\beta$): classifica as alternativas em categorias definidas em função de normas pré estabelecidas	Ordenação γ ($P\gamma$): ordena as alternativas por meio de agrupamento em classes de equivalência	Descrição δ ($P\delta$): descreve detalhadamente as alternativas para facilitar a compreensão do decisor
Análise de sensibilidade			
Estabilidade fraca: a melhor solução permanece dentro do conjunto de soluções não dominadas		Estabilidade forte: o conjunto de solução não dominadas não se altera após a análise	
Preferências			
Reflexividade: a relação binária é considerada reflexiva se $A a \in X$ (conjunto e alternativas), tem-se $(a,a) \in \mathfrak{R}$	Irreflexividade: a relação binária é considerada irreflexiva se $A a \in X$, tem-se $(a,a) \notin \mathfrak{R}$	Simetria: a relação binária é considerada simétrica se $(a,b) \in \mathfrak{R}$ supõe também que $(b,a) \in \mathfrak{R}$	Assimetria: a relação binária é considerada assimétrica se $(a,b) \in \mathfrak{R}$ supõe também que $(b,a) \notin \mathfrak{R}$
Relações básicas de preferência			
Indiferença (I): existe uma equivalência entre as duas alternativas	Preferência estrita (P): há uma preferencia estrita e sem dúvida entre a uma alternativa	Preferência fraca (Q): decisor não consegue definir se prefere uma alternativa, a outra ou se são indiferentes	Incomparabilidade (R): corresponde à ausência de razões claras para com qualquer uma das situações anteriores

Fonte: Adaptado de Gomes *et al.* (2004); Trojan (2012); Campos (2011)

2.6 MODELOS DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO APLICADOS AO SANEAMENTO

A escolha de um sistema de tratamento envolve uma série de variáveis e incertezas, sendo estas de elevada complexidade. Estudos de modelos tem objetivado auxiliar no processo de tomada de decisão, permitindo maior confiabilidade na escolha do sistema e gerenciamento de recursos, sejam eles, econômicos, sociais ou ambientais.

Segundo Campos (2011), outro fator relevante para a aplicação de métodos e elaboração de modelos de apoio à tomada de decisão no saneamento é por se tratar de uma decisão de caráter público e político, a qual requer harmonia entre os decisores, sistematização e transparência.

A Figura 2 apresenta a distribuição de um conjunto de 306 trabalhos, obtidos pela análise sistemática da literatura, os quais são relacionados ao saneamento utilizando métodos multicritérios os quais foram realizados no período de 1970 a 2015. É possível notar uma tendência ascendente com um aumento expressivo na taxa de crescimento marginal durante os últimos cinco anos, período durante o qual mais do que 80% dos artigos foram publicados.

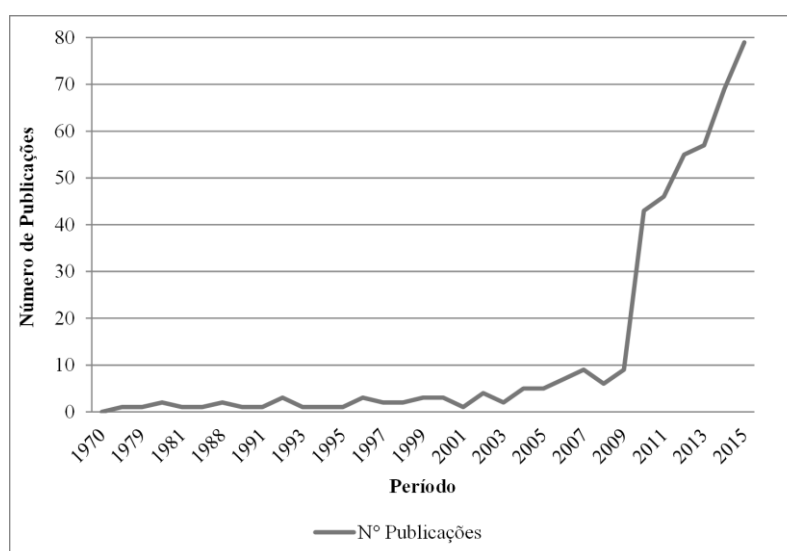


Figura 2 – Distribuição dos trabalhos multicritérios aplicados ao saneamento - 1970-2015

A Tabela 11 expõem-se as aplicações específicas referentes ao emprego de metodologias de apoio à decisão para a seleção de tecnologias de tratamento nos mais diferentes cenários. A análise bibliográfica tem a função de investigar quais pesquisas englobam o tema em estudo, bem como, averiguar quais são os métodos empregados e os critérios que levaram à decisão final.

Tabela 11 – Modelos de apoio à tomada de decisão aplicados ao saneamento (Continua)

Autor/ ano	Título	Objetivo	Modelo e/ou Método	Considerações quanto ao modelo/Método	Pontos fracos e ou Recomendações
Souza (1998)	Um modelo para seleção de processos de tratamento de águas residuárias municipais.	Desenvolver uma metodologia que pode ser empregada como ferramenta auxiliar à seleção de processos de tratamento de águas residuárias municipais, baseada em conceitos e corolários de tecnologia apropriada e em métodos de análise de decisão com múltiplos objetivos.	Modelo proposto PROSEL-I; ELECTRE-I	O Modelo PROSEL-I proposto no trabalho pode ser considerado mais avançado do que os outros modelos pela sua concepção, pois aborda as metodologias de otimização e também de tecnologia apropriada.	-
Harada (2001)	Uso de análise multicritério na ordenação de prioridades em empreendimentos de saneamento	Foi propor uma metodologia simplificada de ordenamento de empreendimentos, de aplicação simples e flexível, que permite a avaliação dos diversos aspectos, sem lançar mão de recursos subjetivos de valoração dos empreendimentos.	Promethee II	Adaptações foram necessárias para uma avaliação precisa na ordenação de prioridades em empreendimentos de saneamento.	-
Refsgaard (2003)	<i>Process-guided multicriteria analysis in wastewater planning</i>	Desenvolver um processo guia para a o planejamento do tratamento de efluentes em um Município norueguês.	MCA; Custo benefício; Programação linear; REGIME	O MCA fornece um quadro de apoio abrangente e sistemático para o tratamento de informações relevantes sobre a competitividade das alternativas e critérios, tornando explícitos os requisitos para novas informações e, assim, apoiando uma tomada de decisão através de um processo bem documentado e transparente.	-
Oliveira (2004)	Modelo para tomada de decisão na escolha de sistema de Tratamento de esgoto sanitário	Buscou mostrar a possibilidade de se usar técnicas da análise de decisão para a escolha do sistema de tratamento de esgoto sanitário de forma ecológica e econômica, como árvore de decisão e análise de sensibilidade.	Modelo proposto	O modelo é de fácil utilização e alteração e poderá auxiliar a escolha de sistemas de tratamento, bem como no pré-dimensionamento das unidades de tratamento, dos equipamentos de aeração e da área necessária para implantação.	Verificou-se a necessidade de se efetuar estudos conjuntos de estimativa de custo de implantação com operação e manutenção, uma vez que os melhores custos não indicam, necessariamente, a melhor alternativa. Bem como aumentar o número de alternativas possíveis.
Zeng <i>et al.</i> (2007)	<i>Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis</i>	Este artigo descreve uma abordagem sistemática inovadora para seleção ótima de águas residuais tratamento, com base na aplicação do processo de hierarquia analítica (AHP) e análise cinética de relações (GRA).	AHP/ GRA	A combinação da GRA hierárquica com a tradicional junto a ideia da hierarquia do AHP permitiu uma reflexão mais eficaz das características reais do problema em comparação com a avaliação baseada em apenas um.	A utilização da programação pode auxiliar a reduzir os erros durante a tomada de decisão. Esta abordagem pode ser aplicada a outros campos no que se refere à otimização de problemas de tomada de decisão.

Tabela 11 – Modelos de apoio à tomada de decisão aplicados ao saneamento (Continuação)

Autor/ Ano	Título	Objetivo	Modelo e/ou Método	Considerações quanto ao modelo/Método	Pontos fracos e ou Recomendações
Ashley <i>et al.</i> (2008)	<i>Making Asset Investment Decisions for Wastewater Systems that Include Sustainability</i>	Buscou abordar conceitos de avaliação de sustentabilidade aplicando estes em dois estudos de caso para ilustrar como os sistemas de apoio à decisão multicritérios podem melhorar a avaliação da sustentabilidade.	Modelo SWARD	O uso dos processos e critérios de sustentabilidade do modelo SWARD ajudou na avaliação da sustentabilidade relativa aos diferentes cenários de tomada de decisão. A estrutura SWARD foi desenvolvida para complementar os atuais processos de tomada de decisão utilizados no setor de água, e pode ajudar as aspirações de sustentabilidade para as prestadores de serviços, agentes reguladores e partes interessadas água urbana.	A prestação de serviços precisa ser melhorada considerando os aspectos de custos, contudo ainda é um desafio o equilíbrio entre este aspecto e os aspectos de sustentabilidade.
Gonçalves <i>et al.</i> (2009)	Uso do modelo qual2k como subsídio À seleção de alternativas de tratamento de Esgotos – estudo de caso: município de São Simão-sp	Subsidiar a análise técnico-econômica e ambiental de possíveis alternativas empregadas no sistema de tratamento de esgotos de um dado município.	Modelo QUAL2K versão 2.04; Matriz de interação	O modelo QUAL2K demonstrou ser uma ótima ferramenta de gestão ambiental, por fornecer importantes subsídios à melhoria da qualidade da água. O fato de o mesmo ter possibilitado a determinação do percentual de tratamento norteia a visão sobre os tipos de subsídios fornecidos por essa ferramenta de gestão.	O presente trabalho identificou a necessidade de estudos mais voltados para verificação da viabilidade técnica e econômica de estações descentralizadas.
Leoneti (2009)	Avaliação de modelo de tomada de decisão para escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário	Foi validar e avaliar a aplicabilidade de um modelo de tomada de decisão para escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário de menor custo econômico desenvolvido por Oliveira (2004).	Modelo proposto por Oliveira (2004); AHP	A melhor aplicação do modelo é na fase final de projeto ou em estudos de concepções. Modelo “ETEX-FEARP” não é determinístico, portanto ele visa proporcionar uma visão macro sobre a existência de outras alternativas as quais poderiam ser mais bem estudadas	Os testes do modelo devem ser ainda ampliados, inserindo-se novas metodologias para continuar as análises das respostas, incluindo além dos econômicos e técnicos ainda o ambiental, social e político.
Campos (2011)	Modelo de apoio à decisão multicritério para priorização de projetos em saneamento	Foi propor um modelo multicritério de decisão para apoiar decisões de hierarquia de projetos de abastecimento de água e esgotamento sanitário.	Promethee II; GAIA; e ELECTRE IV	Os modelos propicia uma análise bem detalhada sobre as potencialidades das alternativas, estruturando o processo de decisão no saneamento. PROMETHEE II manifestou-se como compreensível aos tomadores de decisão. O método GAIA colaborou no sentido de comparar as preferências individuais e perceber a influência dos critérios nas opções de projetos. O ELECTRE IV mostrou-se bastante eficiente no tratamento de informações imprecisas.	Quanto à formulação dos critérios pode-se focar no estudo dos indicadores examinando quais possuem melhor representatividade. Investigar a decisão em grupo com múltiplos critérios.

Tabela 11 – Modelos de apoio à tomada de decisão aplicados ao saneamento (Continuação)

Autor/ ano	Título	Objetivo	Modelo e/ou Método	Considerações quanto ao modelo/Método	Pontos fracos e ou Recomendações
Hunt (2013)	Modelo multicritério de apoio à decisão aplicado à seleção de sistema de tratamento de esgoto para pequenos municípios	Teve por objetivo desenvolver um sistema para a seleção de tecnologia de tratamento de esgoto, especificamente para pequenos municípios brasileiros.	Apoio Multicritério à Decisão (AMD)	O sistema desenvolvido demonstrou-se eficiente sendo este uma ferramenta útil aos decisores tais como profissionais das prefeituras e técnicos envolvidos em questões relacionadas à escolha de tecnologias de tratamento de esgoto.	Deve se incluir no sistema características do solo como restrição e a indicação de tecnologias que permitem o reúso do efluente. Além disso, outros métodos multicritério de apoio à decisão podem ser aplicados à matriz de decisão.
Kanimi <i>et al.</i> (2011)	<i>Selection of wastewater treatment process based on the analytical hierarchy process and fuzzy analytical hierarchy process methods</i>	O processo de hierarquia analítica difusa foi proposto para lidar com a imprecisão dos julgamentos dos decisores a fim de selecionar o melhor processo de tratamento de águas residuais.	AHP; Fuzzy AHP	O método AHP foi fácil de usar e entender pelos especialistas. No que diz respeito a lidar com muitos critérios em um problema foi melhor usar o método AHP e aplicar o software de escolha de especialistas (EC) para simplificar o cálculo, entretanto, o método fuzzy AHP foi mais adequado quando os pesos de critérios e as avaliações de desempenho eram vagos e imprecisos.	Em estudos futuros, podem ser utilizados outros métodos de critérios múltiplos, tais como TOPSIS e ELECTRE para a seleção do processo de tratamento de águas residuais.
Kalbar <i>et al.</i> (2012a)	<i>Selection of an appropriate wastewater treatment technology: A scenario-based multiple-attribute decision-making approach</i>	Desenvolver uma metodologia baseada em cenários de atribuição de múltiplos atributos (MADM) e aplicado à seleção de alternativas de tratamento de águas residuais.	TOPSIS	TOPSIS demonstrou-se bastante eficiente na resolução deste tipo de problema de tomada de decisão ambiental, sendo altamente eficiente na identificação da melhor alternativa para cada um dos cenários.	-
Kalbar <i>et al.</i> (2012b)	<i>Technology assessment for wastewater treatment using multiple-attribute decision-making</i>	A tecnologia utilizada no trabalho buscou ajudar na escolha das tecnologias adequadas de tratamento de águas residuais para várias situações de tomada de decisão encontradas na gestão de águas residuais.	TOPSIS	O método usado para classificação era simples de entender e fácil de implementar em um ambiente de computação amigável, foi também adequado para a situação de decisão considerada neste trabalho já que os tomadores de decisão em realife sempre consideram os aspectos (positivo e negativo) das alternativas e selecionam a melhor alternativa disponível.	O estudo foi limitado a aplicação da metodologia a apenas um caso.

Tabela 11 – Modelos de apoio à tomada de decisão aplicados ao saneamento (Continuação)

Autor/ ano	Título	Objetivo	Modelo e/ou Método	Considerações quanto ao modelo/Método	Pontos fracos e ou Recomendações
Leoneti (2012)	Teoria dos Jogos e Sustentabilidade na Tomada de Decisão: Aplicação a Sistemas de Tratamento de Esgoto	Buscou propor um método multicritério, baseado em indicadores de sustentabilidade, técnicos, econômicos, ambientais e sociais, em conjunto com a Teoria dos Jogos e o equilíbrio de Nash, para auxiliar na resolução de conflitos que emergem na escolha de alternativas, considerando o processo de escolha como um processo de decisão em grupos.	Método multicritério elaborado; Teoria dos Jogos; e equilíbrio de Nash	O método proposto apresenta potencial para auxiliar na escolha de estratégica que proporcione o maior pagamento, considerando a preferência dos jogadores envolvidos, favorecendo a sustentabilidade da escolha com base nas alternativas que compõe o espaço de aceitabilidade.	A garantia da sustentabilidade da escolha com base nas alternativas deve ser o tema principal para estudos futuros.
Kalbar et al. (2013)	<i>The influence of expert opinions on the selection of wastewater treatment alternatives: A group decision-making approach</i>	Apresentar uma nova abordagem para incorporar opiniões de especialistas no processo de tomada de decisão baseada em cenários, uma vez que os pareceres de especialistas desempenham um papel importante na seleção de tecnologias de tratamento.	AHP	O AHP foi eficientemente aplicado para reconciliar atributos qualitativos múltiplos, onde os julgamentos de especialistas foram quantificados utilizando matrizes de comparação de pares com base na escala de Saaty.	Há necessidade de enormes esforços e um enorme apoio financeiro dos Governos para preencher a lacuna do tratamento de efluentes através da implementação de tecnologias adequadas de tratamento.
Lee et al. (2013)	<i>Assessing the Scale of Resource Recovery for Centralized and Satellite Wastewater Treatment</i>	Realizou a classificação de três diferentes configurações de recuperação de água e energia para um estudo caso simplificado.	PROMETH EE I; PROMETH EE II	Os dois métodos satisfizeram as necessidades exigidas na resolução do problema estudado.	Deve-se verificar o custo-benefício e a análise precisa ser abrangente aos componentes de projeto.
Tan et al. (2014)	<i>Fuzzy AHP approach to selection problems in process engineering involving quantitative and qualitative aspects.</i>	Desenvolver uma abordagem fuzzy AHP para aplicar em problemas de engenharia através da aplicação em 3 problemas distintos.	Fuzzy AHP	A abordagem demonstrou ser eficiente na a seleção de alternativas ótimas baseadas em critérios múltiplos que podem ser de natureza quantitativa ou qualitativa, com base no julgamento de especialistas.	Trabalhos futuros poderiam incluir decisões em grupo, incorporando também o grau de importância de cada tomador de decisões.

Tabela 11 – Modelos de apoio à tomada de decisão aplicados ao saneamento (Conclusão)

Autor/ ano	Título	Objetivo	Modelo e/ou Método	Considerações quanto ao modelo/Método	Pontos fracos e ou Recomendações
Grobério e Bringer (2014)	Metodologia de apoio ao processo de pré-seleção de sistemas de tratamento de esgotos no âmbito de uma bacia hidrográfica	Este teve por objetivo estabelecer metodologia de apoio ao processo de tomada de decisão associado à pré-seleção de processos de tratamento de esgotos no âmbito de uma bacia hidrográfica.	Modelo de qualidade de água QUAL-UFGM; programa não Linear (PNL)	A utilização do modelo de qualidade de água e da técnica de otimização para a pré-seleção de sistemas de tratamento de esgotos demonstrou-se uma técnica versátil e de fácil aplicação.	A atualização dos custos de implantação e operação dos diferentes sistemas de tratamento de esgotos. A avaliação do efeito sobre a pré-seleção de sistemas de tratamento de esgoto pela incorporação de outras formas de equidade ao modelo de otimização.
Molinos et al. (2014)	<i>Assessing the sustainability of small wastewater treatment systems: A composite indicator approach</i>	Propôs uma metodologia inovadora para avaliar a sustentabilidade dos sistemas de ETEs com base no desenvolvimento de um modelo abrangendo os aspectos econômicos, ambientais e sociais.	AHP	A aplicação do AHP para atribuir pesos a cada indicador permite a incorporação das preferências dos especialistas e garantiu a confiabilidade da análise comparativa.	A integração de uma bateria de indicadores de sustentabilidade em um único componente tem o potencial de melhorar a disseminação e compreensão da informação de sustentabilidade.
Molinos et al. (2015)	<i>Assessment of wastewater treatment alternatives for small communities: An analytic network process approach</i>	Aplicar o processo analítico de rede (ANP) para classificar um conjunto de tecnologia para tratamento secundário de efluentes em pequenas comunidades.	ANP (Similar ao AHP)	O método ANP melhora o processo de tomada de decisão, proporcionando maior rigor e robustez científica, além de contribuir para uma melhor compreensão do complexo processo de tomada de decisão com múltiplas interdependências, ajudando os tomadores de decisão a refletir e introduzir suas preferências na avaliação.	-
Castillo et al. (2016)	<i>Validation of a decision support tool for wastewater treatment Selection</i>	O objetivo deste trabalho foi avaliar e demonstrar as capacidades de uma ferramenta multicritério de sistema aplicada para o apoio à decisão ambiental integrando as capacidades de avaliação técnica, ambiental, econômica e social em uma única plataforma.	Novedar EDSS	Pode ser visto que o modelo recomendou as mesmas alternativas de tratamento que as consideradas no projeto real e as classificou de forma semelhante, o que permite usar esta ferramenta para apoiar os tomadores de decisão na seleção de tratamento de águas residuais.	Trabalhos futuros deveram considerar a análise multi-critérios focado as necessidades dos decisores, incluindo novos critérios. Assim, será possível classificar os tratamentos sobre esses novos aspectos, conferindo maior pontuação às alternativas de tratamento, permitindo aproximar a análise às considerações dos técnicos.

Conforme observado na Tabela 11 fica evidente a necessidade de estudos que busquem modelos que apresentem uma análise mais estruturada dos critérios de custos, bem como, que abordem um número maior de alternativas, considerando diferentes dimensões. A fim de garantir a adequada seleção e implementação de tecnologias de tratamento de esgotos.

2.7 MÉTODOS UTILIZADOS COMO APOIO AO TRABALHO

Neste trabalho foram utilizados três métodos de apoio ao desenvolvimento do modelo de seleção do sistema de tratamento de águas residuais, são eles: a Simulação de Monte Carlo (SMC) para o estudo de viabilidade econômica das tecnologias; o método Copeland para definição dos critérios; e por fim o método PROMETHEE II para ordenamento das alternativas de tratamento mais adequadas conforme diferentes cenários estabelecidos. Neste item, buscou-se introduzir brevemente cada um dos métodos utilizados.

2.7.1 SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

O método de Monte Carlo, também referenciado como Simulação de Monte Carlo (SMC) consiste na geração de números pseudoaleatórios associados a técnicas probabilísticas e é utilizado para solução de problemas não convencionais, cuja solução por métodos determinísticos seria muito trabalhosa, quando não inviável (LIMA *et al.*, 2017).

O SMC é uma abordagem estocástica que utiliza variáveis aleatórias como entrada e por meio de algoritmos computacionais baseados nas leis da probabilidade e estatística para realizar a simulação, sendo que o resultado não será o mesmo para cada recálculo, embora tenda a convergir para valores aproximados (RICHARD, 1973; HELTON e DAVIS, 2003; LEONETI, 2006, LIMA *et al.*, 2017).

O Método pode ser utilizado em diversas áreas da ciência, como a Administração, Finanças, Economia, Física, Engenharias. Atualmente, este método vem sendo cada vez mais usado por diferentes áreas de estudo, muito devido à facilidade ao acesso a computadores com alta capacidade de processamento, e também softwares capazes de simplificar e automatizar o processo de simulação (SOARES, 2006).

Com o avanço da tecnologia a SMC passou a ser uma alternativa viável de ser utilizada na análise de investimentos em ambientes incertos. Por meio da construção de milhares de cenários possíveis de ser gerada com esta simulação, e suas distribuições de

probabilidades associadas, permite-se transformar um cenário incerto em um cenário de risco calculado (HARZER; SOUZA; DUCLÓS, 2013).

Neste sentido, optou-se pela utilização deste método para o estudo econômico uma vez que ele é indicado para modelos de custos em gestão de projetos os quais são trabalhados de acordo com a função de distribuição de densidade triangular, ou seja, quando se tem a estimativa do valor mínimo possível, valor mais provável e valor máximo possível estimado (LIMA *et al.*, 2017).

2.7.2 COPELAND

Este método foi desenvolvido considerando princípios dos métodos de Borda e Condorcet, conciliando as vantagens dos dois métodos (CALDAS e AZEVEDO, 2009). O método de 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 e MORAES, 2010; TROJAN, 2012).

O método de Copeland 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 do método, segundo Gomes Jr. *et al.* (2005), é a redução da influência de alternativas irrelevantes.

2.7.3 PROMETHEE & GAIA

Os métodos da família PROMETHEE são altamente indicados para a resolução de problemas de ordenação, pois permitem obter uma pré-ordem parcial entre alternativas do problema (CAMPOS, 2011; LEE *et al.*, 2013). Além disso, esse método tem como vantagens a objetividade e flexibilidade, além de rápida utilização, fácil verificação, e transparência nos resultados.

Segundo Gomes *et al.* (2002), o Promethee é um método de sobre classificação, que consiste em construir uma relação binária muito particular entre as alternativas em análise, atribuindo a cada critério um peso proporcional à sua importância. O uso do método Promethee se dá pelas comparações entre as ações [a] e [b], o que determina o resultado da função $F(a,b)$. A comparação é feita tanto de [a] para [b] quanto de [b] para [a] (SILVA *et al.*,

2013). O Quadro 1 apresenta as principais características dos métodos do tipo Promethee, segundo Gomes (2006).

Quadro 1- Características principais dos métodos do tipo Promethee

Tipo de Problema	Tipo de critério	Pesos	Veto
Ordenação	pseudo	sim	não

O método Promethee I é utilizado na comparação parcial, em que são consideradas ações por vezes incomparáveis ou indiferentes em um mesmo nível em relação às demais. A ordenação completa, por sua vez, é realizada no método Promethee II, a qual se dá pelo cálculo da diferença entre o fluxo positivo e o fluxo negativo.

Outra vantagem da utilização do método Promethee II é a seleção ser feita sem admitir relações de incompatibilidade fornecendo como resultado final uma classificação de pré-ordem completa. Deste modo, a classificação das tecnologias ocorre de forma hierárquica por meio da comparação entre todas as alternativas analisadas.

A aplicação do método pode ser realizada com o auxílio da ferramenta computacional Visual PROMETHEE 1.3 - *Academic Version*. Além de facilitar nos cálculos, o software utilizado também fornece a extensão GAIA (*Graph Alignment Identification and Analysis*). A qual foi incluída no modelo objetivando contribuir para a análise, pois possibilita a visualização gráfica do desempenho das alternativas em contraste com os critérios estabelecidos.

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.

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. Esse julgamento pode ser conduzido de forma individual ou coletiva.

A análise da posição dos critérios indica a similaridade entre eles, bem como permite o estudo 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. Assim, quanto mais próxima uma alternativa de um critério melhor será o seu desempenho diante do mesmo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar, no primeiro momento, as propriedades da metodologia de pesquisa, incluindo o enfoque da pesquisa bem como as técnicas necessárias para atingir os objetivos da dissertação. Em seguida, são expostos os procedimentos metodológicos referentes aos processos de coleta e tratamento dos dados. Posteriormente é apresentada a sequência de etapas referente ao desenvolvimento do modelo, esta é importante para compreender o desenvolvimento e aplicação do modelo proposto de priorização.

3.1 ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO

Os métodos de pesquisa podem ser classificados, quanto à forma de abordagem, em qualitativos e quantitativos. O enfoque qualitativo procura coletar dados sem a necessidade de medição numérica para descobrir ou aperfeiçoar as questões de pesquisa. O enfoque quantitativo faz uso da coleta de dados para testar hipóteses por meio de medição numérica e análise estatística com a finalidade de estabelecerem padrões de comportamento (SAMPIERI; COLLADO; LUCIO, 2006; CAUCHICK *et al.*, 2012).

