

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Adriana de Oliveira Pereira dos Reis

**SISTEMÁTICA PARA SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS DE
TRATAMENTO DE EFLUENTES: UMA ANÁLISE
MULTICRITERIAL APLICADA À BACIA HIDROGRÁFICA**

Porto Alegre

2018

Adriana de Oliveira Pereira dos Reis

**SISTEMÁTICA PARA SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE
EFLUENTES: UMA ANÁLISE MULTICRITERIAL APLICADA
À BACIA HIDROGRÁFICA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia, na área de concentração em Sistemas de Produção.

Orientador: Prof. Alejandro Germán Frank, Dr.

Porto Alegre

2018

CIP – Catalogação na publicação

Adriana de Oliveira Pereira dos Reis

**SISTEMÁTICA PARA SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE
EFLUENTES: UMA ANÁLISE MULTICRITERIAL APLICADA
À BACIA HIDROGRÁFICA**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Orientador Alejandro Germán Frank, Dr.

Orientador PPGEP/UFRGS

Prof. Flávio Sanson Fogliatto, PhD

Coordenador PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Prof^ª. Joana Siqueira de Souza, Dra. (PPGEP/UFRGS)

Prof. Néstor Fabián Ayala, Dr. (G-SCOP / Grenoble INP)

Prof^ª. Renata Cornelli, Dra. (Departamento de Engenharia Ambiental/ UCS)

Dedico este trabalho à minha filha, Alice Tosta, minha princesa e meu sol, quem me traz luz e alegria em todos os dias da minha vida. Dedico ao meu esposo, José Antonio, meu amigo, meu parceiro, confidente e sempre paciente. Vocês são especiais para mim. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

A Deus por sua misericórdia e bênçãos. Agradeço a Ele pela dádiva em conceder o convívio com pessoas tão significativas na minha vida.

Ao meu esposo, José Antonio, pelo compartilhamento de conhecimentos da área de pesquisa e, sobretudo por sua paciência, apoio, carinho e estímulo para concluir o doutorado.

À minha filha Alice que, do seu jeitinho meigo e amoroso, colaborou, apoiou, torceu e vibrou para que essa pesquisa pudesse ser concretizada. Você é o amor da minha vida.

Ao Prof. Alejandro Germán Frank, pelas suas contribuições, compreensão e confiança.

À Dra. Maria Silvana Santos, por me ouvir, acompanhar e me instruir em manter o foco.

Aos professores da UFRGS pelos seus ensinamentos e tutorias que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

Aos especialistas que participaram desta pesquisa, e cederam seu tempo compartilhando conhecimento e experiência nas áreas de recursos hídricos e saneamento.

Ao Neo/UFRGS, pela parceria e receptividade de toda a equipe.

À CAPES, pelo apoio por meio da bolsa de doutorado. Ao Ifes pela parceria com a UFRGS, na oferta do Doutorado Interinstitucional em Engenharia de Produção.

À UFES, principalmente ao LAMORH, Laboratório de Modelagem e Otimização em Recursos Hídricos, em especial ao Prof. José Antonio Tosta dos Reis, pela parceria e colaboração nesta pesquisa.

RESUMO

O processo de seleção de uma tecnologia de tratamento de esgoto envolve a análise de diferentes fatores como as características dos efluentes brutos, demanda por energia e material humano qualificado, disponibilidade de terreno, condições climáticas, geração de subprodutos e sua destinação final e capacidade suporte dos cursos d'água receptores, dentre outros. O processo de seleção torna-se mais complexo quando conduzido no âmbito de uma bacia hidrográfica, uma vez que deverão ser considerados corpos d'água com diferentes capacidades de autodepuração e a disposição final de efluentes com diferentes vazões e condições de qualidade. Este trabalho teve como objetivo central estabelecer uma metodologia que permita a seleção de sistemas de tratamento, no âmbito de bacias hidrográficas, considerando o emprego combinado de modelagem matemática de qualidade de água, técnica de otimização e método de análise multicriterial. Ainda que aplicável a quaisquer bacias hidrográficas, a metodologia proposta foi aplicada à Bacia Hidrográfica do Rio Pardo, curso d'água localizado na porção sul do estado do Espírito Santo. Eficiências mínimas de remoção de matéria orgânica, estimadas com emprego combinado de modelo matemático de qualidade de água e técnica de otimização, permitiram a pré-seleção dos sistemas de tratamento de esgoto, observadas a manutenção dos padrões de qualidade dos corpos d'água e/ou dos efluentes e a equidade no esforço de tratamento entre os diferentes sistemas objetos da seleção. Uma pesquisa qualitativa, conduzida por grupos focados, permitiu a validação dos subsistemas sociotécnicos (Ambiental, Tecnológico, Operação e Social) e dos critérios de seleção. A partir do emprego do método baseado na Teoria de Utilidade Multiatributo (MAUT) foi apropriado um Índice Sociotécnico que permitiu estabelecer, por localidade da área de estudo, o *ranking* das tecnologias de tratamento de esgoto pré-selecionadas. Para as sedes municipais de Ibatiba e Iúna (maiores aglomerados urbanos da área de estudo), o Índice Sociotécnico conduziu à priorização de variações dos sistemas de lodos ativados ou de tanque sépticos com biodisco como opções de tratamento. Para a sede do município de Irupi e para os povoados de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças, função da capacidade de autodepuração dos cursos d'água e/ou dos pequenos contingentes populacionais, o Índice Sociotécnico conduziu à priorização de sistemas mais simples, como diferentes variações do sistema de lagoas de estabilização.

Palavras-chave: Análise Multicriterial. Tecnologias. Esgoto. Sociotécnico. Bacia Hidrográfica

ABSTRACT

The selection process of a sewage treatment technology involves the analyses of different factors, such as, the characteristics of raw effluents, electricity and qualified human material demand, land availability, weather conditions, production of by-products and final destination and bearing capacity of water resources, among others. The selection process becomes more complex when carried out in a river basin ambit, once water bodies with capacities of self-depuration and the final destination of effluents with different outflows and quality conditions must be taken into consideration. This work's main goal was to establish a methodology that enabled the selection of systems of treatment, in river basin ambits, considering the combined use of water quality mathematical modelling, optimization technique and the method of multi-criterial analysis. Even applicable to any river basin, the methodology proposed was applied to Rio Pardo river basin, watercourse located in the south of Espírito Santo State. Minimum efficiencies of organic material removal, estimated with the combined use of water quality mathematical modelling and optimization technique, allowed the pre-selection of sewage treatment systems, observed the maintenance of quality standards of water bodies and/or effluents and the equity regarding the treatment effort among the selection's objects systems. A qualitative research, conducted by focus groups, allowed the validation of socio-technical subsystems (Environmental, Technological, Operation and Social) and the selection criteria. By using the method based on the Multi-attribute Utility Theory (MAUT), an Environmental Index was settled in order to allow the establishment, according to the study area location, of a *ranking* of pre-selected sewage treatment technologies. For the municipal headquarters in Ibatiba and Iúna (the biggest urban settlements within the study area), the Environmental Index conducted the prioritization of systems variations of activated sludge or septic tank with biodiscs as options for treatment. As for the municipal headquarter in Irupi and the Santíssima Trindade and Nossa Senhora das Graças villages, the self-depuration capacity function of the watercourses and/or small population contingent, the Environmental Index led to the prioritization of more simple systems, with different variations of the stabilization ponds system.

Keywords: Multi-criterial Analysis. Technologies. Sewage. Socio-technical. River Basin.

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS.....	11
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE ABREVIATURAS.....	13
1. INTRODUÇÃO	14
1.1. TEMA E OBJETIVOS	17
1.2. JUSTIFICATIVA DO TEMA E DOS OBJETIVOS	18
1.3. DELINEAMENTO DO ESTUDO	20
1.3.1. Método de Pesquisa.....	20
1.3.2. Método de Trabalho.....	20
1.4. DELIMITAÇÕES DO ESTUDO	21
1.5. ESTRUTURA DA TESE.....	21
2. REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1. TECNOLOGIAS EMPREGADAS PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES .	25
2.1.1. Lagoas de estabilização	25
2.1.2. Sistemas Anaeróbios	28
2.1.3. Lodos Ativados.....	30
2.1.4. Disposição no solo.....	32
2.1.5. Reatores Aeróbios com biofilmes	34
2.2. CAPACIDADE DE SUPORTE DOS CORPOS D'ÁGUA	36
2.3. PADRÕES AMBIENTAIS PARA CORPOS D'ÁGUA E EFLUENTES.....	44
2.4. AVALIAÇÃO E SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS	50
2.4.1. Métodos de Seleção de sistemas de tratamento de esgoto.....	50
2.4.2. Considerações sobre a Teoria da Utilidade Multiatributo	54
2.4.3. Critérios do processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos.....	55

3. METODOLOGIA.....	60
3.1. FASE 1 – LISTAGEM DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO E DOS CRITÉRIOS SOCIOTÉCNICOS.....	62
3.2. FASE 2 – PRÉ-SELEÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO	62
3.2.1. Apropriação de eficiências mínimas de tratamento de esgotos.....	65
3.2.2. Pré-seleção de tecnologias de tratamento de esgoto.....	67
3.3. FASE 3 - AVALIAÇÃO QUALITATIVA	67
3.3.1. Validação dos critérios e dos subsistemas sociotécnicos	67
3.3.2. Planejamento e condução dos Grupos Focados.....	68
3.3.3. Definição dos pesos de importância associados aos critérios de seleção	69
3.4. FASE 4 - AVALIAÇÃO QUANTITATIVA	70
3.4.1. Estruturação do <i>Framework</i>	71
3.4.2. <i>Ranking</i> das tecnologias de tratamento de esgotos para a área de estudo	74
4. RESULTADOS	75
4.1. FASE 1 - TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO E CRITÉRIOS SOCIOTÉCNICOS ASSOCIADOS	75
4.2. FASE 2 – PRÉ-SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS A PARTIR DO CRITÉRIO DE CORTE	82
4.2.1. Eficiências mínimas e pré-seleção de sistemas de tratamento	82
4.3. FASE 3 – AVALIAÇÃO QUALITATIVA.....	88
4.3.1. O processo de validação	89
4.3.2. Definição dos pesos de importância dos subsistemas sociotécnicos e critérios	94
4.4. FASE 4 – AVALIAÇÃO QUANTITATIVA – RANKING DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO.....	98
4.4.1. Condição 1 – Não imposição de requisitos de qualidade para o efluente final	102
4.4.2. Condição 2 – Efluentes tratados com limite máximo para concentração de DBO de 120mg/L.....	105

4.4.3. Condição 3 – Efluentes submetidos a tratamento com eficiência mínima de remoção de DBO	108
5. DISCUSSÃO	109
6. CONCLUSÃO.....	112
6.1. CONTRIBUIÇÕES ACADÊMICAS	113
6.2. CONTRIBUIÇÕES PRÁTICAS	114
6.3. OPORTUNIDADES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	114
REFERÊNCIAS	116
APÊNDICE A – Formulário de validação dos critérios e subsistemas sociotécnicos	122
APÊNDICE B – Formulário para obtenção dos pesos – Grupos Focados.....	126
APÊNDICE C – Ranking das tecnologias de tratamento de esgotos e.....	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema simplificado de uma lagoa de estabilização	26
Figura 2	Sistemas Anaeróbios.....	29
Figura 3	Esquema simplificado do processo de lodos ativados	31
Figura 4	Alternativas para sistemas com base no solo.....	33
Figura 5	Alternativas para sistemas com base na água	34
Figura 6	Reatores Aeróbios com biofilmes.....	35
Figura 7	Evolução da Estrutura funcional dos modelos Qual-I, Qual-II, Qual2- E, Qual2K.....	43
Figura 8	Classificação das águas do Território Nacional, segundo Res.CONAMA nº 357/05.....	46
Figura 9	Etapas associadas ao planejamento de estações de tratamento de esgotos	51
Figura 10	Etapas associadas ao projeto de sistemas se tratamento de esgoto	51
Figura 11	Comparativo entre Métodos de Seleção de Sistemas de Tratamento de Esgoto.....	53
Figura 12	Fluxograma da estrutura metodológica da pesquisa	61
Figura 13	Representação da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo.....	64
Figura 14	Diagrama unifilar dos cursos d'água da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo	65
Figura 15	Informações dos Especialistas participantes do processo de validação	90
Figura 16	Curva-S - critérios de seleção diretamente proporcionais ao Índice Sociotécnico	100
Figura 17	Curva-S - critérios de seleção inversamente proporcionais ao Índice Sociotécnico.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Condições e padrões de qualidade para corpos d'água doce segundo a Res. CONAMA nº 357/05.....	47
Tabela 2	Critérios técnicos e custos de implantação, operação e manutenção de sistemas de tratamento de esgotos.....	57
Tabela 3	Critérios técnicos para seleção de sistemas de tratamento de esgotos.....	59
Tabela 4	<i>Framework</i> proposto para o ranking dos sistemas de tratamento de esgotos.....	71
Tabela 5	Tecnologias de tratamento de esgotos, com faixa típica de eficiência de remoção da fração carbonácea da matéria orgânica	75
Tabela 6	Tecnologias de tratamento de esgotos e suas características operacionais.....	77
Tabela 7	Tecnologias de Tratamento de esgotos e suas características qualitativas.....	79
Tabela 8	Eficiências mínimas (em %) associados à diferentes condições de tratamento	84
Tabela 9	Tecnologias de tratamento de esgotos pré-selecionados para a Condição 1	85
Tabela 10	Tecnologias de tratamento de esgotos pré-selecionados para as Condições 2 e 3	87
Tabela 11	Validação 01 – Classificação dos critérios nos subsistemas sociotécnicos.....	92
Tabela 12	Validação 02 – Critérios de seleção	93
Tabela 13	Pesos dos critérios de seleção obtidos por meio dos Grupos Focados	95
Tabela 14	Pesos dos subsistemas sociotécnicos obtidos por meio dos Grupos Focados.....	95
Tabela 15	Estrutura de preferência utilizada para o processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos.....	96
Tabela 16	Distinção dos critérios por Benefícios ou Limitações.....	99
Tabela 17	Eficiências mínimas de tratamento de esgoto associados à Condição 1	102
Tabela 18	<i>Ranking</i> das tecnologias de tratamento de esgoto para a Condição 1	103
Tabela 19	Eficiências mínimas de tratamento de esgoto associados à Condição 2	106
Tabela 20	<i>Ranking</i> das tecnologias de tratamento de esgoto para Condição 2 e 3	107
Tabela 21	Eficiências mínimas de tratamento de esgoto associados à Condição 3	108

LISTA DE ABREVIATURAS

- AHP – Método da Análise Hierárquica (*Analytic Hierarchy Process*);
- AMD - Apoio Multicritério a Decisão
- CGT - Teoria dos Jogos Cooperativos (*Cooperative Game Theory*)
- CL - Coliformes termotolerantes
- CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente
- CP – Programação de compromisso (*Compromise Programing*);
- CR - CRITÉRIO
- DBO ou DBO_{5,20} – Demanda Bioquímica de Oxigênio
- ELECTRE - Eliminação e Escolha como Expressão da Realidade (*Elimination and Choice Expressing Reality*);
- EPA ou USEPA - *United States Environmental Protection Agency*
- ETE – Estação de Tratamento de Esgoto
- FAHP – Método Fuzzy AHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process Method);
- GF - GRUPO FOCADO
- I_{Si} – Índice Sociotécnico
- MAUT – Teoria de Utilidade Multiatributo (Multi-Attribute Utility Theory)
- O&M – Custos de Operação e Manutenção
- OD – Oxigênio Dissolvido
- PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos
- PROMETHEE - Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations;
- PROSEL – Process Selection.
- SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
- SS - Sólidos Suspensos
- UASB – Reatores de manta de lodo (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*)

1. INTRODUÇÃO

As atividades industriais geram, além de emissões de gases e resíduos sólidos, efluentes líquidos que são vertidos aos recursos hídricos disponíveis. Somam-se aos efluentes líquidos industriais os expressivos volumes de efluentes de natureza doméstica que, no Brasil, são precariamente tratados antes da disposição final nos mesmos recursos hídricos disponíveis. Desta maneira, obtém-se como consequência um considerável impacto ambiental sobre as fontes hídricas, prejudicando o ecossistema existente no entorno das mesmas, assim como a utilização dessas fontes para o consumo humano (VON SPERLING, 2007; LEME, 2010).