Com base nisto, esta pesquisa apresenta uma abordagem combinada das técnicas qualitativa e quantitativa, pois esta tem por objetivo levantar e detalhar o fenômeno, utilizando-se de ferramentas matemáticas estatísticas, e da pesquisa bibliográfica estruturada. Na Figura 3 é apresentado um resumo sobre todas as características do método de pesquisa. Estatísticas

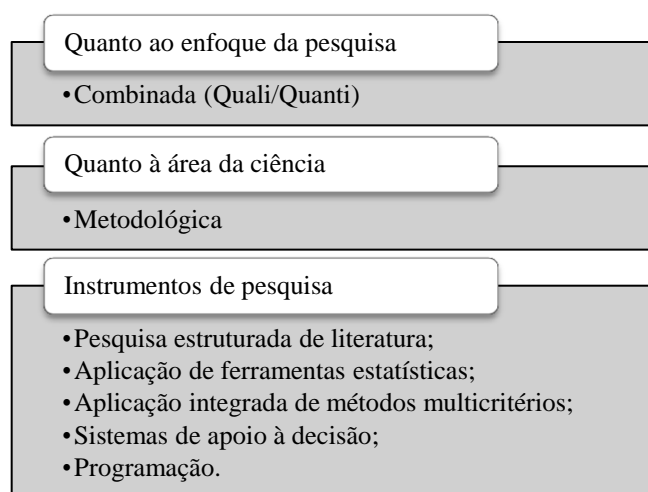


Figura 3- Resumo sobre todas as características do método de pesquisa

Na parte exploratória da pesquisa, foi realizado um levantamento bibliográfico, tanto a nível nacional como internacional, referente aos métodos de apoio à tomada de decisão, com suas possíveis aplicações na escolha de sistemas de tratamento de esgoto em grupos de tomada de decisão, conforme descrito no item 3.2. Na parte aplicada da pesquisa, duas etapas foram definidas para propor o método, as quais possuem os procedimentos metodológicos detalhadamente explicados nos itens 3.3 e 3.4.

Em resumo, a primeira etapa da pesquisa aplicada contemplou a elaboração de uma Biblioteca de Tecnologias desenvolvida com o auxílio do software MS-Excel[®], onde foram definidos blocos de sistemas individuais de tratamento de esgoto, considerando apenas os indicadores econômicos. A escolha do MS-Excel[®] se deve, principalmente, ao fato de este software ser amplamente disseminado, o qual foi utilizado para a definição das funções matemáticas.

A segunda etapa compreendeu a estruturação dos métodos para desenvolvimento dos modelos com base nos blocos dos sistemas e suas respectivas funções definidos na primeira etapa. Basicamente, o método consistiu na proposição de funções, as quais podem ser utilizadas no processo de seleção do sistema de tratamento mais adequado para cada cenário definido. O enquadramento metodológico dos métodos multicritérios utilizados é apresentado na Figura 4.

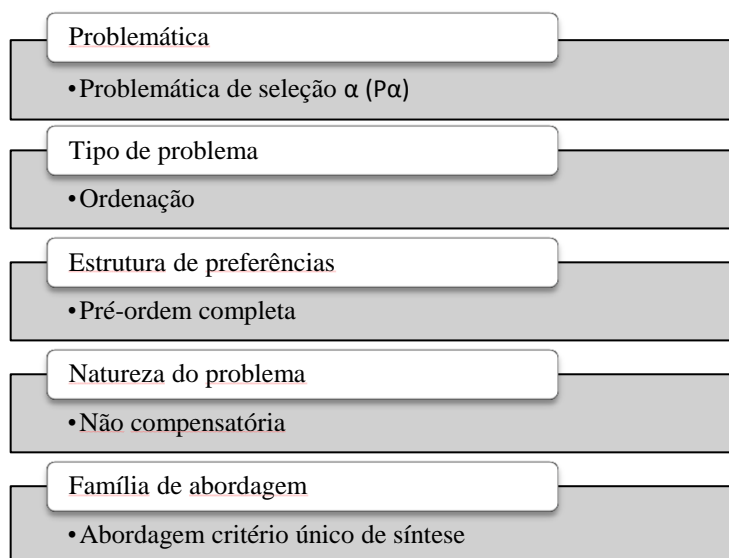


Figura 4- Resumo da problemática multicritério

3.2 PROCEDIMENTOS DA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Foi realizada uma pesquisa estruturada da literatura, a fim de construir conhecimento a partir dos interesses e delimitações de pesquisadores acerca dos principais aspectos que têm sido considerados prioritários para a definição de cada tecnologia de tratamento. A revisão sistemática da literatura foi conduzida de acordo a metodologia ProKnow-C já utilizada por outros autores tais como: Tasca *et al.* (2010), Bortoluzzi *et al.* (2011), Ensslin *et al.* (2012), Bruna Junior *et al.* (2012), Afonso *et al.* (2012), Chaves *et al.* (2012a), Chaves *et al.* (2012b), Back *et al.* (2012), Lacerda *et al.* (2012), Marafon *et al.* (2012); Merlin *et al.*, (2013), Ensslin *et al.* (2014), Lacerda e Ensslin (2014), Dutra *et al.* (2015a), Dutra *et al.* (2015b) e Ensslin *et al.* (2015).

O processo metodológico Proknow-C (ENSSLIN *et al.*, 2010) aplicado a pesquisa, permite identificar e analisar um conjunto de artigos que constituam um portfólio bibliográfico relacionado ao tema. O processo segue uma sequência de 5 fases estruturadas, conforme pode ser observado na Figura 5.

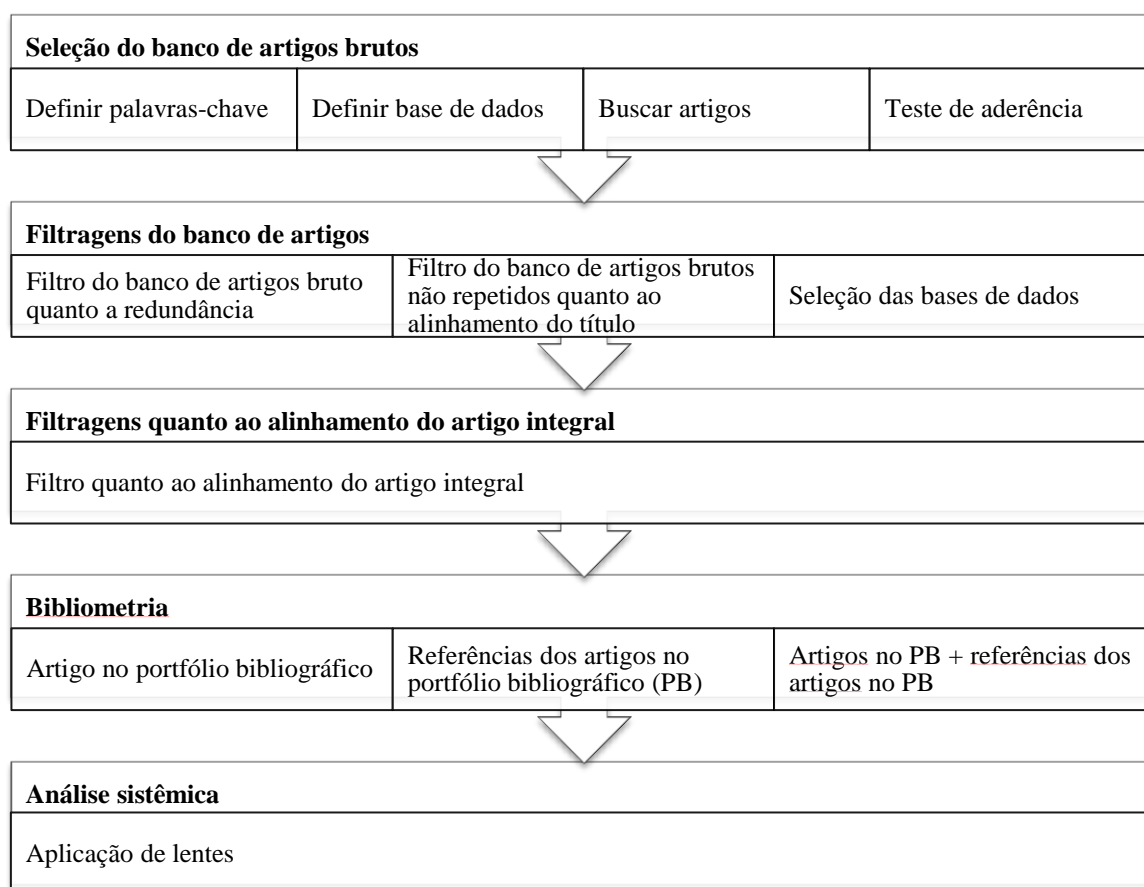


Figura 5 - Processo metodológico Proknow-C

Fonte: Adaptado de ENSSLIN *et al.* (2010).

A primeira fase foi a seleção do banco de artigos brutos, a qual consistiu em 4 etapas: (i) definição das palavras-chave; (ii) definição das base de dados; (iii) busca de artigos; e por fim, (iv) teste de aderência. Para definição das palavras-chave, foi realizado primeiramente a definição dos eixos de pesquisa, tendo como base um levantamento bibliográfico preliminar, no qual foram selecionados 23 trabalhos entre artigos, dissertações e teses alinhados com a temática da pesquisa.

Na sequência foi possível elaborar uma tabela com os principais termos utilizados e a sua representatividade. Após a escolha das palavras-chave para cada um dos 3 eixos, foi possível gerar 12 combinações para a realização da busca de artigos nas bases de dados, utilizando-se da expressão booleana *and* para a ligação das palavras (Figura 6).

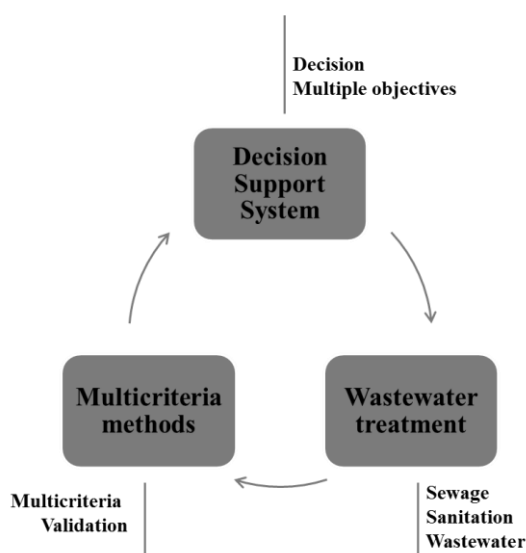


Figura 6- Palavras-Chaves

Para a realização da pesquisa optou-se pela utilização de três bases de dados: *Web of Science (ISI)*, *Scopus* e *Science Direct*. Foram utilizados como critérios para seleção de bases: 1) Acesso; 2) Expressões booleanas; 3) Importação para software de busca; e 4) Representatividade.

Portanto, a presente pesquisa restringiu-se a três bases de dados, com período de interesse entre 1970 até a 2015, sendo 1970 o ano da primeira publicação encontrada. Outra limitação corresponde às opções de pesquisa nas bases de dados utilizadas para a pesquisa, as quais ficaram restritas a opção de pesquisa *in topic*, na qual a pesquisa ocorre na busca dos termos informados, no título, no resumo e nas palavras-chave das publicações (Figura 7).

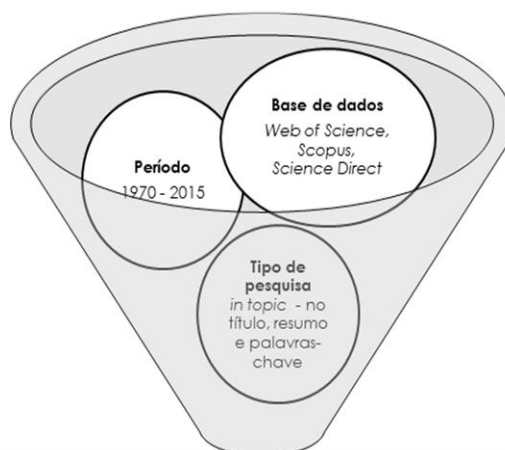


Figura 7- Delimitações de pesquisa

Com as combinações de palavras-chave e as delimitações do trabalho foi então possível iniciar o processo de busca nas bases de dados. A fim de verificar a adequação das palavras-chave escolhidas foi realizado um teste de aderência. De modo aleatório foram selecionados 3 artigos, os quais foram lidos integralmente para verificar o alinhamento ao tema. Por meio deste procedimento foi possível verificar a presença de todas as palavras-chave nos artigos selecionados, de modo que não houve necessidade de mudanças nas palavras-chave iniciais.

Nesta etapa do processo foi empregado o uso da ferramenta de gerenciamento bibliográfico EndNote (THE THOMSON, 2008). Foi realizado o download de todos os artigos (título, palavras-chave e resumo) para o software de gerenciamento, para então realizar a exclusão de duplicados, por meio de uma função fornecida pelo mesmo, excluindo-se, portanto, 9.317 publicações duplicadas de 11.809 referente a primeira pesquisa bruta. Esse elevado número de duplicados provavelmente se deu em razão das bases de dados serem bastante abrangentes, tendo diversos periódicos em comum.

A etapa seguinte foi a exclusão de artigos considerando o alinhamento dos títulos. A fim de maximizar o rigor metodológico adotou-se algumas medidas: (i) definição de palavras não chave para permitir uma leitura rápida (ex: *Health, food, nutrition*); (ii) seleção para leitura cautelosa dos títulos com alguma das palavras-chave de interesse; (iii) leitura dos demais títulos. Nesta etapa, foram eliminados 2.183 artigos, restando um conjunto de dados da aplicação da pesquisa estratégica de 306 artigos não duplicados e com títulos alinhados ao tema da pesquisa para o período de 1970 a 2015.

Tendo como base de dados esses 306 artigos, foi então realizado o reconhecimento científico. Nesta fase, foram selecionados os artigos com maior reconhecimento científico

através do levantamento do número de citações de cada publicação, de acordo com o Google Acadêmico (<http://scholar.google.com.br/>), pesquisa realizada entre os dias 10 e 15 de novembro de 2015.

Definido o número de citações para cada artigo, foi estabelecido, de acordo com o gráfico de Pareto, a margem de 97% do total das citações como ponto de corte nos artigos. Esta restrição, determina que artigos com 5 citações ou menos, sejam enviados para outro banco de dados para segunda avaliação, desta maneira foram encontrados 101 artigos com número de citações inferior a 5, compondo 3% da amostra total, e 205 com número de citações superior, constituindo 97% da amostra.

A partir destes artigos com reconhecimento científico definido foi realizada a leitura integral dos resumos, a fim de verificar o alinhamento dos trabalhos com o tema estudado. Foi realizada a leitura de 205 resumos, dos quais foram selecionados 54 artigos que estavam alinhados com os objetivos de pesquisa.

Destes 54 artigos foi realizado um levantamento dos autores, a fim de compor um banco de autores, para reavaliação dos artigos com número de citação inferior ao determinado como adequado por este trabalho. Foram identificados 66 autores.

Considerando o banco de dados de artigos com número de citações inferior a 5 foi reavaliado de acordo com os seguintes aspectos: (i) tempo de publicação inferior a 2 anos; e se (ii) algum dos autores está no banco de autores. Considerando o cumprimento de um desses aspectos, o artigo foi então separado para leitura integral do resumo. Sendo, portanto, selecionados 72 dos 101 artigos, sendo que destes apenas 2 apresentaram alinhamento com o tema de pesquisa.

Tendo, portanto ao final de todas as etapas 56 artigos com tema alinhado aos interesses da pesquisa. Contudo, apenas 12 destes apresentam aplicações diretas de métodos multicritérios para seleção da tecnologia de tratamento de efluentes sanitários.

3.3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO

O Modelo foi desenvolvido com o objetivo de auxiliar a definição do processo e/ou processos de tratamento de águas residuárias mais apropriados a diferentes cenários, considerando os aspectos de vazão e população.

O desenvolvimento do Modelo seguirá a estruturação básica, considerando os seguintes aspectos: conceitos básicos de tecnologia apropriada; conceitos básicos de critérios

de decisão; abordagem de análise de decisão; experiência anterior em modelagem do problema objeto do estudo; informação disponível sobre os fatores que afetam a escolha de um processo de tratamento de águas residuárias, e aplicação deste (Figura 8).

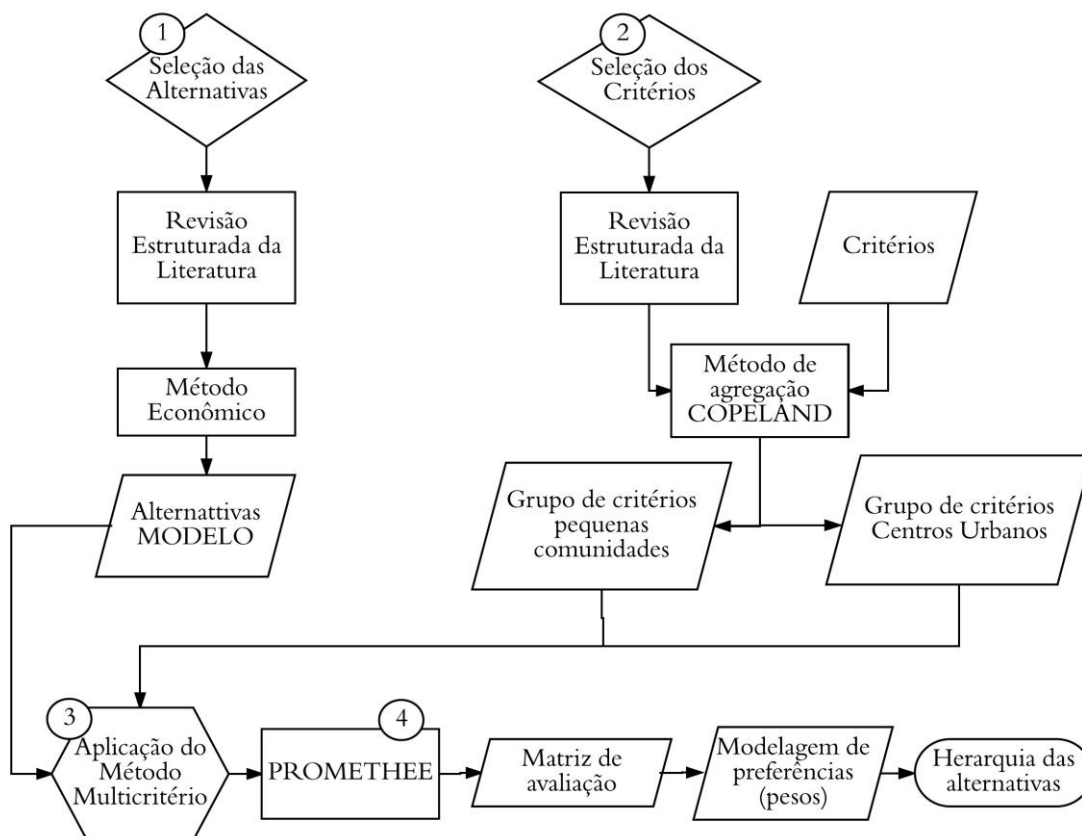


Figura 8 - Estruturação do desenvolvimento do Modelo

A etapa 1 envolve dois estágios. O primeiro estágio consiste no levantamento de tecnologias disponíveis no mercado, especialmente no mercado brasileiro, considerando as bases de dados governamentais e o levantamento bibliográfico. Somado a essa etapa está à caracterização desses sistemas e as análises comparativa entre elas. Com o intuito de definir as tecnologias que se demonstram mais adequada para o tratamento de esgoto. O segundo estágio define os principais critérios e subcritérios que devem ser considerados na tomada de decisão.

Na etapa 2 foram definidos os pesos a cada critério, com base em levantamento bibliográfico de artigos previamente publicados e com reconhecimento científico comprovado. Nesta etapa foi definido o método de Análise de Decisão para se atingir uma solução de hierarquização das alternativas viáveis.

A etapa 3 consiste no levantamento de estudos de modelagem aplicados ao saneamento para levantamento de possíveis alterações e aperfeiçoamento do modelo para que este, então, seja definitivamente estruturado para possibilitar a aplicação prática do mesmo.

Por fim, na etapa 4, de validação do modelo, foi realizada a aplicação do modelo em uma pequena cidade do Paraná, a fim de verificar se o modelo atendeu as expectativas e definir pontos de ajustes até que seja alcançada uma decisão satisfatória.

3.3.1 DEFINIÇÃO DAS ALTERNATIVAS

Os métodos de tratamento de esgotos sanitários são divididos em operações e processos unitários, os quais somados compõem o sistema de tratamento. A definição destes é de alta complexidade, pois apresenta um número elevado de possibilidades e combinações.

O levantamento bibliográfico demonstrou elevada representatividade dos critérios econômicos para a definição de uma tecnologia de tratamento, conforme pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 12- Representatividade dos critérios econômicos

Trabalho	Peso dos critérios				Método definição de pesos
	Econômicos	Ambiental	Social	Técnicos	
Zeng <i>et al.</i> (2007)	0,64			0,36	AGP/GRA
Karimi <i>et al.</i> (2011)	0,30	0,16		0,54	AHP
Lee <i>et al.</i> (2013)	0,71	0,13		0,17	PROM I e II
Tan <i>et al.</i> (2014)	0,56	0,10		0,34	AHP
Molinos <i>et al.</i> (2014)	0,31	0,47	0,22		ANP
Molinos <i>et al.</i> (2015)	0,31	0,47	0,22		ANP
Representatividade (%)	46,99	22,13	7,40	23,51	

Deste modo, foi realizado o estudo econômico aprofundado, através do uso da abordagem estocástica para análise de 37 diferentes sistemas de tratamento considerados usuais no Brasil, segundo Von Sperling (2014). A fim de selecionar um subconjunto de alternativas de baixo custo para o modelo, tendo em vista que este trabalho tem por objetivo fundamental auxiliar países em desenvolvimento na implantação de sistemas de tratamento considerando diferentes cenários e poucos recursos.

Neste sentido, foram selecionadas 37 tecnologias e sistemas compostos de tratamento de esgoto para a realização da análise comparativa de custos. A descrição das tecnologias-item 2.4, listagem está Apêndice A.

O custo por tecnologia foi estimado considerando para a base de cálculo, os custos de implantação, manutenção, operação, requisitos energéticos e de área, uma vez esses foram definidos de acordo com o levantamento estruturado da literatura conforme apresentado no item 3.2.

Foram utilizados os custos mínimos e máximos e mais prováveis de acordo com os valores estimados por Von Sperling (2014), conforme pode ser observado no Apêndice B. Os custos de consumo de energia elétrica geral e de disposição com lodo foram inclusos nos custos operacionais e de manutenção. Os custos de requisitos de área foram estimados de acordo com o valor de mercado do metro quadrado (m²), no período entre 2016 a 2017.

Foi utilizado o MS-Excel[®] para tratamento dos dados, considerando a taxa de câmbio de 3,75 R\$/US\$ e uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 14,25% ao ano, sendo esse o valor da taxa SELIC (BACEN, 2016). Os cálculos foram realizados tendo como horizonte de planejamento 25 anos (JORDÃO e PESSÔA, 2011; DJUKIC, *et al.*, 2016).

Os custos totais foram estimados de acordo com o método de Simulação de Monte Carlo (LIMA *et al.*, 2017). Neste estudo foram geradas 10000 amostras com o intuito de garantir que as incertezas dos dados de entrada fossem cobertas de maneira uniforme. Esses dados foram gerados em planilhas no MS-Excel[®]. As simulações foram feitas para os critérios: custos de instalação, custos de operação e manutenção, demanda por área e demanda por energia, para cada tecnologia de tratamento avaliada.

A Figura 9 apresenta a descrição do modelo econômico estabelecido nesta primeira etapa para definição das tecnologias.

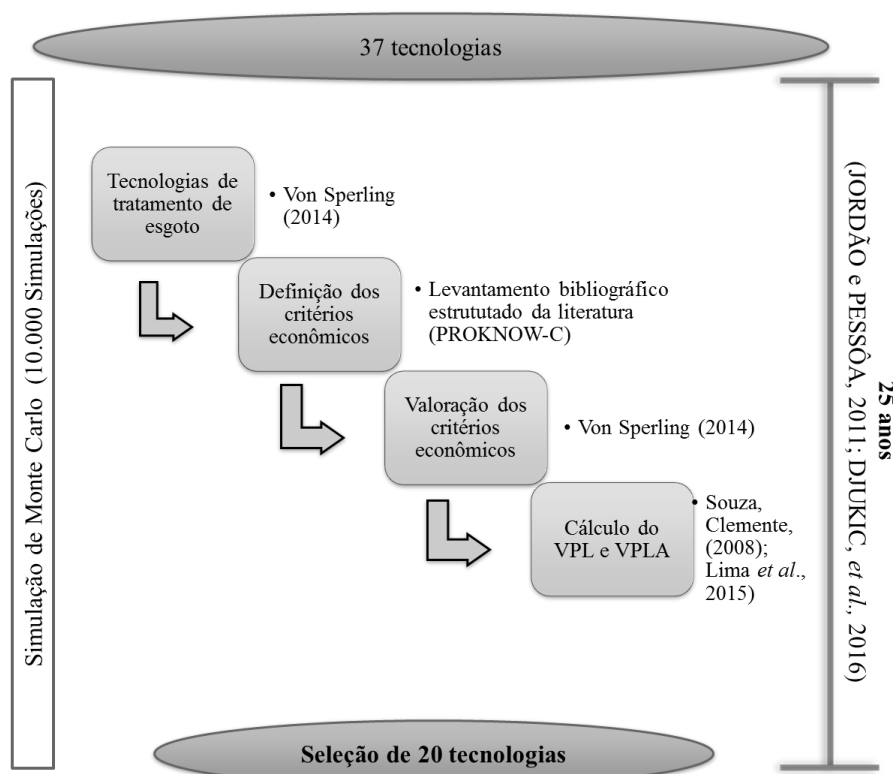


Figura 9- Modelo econômico

Existem vários indicadores econômicos que podem ser utilizados para avaliar o desempenho econômico de um investimento, entre estes está o Valor Presente Líquido (VPL), o Valor Presente Líquido Anualizado (VPLA), o Índice Benefício Custo (IBC), o Retorno Adicional sobre o Investimento (ROIA), a Taxa Interna de Retorno e o Payback (SOUZA e CLEMENTE, 2008; LIMA *et al.*, 2015).

O Valor Presente Líquido (VPL), ou *Net Present Value* é um método robusto de análise de investimento bastante conhecido e utilizado, o qual representa as diferenças nos fluxos de caixa futuros trazidos ao valor presente, descontado o investimento inicial (SOUZA, CLEMENTE, 2008). Sendo o cálculo deste representada na Equação 1.

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

No qual:

CF_0 corresponde ao valor investido;

CF_j ao valor dos benefícios esperados;

N se refere ao tempo de duração;

TMA se refere a taxa de juros (desconto).

O Valor Presente Líquido Anualizado (VPLA) apresenta o valor anual equivalente e requer menor quantidade de ajustes (Equação 2) (LIMA *et al.*,2017).

$$VPLA = VPL \frac{TMA (1+TMA)^N}{(1+TMA)^N - 1} \quad (2)$$

No qual:

VPL corresponde ao Valor Presente Líquido;

TMA ao valor da taxa de juros (Desconto);

N se refere ao tempo de duração.

3.3.2 DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS

Considerando os critérios levantados na literatura (item 2.4.2) é possível observar a heterogeneidade dos indicadores. Para aplicação no modelo, foi realizada a divisão dos critérios nas categorias técnica, ambiental, social e econômica. Apesar disso, esta divisão não é rigorosa, ou mesmo essencial. Pode haver variação nos critérios, dependendo do ponto de vista do avaliador, um critério determinado como técnico pode também ser ambiental, como é o caso do critério qualidade do efluente, por vezes visto nas aplicações encontradas. 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.

Além disso, é essencial observar a quantidade de critérios como medida de simplificação do problema. A maioria dos estudos observados apresenta um número reduzido de critérios, o que é explicado por Gomes (2012) devido ao fato de que alguns métodos operam comparando alternativas, para isso 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.

Portanto, foram observados 68 critérios na literatura, os quais foram divididos em 18 critérios como sendo de primeira ordem e 50 subcritérios, conforme pode ser observado na Figura 10.

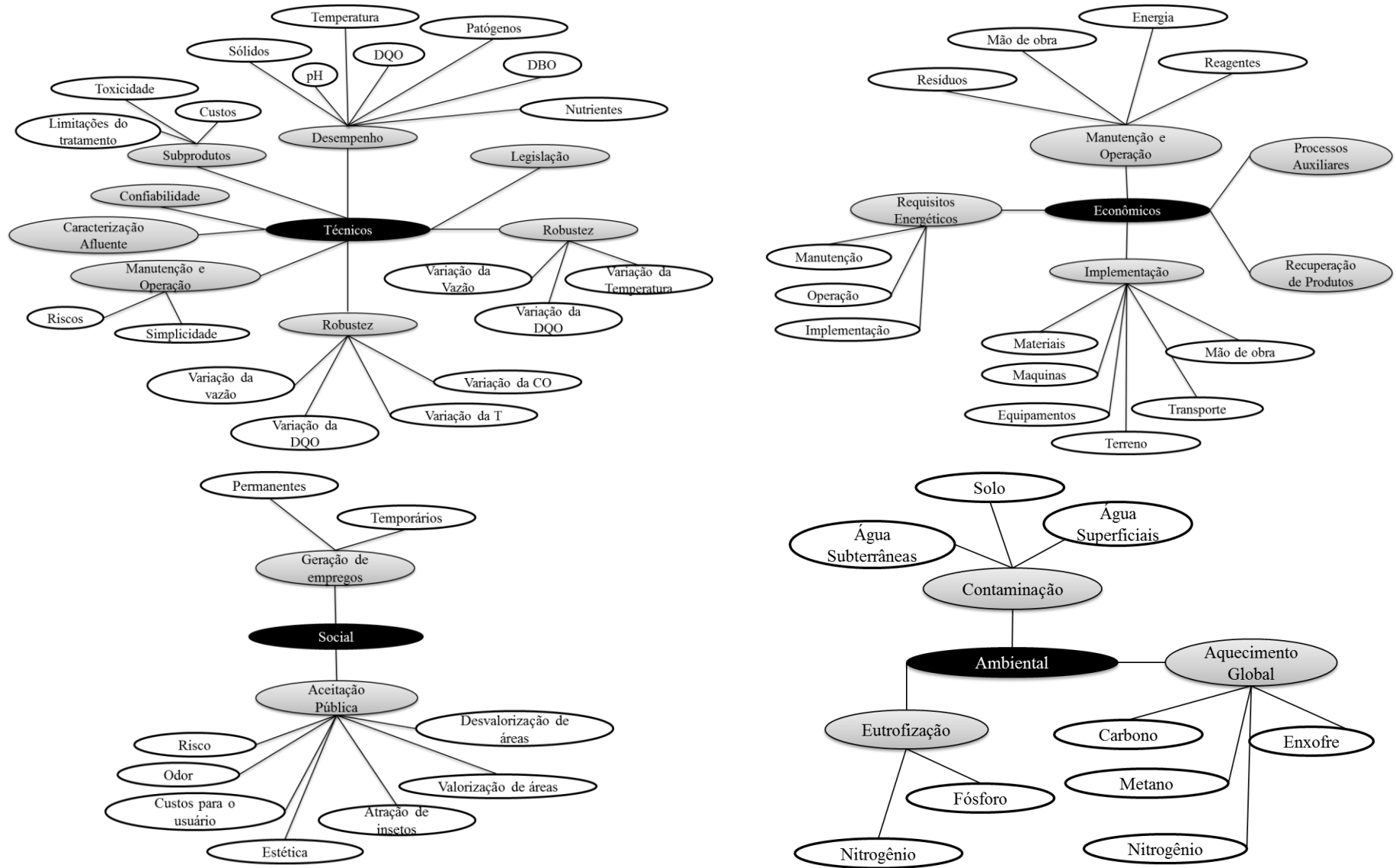


Figura 10- Critérios para seleção da tecnologia de tratamento subdivididos em aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais

Como pode ser observado na Figura 10, é encontrado na literatura internacional um número considerável de trabalhos aplicando as técnicas multicritério como ferramentas para o apoio da tomada de decisão no saneamento. Contudo, são encontrados poucos modelos que abordam o cenário brasileiro, especificamente que abordem as tecnologias usais do Brasil, bem como que considere o maior número de critérios intrínsecos à decisão, considerando os aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais. Normalmente, os modelos encontrados trabalham a problemática de seleção, considerando no máximo 5 tecnologias e alguns poucos critérios. No entanto, nenhum procedimento foi encontrado relacionado à problemática de ordenação nos contextos explorados neste trabalho.

Os critérios foram definidos para cada cenário de acordo com os trabalhos obtidos por meio da 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 como grupo de critérios considerando as características de cada trabalho dentro de cada cenário.

Portanto, para a aplicação do método de Copeland foram determinados dois cenários, sendo o primeiro para pequenas comunidades, definidas pelos decisores com até 5.000 habitantes e com vazão máxima por dia de 500 m^3 , e o segundo cenário para centros urbanos com população acima de 5.000 habitantes e vazão superior a 500 m^3 por dia.

4 MODELO DE TOMADA DE DECISÃO NA SELEÇÃO DOS SISTEMAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

Neste capítulo, estão apresentadas os critérios e alternativas definidas, bem como o modelo final de apoio à tomada de decisão, aplicado a definição estratégica do sistema de tratamento de efluentes sanitários. O modelo foi desenvolvido em duas etapas, sendo a primeira a etapa de avaliação econômica de 37 alternativas, e a segunda avaliação das 20 alternativas economicamente mais viáveis (menor custo), de acordo com as dimensões econômica, social, ambiental e técnica, para dois cenários, conforme esquematização demonstrada na Figura 11.

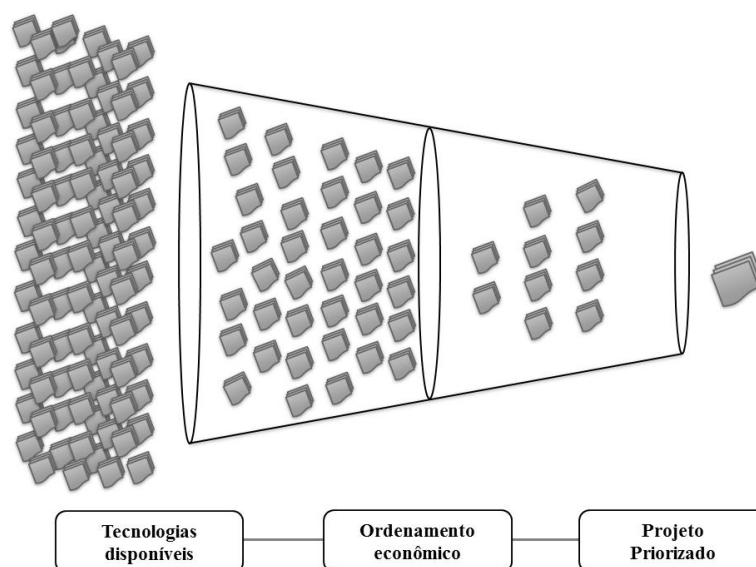


Figura 11- Fases de priorização dos projetos

4.1 PRIORIZAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO

4.1.1 SELEÇÃO DAS ALTERNATIVAS

Segundo Campos (2011), o modelo de priorização tem como objetivo promover a estruturação do processo de decisão por meio da definição dos seus elementos. Neste sentido, foi desenvolvido este modelo de priorização das alternativas potenciais considerando os aspectos econômicos.

De acordo com o levantamento bibliográfico foi possível observar a grande relevância do critério custo. Neste contexto, o estudo de viabilidade econômico foi realizado considerando 37 tecnologias disponíveis definidas por Von Sperling (2014) como principais sistemas de tratamento de esgotos aplicados ao esgoto sanitário no Brasil, a fim de selecionar apenas 20 alternativas economicamente mais competitivas para a segunda avaliação.

Os custos relacionados ao tratamento de esgoto foram divididos em: custos de implantação, custos de manutenção e operação, demanda de energia direta e demanda por área (m²). Para a Simulação de Monte Carlo (SMC) foram utilizados os valores de mínimo, máximo e valor mais provável (Apêndice B) estimados de acordo com Von Sperling (2014).

Para o cálculo do custo total foram então estimados os custos de implantação referentes aos investimentos iniciais, somados aos custos de manutenção e operação, considerando gastos com reagentes e energia comum aos processos de tratamento, mais a energia requerida, principalmente em sistemas aeróbios, além da soma dos custos com área, que foi definida de acordo com o valor requerido de área versus o valor estimado de mercado por metro quadrado. O horizonte de projeto adotado para o estudo de viabilidade foi de 25 anos em valor presente (JORDÃO E PESSOA, 2011; DJUKIC *et al.*, 2016).

Na Tabela 13 são apresentados os resultados da análise econômica e a ordenação das tecnologias de acordo com a ordem econômica, Valor Presente Líquido Anual (VPLA), verificado na simulação.

Tabela 13- Ordenação econômica decrescente das alternativas de tratamento (Continua)

	Tecnologia	VPLA	Coefficiente de variação do VPLA (%)
T32	Lodos ativados convencional + filtração terciária	R\$210852,090,51	5,55
T31	Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P	R\$208471,977,32	5,36
T29	Lodos ativados - Batelada (Aeração prolongada)	R\$180763,841,62	5,43
T30	Lodos ativados convencional com remoção biológica de N	R\$180314,798,17	5,83
T27	Lodos ativados convencional	R\$174275,790,96	5,92
T28	Lodos ativados - Aeração prolongada	R\$171844,165,12	5,56
T36	Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N	R\$142811,360,00	3,95
T35	Biofiltro aerado submerso com nitrificação	R\$140649,419,46	4,00
T33	Filtro biológico percolador de baixa carga	R\$125824,405,66	6,97
T34	Filtro biológico percolador de alta carga	R\$125822,872,87	6,66
T37	Tanque séptico + biodisco	R\$125821,531,68	5,7
T18	Reator UASB + Lodos ativos	R\$119921,988,65	5,56
T19	Reator UASB + Biofiltro aerado submerso	R\$115623,097,51	7,22
T7	Lagoa aerada misturada completa+ lagoa de sedimentação	R\$92829,379,87	8,86
T15	Tanque Séptico + filtro anaeróbio	R\$91190,088,23	7,37

Tabela 13- Ordenação econômica decrescente das alternativas de tratamento (Conclusão)

	Tecnologia	VPLA	Coefficiente de variação do VPLA (%)
T22	Reator UASB + Flotação por ar dissolvido	R\$87208.033,58	8,35
T6	Lagoa aerada – facultative	R\$86291.157,75	9,75
T3	Tratamento primário avançado (A)	R\$73700.424,47	4,01
T25	Reator UASB + Lagoas aeradas mistura completa + lagoa de decantação	R\$72715.934,42	12,94
T24	Reator UASB + lagoas aeradas facultativas	R\$69743.666,92	9,15
T21	Reator UASB + Filtro biológico Percolador de alta carga	R\$67210.998,17	7,95
T16	Tanque Séptico + infiltração	R\$61394.655,48	7,51
T26	Reator UASB + Escoamento superficial	R\$60592.391,87	13,04
T9	Lagoa anaeróbia+ lagoa facultativa+ lagoa de alta taxa	R\$60414.059,29	10,8
T10	Lagoa anaeróbia+ lagoa facultativa+ remoção de algas	R\$58618.628,06	11,95
T8	Lagoa anaeróbia+ lagoa facultativa+ lagoa de maturação	R\$57665.862,59	9,9
T23	Reator UASB + Lagoas de polimento	R\$56748.639,69	9,88
T1	Tratamento primário (tanques septicos)	R\$52958.618,84	6,18
T20	Reator UASB + Filtro anaeróbio	R\$50397.046,03	10,96
T14	Terra úmidas construídas (Wetlands)	R\$49997.518,12	10,14
T13	Escoamento superficial	R\$46115.446,18	10,95
T4	Lagoa facultative	R\$41827.667,77	14,49
T5	Lagoa anaeróbia-lagoa facultative	R\$41793.179,98	16,76
T12	Infiltração rápida	R\$38475.841,53	28,46
T17	Reator UASB*	R\$34552.935,34	11,66
T11	Infiltração lenta	R\$31822.970,76	27,39
T2	Tratamento primário convencional	R\$27809.621,91	5,66

A Figura 12 apresenta o VPLA em ordem decrescente, isto é, o custo anual equivalente estimado com 10.000 interações por meio da SMC para a implantação e manutenção de cada tecnologia avaliada.

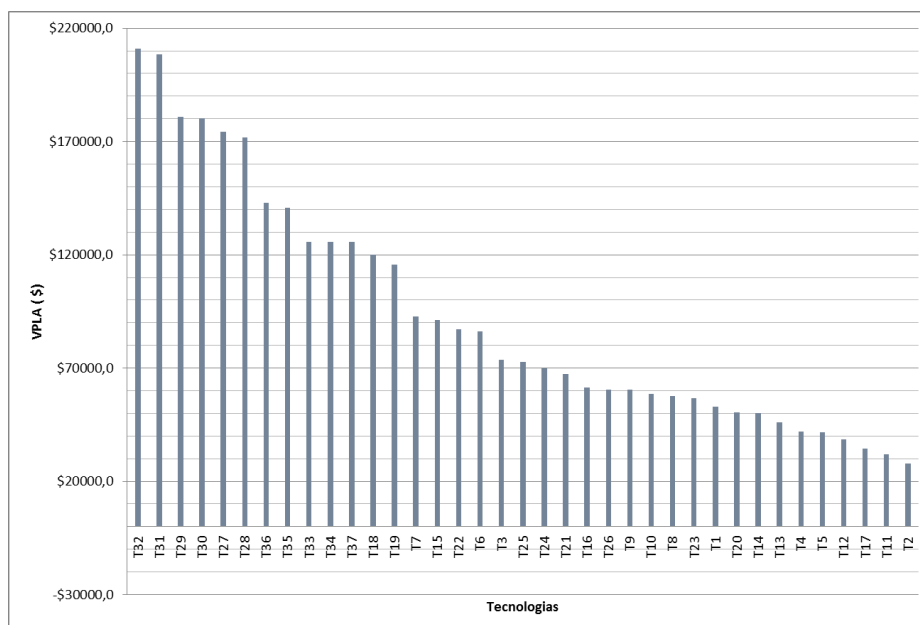


Figura 12- Custo total estimado por unidade de tempo por tecnologia avaliada

As tecnologias que apresentaram menores custos, respectivamente, foram: Tratamento primário convencional (T2), Infiltração lenta (T11), Reator UASB (T17), Infiltração rápida (T12) e Lagoa anaeróbia (T5) seguida de lagoa facultativa (T4). Os valores médios (VPLA) estimados pela SMC dessas tecnologias ficaram compreendidos entre cerca de R\$ 27.809,62 e R\$ 41.793,18.

Os sistemas que apresentaram menor custo são sistemas bastante simples e rudimentares, exceto o reator UASB, que é um sistema de tratamento mais avançado, mas que em contrapartida possuem baixa demanda por área, fato este que provavelmente justifica a posição entre as tecnologias de menores custos. Hunt (2003) em seu trabalho obteve resultados semelhantes, tendo o reator UASB como a tecnologia mais econômica e que também atende aos padrões de lançamentos de efluentes da resolução CONAMA n°430, de 2011 (BRASIL, 2011).

Dentre as opções analisadas, as seis tecnologias que possuem maiores custos por unidade de tempo (VPLA) estimados pela SMC, nessa ordem, no período de 25 anos foram: Lodos ativados convencional com filtração terciária (T32), Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P (T31), Lodos ativados - Batelada (Aeração prolongada) (T29), Lodos ativados convencional com remoção biológica de N (T30), Lodos ativados convencional (T27) e Lodos ativados - Aeração prolongada (T28). Os custos totais médios dessas tecnologias variaram entre R\$ 210.852,09 e R\$ 171.844,17.

Portanto, com base no estudo econômico foram definidas 20 tecnologias como alternativas para o modelo de seleção de tecnologias para pequenas comunidades e centros urbanos as quais são descritas na Tabela 14.

Tabela 14- Alternativas do Modelo

Código		Descrição	Código		Descrição
T3	A1	Tratamento primário avançado (A)	T1	A11	Tratamento primário (tanques sépticos)
T25	A2	Reator UASB + Lagoas aeradas mistura completa + lagoa de decantação	T20	A12	Reator UASB + Filtro anaeróbio
T24	A3	Reator UASB + lagoas aeradas facultativas	T14	A13	Terra úmidas construídas (Wetlands)
T21	A4	Reator UASB + Filtro biológico Percolador de alta carga	T13	A14	Escoamento superficial
T16	A5	Tanque Séptico + infiltração	T4	A15	Lagoa facultative
T26	A6	Reator UASB + Escoamento superficial	T6	A16	Lagoa anaeróbia-lagoa facultative
T9	A7	Lagoa anaeróbia+ lagoa facultativa+ lagoa de alta taxa	T12	A17	Infiltração rápida
T10	A8	Lagoa anaeróbia+ lagoa facultativa+ remoção de algas	T17	A18	Reator UASB
T8	A9	Lagoa anaeróbia+ lagoa facultativa+ lagoa de maturação	T11	A19	Infiltração lenta
T23	A10	Reator UASB + Lagoas de polimento	T2	A20	Tratamento primário convencional

4.1.2 SELEÇÃO DOS CRITÉRIOS

Dos trabalhos utilizando multicritério como ferramenta na seleção da tecnologia de tratamento de esgoto, 6 dos levantados na revisão sistemática da literatura classificaram a aplicação do trabalho direcionada para pequenas comunidades com vazão máxima de 500 m³.dia⁻¹ e população de até 5 mil habitantes. Por outro lado, 6 trabalhos se caracterizavam como aplicações à centros urbanos ou seja com vazão mínima de 500 m³.day⁻¹ e população acima de 5 mil habitantes.

As Tabelas 15 e 16 apresentam os pesos e votos dados para cada critério considerado pelos autores como relevantes para a definição de um sistema de tratamento considerando os diferentes cenários. Esses critérios definidos pelos autores foram reclassificados de acordo com os aspectos econômicos, tecnológico, ambiental e social.

Tabela 15- Critérios para seleção sistema de tratamentos avaliados em pequenas comunidades

Critério \ Artigo		Molinos <i>et al.</i> , (2015)	Molinos <i>et al.</i> , (2014)	Refsgaard (2003)	Kalbar <i>et al.</i> , (2013)	Kalbar <i>et al.</i> , (2012a)	Tan <i>et al.</i> , (2014)	Nº Votos
Econômico	Custo de investimento	0,1237	0,1091					2
	Operação e manutenção	0,1237	0,2156					2
	Custo do ciclo de vida				0,1139	0,1216	0,5600	3
	Área de terreno necessária		0,0166		0,1012	0,1081		3
	Custo por família			0,1357				1
	Necessidade de mão de obra				0,1012	0,1081		2
Técnico	Confiabilidade	0,0447	0,0166		0,0506	0,054		4
	Durabilidade				0,0506	0,054		2
	Replicabilidade				0,1012	0,1081		2
	Flexibilidade				0,0506	0,054		2
	Fácil de atualizar						0,1000	1
	Robustez						0,1200	1
	Complexibilidade	0,0135	0,0561				0,1200	3
Ambiental	Remoção de matéria orgânica e sólidos	0,9800						1
	Remoção de matéria orgânica		0,0310	0,1842			0,1000	3
	Remoção de sólidos suspensos		0,0263					1
	Remoção de Nitrogênio	0,0296	0,0227					2
	Remoção de fósforo	0,0296	0,0263	0,3947				3
	Produção de lodo	0,0609	0,0206					2
	Consumo de energia		0,0187	0,0684				2
	<i>Carbon footprint</i>	0,3127						1
	Eutrofização				0,1012	0,0405		2
	Potencial de recuperação de produtos	0,0222	0,0138	0,0368				3
	Aquecimento global				0,0253	0,027		2
	Comportamentos sustentáveis				0,1012	0,1081		2
	Potencial de recuperação de água	0,0549	0,0200					2
Social	Adaptação local			0,1842				1
	Odor	0,0175	0,1683					2
	Barulho	0,0150	0,0824					2
	Impacto Visual	0,0232	0,0416					2
	Aceitação pública	0,0307	0,1041		0,1012	0,1081		4
	Participação				0,1012	0,1081		2

Tabela 16- Critérios para seleção sistema de tratamentos avaliados em centros urbanos

Nível	Critério \ Artigo	Lee <i>et al.</i> , (2013)	Kalbar <i>et al.</i> , (2013)	Kalbar <i>et al.</i> , (2012a)	Kalbar <i>et al.</i> , (2012b)	Kanimi <i>et al.</i> , (2011)	Zeng <i>et al.</i> , (2007)	Nº Votos
Econômico	Custo de investimento	0,2080				0,1121	0,4058	3
	Operação e manutenção	0,1250				0,1121	0,0670	3
	Custo do ciclo de vida	0,1880	0,0526	0,0625	0,0377			4
	Receita e custo evitado	0,1880						1
	Área de terreno necessária		0,2105	0,2500	0,1698	0,0562	0,1644	5
	Necessidade de mão de obra		0,0263	0,0312	0,0754		0,1052	4
	Custo de eliminação de lodo					0,0562		1
Técnico	Aplicabilidade					0,0204	0,0863	2
	Resiliência a choques hidráulicos	0,1670				0,0181		2
	Resistência a choques de carga orgânica					0,0181		1
	Confiabilidade		0,1052	0,1250	0,1698	0,0174	0,0640	5
	Durabilidade		0,1052	0,1250	0,0754			3
	Replicabilidade		0,0526	0,0625	0,0377			3
	Coordenação com o clima local					0,0174		1
	Coordenação com as instalações locais					0,0174		1
	Flexibilidade		0,1052	0,1250	0,0754	0,0181		4
Complexibilidade					0,0181		1	
Ambiental	Remoção de matéria orgânica					0,0004		1
	Remoção de sólidos suspensos					0,0002		1
	Remoção de Nitrogênio					0,0001	0,0293	2
	Remoção de fósforo					0,0001	0,0293	2
	Efeito da disposição do lodo						0,0491	1
	Produção de lodo					0,1362		1
	Risco					0,1055		1
	Atendimento ao requisito de grau de tratamento					0,1571		1
	Impacto Ambiental					0,1362		1
	Eutrofização		0,2105	0,0625	0,1698			3
	Aquecimento global		0,0526	0,0625	0,0754	0,0095		4
	Comportamentos sustentáveis	0,1250	0,0263	0,0312	0,0377			4
Social	Odor					0,0785		1
	Impacto Visual		0,0263	0,0312	0,0377			3
	Participação		0,0263	0,0312	0,0377			3

O custo do ciclo de vida, confiabilidade, potencial para recuperação de produtos e aceitação foram os critérios que apresentaram maior número de votos para escolha do processo de tratamento em pequenas comunidades. Por outro lado, a área do terreno requerida, flexibilidade, confiabilidade, contribuição para o aquecimento global, aceitação e participação pública foram os critérios que apresentaram maior número de votos para o cenário urbano.

Considerando o método proposto, foram contabilizadas as vitórias que as alternativas têm através da comparação par a par. Portanto, foi utilizado o método Copeland para o cálculo da ordenação final, tendo os autores como decisores. A nomenclatura referente aos decisores é apresentada no Quadro 2, bem como, os agentes de decisão considerados em cada trabalho.

Quadro 2- Nomenclatura referente aos decisores

	Autor	Molinos <i>et al.</i> , (2015)	Molinos <i>et al.</i> , (2014)	Refsgaard (2003)	Kalbar <i>et al.</i> , (2013)	Kalbar <i>et al.</i> , (2012a)	Tan <i>et al.</i> , (2014)
Cidade pequena	Decisor	D1	D2	D3	D4	D5	D6
	Agentes de decisão	Especialista	Especialista	Tomador de decisões, especialista, prefeito	Experiência dos autores	Experiência dos autores	Especialista
	Autor	Lee <i>et al.</i> , (2013)	Kalbar <i>et al.</i> , (2013)	Kalbar <i>et al.</i> , (2012a)	Kalbar <i>et al.</i> , (2012b)	Kanimi <i>et al.</i> , (2011)	Zeng <i>et al.</i> , (2007)
Centro Urbano	Decisor	D7	D4	D5	D8	D9	D10
	Agentes de decisão	Experiência dos autores	Experiência dos autores	Experiência dos autores	Experiência dos autores	Experiência dos autores	Tomadores de decisão

Para o ordenamento dos critérios de preferência foram considerados estes como alternativas de preferência, as quais foram analisadas de acordo com os pesos definidos pelos autores em cada trabalho. Como regra de desempate para critérios/alternativas de mesmo peso foram definidas três regras. Sendo elas: quanto à posição do critério com relação aos demais trabalhos; se este aparecia na lista de fatores essenciais disponíveis em Von Sperling (2014); e por fim, a experiência dos autores deste trabalho.

Portanto, a análise deu-se de acordo com os princípios dos métodos Borda, Condorcet e Copeland, de acordo com os quais, foram elaboradas duas matrizes a partir dos resultados levantados na literatura as quais serão base para uma análise visando à agregação (Tabela 17 e Tabela 18).