No Brasil, a oferta dos serviços de tratamento de esgotos foi pouco alterada nos últimos anos. Por meio do Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos, estudo realizado anualmente pelo Ministério das Cidades, foi constatado que o Brasil apresentava uma cobertura de 37,9% no tratamento de esgotos no ano de 2010 (SNIS, 2012), aumentando para 38,7% no ano de 2012 (SNIS, 2014a). Em 2013, a cobertura de tratamento no país foi ligeiramente aumentada, alcançando 39% (SNIS, 2014b).

Embora os estudos tenham demonstrado um pequeno incremento percentual no tratamento de esgotos, os níveis de cobertura desses serviços ainda são considerados relativamente baixos no país, principalmente se comparados aos níveis de cobertura dos serviços de abastecimento de água, que atingem 93% da população brasileira (SNIS, 2013). Considerando que os custos de investimentos e operação para a implantação de sistemas de tratamento de esgotos podem oscilar substancialmente, em função do tipo de tecnologia a ser implementada (JORDÃO; PESSÔA, 2005; VON SPERLING, 2005; TCHOBANOGLIOUS et al., 2016), o processo de seleção deve ser conduzido de forma cuidadosa.

Com o advento da Política Nacional de Recursos Hídricos, que consolidou a bacia hidrográfica como unidade de planejamento dos recursos hídricos e com a consolidação dos padrões de qualidade ambiental, vários pesquisadores têm desenvolvido metodologias para subsidiar o processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos a partir das respostas dos corpos d'água receptores finais de efluentes tratados. Estas metodologias têm empregado, de forma combinada, um modelo de qualidade de água e uma técnica de otimização. Exemplos desta abordagem são os trabalhos Andrade, Mauri e Mendonça (2012) e, Louzada, Reis e Mendonça (2013). Cabe ressaltar que estas pesquisas têm como principal objetivo a determinação de níveis mínimos de tratamento de esgotos, com a garantia de atendimento dos padrões de qualidade ambiental, não havendo, contudo, uma perspectiva a seleção final dos processos que darão

forma às estações de tratamento. A Análise Multicritério constitui uma metodologia que permite o tratamento simultâneo de diferentes aspectos, qualitativos e quantitativos, em um processo de tomada de decisão (MIN, 1994).

Diversos fatores devem ser considerados na escolha de um determinado sistema – sobretudo as restrições ambientais: a vazão de efluentes brutos, as características de qualidade do afluente, a disponibilidade de terreno, as condições climáticas, a eficiência do sistema, o processamento do lodo e dos demais resíduos gerados no processo de tratamento, incluindo a demanda por energia e disponibilidade de material humano (TCHOBANOGLIOUS et al., 2016).

Os critérios considerados no processo de escolha do sistema de tratamento podem distinguir entre países desenvolvidos e em desenvolvimento. Em países desenvolvidos, a eficiência, a confiabilidade, a disposição do lodo e a disponibilidade de área são fatores considerados críticos no processo de escolha do sistema de tratamento de esgotos, enquanto que para os países em desenvolvimento, aspectos como custos de construção e de operação, simplicidade e sustentabilidade são aspectos críticos para a tomada de decisão (VON SPERLING, 1996; YU; TAY; WILSON, 1997; VON SPERLING, 2005).

Segundo Oliveira (2004), quando consideradas as crescentes pressões associadas à manutenção e recuperação da qualidade dos ambientes naturais, a melhor alternativa de tratamento de esgotos é aquela que garante eficiência ecológica e econômica. Quando são consideradas as cobranças para manter e recuperar a qualidade dos corpos de água, o melhor sistema de tratamento de esgoto é aquele que confere eficiência ecológica e econômica. Assim sendo, a seleção do melhor sistema de tratamento de esgoto baseia-se na minimização do consumo de energia, da geração de resíduos e dos custos de implantação, operação e manutenção, com garantia de remoção dos poluentes, além do cumprimento dos padrões de qualidade ambiental (OLIVEIRA, 2004).

Leoneti (2009), por sua vez, considerou os critérios: custos de operação e manutenção (O&M) e os investimentos iniciais da implantação da planta de tratamento de esgoto, como os critérios mais importantes para processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos. Karimi et al. (2011) utilizaram a confiabilidade e flexibilidade do sistema, os custos de implantação, custos de O&M, a quantidade de lodo gerado, a disposição do lodo, os impactos ambientais, capacidade de assimilação de cargas afluentes, demanda por área, clima, além dos padrões de qualidade ambiental de alguns parâmetros físico-químicos como odor, oxigênio dissolvido, sólidos suspensos, nitrogênio e fósforo, como critérios relevantes para a seleção de sistemas de tratamento de esgotos.

Portanto, observa-se, com base aos critérios anteriormente descritos por diferentes autores, que o processo de seleção de um determinado sistema precisa contemplar uma avaliação multicriterial, onde existem tanto aspectos qualitativos como quantitativos que devem ser avaliados conjuntamente na tomada de decisão a respeito do sistema de tratamento dos esgotos mais viável para uma determinada condição (GOLMOHAMMADI, MELLAT-PARAST, 2012; KALBAR, KARMAKAR, ASOLEKAR, 2012). Quando considerada a forma de seleção dos sistemas de tratamento de esgotos, observa-se na literatura que, nas últimas décadas, diversas aplicações têm sido propostas como, por exemplo, os trabalhos estabelecidos por Souza (1992), Gobbetti (1993), Reami (2011) e Cornelli (2014). Contudo, esses métodos possuem uma importante limitação, uma vez que não integram todas as diferentes dimensões de avaliação acima apresentadas considerando processos decisórios multicriteriais. Desta forma, esses métodos são limitados por não considerarem toda a complexidade do problema. Ainda, a despeito das diferentes etapas que conformam os métodos disponíveis para a seleção dos sistemas de tratamento de esgoto, é relevante observar que a definição de um sistema de tratamento deve considerar, invariavelmente, da capacidade de assimilação dos corpos de água que serão os receptores finais dos esgotos tratados. No entanto, no âmbito de uma bacia hidrográfica, o processo de seleção torna-se muito mais laborioso, pois os corpos d'água de uma bacia apresentam diferentes capacidades de autodepuração e recebem múltiplos lançamentos de esgotos domésticos e industriais com diferentes cargas poluidoras (LOUZADA; REIS; MENDONÇA, 2013).

A grande quantidade de fatores intervenientes na definição da tecnologia de tratamento de esgotos a ser implementada, associados à necessidade de avaliação da capacidade de assimilação dos corpos d'água receptores, tornam assim a tomada de decisão um processo complexo. Por este motivo, surgem três questões que conformam a presente pesquisa: a) como definir sistemas de tratamento de esgotos em uma bacia hidrográfica? b) como considerar a interface água *versus* esgoto na tomada de decisão? e c) como avaliar os sistemas de tratamento de esgoto considerando modelos de qualidade de água, técnicas de otimização e análise multicriterial? Diante deste contexto, esta pesquisa busca desenvolver uma sistemática de avaliação multicriterial, estabelecido a partir de sistemas de tratamento de efluentes passíveis de serem implementados para que assegurem o atendimento dos padrões de qualidade ambiental. Para tanto, o presente trabalho considera, para aplicação da sistemática, a Bacia Hidrográfica do Rio Pardo, na qual serão avaliadas as implementações propostas na presente

tese. Destaca-se, neste sentido, o caráter inovador do tema proposto, uma vez que não se identificou na literatura estudos do tipo em bacias hidrográficas.

1.1. TEMA E OBJETIVOS

O tema de pesquisa desta tese enquadra-se na Engenharia de Sustentabilidade, contemplando a gestão de efluentes e dos recursos naturais. O tema central desta tese aborda os sistemas de tratamento de efluentes e a qualidade da água no âmbito de uma bacia hidrográfica. Esses sistemas integram a maioria das plantas industriais ou constituem uma das atividades fim das empresas de saneamento. O estudo desses sistemas exige que sejam considerados aspectos ambientais e econômicos associados às tecnologias disponíveis para o tratamento de efluentes. O objetivo geral desta tese é propor uma sistemática de avaliação multicriterial que considere alternativas tecnológicas para o tratamento de efluentes, visando o atendimento aos padrões de qualidade de água, com possibilidade de aplicação em quaisquer bacias hidrográficas.

Para que o objetivo geral seja alcançado, foram delineados os objetivos específicos apresentados na sequência.

- i) Selecionar, dentre os sistemas de tratamento de esgotos disponíveis, aqueles aplicáveis à Bacia Hidrográfica do Rio Pardo-ES.
- ii) Estabelecer uma sistemática de avaliação multicriterial para seleção dos sistemas de tratamento de esgotos na Bacia Hidrográfica do Rio Pardo-ES.
- iii) Aplicar a sistemática de avaliação multicriterial para obtenção de um *ranking* dos sistemas de tratamento de esgotos na Bacia Hidrográfica do Rio Pardo-ES.

1.2. JUSTIFICATIVA DO TEMA E DOS OBJETIVOS

O tema desta tese se enquadra na gestão de efluentes, uma área importante na Engenharia de Sustentabilidade. Na gestão de efluentes, a coleta e o tratamento de esgotos constituem alvo de demandas no sistema de saneamento básico do país. Com a criação da Lei Federal nº 11.445/2007, que dá diretrizes nacionais para o saneamento básico e para a Política Federal de Saneamento Básico, algumas contribuições foram possíveis de se estabelecer como, viabilizar os investimentos no setor de saneamento. A Lei Federal nº 9.433/1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), definiu que a bacia hidrográfica é a unidade de planejamento dos recursos hídricos. Logo, todo lançamento e diluição de efluentes devem ser estruturados e planejados em nível de bacias hidrográficas, o que justifica e diferencia, dentre outros estudos, a aplicabilidade do tema da pesquisa.

Outro importante dispositivo normativo para a gestão de efluentes é a Resolução CONAMA nº 357/2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e, dentre outros, estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Esta resolução, indiretamente, estabelece os níveis de tratamento de esgoto que os sistemas de tratamento de esgoto devem possuir.

A Resolução CONAMA nº 430/2011 dispõe sobre condições, parâmetros, padrões e diretrizes para a gestão do lançamento de efluentes em corpos de água receptores e, complementa e altera parcialmente a Resolução CONAMA nº 357/2005. Ambas resoluções são amplamente utilizadas pelos órgãos gestores de recursos hídricos e de licenciamento ambiental.

Adicionalmente, muitas informações acerca da gestão de efluentes não foram esgotadas, diferentemente da área de abastecimento de água (LOFRANO; BROWN, 2010).

Diversas metodologias têm sido aplicadas nas últimas décadas. Souza (1992), Souza e Foster (1996), Gobbetti (1993), Reami (2011) e Cornelli (2014) constituem exemplos de pesquisas referentes à seleção de sistemas de tratamento de esgotos. No entanto, função da complexidade do problema e do número de variáveis a serem trabalhadas, o assunto não foi exaurido, permitindo a adaptação de metodologias de apoio à tomada de decisão com a diversificação da natureza e do conjunto de critérios de seleção e a condução do processo de seleção de sistemas de tratamento no âmbito de bacias hidrográficas.

As pesquisas que se referem à escolha de sistemas de tratamento de esgoto têm concentrado esforços no sistema água (recursos hídricos) ou no sistema esgoto (tratamento de esgoto). Essa prática tem conduzido estudos, quando focados no sistema água, utilizando modelos de qualidade de água ou estes associados às técnicas de otimização (REIS; VALORY;

MENDONÇA, 2015; VALORY; REIS; MENDONÇA, 2016; SANTORO; REIS; MENDONÇA, 2016; FANTIN; REIS; MENDONÇA, 2016;). No que se refere ao foco no sistema esgoto, as pesquisas têm utilizado análise multicritério (TECLE et al.,1988; SOUZA, 1992; GOBETTI, 1993; OLIVEIRA, 2004; LEONETI, 2004; KARIMI et al., 2011, LEONETI, 2012; HUNT, 2013; CORNELLI, 2014). Não é usual, portanto, a seleção de sistemas de tratamento de esgoto envolvendo a interface água *versus* esgoto, considerando as diferentes ferramentas metodológicas mencionadas. Esta pesquisa, propõe uma inovação ao propor uma sistemática para seleção de tecnologias de tratamento de esgoto, utilizando conjuntamente modelo de qualidade associado à técnica de otimização e análise multicriterial. Outro aspecto importante é a análise do sistema água *versus* esgoto, sob o prisma de bacias hidrográficas, conforme determinação legal preconizada pela Lei Federal nº 9.433/1997 (PNRH). Há de se ressaltar que todo o processo de outorga é realizado no âmbito de uma bacia hidrográfica, não podendo, portanto, ser diferente nas pesquisas que versam sobre o tema recursos hídricos, principalmente ao se considerar os possíveis impactos decorrentes de lançamento e diluição de esgotos.