Tabela 17- Matriz de avaliação para a agregação com Copeland para pequenas comunidades

Decisores Alternativas	Custo de investimento	Operação e manutenção	Custo do ciclo de vida	Área de terreno necessária	Custo por família	Necessidade de mão-de-obra	Confiabilidade	Durabilidade	Replicabilidade	Flexibilidade	Fácil de atualizar	Robustez	Complexibilidade	Remoção de matéria orgânica	Remoção de sólidos suspensos	Remoção de Nitrogênio	Remoção de fósforo	Produção de lodo	Consumo de energia	Carbon footprint	Eutrofização	Potencial de recuperação de produtos	Aquecimento global	Comportamentos sustentáveis	Potencial de recuperação de água	Adaptação local	Odors	Barulho	Impacto Visual	Aceitação pública	Participação
D1	2°	3°					8°						15°	6°	7°	10°	11°	4°		1°		13°			5°		14°	15°	12°	9°	
D2	3°	1°		16°			15°						6°	8°	9°	11°	10°	12°	14°			17°			13°	2°	5°	7°	4°		
D3					4°									2°			1°		5°			6°			3°						
D4			1°	2°		3°	9°	11°	4°	10°											6°		12°	5°					7°	8°	
D5			1°	2°		3°	9°	11°	4°	10°											8°		12°	5°					6°	7°	
D6			1°								5°	2°	3°	4°																	

Tabela 18- Matriz de avaliação para a agregação com Copeland para Centros Urbanos

Decisores Alternativas	Custo de investimento	Operação e manutenção	Custo do ciclo de vida	Receita e custo evitado	Área de terreno necessária	Necessidade de mão-de-obra	Custo de eliminação de lodo	Aplicabilidade	Resiliência a choques hidráulicos	Resistência a choques de carga orgânica	Confiabilidade	Durabilidade	Replicabilidade	Coordenação com o clima local	Coordenação com as instalações locais	Flexibilidade	Complexibilidade	Remoção de matéria orgânica	Remoção de sólidos suspensos	Remoção de Nitrogênio	Remoção de fósforo	Efeito da disposição do lodo	Produção de lodo	Risco	Requisito de grau de tratamento	Impacto Ambiental	Eutrofização	Aquecimento global	Comportamentos sustentáveis	Odors	Impacto Visual	Participação
D7	1°	6°	2°	3°					4°																							
D4			6°		1°	10°					3°	5°	7°			4°											2°	8°	9°		11°	12°
D5			5°		1°	10°					2°	4°	6°			3°											7°	8°	9°		11°	12°
D8			8°		1°	7°					2°	5°	9°			4°											3°	6°	10°		11°	12°
D9	4°	5°			8°		9°	10°	11°	12°	15°			17°	16°	13°	14°	19°	20°	21°	22°			3°	6°	1°	2°					
D10	1°	5°			2°	3°		4°			6°									8°	9°	7°						18°		7°		

Nesta fase da aplicação do método também foram necessárias às definições de desempate entre as alternativas. Deste modo, definiu-se como regra de pontuação o número de derrotas das alternativas, ou seja, admitiu-se pontuação igual a 1 para a alternativa que contabilizou maior número de vitórias e pontuação igual a 0 para a alternativa com maior número de derrotas, no caso de empate ambas alternativas receberam 0,5.

O peso relativo aos decisores foi considerado igualitário, ou seja, todos os decisores considerados nesta aplicação possuem a mesma importância dentro do processo decisório, tendo peso unitário.

Portanto, as Tabelas 19 e 20 apresentam a configuração da matriz de Condorcet como base para o cálculo e aplicação do método Copeland e também as interações entre as linhas e colunas da matriz que geram a ordenação Copeland.

Tabela 19- Matriz de Condorcet e ordenação Copeland para pequenas comunidades

Alternativas	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15	a16	a17	a18	a19	a20	a21	a22	a23	a24	a25	a26	a27	a28	a29	a30	a31	ΣL
a1	-	0,5	0,0	0,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	22,0
a2	0,5	-	0,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	22,5
a3	1,0	1,0	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	28,5
a4	1,0	0,5	0,0	-	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	20,5
a5	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5
a6	0,5	0,5	0,0	0,0	1,0	-	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,5	0,5	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	17,5
a7	0,5	0,5	0,0	0,5	1,0	1,0	-	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,5	21,5
a8	0,5	0,5	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,5	0,5	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	11,0
a9	0,5	0,5	0,0	0,0	1,0	0,0	0,5	1,0	-	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,5	0,5	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	17,0
a10	0,5	0,5	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	-	1,0	1,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,5	0,5	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	12,0
a11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5
a12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5
a13	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-	0,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	21,0
a14	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	28,0
a15	0,0	0,0	0,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,0	0,0	-	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	15,5
a16	0,0	0,0	0,0	0,5	1,0	0,5	0,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,0	0,5	13,5
a17	0,0	0,0	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,0	0,0	1,0	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	1,0	23,5
a18	0,0	0,0	0,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	-	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,0	0,5	15,0
a19	0,0	0,0	0,0	0,5	1,0	0,5	0,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	-	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	11,5
a20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	5,5
a21	0,5	0,5	0,0	0,0	1,0	0,0	0,5	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,5	0,5	1,0	-	0,0	1,0	0,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,0	0,5	14,0
a22	0,0	0,0	0,5	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	-	1,0	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	1,0	15,0
a23	0,5	0,5	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,5	0,5	1,0	0,0	0,0	-	0,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	10,0
a24	0,5	0,5	0,0	0,0	1,0	0,0	0,5	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,5	0,5	1,0	1,0	0,0	1,0	-	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	16,0
a25	0,0	0,0	0,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	-	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	13,5
a26	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0
a27	0,0	0,0	0,0	0,5	1,0	0,5	0,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,0	0,5	0,5	0,5	1,0	-	1,0	0,5	0,0	0,5	14,5
a28	0,0	0,0	0,0	0,5	1,0	0,5	0,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,0	0,5	0,5	1,0	0,0	-	0,5	0,0	0,5	13,5	
a29	0,0	0,0	0,0	0,5	1,0	0,5	0,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	-	0,0	0,5	14,0	
a30	0,5	0,5	0,0	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	-	0,0	24,0
a31	0,5	0,5	0,0	0,0	1,0	0,0	0,5	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,0	1,0	0,0	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	-	15,0	
ΣC	8,0	7,5	1,5	9,5	28,5	12,5	8,5	19,0	13,0	18,0	28,5	27,5	9,0	2,0	14,5	16,5	6,5	15,0	18,5	24,5	16,0	15,0	20,0	14,0	16,5	26,0	15,5	16,5	16,0	6,0	15,0	
L-C	14,0	15,0	27,0	11,0	-27,0	5,0	13,0	-8,0	4,0	-6,0	-27,0	-25,0	12,0	26,0	1,0	-1,0	7,0	8,5	-3,5	-13,0	-10,5	-1,0	-5,0	-4,0	-0,5	-12,5	-11,5	-2,0	-2,5	8,0	9,0	
Ordenação	4	3	1	7	31	12	5	24	13	22	30	29	6	2	14	17	11	9	20	28	25	16	22	21	15	27	26	18	19	10	8	

Tabela 20- Matriz de Condorcet e ordenação Copeland para centros urbanos

Alternativas	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15	a16	a17	a18	a19	a20	a21	a22	a23	a24	a25	a26	a27	a28	a29	a30	a31	a32	ΣL
a1	-	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	26,5	
a2	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	21,5	
a3	0,0	1,0	-	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	25,5	
a4	0,0	1,0	0,0	-	0,0	0,0	0,5	0,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	8,0	
a5	0,5	1,0	1,0	1,0	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	30,5	
a6	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	-	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	21,0
a7	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	-	0,5	0,5	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,0	
a8	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,5	-	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	14,0	
a9	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,5	0,0	-	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	12,5	
a10	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,0	
a11	0,5	0,5	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	29,0	
a12	0,5	0,5	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	-	1,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	26,0
a13	0,5	0,5	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	-	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	23,5
a14	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	
a15	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	-	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0
a16	0,5	0,5	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	26,5
a17	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	-	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	
a18	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	1,0	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	
a19	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	
a20	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,5	0,5	0,5	-	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	8,5
a21	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,5	0,5	0,5	0,0	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	7,5
a22	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	7,5
a23	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	-	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	12,0	
a24	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	11,0	
a25	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	-	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	14,0	
a26	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,0	-	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	13,0	
a27	0,5	0,5	0,5	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-	1,0	1,0	1,0	1,0	27,0	
a28	0,0	0,5	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,5	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	-	1,0	1,0	1,0	23,0	
a29	0,5	0,5	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	-	1,0	1,0	1,0	23,0
a30	1,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	11,0	
a31	0,5	0,5	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	-	1,0	20,0
a32	0,5	0,5	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	-	19,0
ΣC	5,5	9,5	5,5	23,0	0,5	10,0	22,0	16,0	18,5	24,0	2,0	6,0	7,5	27,0	26,0	3,5	25,0	28,0	29,0	22,5	23,5	19,0	20,0	17,0	18,0	4,0	8,0	9,0	21,0	11,0	12,0		
L-C	21,0	12,0	20,0	-15,0	30,0	11,0	-13,0	-2,0	-6,0	-17,0	27,0	20,0	16,0	-23,0	-21,0	0,5	2,5	-22,0	-26,0	-20,5	-15,0	-16,0	-11,5	-8,0	-6,0	-4,0	9,0	19,0	15,0	2,0	-1,0	8,0	
Ordenação	3	9	5	24	1	10	23	17	20	27	2	4	7	31	29	15	13	28	32	28	25	26	22	21	19	18	11	6	8	14	16	12	

A Tabela 21 apresenta o ordenamento dos 10 primeiros critérios que devem ser priorizados em função dos cenários estabelecidos neste trabalho, com os resultados obtidos por meio do cálculo e aplicação do método Copeland.

Tabela 21- Grupo de critérios para a definição das tecnologias de tratamento

Pequenas comunidades			Centros urbanos		
Critérios	Ordem	Classificação	Critérios	Ordem	Classificação
Custo do ciclo de vida	1	Econômico	Área de terreno necessária	1	Econômico
Remoção de matéria orgânica	2	Ambiental	Confiabilidade	2	Técnico
Operação e manutenção	3	Econômico	Custo de investimento	3	Econômico
Custo de investimento	4	Econômico	Durabilidade	4	Técnico
Confiabilidade	5	Técnico	Custo do ciclo de vida	5	Econômico
Complexibilidade	6	Técnico	Aquecimento global	6	Ambiental
Área de terreno necessária	7	Econômico	Replicabilidade	7	Técnico
Participação	8	Social	Comportamentos sustentáveis	8	Ambiental
Produção de lodo	9	Ambiental	Operação e manutenção	9	Econômico
Aceitação pública	10	Social	Necessidade de mão de obra	10	Econômico

Conforme já esperado, o grupo econômico foi o que apresentou maior número de critérios. Contudo, os demais aspectos também foram englobados, com exceção dos aspectos sociais para definição das tecnologias de tratamento em centros urbanos.

4.1.3 MÉTODO MULTRICRITÉRIO DE APOIO

A fim de identificar a alternativa com melhor desempenho considerando vários critérios e permitir a comparação entre critérios que têm métricas incomparáveis ou imensuráveis foi selecionada a metodologia MCDM (*Multicriteria decision making*).

Neste sentido, optou-se, especificamente, pela utilização do método PROMETHEE II (que gera uma pré-ordem completa e é utilizado para problemáticas de escolha e ordenação), o qual segundo Lee *et al* (2013) é um método de apoio a tomada de decisão que 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 - Academic Version*.

Primeiro, 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 utilizando a metodologia PROKNOW-C, já descrita no item 3.2. Também foram retirados dados do levantamento das características de cada sistema de tratamento realizado por Von Sperling (2014).

Em seguida, foram comparadas as configurações para cada critério de uma maneira *pairwise*. Para cada comparação, uma pontuação de função de preferência foi calculada usando a função de preferência "usual", na qual 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.

A modelagem de preferência para os cenários avaliados foi realizada com base no levantamento da literatura por alternativa. A Tabela 22 apresenta de forma resumida a estruturação dos critérios conforme as regras do PROMETHEE II, bem como dispõe sobre os pesos definidos por cada decisor.

Tabela 22- Modelagem de preferência conforme PROMETHEE II

	Critérios	Min/ Max	Função	Peso
Pequenas comunidades	Custo do ciclo de vida	Minimizar	Usual	0,3391
	Remoção de matéria orgânica	Maximizar	Usual	0,1154
	Operação e manutenção	Minimizar	Usual	0,1246
	Custo de investimento	Minimizar	Usual	0,0802
	Confiabilidade	Maximizar	Usual	0,0607
	Complexibilidade	Minimizar	Usual	0,0608
	Área de terreno necessária	Minimizar	Usual	0,0853
	Produção de lodo	Minimizar	Usual	0,0347
	Aceitação Pública	Minimizar	Usual	0,1165
Centros urbanos	Área de terreno necessária	Minimizar	Usual	0,2597
	Confiabilidade	Maximizar	Usual	0,1469
	Custo de investimento	Minimizar	Usual	0,2216
	Custo do ciclo de vida	Minimizar	Usual	0,1040
	Aquecimento global	Minimizar	Usual	0,0610
	Replicabilidade	Maximizar	Usual	0,0466
	Comportamentos sustentáveis	Maximizar	Usual	0,0672
	Operação e manutenção	Minimizar	Usual	0,0928

5 APLICAÇÃO DO MODELO

O capítulo de resultados está dividido em duas sessões: (i) seleção de tecnologia de tratamento aplicada a pequenas comunidades; e (ii) seleção de tecnologia de tratamento aplicada a centros urbanos.

5.1 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO PARA PEQUENAS COMUNIDADES

Tendo como base o levantamento estruturado da literatura foi possível definir após utilização do método Copeland 10 critérios de seleção. A definição da melhor alternativa se deu pela utilização do software *PROMETHEE Academic*®. Na Tabela 23 são listadas as métricas de desempenho computadas para cada uma das 20 alternativas analisadas de acordo com os critérios de seleção.

A definição dos clusters de critérios é essencial para apoiar a tomada de decisões, uma vez que a classificação das alternativas se baseia em tais elementos, ainda mais considerando que os aspectos envolvidos na seleção da estação de tratamento compõem um problema multidimensional.

A Figura 16 demonstra as dimensões avaliadas pelo modelo bem como a proporção de cada na seleção final das alternativas quando considerados os pesos dados pelos decisores.



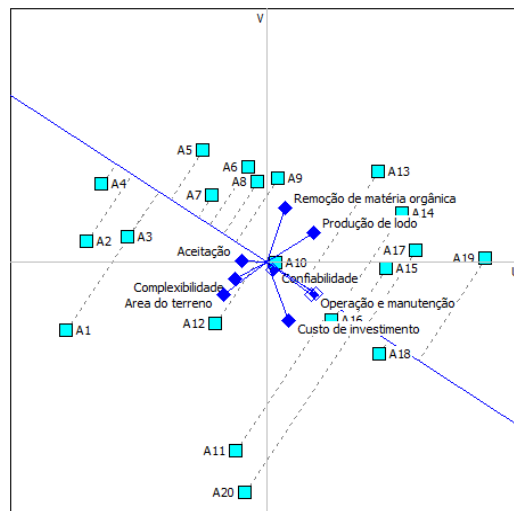
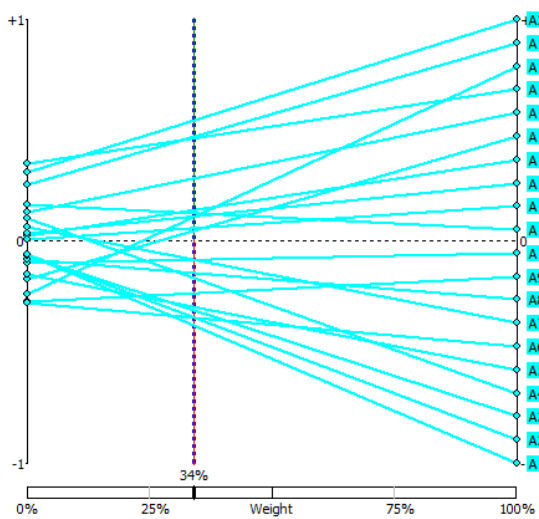
Figura 16- Estrutura para a análise das alternativas no modelo - Pequenas Comunidades

Tabela 23- Input para a análise das alternativas para pequenas comunidades

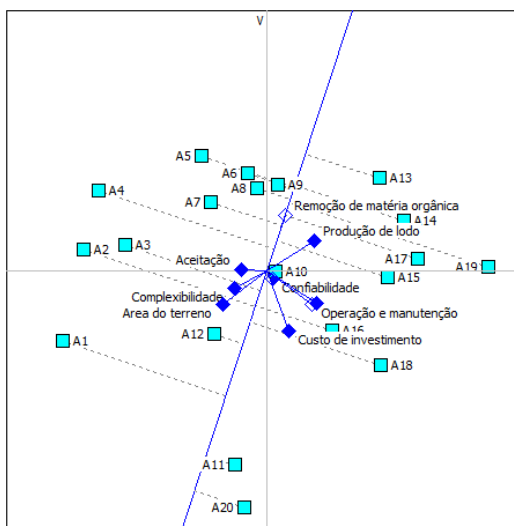
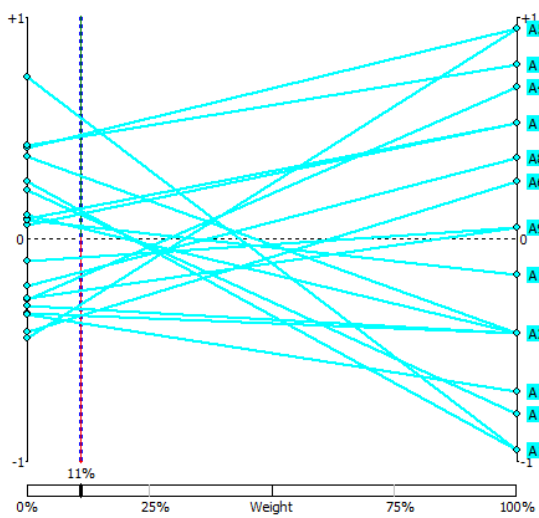
Scenario1	Custo do cid...	Remoção de ...	Operação e ...	Custo de inv...	Confiabilidade	Complexibilid...	Área do terr...	Produção de...	Aceitação
Unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit
Cluster/Group	◆ Ec	◆ Amb	◆ Ec	◆ Ec	◆ Tec	◆ Tec	◆ Ec	◆ Amb	◆ Soc
Preferences									
Min/Max	min	max	min	min	max	min	min	min	min
Weight	0,34	0,11	0,12	0,08	0,06	0,06	0,08	0,03	0,12
Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
Thresholds	absolute	percentage	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
Statistics									
Minimum	27809621,00	30,00	2,00	40,00	3,00	3,00	0,03	0,00	5,00
Maximum	73700424,00	90,00	11,25	80,00	5,00	5,00	30,00	1615,00	15,00
Average	52727804,35	72,28	4,44	59,00	3,85	3,85	3,27	226,50	13,40
Standard Dev.	13221934,56	15,61	2,23	12,43	0,48	0,85	6,32	341,74	2,84
Evaluations									
A1	73700424,00	65,00	11,25	50,00	4,00	3,00	0,05	1615,00	14,00
A2	72715934,00	72,50	7,00	65,00	3,00	3,00	0,20	225,00	5,00
A3	69743666,00	72,50	7,00	65,00	4,00	4,00	0,22	225,00	7,00
A4	67210998,00	80,50	6,25	75,00	4,00	3,00	0,15	290,00	13,00
A5	61394655,00	90,00	4,00	80,00	3,00	4,00	1,25	235,00	15,00
A6	60592391,00	77,50	6,00	70,00	4,00	5,00	2,25	145,00	15,00
A7	60414059,00	76,50	4,75	70,00	4,00	3,00	2,75	107,50	9,00
A8	58618618,00	79,00	4,75	70,00	4,00	3,00	2,45	75,00	15,00
A9	57665862,00	76,50	3,75	75,00	3,00	3,00	4,00	107,50	15,00
A10	56748639,00	76,50	5,75	55,00	5,00	5,00	2,00	200,00	15,00
A11	52958618,00	30,00	2,00	40,00	4,00	3,00	0,04	235,00	15,00
A12	50397046,00	75,00	4,50	57,50	4,00	3,00	0,10	225,00	15,00
A13	49997518,00	80,00	3,25	65,00	4,00	5,00	4,00	0,00	14,00
A14	46115446,00	80,00	3,00	60,00	4,00	5,00	2,75	0,00	15,00
A15	41827667,00	72,50	3,00	60,00	4,00	5,00	3,00	62,50	15,00
A16	41793179,00	72,50	3,00	52,50	4,00	5,00	2,10	107,50	13,00
A17	38475841,00	86,50	2,50	50,00	4,00	4,00	3,00	0,00	14,00
A18	34552935,00	62,50	3,00	40,00	3,00	4,00	5,01	145,00	15,00
A19	31822970,00	90,00	2,00	40,00	4,00	4,00	30,00	0,00	15,00
A20	27809621,00	30,00	2,00	40,00	4,00	3,00	0,03	530,00	14,00

A utilização dos aspectos econômicos para definição das tecnologias de tratamento tem sido amplamente empregado na avaliação de diferentes sistemas (LUNDIN *et al.*, 1999; OLIVEIRA e VON SPERLING, 2008; MOLINOS *et al.*, 2015), no entanto, nos últimos anos um elevado número de autores tem chamado a atenção para a necessidade de que o conceito de sustentabilidade seja integrado na avaliação das tecnologias de tratamento de resíduos sanitários (KALBAR *et al.*, 2013; MOLINOS *et al.*, 2014; MOLINOS *et al.*, 2015). Embora desafiadora a incorporação de aspectos de sustentabilidade no processo de tomada de decisão é de extrema relevância e um diferencial para este modelo de seleção.

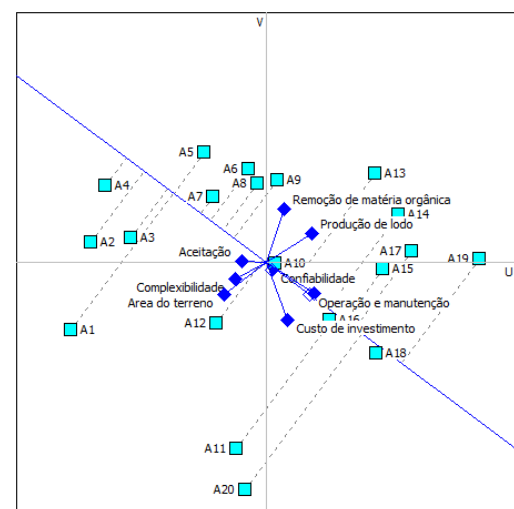
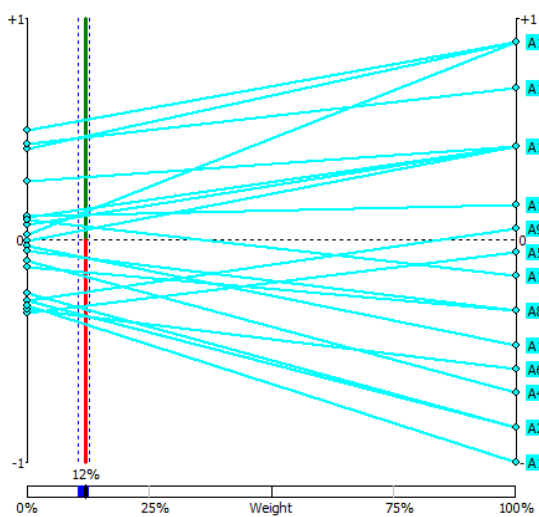
A Figura 17 apresenta a distribuição das características individuais das alternativas avaliadas segundo cada critério de avaliação. Ao passo que a Figura 18 mostra o desempenho das tecnologias, conforme o valor dos fluxos calculados pelo PROMETHEE II, seguindo da melhor para a pior alternativa considerando os mesmos pesos para todos os critérios.