A pesquisa engloba 34 tecnologias de tratamento de esgoto que, após avaliação multicriterial, foram consolidadas numa hierarquização por meio de um *ranking* das tecnologias. Para cada tecnologia, dezenove critérios foram elencados e validados, numa construção sociotécnica (Ambiental, Tecnológico, Operação e Social), considerando aspectos mais globais para tomada de decisão, tendo-se em vista que a maioria dos estudos realizados na área envolvem os aspectos econômicos.

Adicionalmente, a utilização da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) é algo ainda pouco disseminado na área ambiental, em especial na seleção de tecnologias de tratamento de esgoto, por serem utilizados outros métodos de seleção como: AHP, Electre, PROMETHEE, CP, etc., como pode ser observado nos estudos de Hajkowicz e Collins (2007), Campos (2011), Cornelli (2014).

Como a tomada de decisão por determinada tecnologia envolve múltiplos critérios, não só quantitativos, mas também qualitativos, esta pesquisa envolve uma análise qualitativa para obtenção de estrutura de preferência, por meio de grupos focados, técnica de pesquisa pouco utilizada na Engenharia de Produção e na Engenharia Ambiental. O uso de grupos focados é mais recorrente na área de saúde e marketing (RIBEIRO; NEWMANN, 2012). O emprego dos grupos focados na metodologia desta pesquisa traz contribuições para a área ambiental, preenchendo uma lacuna pela obtenção de estrutura de preferência, que neste trabalho, tem o

propósito de que estas sejam utilizadas em quaisquer bacias hidrográficas. Um aspecto importante a destacar é que, usualmente, as estruturas de preferência adotadas em muitos trabalhos são decorrentes de uma aplicação específica em determinada região/local, com limites geográficos mais limitados do que uma bacia hidrográfica, cuja aplicabilidade dessas estruturas se restrinja somente àquela região estudada.

1.3. DELINEAMENTO DO ESTUDO

Na sequência são apresentados os métodos de pesquisa e de trabalho que são utilizados nesta pesquisa.

1.3.1. Método de Pesquisa

Segundo a natureza desta pesquisa, este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, uma vez que direciona à solução de problemas específicos como a tomada de decisão quanto à escolha de sistemas de tratamento de efluentes no âmbito de bacia hidrográfica (GIL, 2008). Em relação ao tipo de abordagem, esta pesquisa utiliza uma abordagem mista, pois combina métodos quantitativos e qualitativos (GIL, 2008; MIGUEL, 2012).

Em relação aos objetivos, o trabalho inicia com uma pesquisa exploratória, realizando o levantamento teórico dos sistemas de tratamentos de esgotos com possibilidade de aplicação na Bacia Hidrográfica do Rio Pardo, para posterior definição desses sistemas (GIL, 2008; MIGUEL, 2012). Na sequência, a pesquisa se conforma em explicativa, a partir do estabelecimento de um modelo de estudo para a bacia em questão. Nesta fase, serão alocados arranjos de sistemas de tratamento de esgotos, na busca do desempenho ótimo na bacia.

1.3.2. Método de Trabalho

O desenvolvimento desta pesquisa constitui-se em quatro etapas principais. A primeira etapa consiste na configuração de sistemas de tratamento de esgotos e de critérios sociotécnicos, a partir de um aprofundamento teórico. A segunda etapa consiste numa pré-seleção de tecnologias de tratamento de esgotos, a partir da apropriação das eficiências mínimas de remoção de matéria orgânica, para a bacia hidrográfica em estudo. A terceira etapa contempla uma avaliação qualitativa, utilizando grupos focados como técnica de pesquisa, cujo objetivo principal é a obtenção de Estrutura de Preferência com propósito de aplicação em qualquer bacia hidrográfica. Por fim, a quarta etapa consiste em numa avaliação quantitativa, com o

desenvolvimento de uma sistemática de avaliação multicriterial que auxiliará no processo de seleção de tecnologias de tratamento de esgotos, a partir do estabelecimento de um *ranking* das tecnologias pré-selecionadas na segunda etapa.

1.4. DELIMITAÇÕES DO ESTUDO

A pesquisa apresenta as tecnologias empregadas no tratamento de esgotos nos níveis primário, secundário e terciário. No entanto, não são abordados os aspectos construtivos e de dimensionamento dos sistemas de tratamento de efluentes. Embora a dinâmica de tratamento dos esgotos seja diferenciada nos mais diversos tipos de tecnologias a serem apresentadas, também não serão detalhados os aspectos microbacterianos que ocorrem na operação dos sistemas de tratamento de esgotos.

A metodologia desenvolvida na presente pesquisa assume como unidade de planejamento territorial a bacia hidrográfica, conforme fundamento da Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997). Não deverá ser, portanto, aplicada a outras divisões sócio-políticas do território nacional. É relevante observar que a metodologia apresentada demanda informações ambientais da bacia hidrográfica objeto de aplicação, aspecto que não é passível de generalização. Desta forma, sempre que aplicado a uma nova bacia hidrográfica, demandará de apropriação de sua caracterização ambiental.

Por último, o trabalho não visa aprofundar em detalhes econômicos das tecnologias selecionadas, tais como os fluxos de caixa, retorno de investimento e outros aspectos. Embora estes pontos sejam de relevância no momento de seleção das tecnologias estudadas, esses aspectos já são bem conhecidos no meio dos especialistas sobre o tema. Portanto, o trabalho focaliza-se na interface entre esses aspectos econômicos já conhecidos, quando combinados com os aspectos qualitativos da seleção. A combinação sistêmica entre esses aspectos quantitativos e qualitativos ainda não foi estudada na área proposta, sendo, portanto, o escopo principal do estudo desta tese. Adicionalmente, critérios sociotécnicos foram incorporados nesta pesquisa.

1.5. ESTRUTURA DA TESE

Esta pesquisa está dividida em seis capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma justificativa do tema da pesquisa, os objetivos a serem alcançados neste trabalho, além do delineamento e as delimitações do estudo, apresentando o método de trabalho e de pesquisa utilizados.

No segundo capítulo é apresentado o referencial teórico, contextualizando a capacidade de suporte dos corpos d'águas, os padrões estabelecidos para qualidade de águas superficiais e as principais tecnologias empregadas para o tratamento de efluentes.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia, em que são descritas as fases que constituíram a pesquisa, tais como a seleção de tecnologias de tratamento de esgoto aplicáveis à Bacia Hidrográfica do Rio Pardo, a pré-seleção de tecnologias de tratamento a partir da apropriação de eficiências mínimas de remoção de matéria orgânica, a definição de Estrutura de Preferência por meio de Análise Qualitativa e o estabelecimento de uma Sistemática de avaliação multicriterial para seleção dos sistemas de tratamento de esgotos, no âmbito de uma bacia hidrográfica.

Os resultados e a discussão são abordados no quarto e quinto capítulo, respectivamente. O sexto capítulo apresenta as conclusões desta pesquisa.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O esgoto doméstico bruto é constituído por água (99,9%) e uma pequena fração (0,1%) de sólidos (TCHOBANOGLIOUS et al.,2016). A fração de sólidos é constituída pelos sólidos dissolvidos ou em suspensão, fixos ou voláteis. Nesta pequena fração de sólidos estão incluídos os microrganismos presentes nos esgotos domésticos (VON SPERLING, 2005). Os diferentes sistemas de tratamento de esgotos têm como finalidade básica a remoção dos sólidos da massa líquida. Os sólidos removidos conformam o lodo, subproduto do tratamento de esgotos que impõe tratamento complementar – para posterior utilização em atividades como, por exemplo, fertilização – ou a adequada disposição final (TCHOBANOGLIOUS et al.,2016).

O volume de esgotos que chega às estações de tratamento de esgotos é composto pela soma dos esgotos domésticos (parcela que normalmente inclui os esgotos produzidos pelas residências, instituições e estabelecimentos comerciais), vazão de infiltração e esgotos industriais (VON SPERLING, 2005). A vazão de esgotos domésticos é função do consumo per capita de água e do coeficiente de retorno (coeficiente que indica qual a parcela de água consumida que é transformada em esgoto). Seu valor apresenta severas flutuações em função de aspectos como nível de desenvolvimento sócio-econômico de uma região, clima, pressão na rede de distribuição de água, existência de medição da água distribuída, existência de sistema de tratamento de esgoto, dentre outros. O consumo de água – e a conseqüente produção de esgotos – além das variações intranuais, apresenta variações diárias, horárias e instantâneas (TCHOBANOGLIOUS et al.,2016).

A vazão de infiltração corresponde à parcela de água que afluí ao sistema de esgotamento sanitário através de fissuras na rede coletora, defeitos nas tubulações e conexões, juntas e paredes dos poços de visita. Conforme observam Castro et al. (1995), a vazão de infiltração é dependente de aspectos como tipo de tubulação, tipo de junta empregada entre tubos e conexões, extensão da rede coletora, tipo de solo, profundidade do lençol, densidade populacional e área servida. Por outro lado, a vazão de esgotos industriais é função do tipo e porte das indústrias, existência de sistemas de reúso de água, nível de recirculação da água de processo, existência e tipo de tratamento dos esgotos produzidos pela indústria (CASTRO et al.,1995).

Os sistemas de tratamento são estabelecidos a partir de processos que impõem aos esgotos diferentes níveis de tratamento. Segundo Castro et al. (1995), os diferentes níveis de tratamento são assim definidos:

- Tratamento preliminar: tem por objetivo a remoção de sólidos grosseiros e areia, buscando proteger os dispositivos de transporte de esgotos (bombas e tubulações) e os demais processos de uma planta de tratamento. O tratamento preliminar envolve processos físicos e constitui etapa inicial do tratamento dos esgotos. O gradeamento e desarenadores (caixa de areia) são as unidades que normalmente conformam o tratamento preliminar;
- Tratamento primário: tem como finalidade a remoção de sólidos em suspensão por meio de processos físicos. Remove de 60% a 70% dos sólidos em suspensão, 30% a 40% da matéria orgânica e de 30% a 40% dos organismos patogênicos. Em estações de tratamento de esgotos, o tratamento primário é usualmente levado a termo por meio de decantadores primários. Tanques sépticos – normalmente empregados em sistemas centralizados de tratamento de esgotos – também constituem uma forma de tratamento primário dos esgotos;
- Tratamento secundário: tem por finalidade remover os sólidos não sedimentáveis, matéria orgânica em estado solúvel e, eventualmente, nutrientes. Por meio de processos predominantemente biológicos, o tratamento secundário permite a remoção de 60% a 99% da matéria orgânica e dos organismos patogênicos. Os diferentes tipos de lagoas de estabilização e de processos de lodos ativados, os reatores anaeróbios, os reatores aeróbios com biofilmes e os sistemas de disposição de esgotos sobre o solo constituem alternativas para o tratamento secundário dos esgotos;
- Tratamento terciário: tem como principal objetivo a remoção de poluentes específicos (compostos tóxicos ou não biodegradáveis) ou a remoção complementar de poluentes não removidos em níveis satisfatórios no tratamento secundário. Sistemas reservados à remoção de nutrientes e à desinfecção usualmente são considerados sistemas terciários de tratamento de esgotos.

Para cada nível de tratamento há uma série de tecnologias potenciais para a remoção de poluentes presentes no esgoto, seja doméstico ou industrial. As principais tecnologias de tratamento de esgotos estão descritas na seção subsequente.

2.1. TECNOLOGIAS EMPREGADAS PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES

As diferentes tecnologias para o tratamento de esgoto são apresentadas na literatura técnica por diversos autores. Henze et al. (2002), Jordão e Pessôa (2005), von Sperling (2005), Leme (2010) e Tchobanoglous et al. (2016) têm como foco de discussão os sistemas centralizados, ou seja, sistemas que consistem na configuração de uma estação de tratamento de esgoto que recebe a contribuição de esgotos advindos de uma extensa rede coletora. Para os sistemas centralizados, as tecnologias conformam-se desde lagoas de estabilização, filtros biológicos, reatores, lodos ativados até a disposição no solo.

Por outro lado, os sistemas descentralizados de tratamento de esgotos são destinados para casos em que a coleta, o tratamento e a disposição final dos esgotos ocorrem próximo ao local onde o esgoto é gerado. Gikas e Tchobanoglous (2009), Massoud, Tarhini e Nasr (2009), Moussavi, Kazembeigi e Farzadkia (2010), Sabry (2010), Libralato, Ghirardini e Avezzù (2012), Li (2013) e Jorsaraei, Gougol e Van Lier (2014), a partir de diferentes perspectivas, discutem variados aspectos relacionados com a implantação, operação e manutenção de sistemas descentralizados de tratamento de esgotos. Segundo Tchobanoglous et al. (2016), o tanque séptico constitui-se no sistema mais comumente empregado para o tratamento descentralizado de esgotos.

Nas seções subsequentes, serão apresentadas sumariamente as tecnologias habitualmente empregadas para o tratamento de esgotos sanitários em países de clima quente.