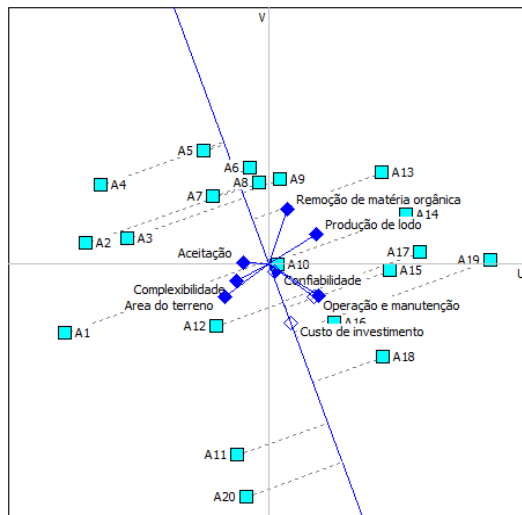
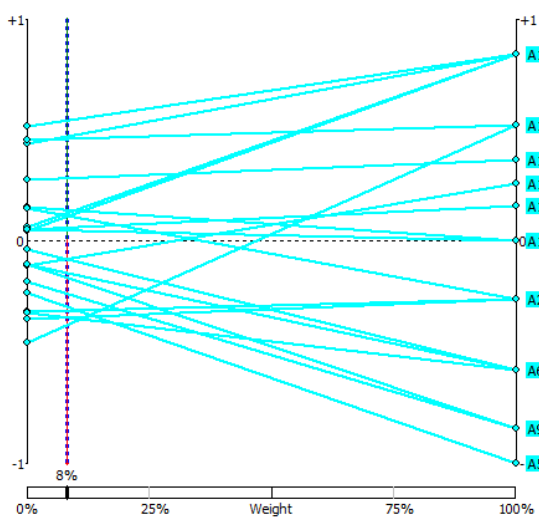
(a)



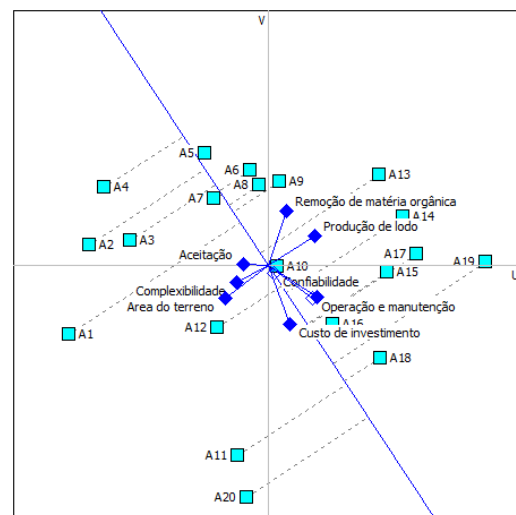
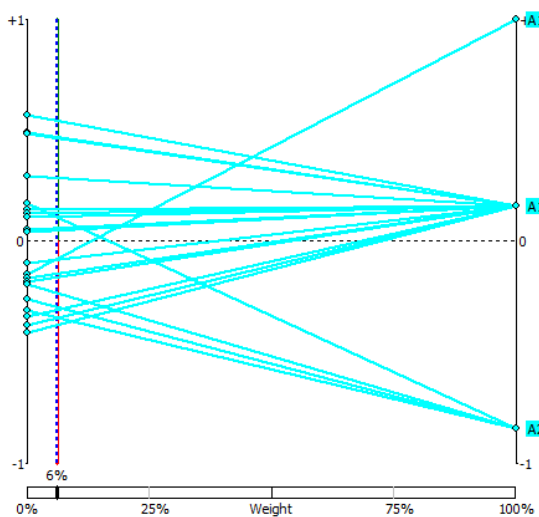
(b)



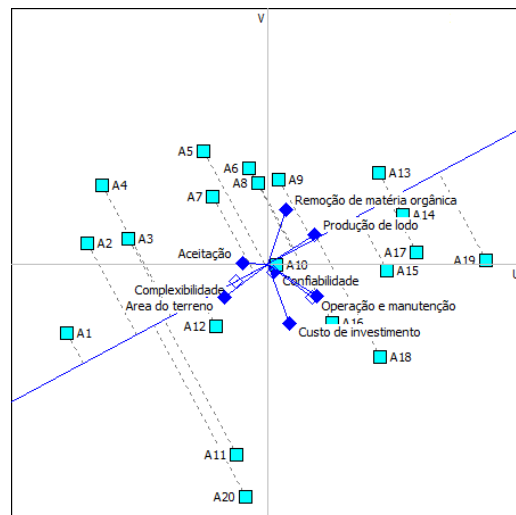
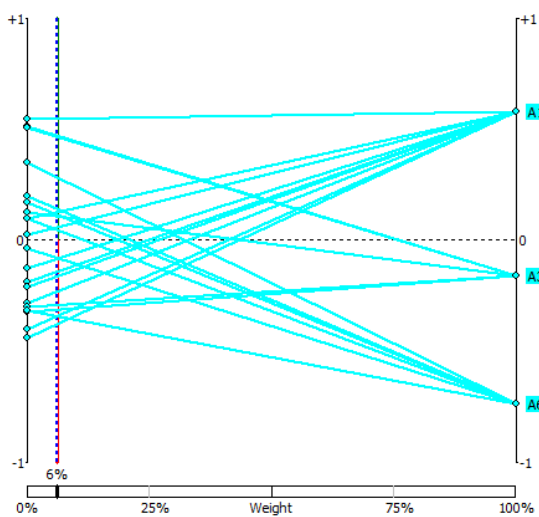
(c)



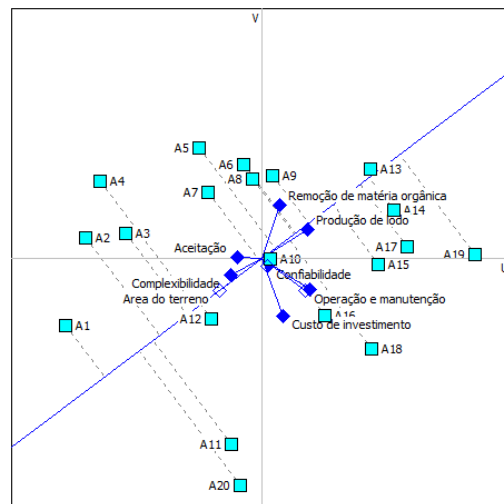
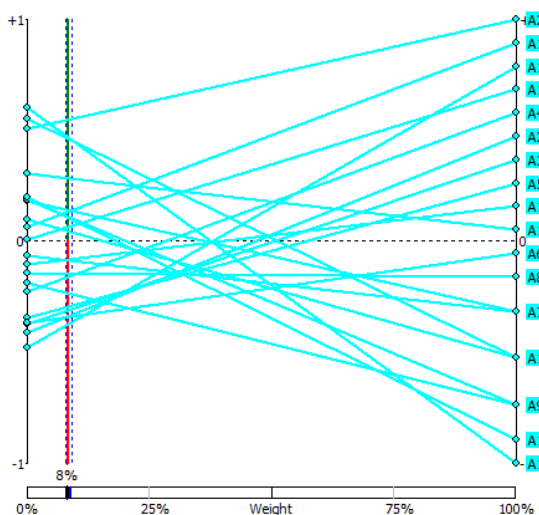
(d)



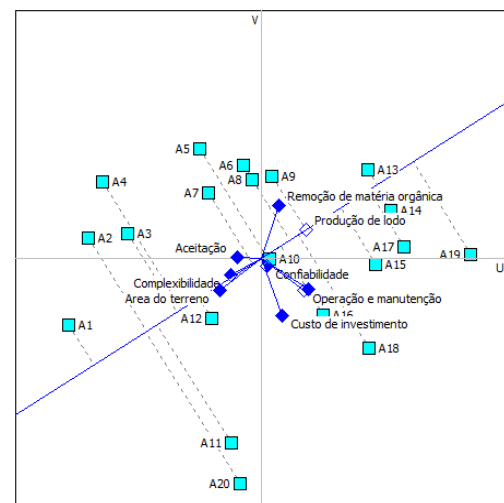
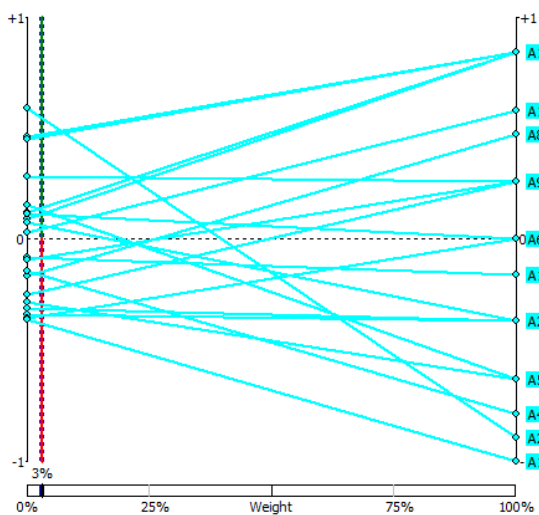
(e)



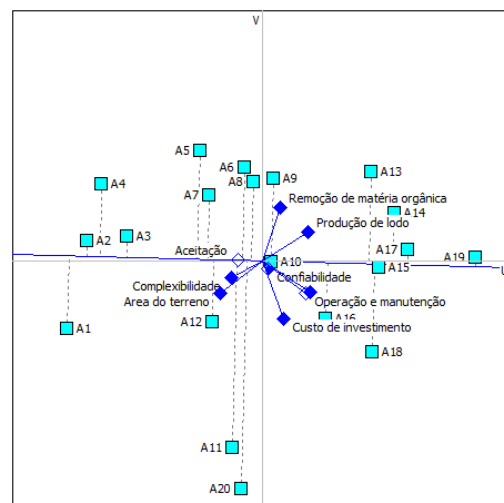
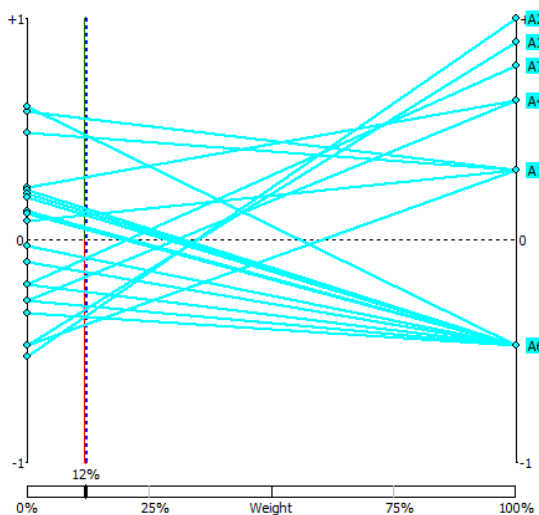
(f)



(g)



(h)



(i)

Figura 17- Distribuição das características das alternativas segundo cada critério de avaliação: (a) Custo do ciclo de vida; (b) Remoção de matéria orgânica; (c) operação e manutenção; (d) Custo de investimento; (e) Confiabilidade; (f) Complexidade; (g) Área do terreno; (h) Produção de lodo; e (i) Aceitação.

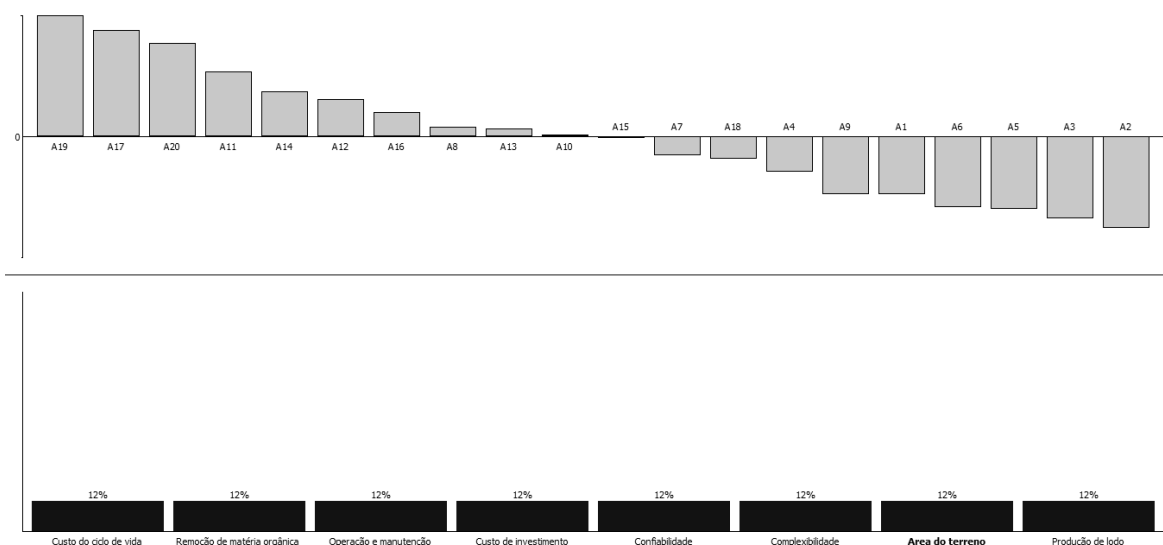


Figura 18- Fluxos de superação por alternativa com critérios com mesmo peso

De acordo com a classificação fornecida pelo método multicritério PROMETHEE II foi possível verificar que a alternativa que apresentou melhor classificação considerando os critérios obtiveram mesmo pesos foi à alternativa A19 (Infiltração lenta). Já a alternativa com pior desempenho considerando os critérios avaliados foi à alternativa A2 (Reator UASB seguido de lagoas aeradas mistura completa e lagoa de decantação).

Admitindo os trabalhos observados na literatura como agentes da decisão foram definidos pesos para cada grupo de critério. O ranqueamento das alternativas de acordo com os diferentes pesos é apresentado na Figura 19.

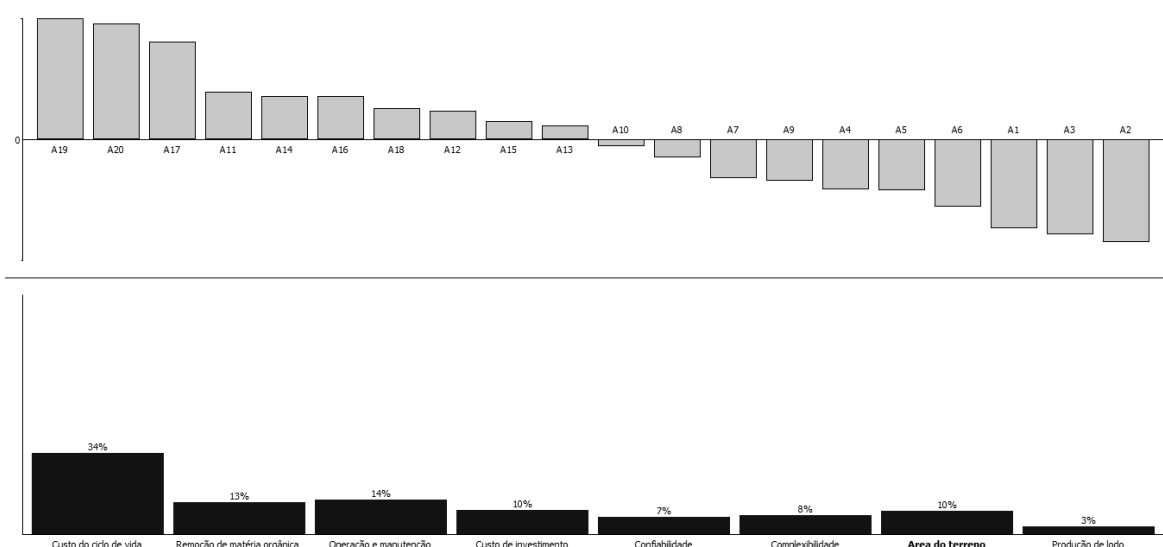


Figura 19- Fluxos de superação por alternativa considerando diferentes pesos entre os critérios

Notou-se que embora considerados diferentes pesos para os critérios de seleção a maioria das alternativas mantiveram suas posições. Sendo as 3 melhores alternativas e também as 3 com as mais baixas posições na hierarquia, as mesmas considerando ou não diferentes pesos para os critérios avaliados (Tabela 24).

Tabela 24- Hierarquia das alternativas para pequenas comunidades

Hierarquia	Desconsiderando Peso	Hierarquia	Considerando Peso	Hierarquia	Restrição Legislação
1°	A19	1°	A19	-	A1
2°	A17	2°	A20	-	A11
3°	A20	3°	A17	-	A20
4°	A11	4°	A11	1°	A19
5°	A14	5°	A14	2°	A17
6°	A12	6°	A16	3°	A16
7°	A16	7°	A18	4°	A14
8°	A8	8°	A12	5°	A18
9°	A13	9°	A15	6°	A13
10°	A10	10°	A13	7°	A12
11°	A15	11°	A10	8°	A15
12°	A7	12°	A8	9°	A10
13°	A18	13°	A7	10°	A7
14°	A4	14°	A9	11°	A8
15°	A9	15°	A4	12°	A4
16°	A1	16°	A5	13°	A9
17°	A6	17°	A6	14°	A5
18°	A5	18°	A1	15°	A3
19°	A3	19°	A3	16°	A6
20°	A2	20°	A2	17°	A2

Considerando que o modelo é genérico e não necessariamente visa o atendimento direto à legislação foi conduzido apenas neste momento, o levantamento da classificação das alternativas quanto ao atendimento dos padrões de lançamento determinados na legislação do estado do Paraná, ou seja, foram considerados os dados definidos pela Resolução 001/07 SEMA de 23/01/2007 (DBO: até 90 mg.L⁻¹; DQO: até 225 mg.L⁻¹).

As alternativas foram, portanto, reclassificadas considerando apenas as que atendem a ambos os padrões de qualidade definidos no estado do Paraná (Apêndice D). Deste modo, à alternativa A19 (Infiltração lenta), A17 (Infiltração rápida) e em terceira posição na hierarquização a alternativa A16 (Lagoa anaeróbia-lagoa facultative) passaram a ser as alternativas entre as analisadas que se aproximaram mais aos interesses dos decisores para utilização no tratamento de esgotos do tipo domésticos em pequenas comunidades rurais. Resultado que condiz com o observado por Molinos *et al.*, (2015). Os autores observaram que tecnologias mais extensas, as zonas húmidas construídas e os sistemas de lagoas eram as

alternativas preferidas para as pequenas comunidades. Hunt (2013) também observou vantagens da utilização dos sistemas de disposição no solo. Entretanto, a autora reforça a importância de que esses sejam incentivados no Brasil uma vez que ainda são pouco difundidos e efetivamente utilizados.

Essa análise sob os aspectos restritivos da legislação é bastante relevante uma vez que ela limita a seleção final as alternativas que atendam à legislação. Além disso, essa análise pode assumir caráter ainda mais restritivo dependendo dos objetivos dos decisores, da localidade, cidade, estado, país, região, características de desenvolvimento, nível econômico, social e de compromisso com o meio ambiente, por este motivo, esta análise foi conduzida depois da seleção das principais tecnologias, contudo ela pode ser conduzida na segunda etapa após o estudo econômico.

Segundo Campos (2011), a extensão gráfica GAIA possibilita a análise comparativa entre a influência do peso dos atributos sobre os resultados de desempenho das tecnologias. Portanto, é apresentada a Figura 20 a fim de proporcionar de forma mais detalhada a visualização da distribuição das alternativas considerando os critérios preconizados para a seleção das tecnologias de tratamento em pequenas comunidades.

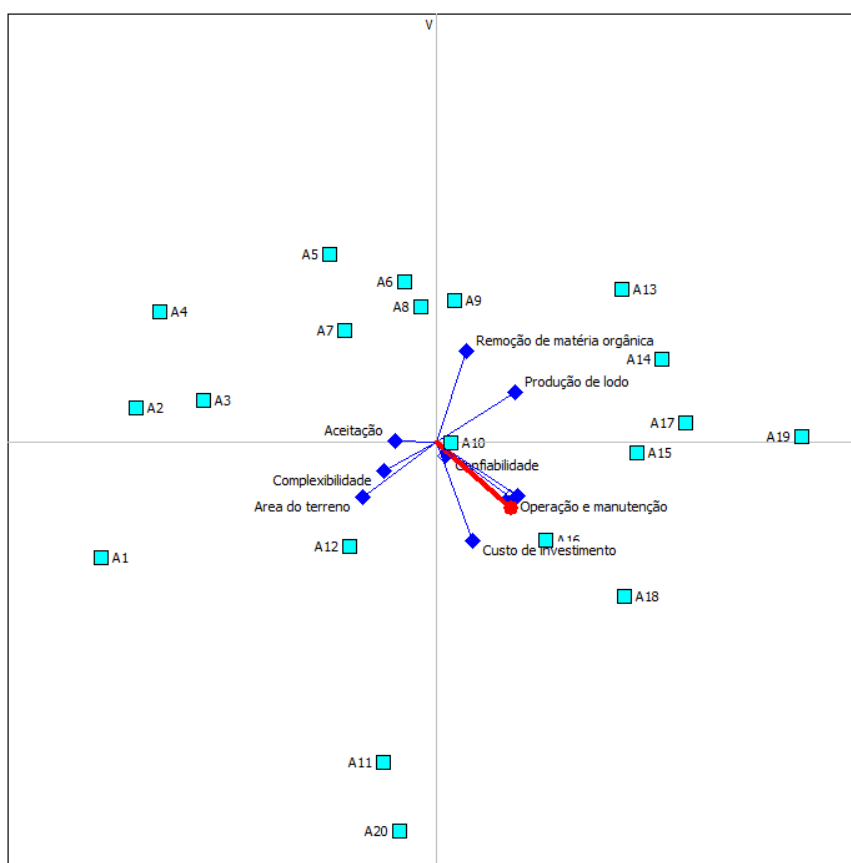


Figura 20- GAIA para pequenas comunidades

É possível verificar pela análise do gráfico que as tecnologias mais dispersas entre si são A1, A11, A20. O que indica maior diferença entre as propriedades das alternativas. O que pode ser justificado principalmente pelas características de cada um desses sistemas, uma vez que a alternativa A1 é o tratamento primário avançado, a A11 é tratamento primário por tanques sépticos e a A20 constitui o tratamento primário convencional. As três alternativas são as que apresentam menor desempenho quanto à qualidade final do efluente, especialmente, quanto à remoção de matéria orgânica, a qual era um dos critérios avaliados.

Quanto à posição dos critérios pode-se observar que o critério confiabilidade, operação e manutenção e também custo de investimento apresentaram mesma direção da reta vermelha, o que demonstra similaridade com a linha de preferência dos decisores considerados, ao passo que os demais critérios apresentaram outros direcionamentos.

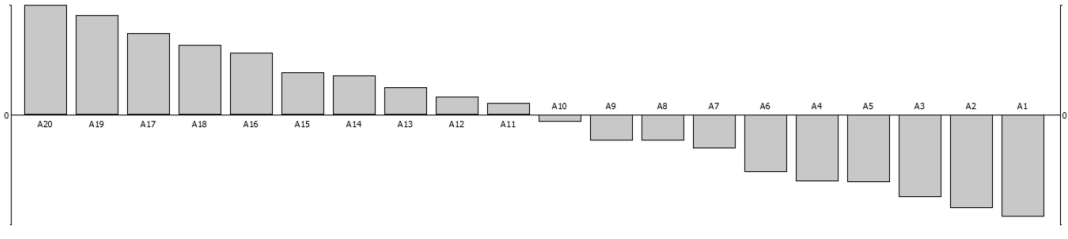
Além disso, foi realizada a análise de sensibilidade de escores de preferência de critérios, a fim de verificar o quanto sensíveis são as ordenações diante de variações nos valores de entrada. Foram utilizados os escores de preferência para representar a verdadeira importância de diferentes critérios. Segundo Lee *et al.*, (2013), a pontuação por um tomador de decisão provavelmente melhorará quando o tomador de decisões entender a sensibilidade dos rankings de configuração a esses escores.

Essa análise foi realizada por meio da variação sistemática dos escores de preferência, no qual cada critério teve seu peso dobrado mantendo constantes os demais, para avaliar a robustez do modelo, conforme Tabela 25.

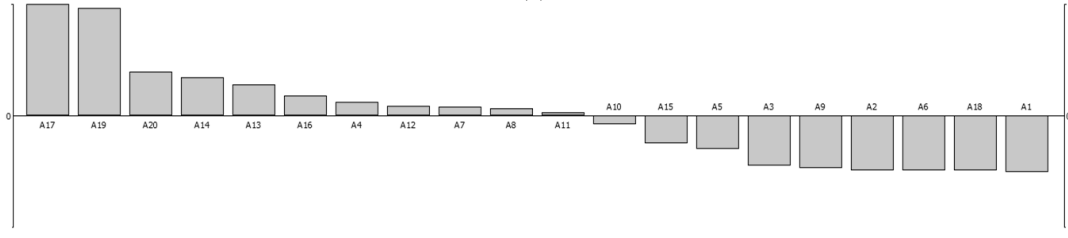
Tabela 25- Análise de Sensibilidade: Pequenas comunidades

	Critérios	Decisores	Análise de sensibilidade								
Pequenas comunidades	Custo do ciclo de vida	0,3391	0,6782	0,0960	0,0940	0,1050	0,1100	0,1100	0,1040	0,1160	0,0960
	Remoção de matéria orgânica	0,1154	0,0400	0,2308	0,0940	0,1050	0,1100	0,1100	0,1040	0,1160	0,0960
	Operação e manutenção	0,1246	0,0400	0,0960	0,2492	0,1050	0,1100	0,1100	0,1040	0,1160	0,0960
	Custo de investimento	0,0802	0,0400	0,0960	0,0940	0,1604	0,1100	0,1100	0,1040	0,1160	0,0960
	Confiabilidade	0,0607	0,0400	0,0960	0,0940	0,1050	0,1214	0,1100	0,1040	0,1160	0,0960
	Complexibilidade	0,0608	0,0400	0,0960	0,0940	0,1050	0,1100	0,1216	0,1040	0,1160	0,0960
	Área de terreno necessária	0,0853	0,0400	0,0960	0,0940	0,1050	0,1100	0,1100	0,1706	0,1160	0,0960
	Produção de lodo	0,0347	0,0400	0,0960	0,0940	0,1050	0,1100	0,1100	0,1040	0,0694	0,0960
	Aceitação Pública	0,1165	0,0400	0,0960	0,0940	0,1050	0,1100	0,1100	0,1040	0,1160	0,2330

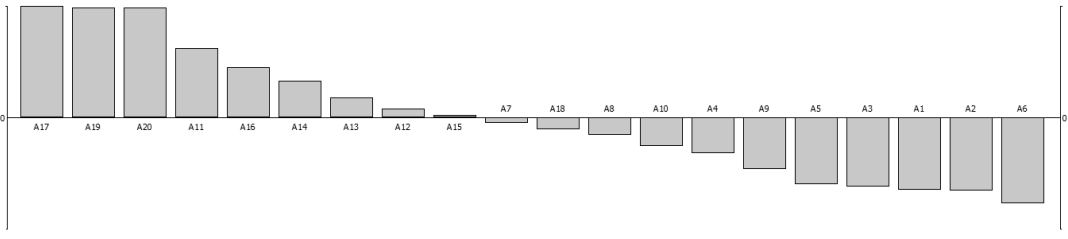
Na Figura 21 são apresentados os fluxos de superação por alternativa considerando as variações nos critérios, definidas na análise de sensibilidade.