2.1.1. Lagoas de estabilização

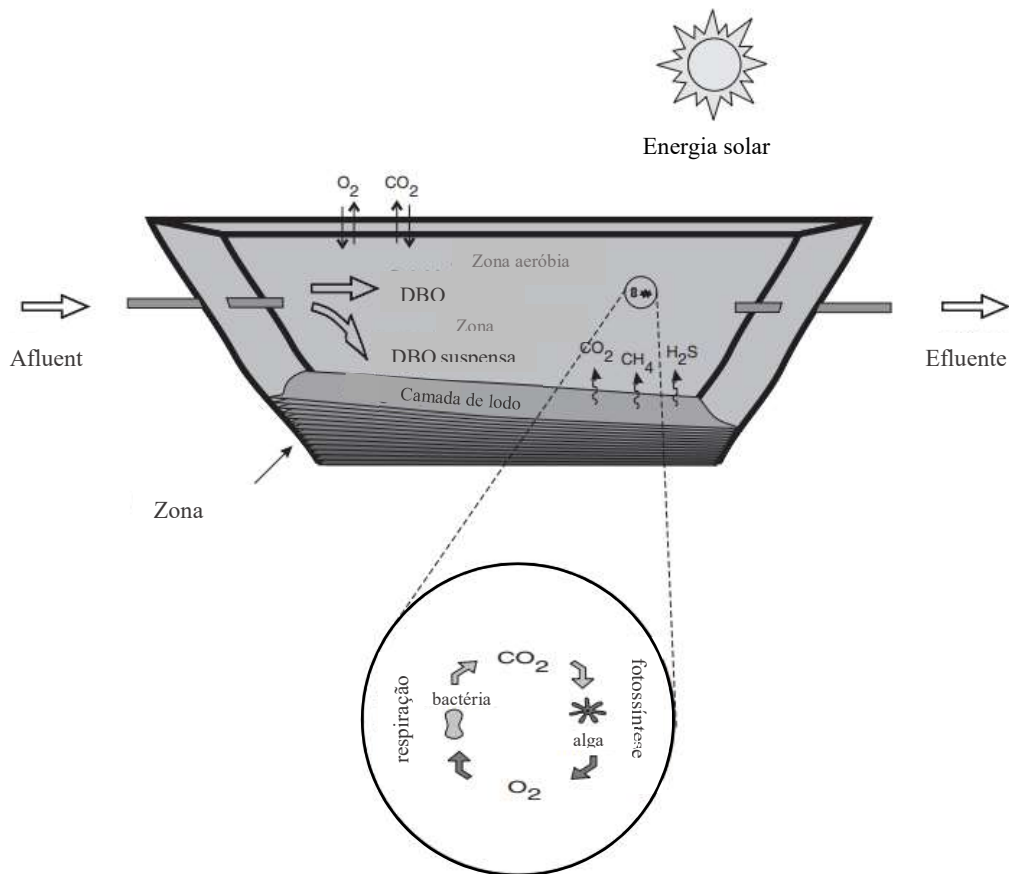
As lagoas de estabilização constituem a alternativa mais simples para o tratamento de esgotos. São indicadas para o tratamento de esgotos para condições usualmente encontradas no Brasil, particularmente em função de *a*) suficiente disponibilidade de área em boa parte dos municípios, *b*) elevadas temperaturas médias e insolação, *c*) simplicidade operacional e *d*) baixa (ou nenhuma) demanda de equipamento para operação (VON SPERLING, 1996).

Dentre as diferentes variantes construtivas das lagoas de estabilização, as lagoas facultativas são as mais simples. Operacionalmente funcionam com a retenção dos esgotos por um período suficientemente longo para que processos naturais de estabilização da fração carbonácea da matéria orgânica se estabeleçam. Ainda que a operação seja simples e confiável e os custos de implantação e operação bastante competitivos, as lagoas facultativas, por envolverem processos essencialmente naturais, exigem tempos de detenção substancialmente elevados para a

estabilização da matéria orgânica (ARCEIVALA, 1992; VON SPERLING, 1996; JORDÃO; PESSÔA, 2005; TCHOBANOGLIOUS et al., 2016).

Conforme discutiram detalhadamente Uehara et al. (1989), von Sperling (1996) e Tchobanoglous et al. (2016), nas lagoas facultativas a matéria orgânica dissolvida (DBO solúvel) e a matéria orgânica em suspensão de pequenas dimensões (DBO finamente particulada) são assimiladas pelas bactérias facultativas. A matéria orgânica particulada (DBO suspensa) tende a se sedimentar, sendo convertida anaerobicamente por bactérias no fundo da lagoa. Nas camadas superficiais das lagoas facultativas, a estabilização da matéria orgânica demanda oxigênio dissolvido, constituinte fornecido por meio da atividade fotossintética realizada pelas algas. Desta forma, numa lagoa facultativa adequadamente projetada e operada, estabelece-se o equilíbrio entre consumo e a produção de oxigênio e gás carbônico. Um esquema simplificado de uma lagoa facultativa é apresentado por meio da Figura 1.

Figura 1 Esquema simplificado de uma lagoa de estabilização



Fonte: von Sperling (1996)

As lagoas anaeróbias em associação com lagoas facultativa (combinação também conhecida como Sistema Australiano), lagoas aeradas facultativas, lagoas de alta taxa e lagoas de maturação constituem as principais variantes construtivas das lagoas facultativas. Segundo observam von Sperling (1996), Jordão e Pessoa (2005) e Tchobanoglous et al. (2016), as referidas variantes diferenciam-se das lagoas facultativas em função dos seguintes aspectos:

- A associação entre lagoas anaeróbias e lagoas facultativas apresenta eficiência similar à lagoa facultativa; no entanto, a área total demandada pela associação das lagoas equivale a aproximadamente 2/3 da área que seria ocupada por uma lagoa facultativa exclusiva. Em função da existência de uma etapa anaeróbia podem surgir problemas com odores, decorrência da eventual liberação de gás sulfídrico;
- Nas lagoas aeradas facultativas, o oxigênio deixa de ser fornecido por meio da atividade fotossintética, sendo gerado a partir da operação de aeradores mecânicos. Esta variante construtiva demanda menores áreas; no entanto, função da mecanização, a operação e manutenção são menos simples e substancialmente mais onerosas;
- As lagoas de alta taxa apresentam como principal característica a pequena baixa profundidade. Esta característica permite que a luz penetre em toda a coluna líquida, assegurando elevada atividade fotossintética, e altos valores de pH e concentrações de oxigênio dissolvido. Os efluentes finais destas lagoas possuem menores concentrações de microrganismos patogênicos e nutrientes. Por receber alta carga orgânica, esta lagoa recebe uma moderada agitação por meio de equipamentos de baixa potência;
- Com profundidades máximas de 1 (um) metro, as lagoas de maturação estabelecem condições adversas para os microrganismos patogênicos – radiação ultravioleta atravessando toda a coluna líquida, valores elevados de pH e OD (Oxigênio Dissolvidos), temperatura inferior à do trato intestinal humano e falta de nutrientes. Constituem, portanto, variantes das lagoas facultativas empregadas para a remoção de microrganismos patogênicos, sendo recorrentemente empregadas como pós-tratamento dos esgotos.

Em função da versatilidade das lagoas facultativas, estes sistemas de tratamento de esgotos – bem como suas diferentes variantes construtivas – têm encontrado aplicações em diferentes condições operacionais. Ilustram o emprego de lagoas facultativas, sob diferentes condições de operação e em diferentes locais, os trabalhos de Lima (1984), Yhdego (1992), von Sperling (1999), Ingallinella et al. (2002), Jail et al. (2010), Pirsahab et al. (2014), Ragush et al. (2015), Verbyla e Mihelcic (2015) e Carrilho e Carvalho (2016).

2.1.2. Sistemas Anaeróbios

Os processos anaeróbios de tratamento de esgotos são aqueles que se estabelecem na ausência de oxigênio dissolvido. Segundo Jordão e Pessoa (2005), três aspectos fundamentais favorecem a aplicação de reatores anaeróbios de alta taxa para o tratamento de esgotos. São eles:

- Os reatores anaeróbios acumulam grande quantidade de biomassa, em função de processos como a sedimentação, agregação à sólidos ou recirculação. Como consequência, o tempo de permanência dos microrganismos nos reatores anaeróbios é substancialmente superior ao tempo de detenção hidráulica, inclusive para os microrganismos que apresentam menores taxas de crescimento;
- Promoção de melhor contato entre biomassa e substrato;
- Melhor atividade da biomassa.

Os sistemas anaeróbios de tratamento de esgotos envolvem basicamente dois tipos de reatores (JORDÃO; PESSÔA, 2005):

- Reatores que proporcionam a agregação da biomassa a um meio suporte inerte;
- Reatores que apresentam a separação entre as fases líquida, gasosa e sólida, usualmente denominados reatores de manta de lodo (em inglês identificados pela sigla UASB, abreviatura de *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*).

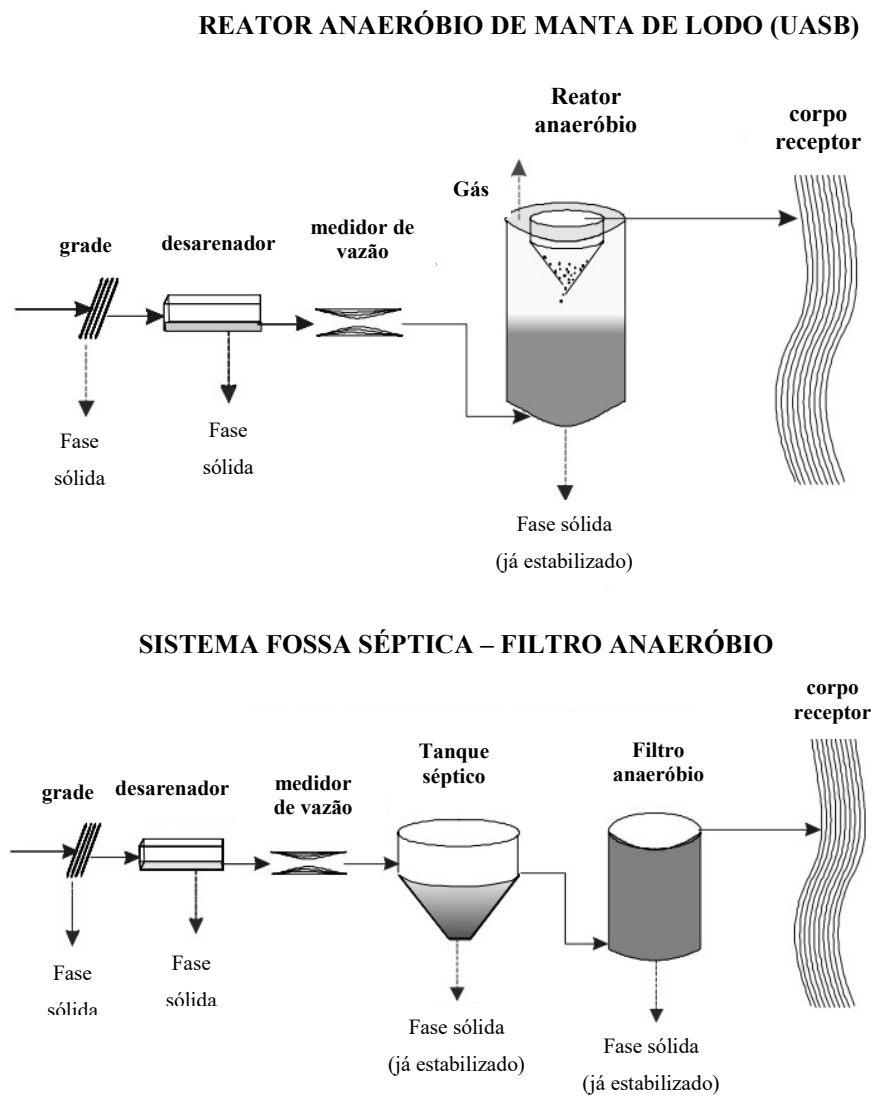
Dentre os sistemas em que a biomassa cresce aderida ao meio suporte, o mais comum é o filtro anaeróbio. Segundo von Sperling (1998), o fluxo do esgoto em filtros anaeróbio é usualmente ascendente, fazendo com que o filtro opere afogado. Como usual no tratamento por via anaeróbia, os filtros podem gerar maus odores. No entanto, a produção de lodo nos filtros anaeróbios é reduzida. Os trabalhos de Campos e Dias (1989), Ruiz et al. (1997), Joung et al. (2009) e Tonetti et al. (2011) constituem exemplos de diferentes aplicações de filtros anaeróbios para o tratamento de efluentes.

Nos reatores UASB, as bactérias formam uma manta de lodo no interior do reator, estabelecendo elevada concentração da biomassa responsável pela estabilização da matéria orgânica afluenta. Em função da alta concentração da biomassa, o volume do UASB é reduzido quando comparado a outros sistemas de tratamento de esgotos (VON SPERLING, 1998; JORDÃO E PESSÔA, 2005). Os esquemas simplificados desses dois sistemas são apresentados na Figura 2.

Os reatores UASB têm tido larga aplicação tanto para o tratamento de esgotos de origem doméstica quanto para o industrial. Ilustram a aplicação de reatores UASB, sob diferentes

condições operacionais, os trabalhos de Fang e Chui (1993), Ruiz et al. (1997), Fernandes e Oliveira (2006) e Ma et al. (2013).

Figura 2 Sistemas Anaeróbios



Fonte: von Sperling (2005)

2.1.3. Lodos Ativados

Os processos de lodos ativados, originalmente estabelecidos na Inglaterra no início do Século XX, são largamente empregados para o tratamento de efluentes de domésticos e de diferentes tipologias industriais, como ilustram os trabalhos de von Sperling, Freire e Chernicharo (2001), Kuns et al. (2002), Morais, Sirtori e Peralta-Zamora (2006), Galán, Díaz-Cruz e Barceló (2012), Hyland et al. (2012) e Aquino, Brandt e Chernicharo (2013).

O funcionamento dos processos de lodos ativados envolve a produção de flocos biológicos (biomassa), formados a partir de microrganismos que crescem e se aglutinam no interior de um tanque de aeração (TCHOBANOGLIOUS et al., 2016). O efluente do tanque segue para o decantador secundário, onde os flocos biológicos são separados do efluente tratado.

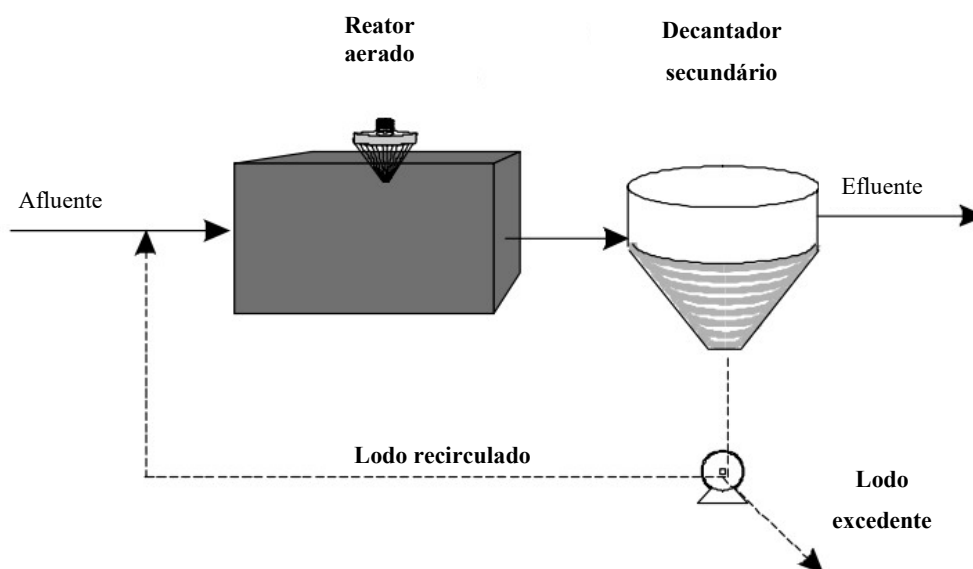
No processo de lodos ativados, parte da biomassa retida no decantador (comumente denominada lodo) é recirculada para o tanque de aeração, aumentando a concentração de microrganismos ativos e, normalmente, a eficiência do sistema. Parte do lodo depositado no fundo do decantador é descartada. Os aeradores mecânicos ou difusores empregados no tanque de aeração têm como funções *a*) produção de ambiente aeróbio e completamente misturado no interior do reator biológico e *b*) manutenção do permanente contato entre a biomassa suspensa e os compostos orgânicos que lhes servem de substrato. São características dos processos de lodos ativados elevados consumos de energia, consideráveis índices de mecanização e elevadas produções de lodo. No entanto, usualmente produzem efluentes finais com elevada qualidade e apresentam requisitos de área inferiores aqueles apresentados pelos processos aeróbios de tratamento de esgotos (VON SPERLING, 1997; HENZE et al., 2002; TCHOBANOGLIOUS et al., 2016). Um esquema simplificado do processo de lodos ativados é apresentado por meio da Figura 3.

Os processos de lodos ativados convencionais, lodos ativados por aeração prolongada e lodos ativados de batelada (também conhecido como lodos ativados de fluxo intermitente) constituem as principais variantes dos processos de lodos ativados (VON SPERLING, 1997).

No processo de lodos ativados convencionais, a parcela de matéria orgânica sedimentável é retirada do sistema antes do tanque de aeração por meio de um decantador primário. Nesta variante do processo de lodos ativados, o tempo de retenção dos sólidos no sistema (parâmetro, usualmente, denominado idade do lodo) varia entre 4 e 10 dias, com o lodo excedente podendo ser descartado tanque do tanque de aeração quanto da linha de recirculação do lodo. O tempo

de detenção hidráulica, por sua vez, flutua entre 6 e 8 horas (VON SPERLING, 1997; TCHOBANOGLIOUS et al.,2016).

Figura 3 Esquema simplificado do processo de lodos ativados



Fonte: von Sperling (2005)

No sistema de lodos ativados com aeração prolongada, o tempo de detenção da biomassa é consideravelmente maior (usualmente entre 18 e 30 dias), aspecto que conduz a tanques de aeração de maiores dimensões, elevando o tempo de detenção hidráulica para valores entre 16 e 24 horas. Neste sistema, como a carga orgânica recebida é similar àquelas do sistema convencional, a disponibilidade de substrato é bem menor e os microrganismos passam a metabolizar os compostos orgânicos presentes em suas células. Como consequência, a biomassa passa a ser estabilizada no próprio tanque de aeração. Como o lodo excedente do sistema já é descartado estabilizado, o decantador primário, por produzir um lodo que exige tratamento complementar, normalmente é eliminado da planta de tratamento (VON SPERLING, 1997; TCHOBANOGLIOUS et al.,2016).

Segundo von Sperling (1997) e Tchobanoglous et al. (2016) e os processos de Lodos ativados por batelada operam com entrada intermitente de esgoto. Este sistema envolve os mesmos princípios associados ao processo de lodos ativados convencionais, porém em um único tanque. O funcionamento deste sistema ocorre por ciclos bem definidos e a biomassa permanece no

reator durante todos os ciclos. Normalmente, uma estação de tratamento de esgotos com esta tecnologia opera com dois ou mais reatores de batelada em paralelo.

2.1.4. Disposição no solo

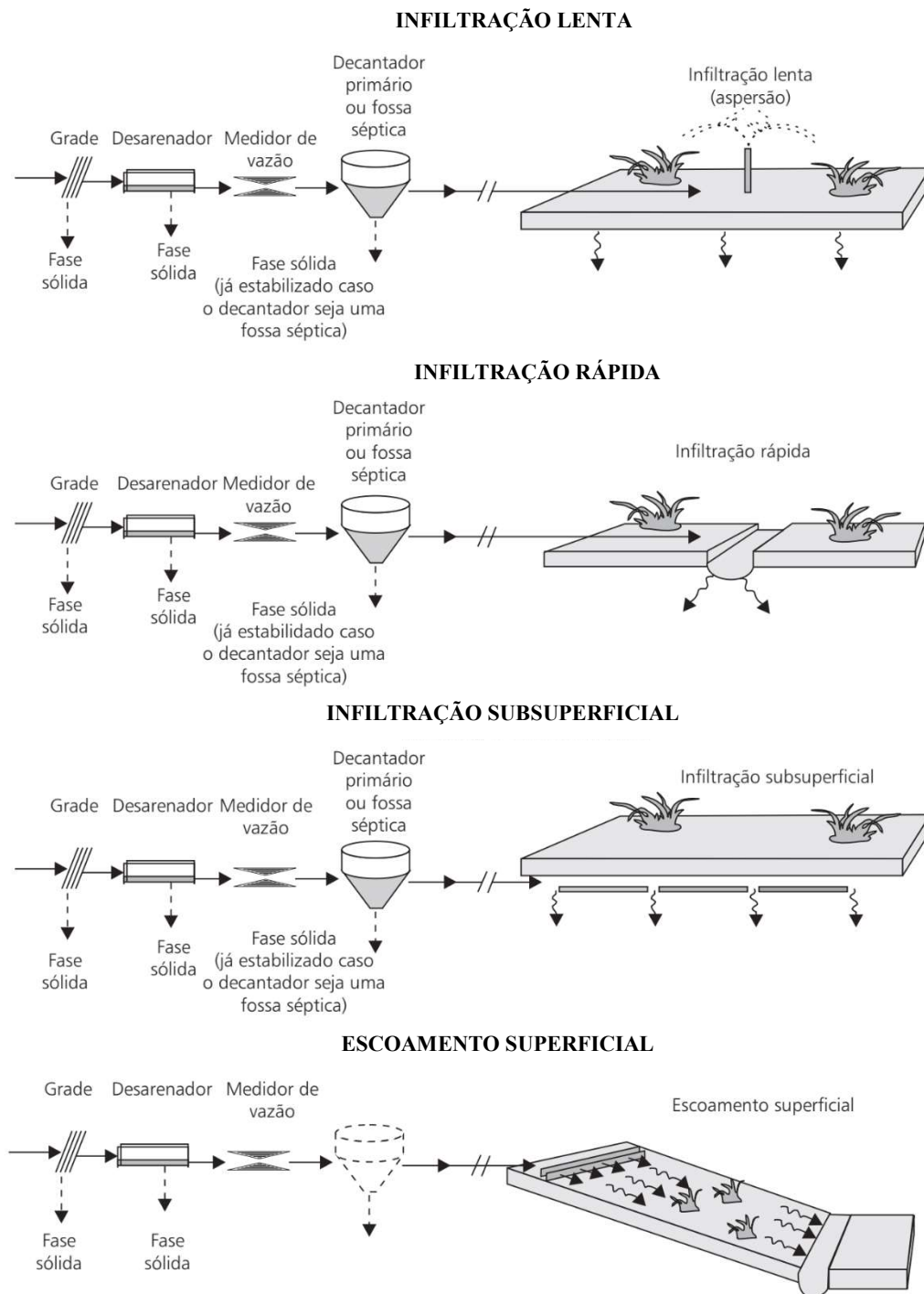
A disposição de efluentes no solo é um processo que difere dos processos convencionais, pois a maioria dos efluentes tratados são lançados normalmente em corpos d'água, especialmente os superficiais. Quando a disposição dos efluentes ocorre no solo, diferentes mecanismos de ordem física, química e biológica atuam para a remoção de poluentes (CAMPOS et al., 1999; JORDÃO; PESSÔA, 2005). Segundo von Sperling (2005), a disposição de efluentes no solo constitui processo recorrentemente empregado em diferentes partes do mundo. No Brasil, constitui alternativa com tendência de utilização crescente. É relevante observar que a aplicação de esgotos no solo constitui alternativa para tratamento (que, função da tecnologia, pode se estabelecer nos níveis primário, secundário ou terciário), disposição final ou ambos (VON SPERLING, 2005).

As principais variações de disposição de efluentes no solo são os sistemas com base no solo (infiltração lenta, infiltração rápida, infiltração subsuperficial e escoamento superficial) e os sistemas com base na água (terras úmidas construídas, também conhecidas como banhados artificiais ou *wetlands*). A seleção do método de disposição depende do clima, do nível do lençol subterrâneo, da permeabilidade do solo, além da eficiência requerida para o tratamento dos efluentes (VON SPERLING, 2005). Na Figura 4 são apresentadas as principais alternativas para sistemas com base no solo. A Figura 5, por sua vez, representa as variantes para sistemas com base na água.

No sistema de infiltração lenta o objetivo principal é o tratamento de esgotos. Quando estes sistemas são empregados com a perspectiva de reuso de água para agricultura são os denominados de fertirrigação. O sistema de infiltração rápida funciona como um filtro, no qual o esgoto percola no meio filtrante – solo; é o sistema que demanda menor área e a descarga do esgoto é realizada de forma intermitente. Na infiltração subsuperficial o esgoto é aplicado abaixo do nível do solo, com o esgoto sendo conduzido por tubulações, não produzindo a inundação da área. Nos sistemas de escoamento superficial, função da declividade do terreno em que os esgotos são dispostos, um efluente final é produzido – o solo indicado para este sistema é o de baixa permeabilidade, a aplicação do esgoto é intermitente (VON SPERLING, 2005; TCHOBANOGLOUS et al., 2016).

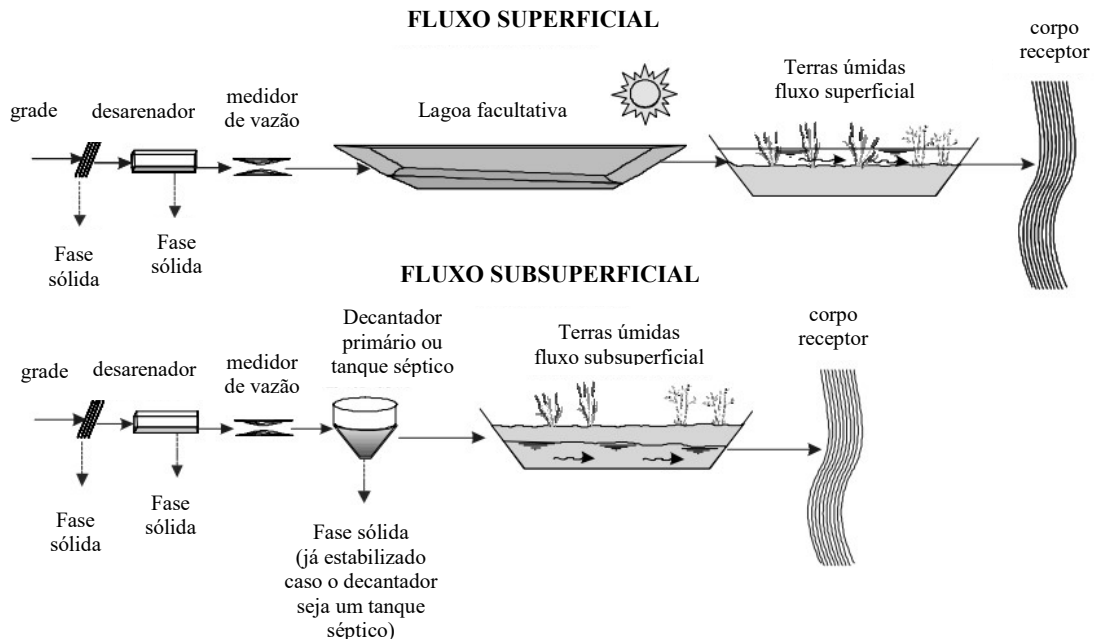
Constituem exemplos de aplicação de sistemas de tratamento e disposição final de tratamento com base no solo os trabalhos de Oron et al. (1999), Corrêa, Melo Filho e Bernardes (2000), Loures et al. (2006).