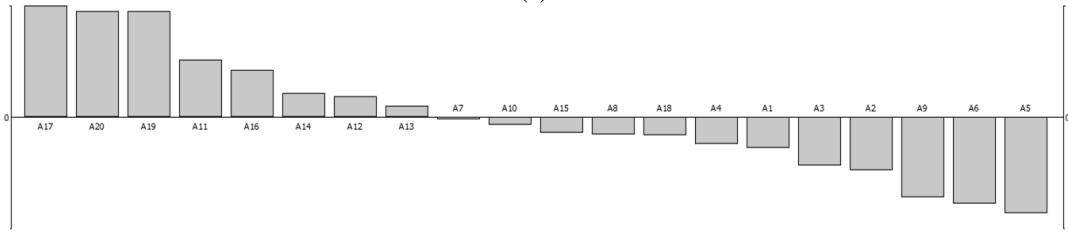
(a)



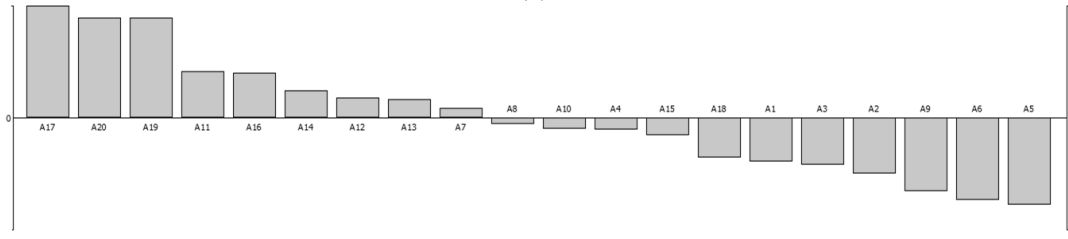
(b)



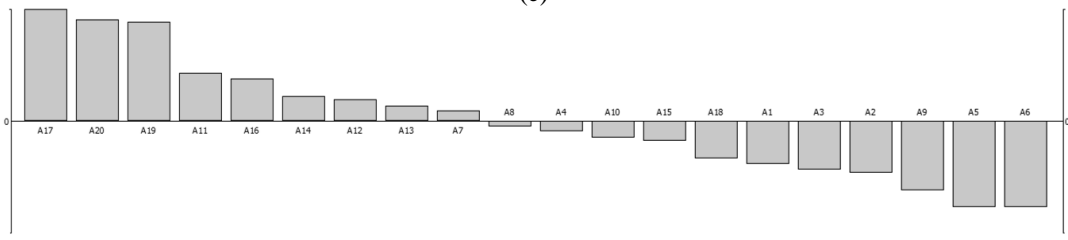
(c)



(d)



(e)



(f)

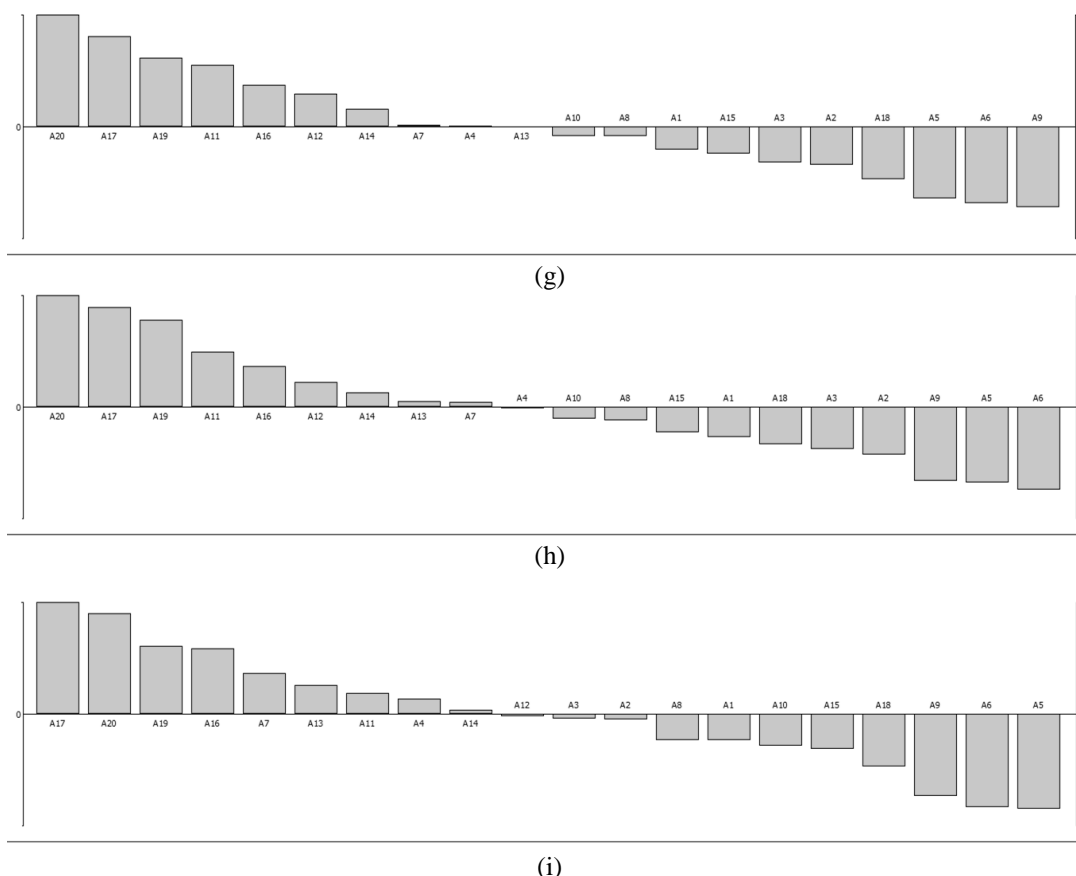


Figura 21- Análise de sensibilidade para critério de avaliação com o dobro do peso: Custo do ciclo de vida (a); Remoção de matéria orgânica (b); Operação e manutenção (c); Custo de investimento (d); Confiabilidade (e); Complexidade (f); Área do terreno (g); Produção de lodo (H); e Aceitação (i).

As alterações nos escores de preferência praticamente não afetaram a hierarquização. As alternativas 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, como se os pesos ainda fossem iguais.

5.2 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO PARA CENTROS URBANOS

Foram mantidos os critérios: custo do ciclo de vida, operação e manutenção, custo de investimento, confiabilidade e área do terreno e foram adicionados os critérios replicabilidade, aquecimento global e comportamentos sustentáveis. Os dados de entrada do modelo referentes aos critérios priorizados para a definição do sistema de tratamento em centros urbanos são exibidos na Tabela 26.

Tabela 26- Input para a análise das alternativas para Centros Urbanos

Scenario1	Custo do cid...	Aquecimento...	Operação e ...	Custo de inv...	Confabilidade	Replicabilidade	Área do terr...	Comportame...
Unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit
Cluster/Group	◆ Ec	◆ Amb	◆ Ec	◆ Ec	◆ Tec	◆ Tec	◆ Ec	◆ Amb
Preferences								
Min/Max	min	min	min	min	max	min	min	max
Weight	0,10	0,06	0,09	0,22	0,15	0,05	0,26	0,07
Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
Statistics								
Minimum	27809621,00	-1,00	2,00	40,00	3,00	3,00	0,03	14,50
Maximum	73700424,00	4,00	11,25	80,00	5,00	5,00	30,00	120,00
Average	52727804,35	1,60	4,44	59,00	3,85	3,85	3,27	37,79
Standard Dev.	13221934,56	1,24	2,23	12,43	0,48	0,85	6,32	29,94
Evaluations								
A1	73700424,00	1,00	11,25	50,00	4,00	3,00	0,05	32,50
A2	72715934,00	4,00	7,00	65,00	3,00	3,00	0,20	14,50
A3	69743666,00	3,00	7,00	65,00	4,00	4,00	0,22	14,50
A4	67210998,00	2,00	6,25	75,00	4,00	3,00	0,15	26,83
A5	61394655,00	1,00	4,00	80,00	3,00	4,00	1,25	45,00
A6	60592391,00	2,00	6,00	70,00	4,00	5,00	2,25	25,83
A7	60414059,00	3,00	4,75	70,00	4,00	3,00	2,75	19,13
A8	58618618,00	2,00	4,75	70,00	4,00	3,00	2,45	26,33
A9	57665862,00	3,00	3,75	75,00	3,00	3,00	4,00	19,13
A10	56748639,00	2,00	5,75	55,00	5,00	5,00	2,00	25,50
A11	52958618,00	1,00	2,00	40,00	4,00	3,00	0,04	15,00
A12	50397046,00	3,00	4,50	57,50	4,00	3,00	0,10	18,75
A13	49997518,00	-1,00	3,25	65,00	4,00	5,00	4,00	120,00
A14	46115446,00	0,00	3,00	60,00	4,00	5,00	2,75	80,00
A15	41827667,00	1,00	3,00	60,00	4,00	5,00	3,00	36,25
A16	41793179,00	2,00	3,00	52,50	4,00	5,00	2,10	24,17
A17	38475841,00	0,00	2,50	50,00	4,00	4,00	3,00	86,50
A18	34552935,00	2,00	3,00	40,00	3,00	4,00	5,01	20,83
A19	31822970,00	0,00	2,00	40,00	4,00	4,00	30,00	90,00
A20	27809621,00	1,00	2,00	40,00	4,00	3,00	0,03	15,00

Na Figura 22 é apresentada a distribuição dos critérios em clusters e na Figura 23 são demonstrados os valores dos critérios para as alternativas avaliadas para aplicações em centros urbanos.

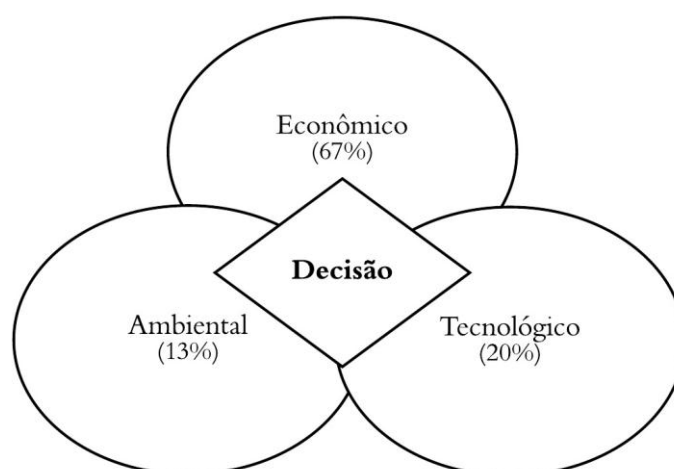
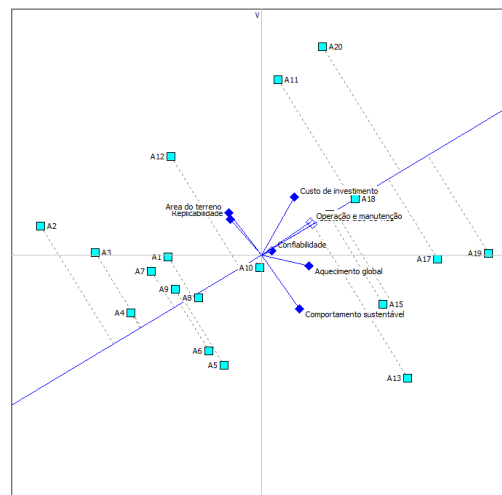
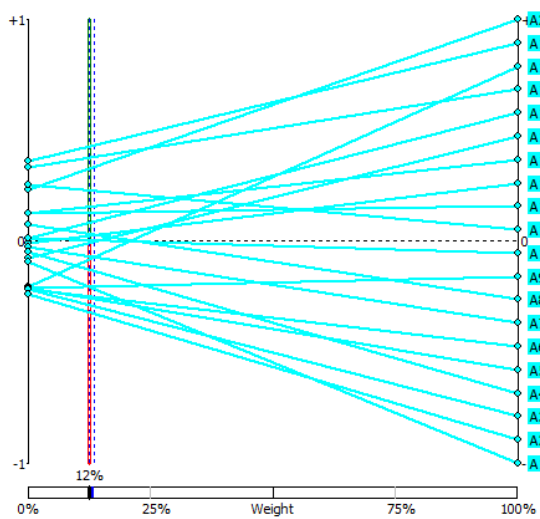
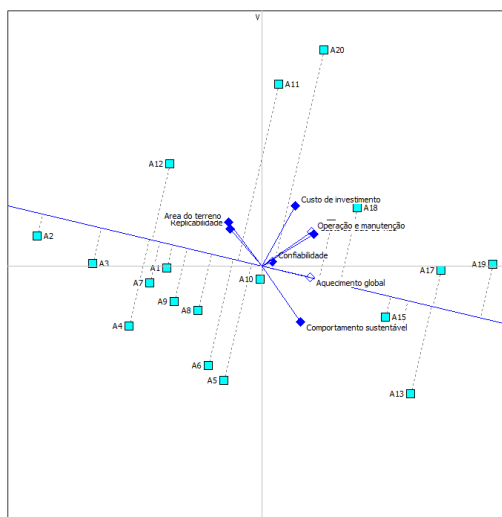
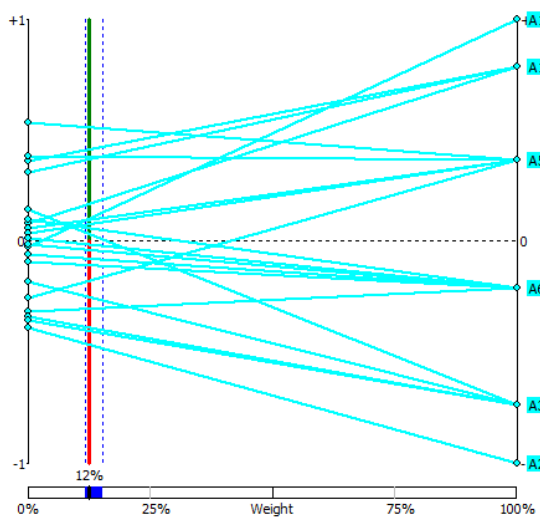


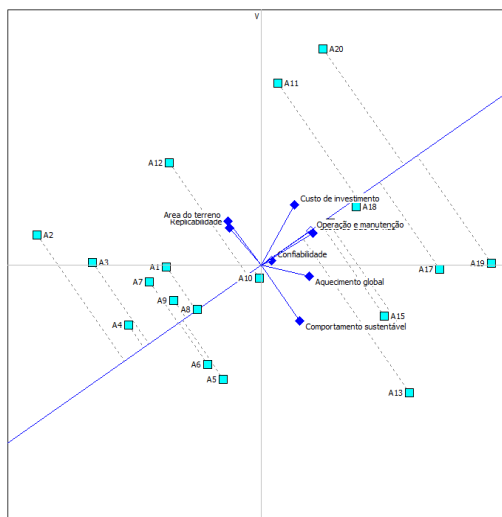
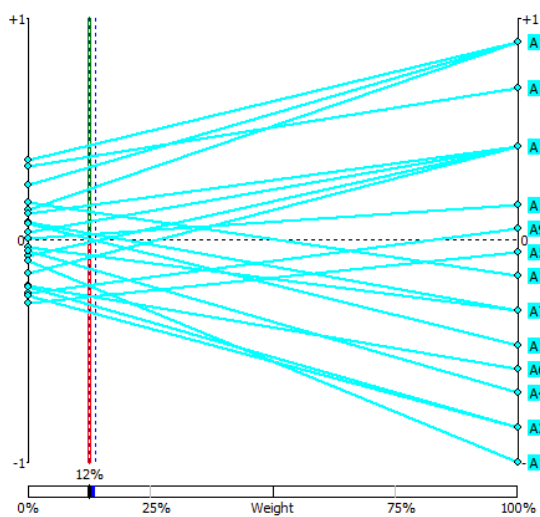
Figura 22- Estrutura para a análise das alternativas no modelo - Centros Urbanos



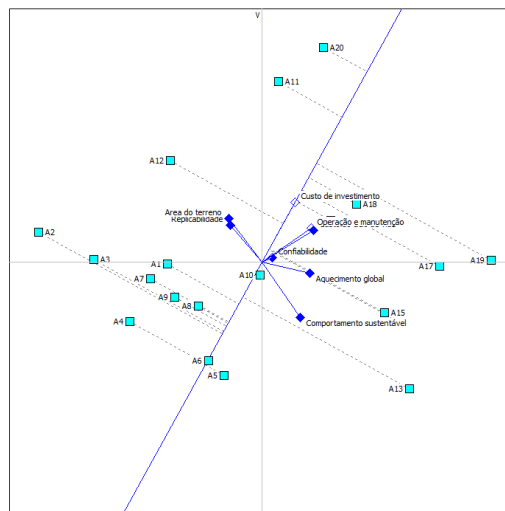
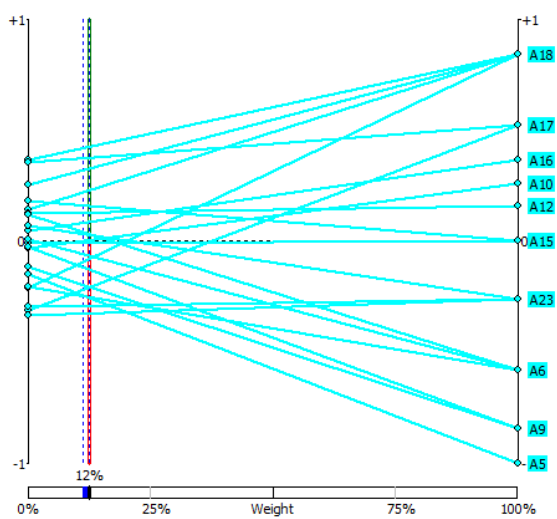
(a)



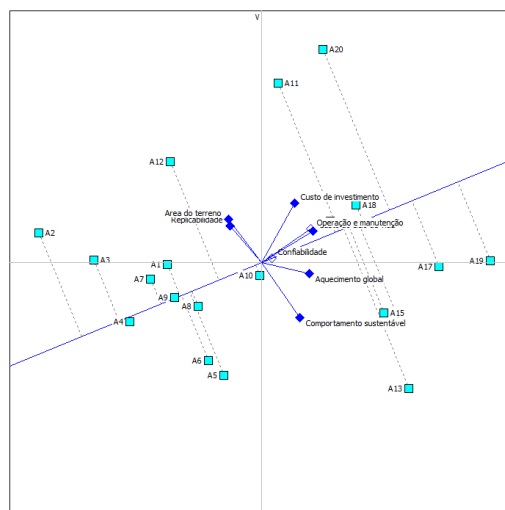
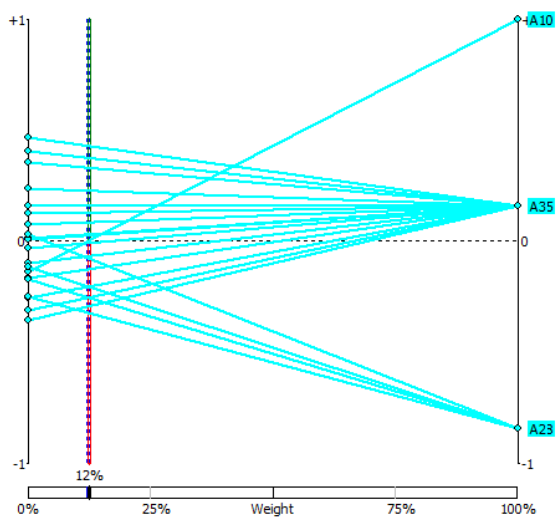
(b)



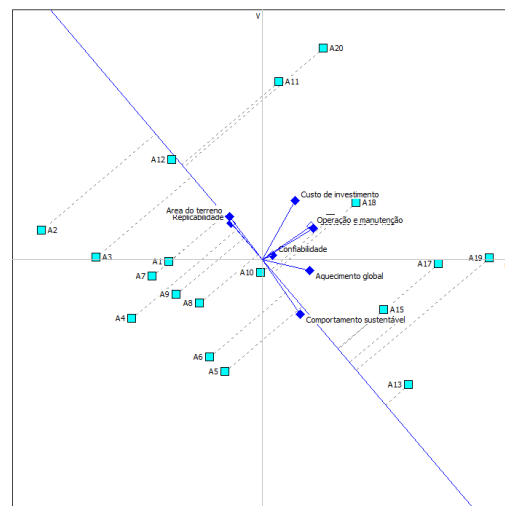
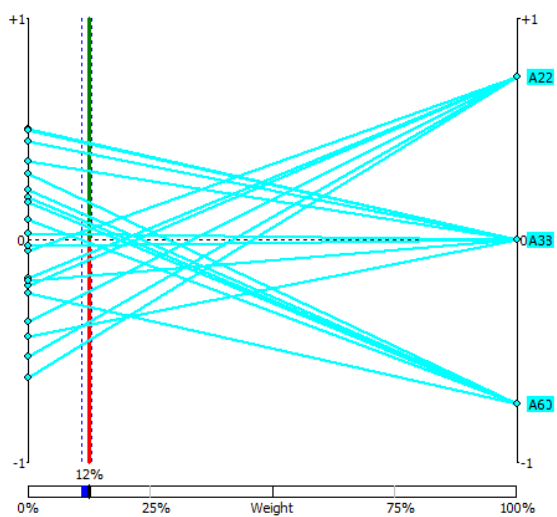
(c)



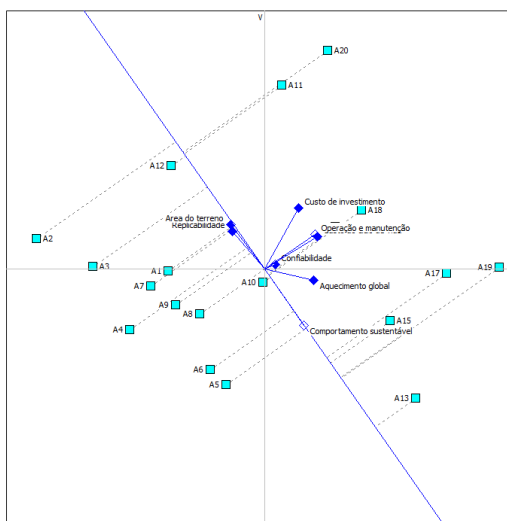
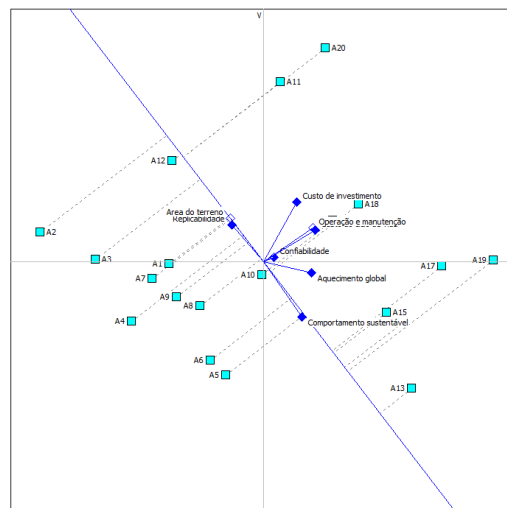
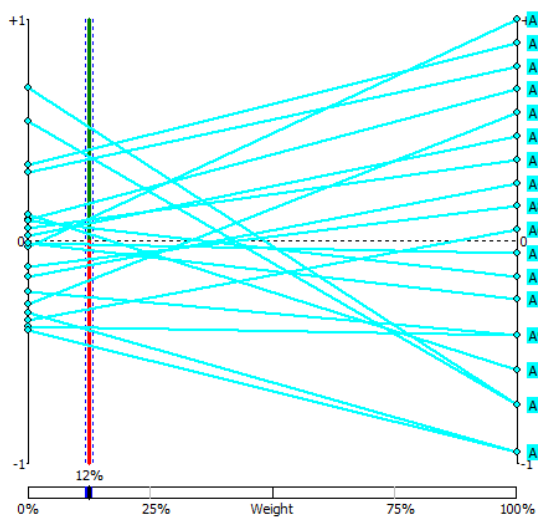
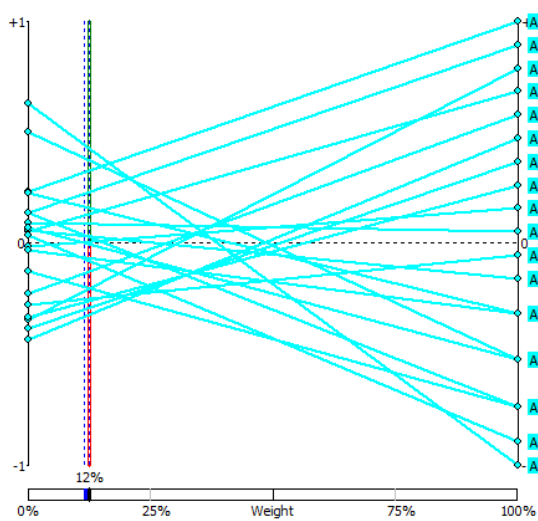
(d)



(e)



(f)



(g)

(h)

Figura 23- Distribuição das características das alternativas segundo cada critério de avaliação: Custo do ciclo de vida (a); Aquecimento global (b); Operação e manutenção (c); Custo de investimento (d); Confiabilidade (e); Replicabilidade (f); Área do terreno (g); e Comportamentos sustentáveis (h).

A Figura 24 apresenta o ranqueamento da melhor para a pior alternativa com mesmos pesos para todos os critérios.

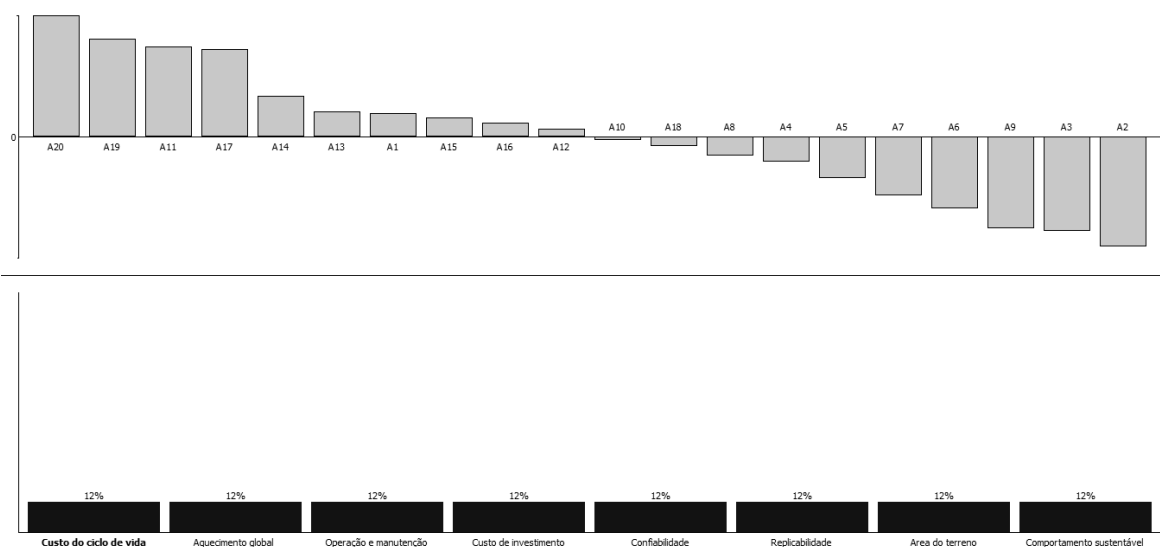


Figura 24- Fluxos de superação por alternativa considerando mesmos pesos entre os critérios

A Figura 25 apresenta os fluxos de superação por alternativa com os pesos definidos pelos decisores para o critério de seleção.

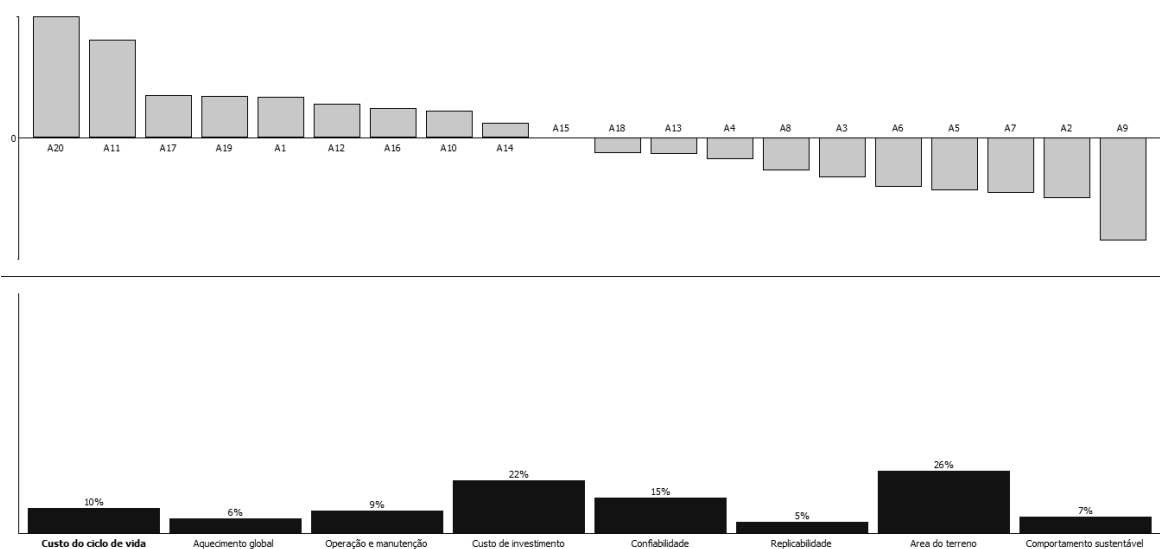


Figura 25- Fluxos de superação por alternativa considerando diferentes pesos entre os critérios

As alternativas A20 (Tratamento primário convencional), A11 (Tratamento primário + tanques sépticos), A17 (Infiltração rápida), e A19 (Infiltração lenta) foram as que obtiveram melhores desempenhos e consequentemente ficaram entre as 4 primeiras colocadas, tanto considerando os pesos definidos pelos decisores bem como sem a definição de pesos. Ao passo que as alternativas que obtiveram pior desempenho variaram. Contudo as alternativas A9 (Lagoa anaeróbia+ Lagoa facultativa+ Lagoa de maturação) e A2 (Reator UASB + Lagoas

aeradas mistura completa + Lagoa de decantação) se mantiverem com posições mais baixas na hierarquia.