Figura 4 Alternativas para sistemas com base no solo



Fonte: Campos et al. (1999)

Figura 5 Alternativas para sistemas com base na água



Fonte: von Sperling (2005)

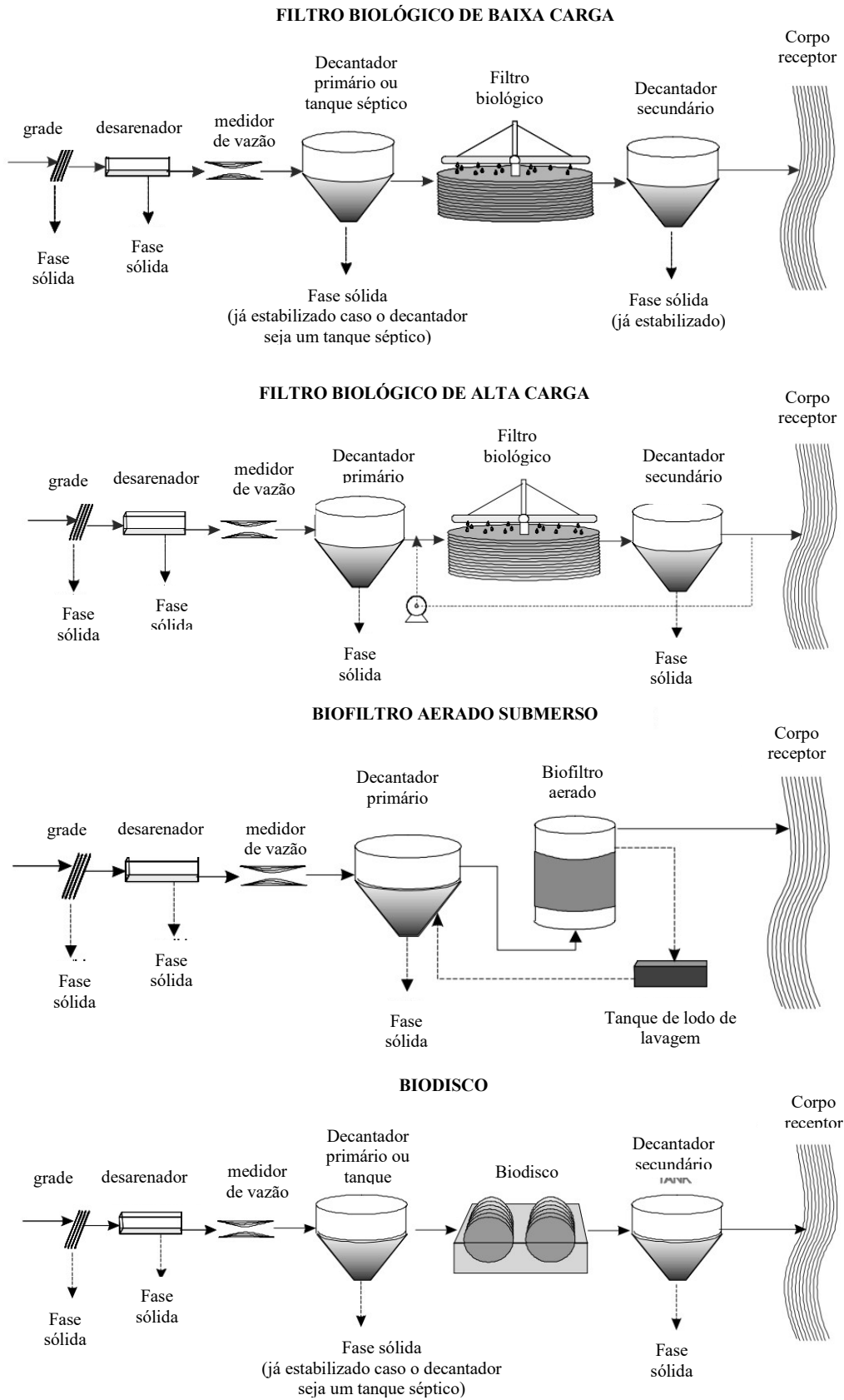
Os sistemas de terras úmidas construídas (banhados artificiais ou wetlands) são construções similares às lagoas de estabilização, com no máximo 1,0 m de profundidade e no interior das quais plantas aquáticas flutuantes ou enraizadas se estabelecem. Os sistemas de terras úmidas construídas podem ser de fluxo superficial e de fluxo subsuperficial. As terras úmidas de fluxo superficial são apropriadas para associação a lagoas de estabilização. Já as de fluxo subsuperficial (ou leitos submersos vegetados) não apresentam água livre na superfície, sendo usualmente associadas a tanques sépticos ou reatores anaeróbios (VON SPERLING, 2005; TCHOBANOGLIOUS et al., 2016).

Sousa et al. (1996), Kivaisi (2001) e Vymazal (2005) apresentam diferentes aspectos de sistemas de terras úmidas construídas, sumarizando características construtivas e operacionais, limitações e potencialidades dos sistemas.

2.1.5. Reatores Aeróbios com biofilmes

Os reatores aeróbios com biofilmes são utilizados como pós-tratamento de outros sistemas e recebem esta denominação pelo fato de a biomassa crescer aderida a um meio suporte (VON SPERLING, 2005). As variantes mais comuns dos reatores aeróbios com biofilmes são os: filtros biológicos de baixa carga, filtros biológicos de alta carga, biofiltro aerado submerso e o biodisco (Figura 6).

Figura 6 Reatores Aeróbios com biofilmes



Fonte: von Sperling (2005)

O primeiro filtro biológico teve suas operações iniciadas no século XIX, na Inglaterra (JORDÃO; PESSÔA, 2005; TCHOBANOGLIOUS et al., 2016). Basicamente, o processo de tratamento de esgotos nos filtros biológicos apresenta algumas características, de acordo com von Sperling (2005) e Tchobanoglous et al. (2016): *a)* a biomassa cresce aderida ao um meio suporte. A distribuição dos esgotos no meio suporte é feita por meio de aspersores (JORDÃO; PESSÔA, 2005). *b)* o meio suporte pode ser composto por pedras, escória de alto forno, material plástico ou outros materiais, *c)* o objetivo desses filtros não é a filtração, mas sim a formação de película microbiana, a qual adsorve a matéria orgânica presente nos esgotos.

Os biofiltros aerados submersos, por sua vez, são constituídos por um tanque com meio poroso, pelo qual o esgoto e ar fluem de forma permanente. Trata-se de um reator trifásico (fases sólida, líquida e gasosa), aplicado também em associação ao reator UASB, como pós tratamento de efluentes. O biodisco é outra variante de reator aeróbio, cuja biomassa cresce aderida a um meio suporte (que é o próprio biodisco). O processo de biodisco consiste em uma série de discos de 3,60 m de diâmetro, espaçados entre si e montados em um eixo horizontal. Esses discos giram, imersos à meia seção em esgoto. É utilizado em pequenas comunidades, com elevado custo de implantação e nível operacional moderado (JORDÃO; PESSÔA, 2005; VON SPERLING, 2005). Os trabalhos de Chavan e Mukherji (2008) e Mba e Bannister (2007) ilustram exemplos de pesquisas com biodiscos.

A seleção de tecnologias depende preliminarmente da avaliação da capacidade de suporte dos corpos d'água. Para avaliação dessa capacidade de suporte, as ferramentas tecnológicas usualmente empregadas são os modelos matemáticos de qualidade de água, foco da próxima seção.

2.2. CAPACIDADE DE SUPORTE DOS CORPOS D'ÁGUA

O fenômeno de autodepuração pode ser definido como o conjunto de processos físicos, químicos e bioquímicos, essencialmente naturais, que buscam o restabelecimento do equilíbrio meio aquático, após alterações produzidas pelos despejos afluentes.

O conceito de autodepuração, no entanto, apresenta a mesma relatividade que o conceito de poluição: um corpo d'água pode apresentar-se depurado a partir da observação, por exemplo, dos níveis de oxigênio dissolvido, mesmo que ainda apresente elevadas concentrações de microrganismos patogênicos, compostos de nitrogênio ou micropoluentes inorgânicos. Desta forma, habitualmente considera-se que um corpo d'água autodepurou-se quando suas

características de qualidade são adequadas aos usos que lhe são associados (VON SPERLING, 2007).

O conhecimento e a quantificação do fenômeno de autodepuração são importantes para que se possa utilizar a capacidade de assimilação dos rios e impedir o lançamento de despejos acima da capacidade de suporte dos cursos d'água (VON SPERLING, 2007). Até um determinado limite, os cursos d'água podem assimilar os despejos afluentes sem comprometimentos do ponto de vista ambiental; esta capacidade, que de fato constitui um recurso natural, deve ser utilizada (dentro de conservadores critérios técnicos) como forma de complementação dos processos de tratamento de esgotos.

Neste contexto surgem os modelos matemáticos de qualidade de água, ferramentas tecnológicas que permitem a descrição do fenômeno de autodepuração, recorrentemente utilizados para avaliação da evolução espacial e temporal da qualidade dos corpos d'água e simulação dos efeitos da disposição final de efluentes domésticos ou industriais, brutos ou tratados.

Segundo Orlob (1992), os primeiros esforços relacionados com a conformação de um modelo matemático de qualidade de água foram estabelecidos em 1920, a partir de estudos conduzidos no rio Ohio, Estados Unidos, que tinham como perspectiva monitorar fontes de poluição e suas consequências. Estes esforços produziram o modelo de Streeter-Phelps (STREETER; PHELPS, 1925), notadamente a primeira aplicação da modelagem matemática em recursos hídricos. O modelo de Streeter-Phelps realiza o balanço entre as concentrações de oxigênio dissolvido e demanda bioquímica de oxigênio (DBO) no corpo d'água a partir da solução analítica de equações diferenciais ordinárias de primeira ordem.

Conceitualmente, o modelo proposto por Streeter e Phelps (1925) assume que o escoamento no curso d'água ocorre segundo o regime de fluxo em pistão. Neste regime de escoamento, cada seção do curso d'água funciona como um êmbolo, no interior do qual a qualidade de água é uniforme; adicionalmente, não existem intercâmbios de massa ou energia entre duas seções adjacentes quaisquer. Desta forma, à medida que o êmbolo se desloca ao longo do curso d'água, os processos que caracterizam o fenômeno de autodepuração se desenvolvem no seu interior.

Para o estabelecimento da representação funcional (formulação das características físicas, processos e condições limites em equações algébricas que permitirão a realização do balanço de massa das concentrações de OD e DBO), duas outras hipóteses são assumidas por Streeter e Phelps (1925):

1ª hipótese: O OD existente no interior do êmbolo é consumido para a oxidação da fração carbonácea da matéria orgânica. Assim, a redução das concentrações de OD será proporcional às concentrações de DBO existentes no interior do êmbolo. Outros processos eventualmente responsáveis pela redução dos níveis de OD num curso d'água (nitrificação e demanda bentônica, por exemplo) não são considerados;

2ª hipótese: na medida em que as concentrações de OD são reduzidas no interior do êmbolo, estabelece-se o processo de reaeração atmosférica, através do qual o oxigênio existente no ar atmosférico é transferido, por difusão, para o interior da massa líquida. Este fluxo de oxigênio será, portanto, tanto mais intenso quanto maior for o déficit de OD da massa líquida; o déficit de oxigênio, por sua vez, será sempre estabelecido em relação à concentração de saturação de OD da massa líquida. A fotossíntese, outro processo que contribui para o aumento das concentrações de OD, não é considerado pelo modelo de Streeter e Phelps.

Desta forma, a taxa de variação das concentrações de OD no interior do êmbolo foi descrita no modelo proposto por Streeter e Phelps (1925) a partir da Equação (1).

$$\frac{dC}{dt} = -K_1 \cdot L + K_2 (C_S - C) \quad (1)$$

onde:

- C – concentração de OD da massa líquida (mg.L⁻¹);
- C_S – Concentração de saturação de OD da massa líquida (mg.L⁻¹);
- L – Concentração de DBO remanescente na massa líquida (mg.L⁻¹);
- K₁ – Coeficiente de desoxigenação (dia⁻¹);
- K₂ – Coeficiente de reaeração (dia⁻¹);
- t – Tempo (dia).

A taxa de variação nas concentrações de DBO, por sua vez, foi descrita pela Equação (2).

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 \cdot L \quad (2)$$

A integração da Equação (2) entre dois instantes quaisquer (t₀ = 0 e t), nos quais são observados diferentes valores de DBO (respectivamente L₀ e L(t)), conduz a Equação (3).

$$L(t) = L_0 \cdot e^{-K_1 \cdot t} \quad (3)$$

Na Equação (3), L₀ (comumente conhecida como DBO_{última}) representa a demanda de oxigênio para a completa oxidação dos compostos orgânicos presentes no ponto de mistura entre o

efluente e o curso d'água. Já a $DBO_{5,20}$ representa a demanda de oxigênio exercida nos cinco primeiros dias do processo de oxidação dos compostos orgânicos, conservando-se a temperatura da massa líquida em 20°C. A $DBO_{5,20}$ (simplificadamente representada ao longo do restante do texto por DBO) é comumente conhecida como $DBO_{\text{padrão}}$ e constitui o parâmetro indicador da presença de matéria orgânica mais comumente determinado nas análises laboratoriais correntes.

A Equação (3) permite observar que, para um tempo substancialmente longo após o recebimento de uma carga orgânica ($t \rightarrow \infty$), a DBO tende a desaparecer ($L(t = \infty) \rightarrow 0$).

Considerando-se a solução apresentada pela Equação (3), a integração da Equação (01) entre dois instantes quaisquer ($t_0 = 0$ e t), nos quais são observadas diferentes concentrações de OD, produz a Equação (4).

$$C(t) = C_S - \left\{ \left[\frac{K_1 \cdot L_0}{K_2 - K_1} \cdot (e^{-K_1 \cdot t} - e^{-K_2 \cdot t}) \right] + (C_S - C_0) \cdot e^{-K_2 \cdot t} \right\} \quad (4)$$

Na Equação (4), $C(t)$ representa a concentração de OD para um instante t qualquer e C_0 a concentração de OD para o ponto de mistura entre efluente e curso d'água. A última Equação estabelece que, muito depois do lançamento de um efluente ($t \rightarrow \infty$) e em função do fenômeno de reaeração atmosférica, a concentração de OD tende para a concentração de saturação de oxigênio da massa líquida ($C(t = \infty) \rightarrow C_S$).

As Equações (3) e (4) estabelecem que, no instante do recebimento do efluente ($t = 0$), as concentrações de DBO e OD tendem, respectivamente, para os valores L_0 e C_0 . Os valores de L_0 e C_0 são determinados a partir das equações (5) e (6), respectivamente, equações de simples mistura associadas ao ponto de disposição final.

$$L_0 = f_C \cdot \frac{Q_R \cdot DBO_R + Q_E \cdot DBO_E}{Q_R + Q_E} \quad (5)$$

$$C_0 = \frac{Q_R \cdot OD_R + Q_E \cdot OD_E}{Q_R + Q_E} \quad (6)$$

Onde:

- Q_R – Vazão do curso d'água (m³/s, L/s);
- Q_E – Vazão do efluente (m³/s, L/s);
- DBO_R – DBO padrão do curso d'água à montante do lançamento do efluente (mg/L);

- DBO_E – DBO padrão do efluente (mg/L);
- OD_R – OD do rio à montante do lançamento (mg/L);
- OD_E – OD do efluente (mg/L);
- f_C – fator de correção para a conversão da DBO padrão em DBO última.

Segundo von Sperling (2007), o valor do fator de correção empregado para a estimativa da $DBO_{última}$ pode ser obtido a partir da Equação (7).

$$f_C = \frac{1}{1 - e^{-5 \cdot K_1}} \quad (7)$$

A concentração mínima de OD (C_C) à jusante do lançamento do efluente (ponto da curva de concentração de OD no qual a derivada em relação ao tempo é nula) pode ser obtida a partir da Equação (8).

$$C_C = C_S - \left[\left(\frac{K_1}{K_2} \right) \cdot L_0 \cdot e^{-K_1 \cdot t_C} \right] \quad (8)$$

Na Equação (8), t_C representa o tempo transcorrido entre o lançamento do efluente e a ocorrência da concentração mínima de OD. Este tempo pode ser estimado com auxílio da Equação (9).

$$t_C = \frac{1}{K_2 - K_1} \cdot \ln \left\{ \frac{K_2}{K_1} \cdot \left[1 - \frac{D_0 (K_2 - K_1)}{L_0 \cdot K_1} \right] \right\} \quad (9)$$

A concentração de saturação de OD constitui uma informação fundamental para a avaliação do perfil de OD ao longo de um curso d'água. Para um curso d'água com salinidade nula, a uma temperatura de 20°C e ao nível do mar, a concentração de saturação de OD equivale a aproximadamente 9,20 mg/l.

Os valores dos coeficientes de desoxigenação (K_1) e de reaeração (K_2) podem ser obtidos a partir **a)** de experimentos de laboratório ou trabalhos de campo que monitorem as concentrações de OD ou DBO, **b)** de fórmulas empíricas ou **c)** de valores disponíveis na literatura. De maneira geral, K_1 e K_2 sempre são obtidos para temperatura de referência de 20°C, sendo necessárias correções sempre que a temperatura do curso d'água afastar-se deste valor. Para as referidas correções usualmente emprega-se a Equação (10).

$$K_T = K_{20^\circ C} \cdot \theta^{(T-20)} \quad (10)$$

Na última equação, T a temperatura (em $^{\circ}\text{C}$) e θ um coeficiente adimensional. Para correções do coeficiente K_1 , o coeficiente θ varia entre 1,020 e 1,075, assumindo habitualmente o valor de 1,047. Nas correções do coeficiente K_2 , o coeficiente varia entre 1,008 e 1,047, sendo 1,024 o valor adotado mais frequentemente.

Em 1970, como relevante aprimoramento do modelo de Streeter e Phelps, o modelo Qual-I foi proposto pela *Texas Water Development Board* e *Masch and Associates* (WANG, 2013). O referido modelo emprega equações unidimensionais de dispersão-advecção integradas numericamente por meio do método das diferenças finitas. Para a representação conceitual do curso d'água, o modelo Qual-I assume elementos computacionais para os quais realiza o balanço de massa dos constituintes modelados, elementos computacionais que, por trecho de rio, apresentam propriedades hidrológicas e físicas similares.

A *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) apresentou, em 1972, o modelo Qual-II, modelo que constitui modificação do Qual-I (BROWN; BARNWELL, 1987). O modelo Qual-II apresentou mesma estrutura conceitual e funcional do modelo Qual-I, apresentando como principal modificação a incorporação de diferentes fenômenos responsáveis pela variação dos níveis de oxigênio dissolvido – incorporação do processo de amonificação, demanda bentônica e fotossíntese.

O modelo Qual-2E, desenvolvido em 1987 a partir de um acordo de cooperação entre a *Tufts University* e a USEPA constituiu a versão do modelo QUAL-I mais largamente empregada no mundo para a simulação das condições de qualidade de água em rios (SOMLYODY et al., 1998; DROLC; KONKAN, 1999).

O modelo Qual-2E é aplicável a rios dendríticos e bem misturados. Nestes corpos d'água, assim como o modelo Qual-I, o Qual-2E realiza uma análise unidimensional, por assumir que os principais mecanismos de transporte (advecção e dispersão) são avaliados apenas ao longo da direção principal do fluxo. Além da variação nas concentrações de OD e DBO, também podem ser simulados por meio do modelo Qual-2E, simultaneamente ou em qualquer combinação, minerais conservativos, temperatura, clorofila *a*, ciclo do fósforo (orgânico e dissolvido), ciclo do nitrogênio (nitrogênio orgânico, amônia, nitritos e nitratos), coliformes e um constituinte não-conservativo. Conceitualmente, o rio é segmentado em trechos que, por sua vez, podem ser divididos em subtrechos ou elementos computacionais. Estes elementos computacionais possuem comprimentos constantes e são considerados como completamente misturados. Os trechos, portanto, podem ser entendidos como grupos de reatores de mistura completa, concatenados, onde são comuns as características hidrogeométricas e taxas biológicas. Para a

solução da equação de advecção-dispersão o Qual2-E também emprega o método das diferenças finitas (BROWN; BARNWELL, 1987).

Ainda que considerado um modelo que aprimorou as equações utilizadas para descrever a cinética reacional de uma maior quantidade de constituintes de qualidade de água, Park e Lee (1996) e Park e Lee (2002) indicaram limitações do emprego do modelo Qual2-E. Segundo os referidos autores, o modelo não inclui a relação entre os níveis de oxigênio dissolvido e as plantas fixas (macrófitas, por exemplo) nem a variação produzida nos níveis de DBO em decorrência da biomassa algal.

No ano de 2000, como aprimoramento do modelo Qual2-E, a USEPA apresentou o modelo Qual2-K. As principais modificações produzidas com a implementação do modelo Qual2-K estão associadas a expansão da estrutura computacional – aspecto que permite a simulações de trechos mais extensos de cursos d'água sem perda de qualidade nas respostas das simulações – e a inclusão de novas interações entre os constituintes modelados como a DBO associada a biomassa algal, a desnitrificação e a modificação nos níveis de oxigênio dissolvido em função das plantas fixas (PARK; LEE, 2002).

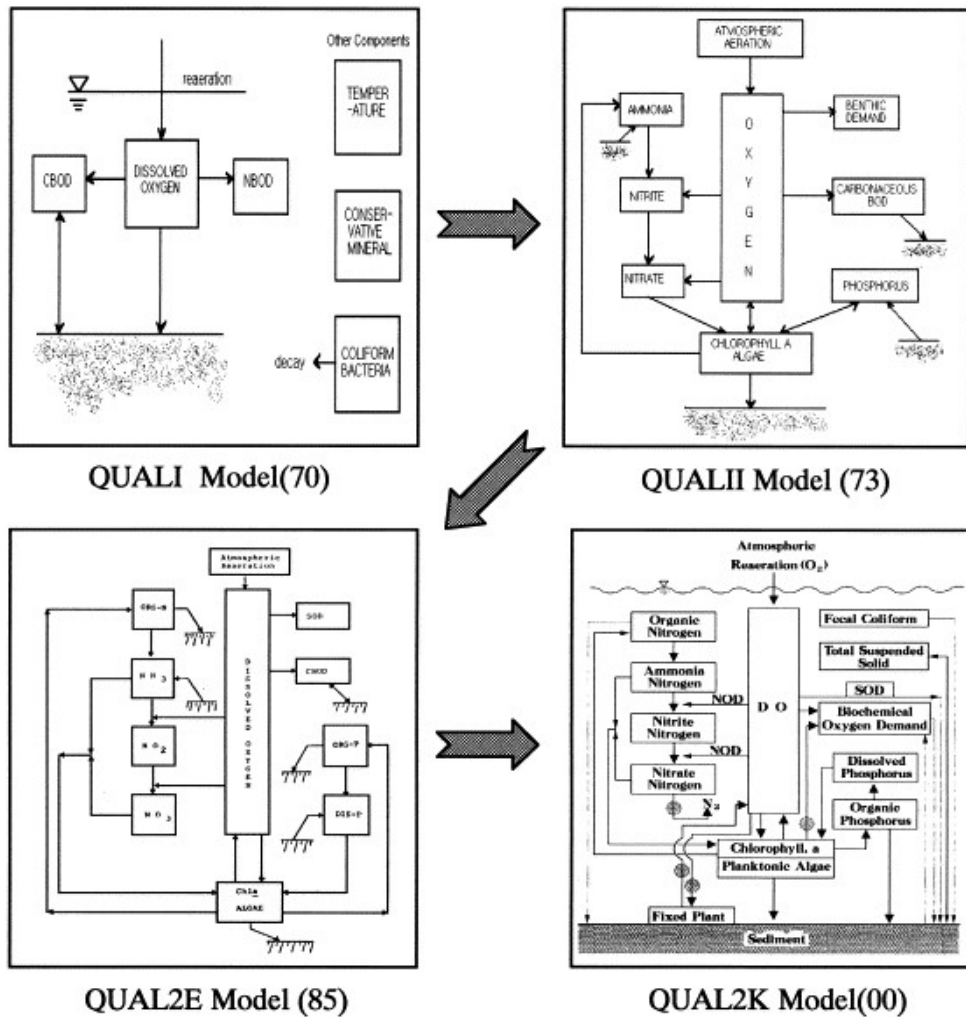
Uma representação esquemática dos diferentes processos que conformaram os modelos Qual-I, Qual-II, Qual-2E e Qual2-K é apresentada por meio da Figura 7.

A partir da estrutura conceitual e funcional do modelo Qual2-E, von Sperling (2007) estabeleceu o modelo Qual-UFMG. O Qual-UFMG possibilita a modelagem da demanda bioquímica de oxigênio, oxigênio dissolvido, nitrogênio total e suas frações, fósforo total e suas frações e coliformes termotolerantes ou E.coli. Contrapondo-se ao Qual2-K, o Qual-UFMG possui como simplificações **a)** não incluir as algas e suas inter-relações com os outros constituintes, **b)** não considerar os efeitos da dispersão longitudinal e **c)** utilizar o método de Euler para a solução das equações diferenciais que descrevem a variação espacial dos constituintes de qualidade de água. O método de Euler – método numérico de resolução mais simples – exige menores passos de integração.

Os modelos Qual2-E, Qual2-K e Qual-UFMG têm sido recorrentemente empregados como ferramentas de apoio aos processos de planejamento e gerenciamento de cursos d'água no âmbito de uma bacia hidrográfica. Os trabalhos de Parmar e Keshari (2014), Purandara et al. (2012), Paliwal, Sharma e Kansal (2007) e Mehrdadi et al. (2006) ilustram o emprego do modelo Qual2-E quando da avaliação da disposição final de efluentes tratados. Já Zhu et al. (2015), Zhang et al. (2012) e Fang et al. (2008) apresentam diferentes aplicações do modelo Qual2-K na predição dos efeitos do lançamento de efluentes tratados em rios. Os trabalhos de

Calmon et al. (2016), Reis, Valory e Mendonça (2015), Salla et al. (2013) e Teodoro et al. (2013), por sua vez, ilustram diferentes aplicações do modelo Qual-UFMG no processo de avaliação da disposição final de efluentes – brutos ou tratados – em diferentes cursos d’água brasileiros.

Figura 7 Evolução da Estrutura funcional dos modelos Qual-I, Qual-II, Qual2- E, Qual2K



Fonte: Park e Lee (2002).

A referência inicial para a aceitabilidade de um sistema de tratamento de esgoto, avaliada a capacidade de autodepuração de corpos d’água, são os padrões de qualidade estabelecidos para efluentes e corpos d’água por meio das resoluções editadas pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). Os referidos padrões constituem foco da seção subsequente.

2.3. PADRÕES AMBIENTAIS PARA CORPOS D'ÁGUA E EFLUENTES

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) editou, em 17 de junho de 2005, a Resolução nº 357/2005 (BRASIL, 2005), por meio da qual, além da divisão e classificação das águas do Território Nacional, são fixados os padrões de qualidade requeridos para os diferentes corpos d'água e efluentes. Esta Resolução constitui o principal instrumento legal brasileiro destinado ao controle da poluição hídrica.

A Resolução CONAMA nº 357/2005 divide as águas do Território Nacional em águas doces (salinidade inferior a 0,5‰), salobras (salinidade entre 0,5 e 30‰) e salinas (salinidade superior a 30‰). Em função de possíveis usos, foram criadas treze classes para as águas do Território Nacional, conforme classificação apresentada na Figura 8.

Para cada classe de uso criada foi estabelecido o padrão ou a condição de qualidade a ser mantido no corpo d'água. Os limites estabelecidos para alguns dos parâmetros físicos, químicos e biológicos de qualidade nas águas doces estão apresentados na Tabela 1.

A Resolução CONAMA nº 430/2011 (BRASIL, 2011), editada em 13 de maio de 2011, foi estabelecida com os propósitos de complementar e alterar a Resolução CONAMA n.º 357/2005, dispondo sobre condições e padrões de lançamento de efluentes.

Segundo a Resolução CONAMA nº 430/2011, os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos no corpo da referida Resolução. Neste contexto, a Resolução impõe que efluentes não poderão conferir ao corpo receptor características de qualidade em desacordo com as metas obrigatórias progressivas, intermediárias e final, do seu enquadramento.

No entanto, de maneira excepcional e em caráter temporário, o órgão ambiental responsável pelo licenciamento ambiental poderá autorizar o lançamento de efluentes em desacordo com as condições e padrões estabelecidos na Resolução. Esta excepcionalidade poderá se estabelecer desde que observados os seguintes requisitos (BRASIL, 2011):

- comprovação de relevante interesse público, devidamente motivado;
- atendimento ao enquadramento do corpo receptor e às metas intermediárias e finais, progressivas e obrigatórias;
- realização de estudo ambiental tecnicamente adequado, às expensas do empreendedor responsável pelo lançamento;

- estabelecimento de tratamento e exigências para este lançamento;
- fixação de prazo máximo para o lançamento, prorrogável a critério do órgão ambiental competente, enquanto durar a situação que justificou a excepcionalidade aos limites estabelecidos nesta norma; e
- estabelecimento de medidas que visem neutralizar os eventuais efeitos do lançamento excepcional.

Para efluentes de natureza diversa, a Resolução CONAMA nº 430/2011 estabeleceu as seguintes condições e padrões de lançamento (BRASIL, 2011):

- pH entre 5 a 9;
- Temperatura: inferior a 40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C no limite da zona de mistura;
- Materiais sedimentáveis: até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone Imhoff. Para a disposição final em corpos d'água lênticos, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes;
- Regime de lançamento: a vazão máxima não deverá exceder 1,5 vez a vazão média do período de atividade diária do agente poluidor, exceto nos casos permitidos pela autoridade competente;
- Óleos e graxas: até 20 mg/L para óleos minerais e até 50 mg/L para óleos vegetais e gorduras animais;
- Ausência de materiais flutuantes; e
- Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_{5,20}): eficiência mínima de remoção de DBO_{5,20} de 60%, sendo admitidas eficiências mais baixas de tratamento quando da existência de estudo de autodepuração do corpo receptor que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor

Os padrões de qualidade e condições de disposição final estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011 também são aplicáveis aos efluentes oriundos de sistemas de disposição final de resíduos sólidos, independentemente de sua origem.