Considerando as restrições impostas pela legislação foi possível verificar que as alternativas que demonstraram melhor potencial ao atender aos requisitos estabelecidos foram a A17 (Infiltração rápida), A12 (Reator UASB + Filtro anaeróbio) e A16 (Lagoa anaeróbia + Lagoa facultativa), já as que obtiveram menos vantagens para os sistemas em centros urbanos foram A9 (Lagoa anaeróbia+ lagoa facultativa+ lagoa de alta taxa), A7 (Lagoa anaeróbia+ lagoa facultativa+ lagoa de maturação) e A2 (Reator UASB + Lagoas aeradas mist comp + lagoa de decantação), o que é claramente justificado pela área demanda por esses sistemas de lagoas, recurso esse de difícil acesso em centros urbanos.

A Tabela 27 mostra um resumo da classificação das tecnologias segundo diferentes aspectos.

Tabela 27- Hierarquia das alternativas para Centros Urbanos

Hierarquia	Desconsiderando Peso	Hierarquia	Considerando Peso	Hierarquia	Restrição Legislação
1°	A20	1°	A20	-	A1
2°	A19	2°	A11	-	A11
3°	A11	3°	A17	-	A20
4°	A17	4°	A19	1°	A17
5°	A14	5°	A1	2°	A12
6°	A13	6°	A12	3°	A16
7°	A1	7°	A16	4°	A19
8°	A15	8°	A10	5°	A10
9°	A16	9°	A14	6°	A14
10°	A12	10°	A15	7°	A15
11°	A10	11°	A18	8°	A18
12°	A18	12°	A13	9°	A4
13°	A8	13°	A4	10°	A13
14°	A4	14°	A8	11°	A8
15°	A5	15°	A3	12°	A3
16°	A7	16°	A6	13°	A6
17°	A6	17°	A5	14°	A5
18°	A9	18°	A7	15°	A2
19°	A3	19°	A2	16°	A7
20°	A2	20°	A9	17°	A9

A Figura 26 mostra que as alternativas se encontram mais dispersas no plano, ou seja, maior é a diferença destas entre si, de acordo com as preferências dos agentes de decisão para os centros urbanos. Contudo, os critérios custo de investimento, operação e manutenção, confiabilidade e custo do ciclo de vida ocuparam mesmo posicionamento no plano, demonstrando similaridade entre eles.

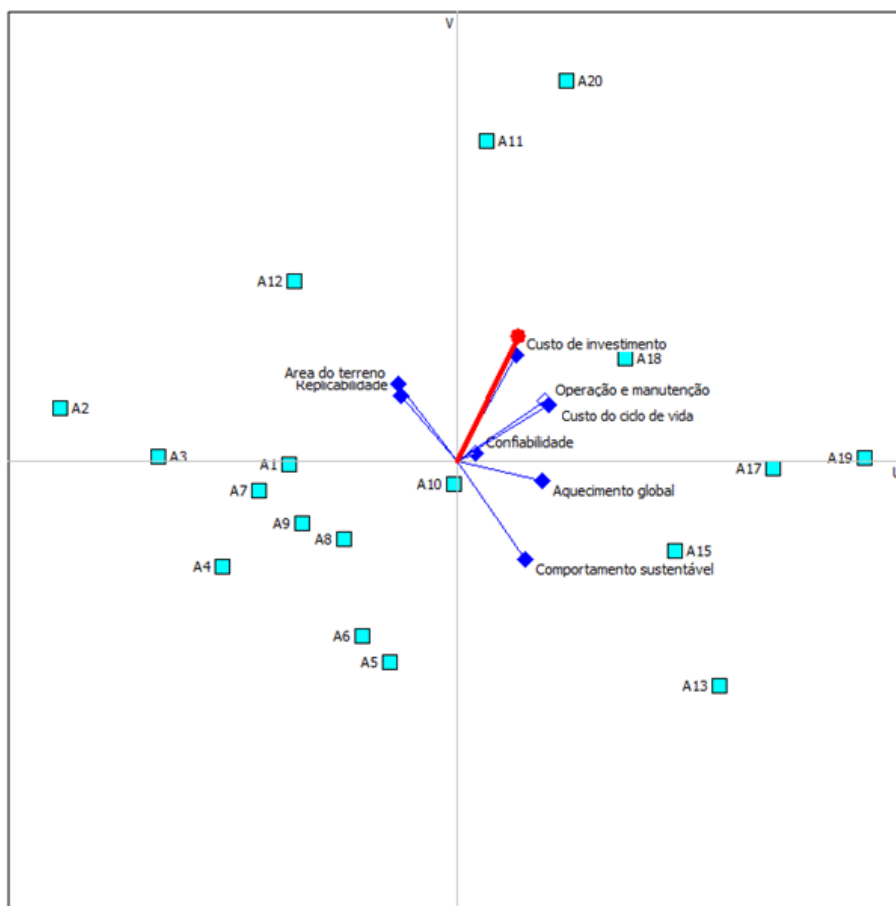


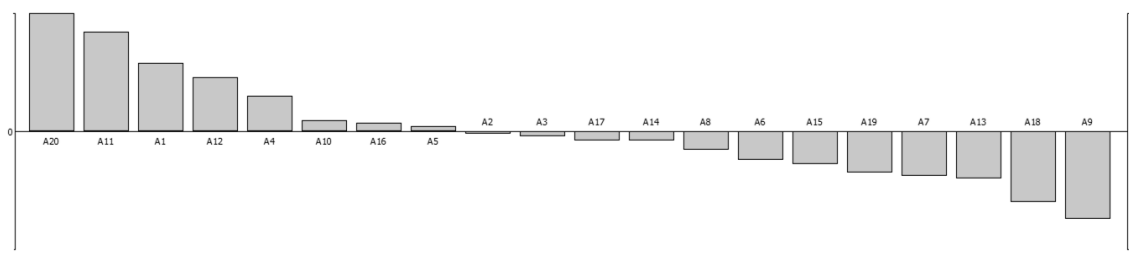
Figura 26- GAIA para Centros Urbanos

A Tabela 28 contém os valores das preferências utilizados para a análise de sensibilidade.

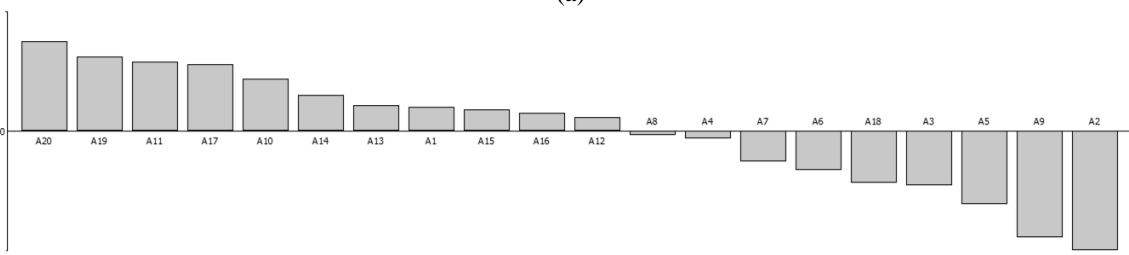
Tabela 28- Análise de Sensibilidade: Centros Urbanos

	Critérios	Decisores	Análise de sensibilidade							
			0,5194	0,0880	0,0800	0,1000	0,1200	0,1200	0,1040	0,1160
Centros urbanos	Área de terreno necessária	0,2597	0,5194	0,0880	0,0800	0,1000	0,1200	0,1200	0,1040	0,1160
	Confiabilidade	0,1469	0,0600	0,2938	0,0800	0,1000	0,1200	0,1200	0,1040	0,1160
	Custo de investimento	0,2216	0,0600	0,0880	0,4432	0,1000	0,1200	0,1200	0,1040	0,1160
	Custo do ciclo de vida	0,104	0,0600	0,0880	0,0800	0,2080	0,1200	0,1200	0,1040	0,1160
	Aquecimento global	0,061	0,0600	0,0880	0,0800	0,1000	0,1300	0,1200	0,1040	0,1160
	Replicabilidade	0,0466	0,0600	0,0880	0,0800	0,1000	0,1200	0,0932	0,1040	0,1160
	Comportamentos sustentáveis	0,0672	0,0600	0,0880	0,0800	0,1000	0,1200	0,1200	0,1344	0,1160
	Operação e manutenção	0,0928	0,0600	0,0880	0,0800	0,1000	0,1200	0,1200	0,1040	0,1856

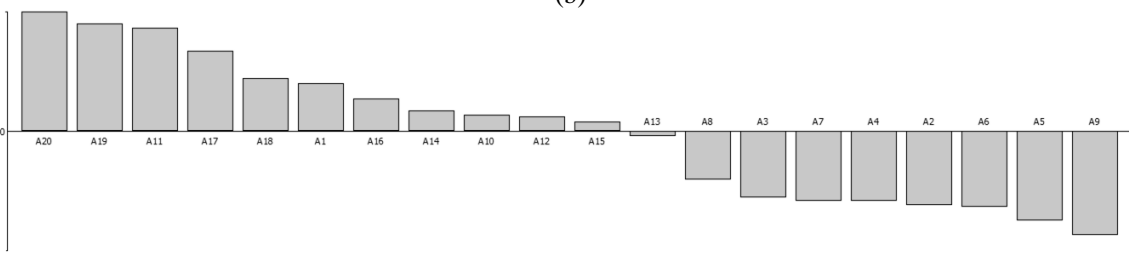
Conforme pode ser observado na Figura 27, praticamente não houve mudança na classificação das alternativas avaliadas, mesmo com as mudanças dos pesos.



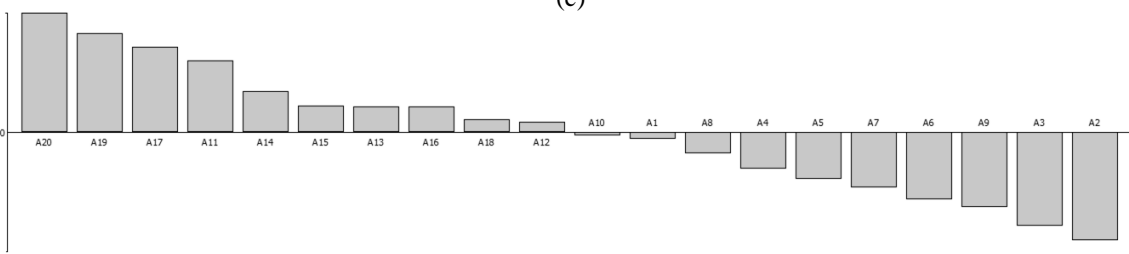
(a)



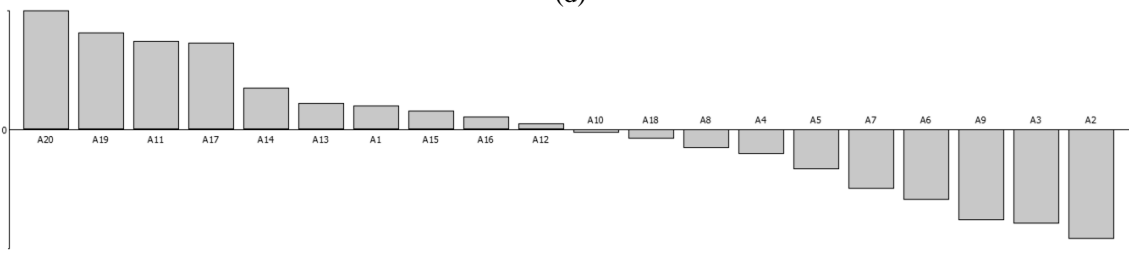
(b)



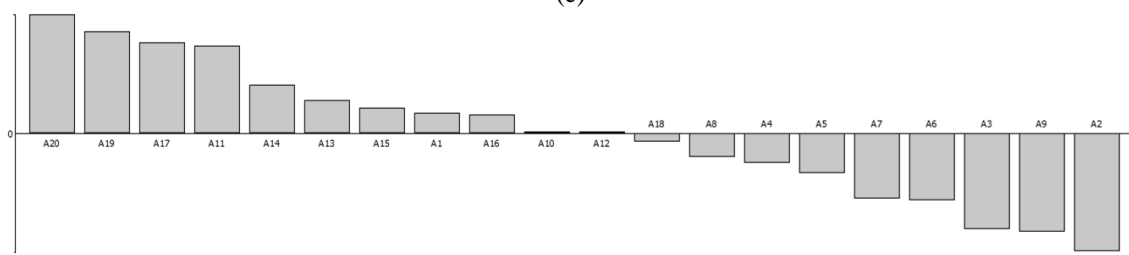
(c)



(d)



(e)



(f)

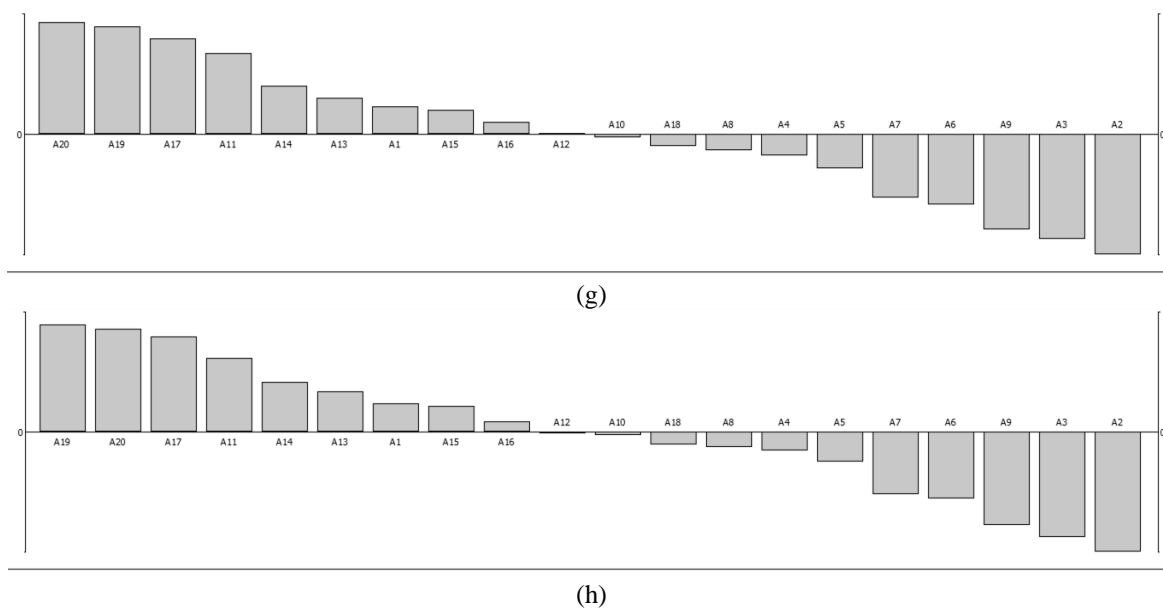


Figura 27- Análise de sensibilidade para critério de avaliação com o dobro do peso: Área do terreno (a); Confiabilidade (b); Custo de investimento (c); Custo do ciclo de vida (d); Aquecimento global (e); Replicabilidade (f); Comportamentos sustentáveis (g); Operação e manutenção (h).

As alterações de preferência não afetaram significativamente a hierarquização das alternativas, indicando que essas configurações são robustas e se mantiveram dentro das expectativas do grupo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A estruturação do processo de decisão em projetos de saneamento é de extrema importância, especialmente em países em desenvolvimento, os quais possuem poucos recursos tanto financeiros como técnicos. Desta forma, fica evidente a necessidade de métodos e modelos para auxiliar no processo de tomada de decisões no âmbito sanitário. Neste sentido, esse trabalho buscou desenvolver uma ferramenta de apoio à priorização dos sistemas de tratamento em diferentes cenários. Assim, neste item serão abordadas as principais conclusões do estudo desenvolvido.

6.1 CONCLUSÕES

A limitação de recursos financeiros, problemática de hierarquia, necessidade de transparência na decisão, critérios de decisão conflitantes, de naturezas diferentes, e múltiplos objetivos são alguns dos problemas envolvidos na priorização de projetos na área sanitária. Ponderando esses fatores intrínsecos à tomada de decisão, os modelos de priorização elaborados neste trabalho buscaram envolver diversas dimensões, sendo elas técnicas, ambientais, econômicas e sociais.

A pesquisa estruturada da literatura por meio da ferramenta PROKNOW-C auxiliou de forma direta nas principais etapas do estudo e elaboração do modelo de seleção propiciando a adequada caracterização do contexto, a definição das principais aplicações multicritério em saneamento, caracterização das técnicas de decisão em grupo, bem como levantamento dos principais critérios de seleção, fornecendo subsídios para a aplicabilidade do modelo de decisão.

Diante dos baixos investimentos em saneamento nos países subdesenvolvidos, o fator econômico tem sido considerado preponderante na tomada de decisões. Portanto, a primeira etapa do modelo objetivou conduzir uma análise detalhada do critério de custo, tendo esta como ferramenta nos estágios iniciais da definição da tecnologia de tratamento de águas residuais mais adequadas.

Entre as 37 tecnologias estudadas, através da aplicação da Simulação De Monte Carlo, o tratamento primário convencional mostrou ser a tecnologia mais econômica. No entanto, esta tecnologia não atende aos padrões de descarga mínimos exigidos pela legislação brasileira vigente, tornando necessária a implantação de um sistema secundário de remoção de

matéria orgânica e nutrientes. Sendo assim, a tecnologia de tratamento que apresentou menor custo e também apresentou uma taxa média de remoção de matéria orgânica dentro do estabelecido pela legislação foi o Reator UASB (T17), atendendo apenas os aspectos econômicos e de desempenho.

Ainda de acordo com os aspectos econômicos foi possível verificar a correlação entre a demanda de área e energia com a classificação econômica final, uma vez que quanto maior a demanda desses recursos maior o custo final da tecnologia, embora muitas vezes, essas tecnologias com maior custo apresentem maior eficiência de tratamento. Deste modo ficando evidenciada a necessidade de estudos conjuntos para a definição de um sistema de tratamento.

Neste contexto, foram desenvolvidos dois modelos para auxiliar a determinação do sistema de tratamento. O primeiro cenário avaliado foi para pequenas comunidades o qual abordou as dimensões econômicas, ambientais, sociais e tecnológicos. Por outro lado, o segundo modelo, o qual visa apoiar a decisão para aplicação de tecnologias em centros urbanos buscou incorporar na análise os fatores os aspectos econômicos, ambientais e tecnológicos.

Os resultados para os cenários estudados mostraram que as tecnologias infiltração lenta (A19), infiltração rápida (A17), e lagoa anaeróbia seguida de lagoa facultativa (A16) são as alternativas preferidas para as pequenas comunidades, enquanto que os sistemas UASB, seguido de pós-tratamento foram opções menos preferidas. O modelo de determinação de tecnologias em centros urbanos demonstrou que as alternativas de melhor potencial ao atender aos requisitos estabelecidos foram a Infiltração rápida (A17), Reator UASB + Filtro anaeróbio (A12) e Lagoa anaeróbia + Lagoa facultativa (A16), e as de menor potencial foram os sistemas de lagoas (A9; A7; A2), provavelmente devido à extensa área demandada por esses sistemas.

Considerou-se que os objetivos deste trabalho foram atingidos e a metodologia multicritério demonstrou ser uma ferramenta bastante útil quando aplicada ao saneamento para a estruturação do processo de decisão, proporcionando que esta seja realizada de forma objetiva, clara, racional e transparente, propiciando a otimização do uso dos recursos técnicos e financeiros no setor público.

Além disso, a primeira etapa do modelo poderia ser utilizada individualmente na fase de planejamento ou ampliação das unidades de tratamento e planos diretores na área sanitária, uma vez que ele individualmente já propicia uma análise global de gastos envolvidos com as tecnologias, permitindo deste modo que as discussões não sejam subjetivas. Bem como, a

utilização deste modelo pode reduzir custos com orçamentos entre diversas alternativas de tratamento para, então, identificar e focar nas melhores alternativas sugeridas pelo modelo.

Considerando o elevado número de critérios no problema de seleção o método de Copeland demonstrou-se bastante adequado, uma vez que esse possibilita a comparação par das alternativas e o empate delas de modo que todos os critérios fossem avaliados. Já o método PROMETHEE II é preferido quando os pesos de critérios são definidos e a ordenação de desempenho das alternativas é requerida, portanto este foi utilizado para a ordenação final das tecnologias. Ambos os métodos são simples de usar e entender pelos especialistas.

Como a avaliação pode ser baseada em julgamentos subjetivos, foi realizada a análise de sensibilidade, a fim de testar a estabilidade do ranking de alternativas. Foi observada alta consistência dos resultados, mesmo com as variações dos pesos a classificação das alternativas praticamente se manteve inalterada, o que demonstra a robustez do modelo proposto sobre possíveis variações produzidas por elementos de natureza subjetiva.

O trabalho desenvolvido demonstrou-se possível de ser replicado em outros cenários considerando diferentes preferências dos agentes de decisão, bem como variando os dados característicos das tecnologias ou em outras situações em que seja necessário hierarquizar projetos de saneamento.

Deste modo, a aplicação deste modelo de avaliação de projetos no saneamento é possível promover a melhoria na qualidade dos processos de tratamento 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. Uma vez que a metodologia proposta demonstrou elevado potencial para a redução da subjetividade na determinação dos processos de tratamento de esgotos garantindo que todos os aspectos essenciais sejam considerados em função dos cenários avaliados.

Uma contribuição prática da aplicação da metodologia proposta é quanto a minimização do consumo de recursos tais como energia, reagentes químicos e outros insumos, bem a redução dos resíduos gerados o que permitirá a longo termo a expansão dos serviços de esgotamento sanitário, uma vez que o modelo propicia o melhor uso dos recursos, ampliando a capacidade de investimentos, de forma a contribuir para redução da pobreza e melhoria da qualidade do meio ambiente.

6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS

O modelo proposto neste trabalho alcançou resultados promissores. Contudo, faz-se necessário um maior número de testes, surgindo à oportunidade de que futuras pesquisas sejam realizadas a fim de propor novas metodologias para conduzir as análises das respostas.

Outra etapa que pode ser aperfeiçoada de maneira a garantir melhores resultados é 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 reuso 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. Além disso, garantir que os princípios fundamentais da sustentabilidade sejam inclusos no modelo é um importante objetivo para estudos futuros.

Outros métodos de critérios múltiplos, tais como TOPSIS e ELECTRE também podem ser utilizados para a seleção do processo de tratamento de águas residuais. E quanto à formulação dos critérios é possível focar no estudo da representatividade dos indicadores em função das características dos decisores.

REFERÊNCIAS

AFONSO, M. H. F.; SOUZA, J. V.; ENSSLIN, S. R.; ENSSLIN, L. Como construir conhecimento sobre o tema de pesquisa. Aplicação do processo Proknow-C na busca de literatura sobre avaliação do desenvolvimento sustentável. **RGSA: Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 5, p. 47-62, 2012.

ALSINA F. X.; GALLEGO, A.; FEIJOO, G.; RODRIGUEZ, R. I. Multiple-objective evaluation of wastewater treatment plant control alternatives. **Journal of Environmental Management**. 2010;91(5):1193-1201. 2008.

ARAÚJO JR., MM. **Reator combinado anaeróbio-aeróbio de leito fixo para remoção de matéria orgânica e nitrogênio de água residuária de indústria produtora de lisina**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 136p. 2006.

ABREU, S. B.; ZAIAT, M. **Desempenho de reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo no tratamento de esgoto sanitário**. Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 181-188, abr/jun. 2008.

ASHLEY, R.; BLACKWOOD, D.; BUTLER, D.; JOWITT, P.; DAVIES, J.; SMITH, J.; GILMOUR, D.; OLTEAN, D. Making Asset Investment Decisions for Wastewater Systems That Include Sustainability. **Journal of Environmental Engineering**. Vol. 134. No. 3. 2008.

BACK, F. T. E. E. Processo para construir o conhecimento inicial de pesquisa ilustrado ao tema gestão de recursos humanos. **Pesquisa & Desenvolvimento Engenharia de Produção**, v. 10, p. 81-100, 2012.

BACEN. Banco Central do Brasil. **Conversão de moedas**. Disponível em: <<http://www4.bcb.gov.br/pec/conversao/conversao.asp>>. Acesso em: Junho. 2016.

BARBOSA, I. M; MIERZWA, J.C.; HESPANHOL, I.; SUBTIL, E. L. Remoção de matéria orgânica e nitrogênio em biorreator com membranas submersas operando em condição de nitrificação e desnitrificação simultânea. **Rev. Ambient. Água**. vol. 11 n. 2. p.304-305. 2016.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 430**, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n 357, de 17 de março de 2005. Publicação DOU nº 92, de 16/05/2011, p. 89. 2011. Disponível em <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: Fev. 2016.

BRUNA JUNIOR, E. D. Seleção e análise de um portfólio de artigos sobre avaliação de desempenho na cadeia de suprimentos. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas (Online)**. v. 1, p. 113-125, 2012.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO. Projeto BNDES Saneamento em Foco. 2015. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br>>. Acesso em: Abril, 2015.

BOUYSSOU, D. Evaluation and decision models: a critical perspective. Boston/London/Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, International Series in Operations Research & Management Science. Vol. 32. 2000.

BORTOLUZZI, S. C.; ENSSLIN, S. R.; ENSSLIN, L.; VALMORBIDA, S. M. I. A Avaliação de desempenho em redes de pequenas e médias empresas: estado da arte para as delimitações postas pelo pesquisador. **R. eletr. estrat. neg.**, Florianópolis, v.4, n.2, p. 202-222, jun./dez. 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.

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.

CALLADO, N.H; FORESTI, E. Removal of organic Carbon, Nitrogen and Phosphorous in Sequential Batch Reactors Integrating the Anaerobic/Aerobic processes. **Water Science Technology**, Vol. 44, 263-270. 2001.

CALIJURI, M. L.; Bastos, R. K. X.; Magalhães, T. B.; Capelete, B. C.; Dias, E. H. O. Tratamento de esgotos sanitários em sistemas reatores UASB/wetlands construídas de fluxo horizontal: eficiência e estabilidade de remoção de matéria orgânica, sólidos, nutrientes e coliformes. **Eng. Sanit. Ambient.** Vol.14, n.3. 2009, 421-430p.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias**. 2ª ed: Belo Horizonte. DESA-UFMG – 2001.

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.

CHAVES, L. C. VALMORBIDA, S. M. I.; PETRI, S. P; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. L. Mapeamento do tema Gestão do Apoio à Decisão quando analisado sob a ótica de seus resultados. **S & G. Sistemas & Gestão**, v. 7, p. 336-348, 2012a.

CALDAS, M.A.F.; AZEVEDO, F. Um modelo de localização de terminal multimodal de cargas baseado em análise multicritério. **In:** Anais do XLI SBPO, Porto Seguro, 2009.

CHAVES, L. C. VALMORBIDA, S. M. I.; PETRI, S. P; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. L. Balanced Scorecard Na Gestão Universitária: Análise Bibliométrica Entre 2001-2011. **Revista da Faculdade de Administração e Economia - ReFAE**, v. 4, p. 47-68, 2012b.

COLARES, C. J. G.; SANDRI, D. Eficiência do tratamento de esgoto com tanques sépticos seguidos de leitos cultivados com diferentes meios de suporte. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 8, n. 1, p. 172-185, 2013.

DUTRA, A.; RIPOLL, F.; V. M.; ENSSLIN, S. R.; ENSSLIN, L; ROGERIO, L.; GONÇALVES, P. Opportunities for research on evaluation of seaport performance : A systemic analysis from international literature. **African J. Bus. Manag**, v. 9, p. 704–717. 2015a.

- DUTRA, A.; RIPOLL-FELIU, V. M.; FILLLOL, A. G.; ENSSLIN, S. R.; ENSSLIN, L. The construction of knowledge from the scientific literature about the theme seaport performance evaluation. **Int. J. Product. Perform. Manag.** 64, p. 243–269. 2015b.
- DJUKIC, M.; JOVANOSKI, J.; MUNITLAK, O.; LAZIC, M.; BODROZA, D. Cost-benefit analysis of an infrastructure project and a cost-reflective tariff: A case study for investment in wastewater treatment plant in Serbia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** 59, p. 1419–1425. 2016.
- ENSSLIN, L.; GIFFHORN, E.; ENSSLIN, S.R.; PETRI, S. M.; VIANNA, W. B. Avaliação do Desempenho de Empresas Terceirizadas com o Uso da Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão- Construtivista. **Revista Pesquisa Operacional**, v. 30, n. 1, p. 125-152, 2010.
- ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R.; PACHECO, G. C. Um Estudo Sobre Segurança em Estádios de Futebol Baseado na Análise da Literatura Internacional; **Perspectivas em Ciências da Informação**; v.17, n. 2, p. 71-91, 2012.
- ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R.; SOUZA, M. V. Gerenciamento de portfólio de produtos na indústria: estado da arte. **Revista Produção Online**, v.14, n. 3, p. 790-821, 2014.
- ENSSLIN, S. R.; ENSSLIN, L.; ADEMAR, L. D. S. M.; RIPOLL-FELIU, D. V. M. Research opportunities in performance measurement in public utilities regulation. **Int. J. Product. Perform. Management.** v.64. n.7 p. 994- 1016. 2015.
- FORESTI, E. Anaerobic treatment of domestic sewage: established technologies and perspectives. **Water Science and Technology**, v.45, n.10, p.181-186. 2002.
- FERREIRA, R.O.; GOMES, F.P.; MELLO, J.C.C.B.S. Emprego de métodos ordinais multicritério na escolha de seleções cabeças de chave da copa do mundo de 2014. **Relatórios de Pesquisa em Engenharia de Produção**, v. 11, n. 11, 2011.
- GARRIDO, R. S.; MOLINOS, M.; S.; HERNÁNDEZ, F. S. Comparing the efficiency of wastewater treatment technologies through a DEA metafrontier model. **Chem. Eng. J.** 173. p.766–772. 2011.
- GARRIDO, B. 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. **J. Environ. Manage.** V. 112, 384–391, 2012.
- GARRIDO, B. M.; REIF, R.; HERNÁNDEZ, F.; POCH, M. Including the environmental criteria when selecting a wastewater treatment plant. **Environmental Modelling & Software.** v. 56. p. 74-82. 2013.
- GOMES, L. F. A. M; GOMES, C. F. S. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério.** 4 ed. Editora Atlas. São Paulo. 2012.
- GONÇALVES, C. S. I.; DIBIAZI, A. L. B.; SOUZA, D. G.; PENNER, G. C. À seleção de alternativas de tratamento de Esgotos – estudo de caso: município de São simão- SP. **Revista Uniara.** v. 12. n.2. 2009.

GOMES JUNIOR, S.F.; MELLO, J.C.C.B.S. Utilização do método de Copeland para avaliação dos pólos regionais do CEDERJ. **In:** Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Gramado, 2005.

HAMADA, N. **Ensaio de toxicidade empregados na avaliação de Efeitos no sistema de tratamento de esgotos e efluentes, ETE Suzano, e seu entorno, utilizando organismos aquáticos.** (Dissertação em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear). Instituto De Pesquisas Energéticas E Nucleares- Universidade de São Paulo. São Paulo. 2008.

HARADA, Antônio L. Uso de análise multicritério na ordenação de prioridades em empreendimentos de saneamento. **In:** Congresso Brasileiro de Engenharia Ambiental e Sanitária. Anais eletrônicos do 21 Congresso da ABES. Rio de Janeiro: ABES, 2001.

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.

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

JORDÃO, E. P. PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos.** 4ª Edição. Rio de Janeiro: ABES, 932p. 1995.

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. **Int. J. Environ. Sci. Technol.** 8, p. 267–280. 2011.

KALBAR, P. P.; KARMAKAR, S.; ASOLEKAR, S. R. Selection of an appropriate wastewater treatment technology: A scenario-based multiple-attribute decision-making approach. **J. Environ. Manage.** 113, 158–169, 2012a.

KALBAR, P. P.; KARMAKAR, S.; ASOLEKAR, S. R. Technology assessment for wastewater treatment using multiple-attribute decision-making. **Technol. Soc**, v.34, 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. **J. Environ. Manage.** v. 128, p. 844–851, 2013.

LACERDA, R. T. O.; ENSSLIN, S. R.; ENSSLIN, L. Uma Análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. **Gestão & Produção**, v.19, n.1, 2012.

LACERDA, R. T. D. O.; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R. Research opportunities in strategic management field: a performance measurement approach. **Int. J. Bus. Perform. Manag.** v.15, p.158. 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.** v.47, p.10762–10770. 2013.

LEONETI, A. B. **Avaliação de modelo de tomada de decisão para escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário.** Dissertação de Mestrado em Administração de Organizações – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto (FEARP). Ribeirão Preto. 2009.

LIMA, J. D.; TRENTIN, M. G. ; OLIVEIRA, G. A.; BATISTUS, D. R.; SETTI, D. **Systematic Analysis of Economic Viability with Stochastic Approach: A Proposal for Investment.** In: Marlene Amorim; Carlos Ferreira; Milton Vieira Junior; Carlos Prado. (Org.). *Engineering Systems and Networks: The Way Ahead for Industrial Engineering and Operations Management.* 1ed.Switzerland: Springer International Publishing, 2017, v. 10, p. 317-325.

LEONETI, A. B.; OLIVEIRA, S. V. W. B.; OLIVEIRA, M. M. B. O equilíbrio de Nash como uma solução para o conflito entre eficiência e custo na escolha de sistemas de tratamento de esgoto sanitário com o auxílio de um modelo de tomada de decisão. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, n1, p. 53–64. 2010.

LEONETI, A. B. **Teoria dos jogos e sustentabilidade na tomada de decisão: aplicação a sistemas de tratamento de esgoto.** Tese (Doutorado Engenharia Hidráulica e Saneamento). Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

LOPES, T. R. **Caracterização do esgoto sanitário e lodo proveniente de reator anaeróbico e de lagoas de estabilização para avaliação da eficiência na remoção de contaminantes.** Dissertação (Mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2015.

LIMA, J.D ; TRENTIN ; OLIVEIRA, A.G.; BATISTUS, D. R.; SETTI, D . A systematic approach for the analysis of the economic viability of investment projects. **International Journal of Engineering Management and Economics**, v. 5, p. 19-34, 2015.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água.** Campinas: Átomo, 2005. 444p.

LUNDIN, M.; MOLANDER, S.; MORRISON, G.M. A set of indicators for the assessment of temporal variations in the sustainability of sanitary systems. **Water Sci. Technol.** 39 (5), 235–242. 1999.

MATSUMOTO, T.; SÁNCHEZ, I. O. Monitoreo del desempeño y estudio batimétrico de la planta de tratamiento de aguas residuales de neves paulista (São Paulo, Brasil). **Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia.** v.10. n.20. p. 139-151. 2013.

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

MACKENZIE, L. D. **Water and wastewater engineering: Design principles and practice**. Ed. McGraw-Hill Companies. 2010.

METCALF; EDDY. **Wastewater Engineering: treatment, disposal, reuse**. 4. ed. New York: McGraw - Hill Book, 2003.

MARAFON, A. D. ; ENSSLIN, S. R.; ENSSLIN, L; LACERDA, R. T. O. Revisão sistêmica da literatura sobre avaliação de desempenho na gestão de P&D. **Revista Gestão Industrial**, v. 8, p. 1-43, 2012.

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

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.

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

MENDONÇA, L.C. **Microbiologia e cinética de sistemas de lodos ativados como pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio de leito expandido**. 2002. 184 p. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

MONTEIRO, R. C. M. **Viabilidade técnica do emprego de sistemas tipo “wetlands” para o tratamento de água cinza visando o reuso não potável**. 2009. 84p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Escola politécnica de São Paulo, São Paulo, 2009.

NETTO, A.P. O. **Reator Anaeróbio-Aeróbio de Leito Fixo, com Recirculação da fase líquida, aplicado ao tratamento de esgoto sanitário**. 207 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo. 2007.

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

OLIVEIRA, S. V.W. B. **Modelo para tomada de decisão na escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário**. 2004. 293f. Tese (Doutorado em Administração). Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

ORMONDE, V. S. S. **Avaliação de 'Wetlands' Construídos no Pós-Tratamento de efluente de Lagoa de Maturação**. 2012. 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2012.

PONTES, P. P.; CHERNICHARO, C. A. L. Efeito do retorno de lodo aeróbio sobre as características da biomassa presente em reatores UASB tratando esgoto sanitário. **Eng Sanit Ambient**. v.14 n.2. 223-234p. 2009.

PASSETO WILSON. **Dossiê do saneamento**. 4 ed. Agua e cidade. 2004.

PRATA, R. C. C.; MATOS, A. T.; CECON, R. P., MONACO, P. A. V.; PIMENTA, L. Tratamento De Esgoto Sanitário Em Sistemas Alagados Construídos Cultivados Com Lírio-Amarelo. **Eng. Agríc**. v.33, n.6, p.1144-1155. 2013.

PINTO, J. D. S.; CHERNICHARO, C., A, L. Escoria de alto fomo: uma nova alternativa de meio suporte para filtros anaeróbio. **In: Anais. Simpósio Italo-brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 3 ABES/ANDIS/AIDIS, Gramado, Rio Grande do Sul. 1996.**

PHILIPPI, A. J. **Saneamento, saúde e ambiente: Fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. Ed. Barueri. São Paulo. 2005

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

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-2013**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 181 p. 2014.

SAIANI, C. C. S. **Restrições à expansão dos investimentos em saneamento básico no Brasil: déficit de acesso e desempenho dos prestadores**. 2007. 315 f. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada). Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2007.

SUBTIL, E. L. **Avaliação da redução de sulfato e produção de sulfeto dissolvido em reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) tratando esgoto sanitário em escala real**. Dissertação (Mestrado em Saneamento). Universidade Federal do Espírito Santo. 2007.

SILVA, G. H. R. **Reator compartimentado anaeróbio/aeróbio tratando esgoto sanitário: Desempenho e Operação**. Campinas: UNICAMP. Dissertação (Mestrado em engenharia civil). 166p. Campinas, SP. 2001.

SILVA, G. H. R.; NOUR, E. A. A. **Reator compartimentado anaeróbio/ aeróbio: Sistema de baixo custo para tratamento de pequenas comunidades**. São Paulo, SP. 2005.

SOUZA, A.; CLEMENTE, A. **Decisões financeiras e análise de investimentos: fundamentos, técnicas e aplicações**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LUCIO, P. B. **Metodologia de pesquisa**. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

TCHEMRA, A. H. **Tabela de decisão adaptativa na tomada de decisões multicritério.**

Tese (doutorado). Escola politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de engenharia de computação e sistemas digitais. São Paulo. 172 p. 2009.

TASCA, J. E.; ENSSLIN, S. R.; ALVES, M. B. M. An approach for selecting a theoretical framework for the evaluation of training programs. **Journal of European Industrial Training**, v. 34, n.7, p.631–655. 2010.

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.

THE THOMSON, C. EndNote. X2 ed., **The Thomson Corporation**, 2008.

TROJAN, F. **Modelos multicritério para apoiar decisões na gestão da manutenção de redes de distribuição de água para a redução de custos e perdas.** 133p. Tese (Doutorado em Engenharia De Produção). Universidade Federal De Pernambuco, Recife, 2012.

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

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos: uma manual para regiões de clima quente.** Campina Grande, 1994. 240p.

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

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

VIDAL, R.; MOLINER, E.; MARTÍNEZ G.; RUBIO M. C. Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. **Resour Conserv Recycl**. v. 74. p. 101-114. 2002.

ZENG, G.; JIANG, R.; HUANG, G.; XU, M.; LI, J. Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis. **J. Environ. Manage**. 82, 250–259. 2007.

WANG, Y. T.; SUIDAN, M. T.; RITTMAN, B. E. Anaerobic treatment of phenol by an expanded-bed reactor. **J. Wat. Poll. Cont. Fed**. 58(3). p. 227-233. 1986.

APÊNDICE A

Tecnologias e sistemas de tratamento de esgoto utilizados no Brasil

Ordem Técnica	Sistemas de tratamento	Ordem Econômica
T1	Tratamento primário (tanques septicos)	28
T2	Tratamento primário convencional	37
T3	Tratamento primário avançado (A)	18
T4	Lagoa facultative	32
T5	Lagoa anaeróbia-lagoa facultativa	33
T6	Lagoa aerada - facultativa	17
T7	Lagoa aerada misturada completa+ lagoa de sedimentação	14
T8	Lagoa anaeróbia+ lagoa facultativa+ lagoa de maturação	26
T9	Lagoa anaeróbia+ lagoa facultativa+ lagoa de alta taxa	24
T10	Lagoa anaeróbia+ lagoa facultativa+ remoção de algas	25
T11	Infiltração lenta	36
T12	Infiltração rápida	34
T13	Escoamento superficial	31
T14	Terra úmidas construídas (Wetlands)	30
T15	Tanque Séptico + filtro anaeróbio	15
T16	Tanque Séptico + infiltração	22
T17	Reator UASB*	35
T18	Reator UASB + Iodos ativos	12
T19	Reator UASB + Biofiltro aerado submerso	13
T20	Reator UASB + Filtro anaeróbio	29
T21	Reator UASB + Filtro biológico Percolador de alta carga	21
T22	Reator UASB + Flotação por ar dissolvido	16
T23	Reator UASB + Lagoas de polimento	27
T24	Reator UASB + lagoas aeradas facultativas	20
T25	Reator UASB + Lagoas aeradas mist comp + lagoa de decantação	19
T26	Reator UASB + Escoamento superficial	23
T27	Lodos ativados convencional	5
T28	Lodos ativados - Aeração prolongada	6
T29	Lodos ativados - Batelada (Aeração prolongada)	3
T30	Lodos ativados convencional com remoção biológica de N	4
T31	Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P	2
T32	Lodos ativados convecional + filtração terciária	1
T33	Filtro biológico percolador de baixa carga	9
T34	Filtro biológico percolador de alta carga	10
T35	Biofiltro aerado submerso com nitrificação	8
T36	Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N	7
T37	Tanque séptico + biodisco	11

Onde: * UASB- Upflow Anaerobic Sludge Blanket

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2014)

APÊNDICE B (Continua)

Custos mínimos e máximos por tecnologias de tratamento de esgoto

Alternativa	Implantação (R\$/hab)		Manutenção e Operação (R\$/hab.ano)		Energia Mín (R\$/W.hab)		Demanda por área (R\$/m ² .hab)	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
T1	8,00	13,33	0,40	0,67			0,03	0,05
T2	8,00	10,67	0,40	0,67			0,02	0,04
T3	10,67	17,33	2,00	4,00			0,04	0,06
T4	8,00	20,00	0,53	1,07			2,00	4,00
T5	8,00	20,00	0,53	1,07			1,20	3,00
T6	13,33	24,00	1,33	2,40	1,20	2,00	0,25	0,50
T7	13,33	24,00	1,33	2,40	1,80	2,50	0,20	0,40
T8	13,33	26,67	0,67	1,33			3,00	5,00
T9	13,33	24,00	0,93	1,60		0,30	2,00	3,50
T10	13,33	24,00	0,93	1,60			1,70	3,20
T11	5,33	16,00	0,27	0,80			10,00	50,00
T12	8,00	18,67	0,40	0,93			1,00	6,00
T13	10,67	21,33	0,53	1,07			2,00	3,50
T14	13,33	21,33	0,67	1,07			3,00	5,00
T15	21,33	34,67	1,60	2,67			0,20	0,35
T16	16,00	26,67	0,80	1,33			1,00	1,50
T17	8,00	13,33	0,67	0,93			0,03	0,10
T18	18,67	29,33	1,87	3,20	1,80	3,50	0,08	0,20
T19	17,33	26,67	1,87	3,20	1,80	3,50	0,05	0,15
T20	12,00	18,67	0,93	1,47			0,05	0,15
T21	16,00	24,00	1,33	2,00			0,10	0,20
T22	16,00	24,27	1,60	2,40	1,00	1,50	0,05	0,15
T23	10,67	21,33	1,20	1,87			1,50	2,50

APÊNDICE B (Conclusão)

Alternativa	Implantação (R\$/hab)		Manutenção e Operação (R\$/hab.ano)		Energia Mín (R\$/W.hab)		Demanda por área (R\$/m ² .hab)	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
T24	10,67	24,00	1,33	2,40	0,30	0,60	0,15	0,30
T25	10,67	24,00	1,33	2,40	0,50	0,90	0,10	0,30
T26	10,67	24,00	1,33	1,87			1,50	3,00
T27	26,67	42,67	2,67	5,33	2,50	4,50	0,12	0,25
T28	24,00	32,00	2,67	5,33	3,50	5,50	0,12	0,25
T29	24,00	32,00	2,67	5,33	4,50	6,00	0,12	0,25
T30	29,33	45,33	2,67	5,87	2,20	4,20	0,12	0,25
T31	34,67	50,67	4,00	6,67	2,20	4,40	0,12	0,25
T32	34,67	50,67	4,00	6,67	2,50	4,50	0,15	0,30
T33	32,00	40,00	2,67	4,00			0,15	0,30
T34	32,00	40,00	2,67	4,00			0,12	0,25
T35	18,67	32,00	2,13	4,00	2,50	4,50	0,10	0,15
T36	21,33	34,67	2,13	4,00	2,20	4,20	0,10	0,15
T37	32,00	40,00	2,67	4,00			0,10	0,20

Onde: Mín- mínimo; Máx- máximo; T- Tecnologias.

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2014).

APÊNDICE C (Continua)

Custos máximos estimados por tecnologias de tratamento de esgoto

Tecnologia	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Mínimo	\$42833,55	\$36677,22	\$88278,19	\$1164417,72	\$719990,43	\$221546,94	\$199156,41	\$1728868,26
Máximo	\$62609,53	\$51920,92	\$115526,11	\$2267450,9	\$1716258,39	\$371830,49	\$323981,12	\$2827022,05
Média	\$53194,04	\$44710,16	\$101536,55	\$1698712,16	\$1216471,61	\$296361,42	\$260623,13	\$2291231,55
Desvio-padrão	\$3288,54	\$2528,88	\$4074,39	\$229173,92	\$203844,63	\$28906,81	\$23096,78	\$226911,47
Coef. de variação	6,18%	5,66%	4,01%	13,49%	16,76%	9,75%	8,86%	9,90%
Mediana	\$53118,93	\$44682,85	\$101533,25	\$1704043,82	\$1218944,47	\$297229,08	\$260458,94	\$2292381,84
VPL	\$358343,57	\$188173,32	\$498692,63	\$283026,18	\$282792,82	\$583887,61	\$628128,37	\$390195,05
VPLA	\$52958,62	\$27809,62	\$73700,42	\$41827,67	\$41793,18	\$86291,16	\$92829,38	\$57665,86
Tecnologia	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
Mínimo	\$1170821,51	\$1016555,46	\$5753093,37	\$612812,96	\$1166620,05	\$1722858,35	\$193795,51	\$614834,3
Máximo	\$2006761,1	\$1843432,22	\$27700868,62	\$3371890,43	\$1992680,93	\$2828813,56	\$297072,88	\$894840,59
Média	\$1583677,56	\$1427145,86	\$16659403,54	\$1982385,24	\$1575985,34	\$2268388,71	\$244232,66	\$756141,64
Desvio-padrão	\$171093,47	\$170514,	\$4563591,79	\$564204,98	\$172523,16	\$229991,87	\$18001,46	\$56799,87
Coef. de variação	10,80%	11,95%	27,39%	28,46%	10,95%	10,14%	7,37%	7,51%
Mediana	\$1589775,5	\$1425915,4	\$16612474,9	\$1995314,	\$1570455,74	\$2255323,45	\$245087,52	\$756208,95
VPL	\$408790,67	\$396641,92	\$215329,57	\$260346,11	\$312039,36	\$338307,33	\$617036,13	\$415425,86
VPLA	\$60414,06	\$58618,63	\$31822,97	\$38475,84	\$46115,45	\$49997,52	\$91190,09	\$61394,66

APÊNDICE C (Conclusão)

Tecnologia	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T24
Mínimo	\$47749,1	\$154704,97	\$136552,26	\$74175,84	\$116258,15	\$108339,67	\$890931,54	\$144489,88
Máximo	\$93892,41	\$240604,98	\$207079,35	\$137971,76	\$184630,2	\$174323,01	\$1446162,15	\$247492,23
Média	\$70821,56	\$197760,79	\$170423,27	\$106641,99	\$150110,6	\$143377,57	\$1164614,13	\$195304,43
Desvio-padrão	\$8254,9	\$14483,64	\$12300,08	\$11688,01	\$11927,01	\$11973,82	\$115074,	\$17874,23
Coef. de variação	11,66%	7,32%	7,22%	10,96%	7,95%	8,35%	9,88%	9,15%
Mediana	\$70868,82	\$197640,8	\$170615,21	\$106647,25	\$150404,6	\$143322,01	\$1162774,23	\$195370,97
VPL	\$233801,83	\$811450,03	\$782361,66	\$341010,73	\$454782,04	\$590091,63	\$383988,68	\$471919,3
VPLA	\$34552,94	\$119921,99	\$115623,1	\$50397,05	\$67211,	\$87208,03	\$56748,64	\$69743,67
Tecnologia	T25	T26	T27	T28	T29	T30	T31	T32
Mínimo	\$118004,41	\$898551,91	\$224274,48	\$231758,76	\$238958,66	\$234225,92	\$260769,88	\$282788,51
Máximo	\$252800,8	\$1730549,58	\$326395,72	\$319311,99	\$326346,75	\$334450,12	\$366398,07	\$393499,34
Média	\$181939,04	\$1312662,22	\$277657,31	\$274898,7	\$283371,14	\$284379,92	\$311707,5	\$336192,22
Desvio-padrão	\$23540,52	\$171161,57	\$16442,84	\$15287,79	\$15377,13	\$16569,93	\$16710,04	\$18646,15
Coef. de variação	12,94%	13,04%	5,92%	5,56%	5,43%	5,83%	5,36%	5,55%
Mediana	\$181877,24	\$1318480,66	\$277408,77	\$275637,28	\$283419,8	\$284642,98	\$311455,27	\$335600,33
VPL	\$492031,1	\$409997,36	\$1179234,09	\$1162780,53	\$1223135,37	\$1220096,92	\$1410621,98	\$1426726,98
VPLA	\$72715,93	\$60592,39	\$174275,79	\$171844,17	\$180763,84	\$180314,8	\$208471,98	\$210852,09
Tecnologia	T33	T34	T35	T36	T37			
Mínimo	\$205379,37	\$189502,63	\$182990,23	\$185197,47	\$175958,43			
Máximo	\$299930,22	\$270572,3	\$235616,18	\$238631,76	\$243109,93			
Média	\$251484,74	\$229248,32	\$209979,15	\$212564,56	\$209586,48			
Desvio-padrão	\$17516,11	\$15261,41	\$8388,91	\$8387,12	\$11939,8			
Coef. de variação	6,97%	6,66%	4,00%	3,95%	5,70%			
Mediana	\$251667,69	\$229486,32	\$210167,45	\$212928,61	\$209804,95			
VPL	\$851388,64	\$851378,26	\$951701,83	\$966330,56	\$851369,19			
VPLA	\$125824,41	\$125822,87	\$140649,42	\$142811,36	\$125821,53			

Onde: VPL- Valor Presente Líquido; VPLA- Valor Presente Líquido Anualizado.

APÊNDICE D

Alternativas de tratamento de esgoto utilizadas no modelo de seleção

Alternativa	Sistemas de tratamento	DBO	DQO
		LIM MÁX	LIM MÁX
		90	225
A1	Tratamento primário avançado	105	200
A2	Reator UASB + Lagoas aeradas mist comp + lagoa de decantação	65	160
A3	Reator UASB + lagoas aeradas facultativas	65	160
A4	Reator UASB + Filtro biológico Percolador de alta carga	40	125
A5	Tanque Séptico + infiltração	10	40
A6	Reator UASB + Escoamento superficial	50	85
A7	Lagoa anaeróbia+ lagoa facultativa+ lagoa de alta taxa	55	140
A8	Lagoa anaeróbia+ lagoa facultativa+ remoção de algas	40	125
A9	Lagoa anaeróbia+ lagoa facultativa+ lagoa de maturação	55	140
A10	Reator UASB + Lagoas de polimento	55	140
A11	Tratamento primário (tanques sépticos)	225	425
A12	Reator UASB + Filtro anaeróbio	60	150
A13	Sistemas alagados construídas (Wetlands)	50	125
A14	Escoamento superficial	50	125
A15	Lagoa facultative	65	160
A16	Lagoa anaeróbia+ Lagoa facultativa	65	160
A17	Infiltração rápida	10	40
A18	Reator UASB	85	225
A19	Infiltração lenta	10	40
A20	Tratamento primário convencional	225	425