Figura 8 Classificação das águas do Território Nacional, segundo Res.CONAMA nº 357/05

CLASSES		USOS PREVISTOS
Águas doces	Especial	Ao abastecimento para consumo humano, com desinfecção; À preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; e, À preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.
	1	Ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado; À proteção das comunidades aquáticas; À recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA 274/00; À irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; e, À proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.
	2	Ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; À proteção das comunidades aquáticas; À recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA 274/00; À irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e, À aquicultura e à atividade de pesca.
	3	Ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; À irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; À pesca amadora; À recreação de contato secundário; e, À dessedentação de animais.
	4	À navegação e à harmonia paisagística.
Águas salinas	Especial	À preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral; e, À preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.
	1	À recreação de contato primário, conforme Resolução CONAMA 274/00; À proteção das comunidades aquáticas; e, À aquicultura e à atividade de pesca.
	2	À pesca amadora; e, À recreação de contato secundário.
	3	À navegação; e, À harmonia paisagística.
Águas salobras	Especial	À preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral; e, À preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.
	1	À recreação de contato primário, conforme Resolução CONAMA 274/00; À proteção das comunidades aquáticas; À aquicultura e à atividade de pesca; Ao abastecimento para consumo humano após tratamento convencional ou avançado; e, À irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película, e à irrigação de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto.
	2	À pesca amadora; e, À recreação de contato secundário.
	3	À navegação; e, À harmonia paisagística.

Fonte: (BRASIL, 2005)

Tabela 1 Condições e padrões de qualidade para corpos d'água doce segundo a Res. CONAMA nº 357/05

Condição ou padrão de qualidade para corpos d'água doce	Valor máximo permissível			
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4 ⁽¹⁾
Cor verdadeira	Nível de cor natural do corpo d'água em mg Pt/L	Até 75 mg Pt/L	Até 75 mg Pt/L	-
Turbidez	Até 40 UNT	Até 100 UNT	Até 100 UNT	-
Gosto ou odor	Virtualmente ausente	Virtualmente ausente	Virtualmente ausente	-
pH	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
DBO _{5,20} ⁽²⁾	3 mg/L O ₂	5 mg/L O ₂	10 mg/L O ₂	-
OD	Não inferior a 6 mg/L O ₂ em qualquer amostra	Não inferior a 5 mg/L O ₂ em qualquer amostra	Não inferior a 4 mg/L O ₂ em qualquer amostra	Maior que 2 mg/L O ₂ em qualquer amostra
Nitrato ⁽³⁾	10,0 mg/L N	10,0 mg/L N	10,0 mg/L N	-
Nitrito ³	1,0 mg/L N	1,0 mg/L N	1,0 mg/L N	-
Nitrogênio amoniacal total ⁽³⁾	3,7mg/L N, para pH ≤ 7,5 2,0 mg/L N, para 7,5 < pH ≤ 8,0 1,0 mg/L N, para 8,0 < pH ≤ 8,5 0,5 mg/L N, para pH > 8,5	3,7mg/L N, para pH ≤ 7,5 2,0 mg/L N, para 7,5 < pH ≤ 8,0 1,0 mg/L N, para 8,0 < pH ≤ 8,5 0,5 mg/L N, para pH > 8,5	13,3 mg/L N, para pH ≤ 7,5 5,6 mg/L N, para 7,5 < pH ≤ 8,0 2,2 mg/L N, para 8,0 < pH ≤ 8,5 1,0 mg/L N, para pH > 8,5	-
Fósforo total (ambiente lêntico ⁵) ⁽³⁾	0,020 mg/L P	0,020 mg/L P	0,05 mg/L P	-
Fósforo total (ambiente intermediário, com tempo de residência entre 2 e 40 dias, e tributários diretos de ambiente lêntico) ⁽³⁾	0,025 mg/L P	0,025 mg/L P	0,075 mg/L P	-
Fósforo total (ambiente lótico ⁶) e tributários de ambientes intermediários) ⁽³⁾	0,1 mg/L P	0,1 mg/L P	0,15 mg/L P	-
Clorofila a	10 µg/L	30 µg/L	60 µg/L	-

Tabela 1 Condições e padrões de qualidade para corpos d'água doce segundo a Res.CONAMA nº 357/2005 (conclusão)

Condição ou padrão de qualidade para corpos d'água doce	Valor máximo permitido			
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4 ⁽¹⁾
Densidade de cianobactérias	20.000 cel/mL ou 2 mm ³ /L	50.000 cel/mL ou 5 mm ³ /L	100.000 cel/mL ou 10 mm ³ /L ²	-
Coliformes termotolerantes (CL)	Para o uso de recreação de contato primário deverão ser obedecidos os padrões de qualidade de balneabilidade, previstos na Res. CONAMA nº 274/00. Para os demais usos, não deverá ser excedido um limite de 200 coliformes termotolerantes por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 6 amostras, coletadas durante o período de um ano, com frequência bimestral. ⁽⁴⁾	Para uso de recreação de contato primário deverá ser obedecida a Res.CONAMA nº 274/00. Para os demais usos, não deverá ser excedido um limite de 1.000 coliformes termotolerantes por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 6 (seis) amostras coletadas durante o período de um ano, com frequência bimestral. ⁽⁴⁾	Para recreação de contato secundário não deverá ser excedido um limite de 2500 CL por 100 mL em 80% ou mais de pelo menos 6 amostras, coletadas durante o período de um ano, com frequência bimestral. Para dessedentação de animais criados confinados não deverá ser excedido o limite de 1000 CL por 100 mL em 80% ou mais de pelo menos 6 amostras, coletadas durante o período de um ano, com frequência bimestral. Demais usos, não deverá ser excedido um limite de 4000 CL por 100 mL em 80% ou mais de pelo menos 6 amostras coletadas durante o período de um ano, com periodicidade bimestral. ⁽⁴⁾	-

Fonte: Adaptado de BRASIL (2005).

Notas:

- (1) Para águas doces classe 4, o odor e aspecto não devem ser objetáveis e as substâncias facilmente sedimentáveis que contribuam para o assoreamento de canais de navegação devem estar virtualmente ausentes;
- (2) Os limites de DBO, estabelecidos para as águas doces de Classes 2 e 3, poderão ser elevados, caso o estudo da capacidade de autodepuração do corpo receptor demonstre que as concentrações mínimas de OD previstas não serão desobedecidas, nas condições de vazão de referência, com exceção da zona de mistura. Entende-se como zona de mistura a região do corpo receptor onde ocorre a diluição inicial de um efluente;
- (3) Os valores máximos admissíveis dos parâmetros relativos às formas químicas de nitrogênio e fósforo, nas condições de vazão de referência, poderão ser alterados em decorrência de condições naturais, ou quando estudos ambientais específicos, que considerem também a poluição difusa, comprovem que esses novos limites não acarretarão prejuízos para os usos previstos no enquadramento do corpo de água.
- (4) A *E. coli* poderá ser determinada em substituição ao parâmetro coliforme termotolerante de acordo com limites estabelecidos pelo órgão ambiental competente.
- (5) Ambiente lântico: ambiente que se refere à água parada, com movimento lento ou estagnado (BRASIL, 2005).
- (6) Ambiente lótico: ambiente relativo a águas continentais moventes (BRASIL, 2005).

Os efluentes produzidos por sistemas de tratamento de esgotos sanitários receberam particular atenção com a edição da Resolução CONAMA nº 430/2011, por meio da qual foram definidos padrões de qualidade e condições de lançamento específicos. Para efluentes finais de estações de tratamento de esgotos sanitários foram fixados os seguintes padrões e condições de lançamento (BRASIL, 2011):

- pH entre 5 e 9;
- Temperatura: inferior a 40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor, no limite da zona de mistura, não deverá exceder a 3°C;
- Materiais sedimentáveis: até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone Imhoff. Para a disposição final em corpos d'água lênticos, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes;
- Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_{5,20}): concentração máxima de 120 mg/L, sendo admitidas concentrações superiores a este limite quando o sistema de tratamento apresentar eficiência mínima de remoção de DBO_{5,20} de 60%, ou mediante estudo de autodepuração do corpo receptor que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor;
- Substâncias solúveis em hexano (óleos e graxas); concentração máxima de 100 mg/L;
- Ausência de materiais flutuantes.

É relevante observar que os efluentes oriundos de serviços de saúde também devem atender às exigências estabelecidas para efluentes de sistemas de tratamento de esgotos sanitários. No entanto, além de compulsoriamente precisarem atender as normas sanitárias específicas vigentes, possuem duas alternativas para a sua disposição final. São elas:

- Lançamento em rede coletora de esgotos sanitários conectada a estação de tratamento, atendendo às normas e diretrizes da operadora do sistema de coleta e tratamento de esgoto sanitários; e
- Lançamento diretamente no corpo receptor final após tratamento especial.

As resoluções CONAMA nº 357/2005 e nº 430/2011 constituem documentos de referência para as atividades de controle da poluição hídrica e, para a análise de processos de licenciamento ambiental e outorga. Adicionalmente, tem permitido a conformação de restrições de qualidade de água quando do emprego combinado de técnicas de otimização e modelagem de qualidade

de água para o planejamento de sistemas de tratamento de esgotos no âmbito de bacias hidrográficas, como nos trabalhos estabelecidos por Albertin (2008), Andrade, Mauri e Mendonça (2013), Reis, Valory e Mendonça (2015) e Valory, Reis e Mendonça (2016).

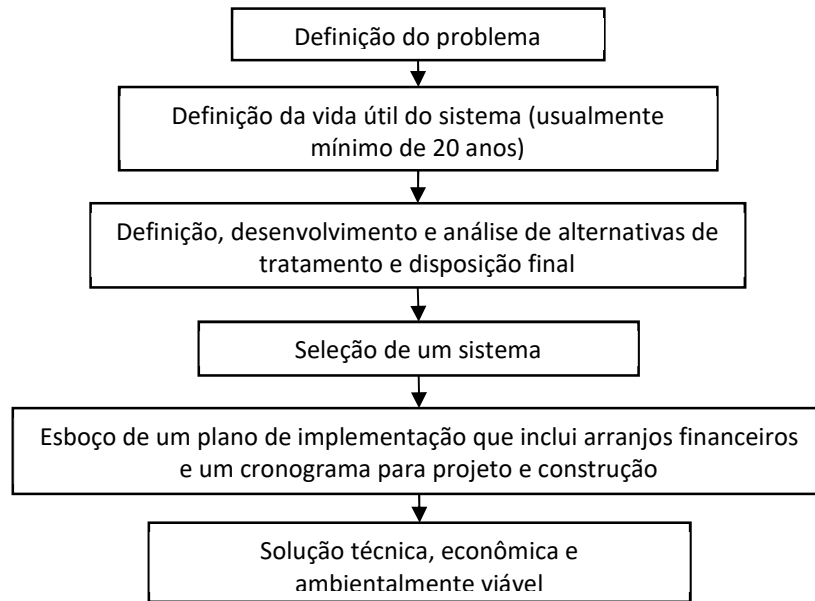
2.4. AVALIAÇÃO E SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

Existem métodos e diferentes critérios a serem avaliados no processo de seleção de tecnologias de tratamento de esgotos. Tchobanoglous et al. (2016), por exemplo, indicam um método em etapas associadas desde a definição do problema inicial, com a identificação das alternativas das tecnologias de tratamento de esgotos para somente depois realizar a seleção de um único sistema. A solução viável é aquela que congrega os critérios técnicos, econômicos e ambientais (TCHOBANOGLIOUS et al., 2016). Para Karimi et al. (2011), Souza (1992), Leoneti (2009), Kalbar, Karmakar, Asolekar (2012), demais critérios são considerados relevados no processo de seleção da melhor tecnologia de tratamento de esgotos, como vazão efluente, disponibilidade de terreno, custo de implantação, eficiência do sistema.

2.4.1. Métodos de Seleção de sistemas de tratamento de esgoto

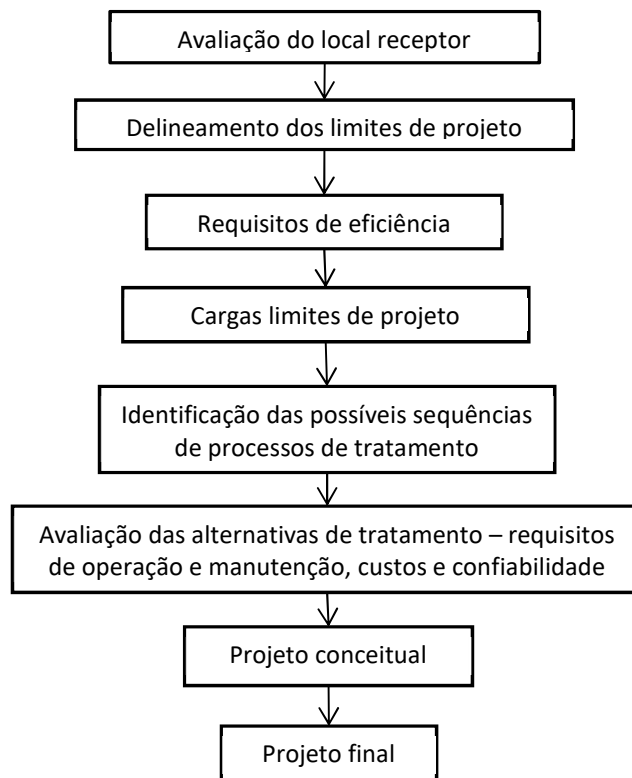
Segundo Tchobanoglous et al. (2016), o planejamento associado à implantação de uma estação de tratamento de esgotos, incluindo-se aí a seleção final do sistema de tratamento, deve incorporar as diferentes etapas representadas esquematicamente por meio da Figura 9. Para a *United States Environmental Protection Agency* (EPA, 2002), o projeto final de sistemas de tratamento de esgotos deve ser conduzido a partir das atividades reunidas no fluxograma apresentado pela Figura 10. Os requisitos de eficiência são incorporados na análise como um parâmetro preliminar, que antecede a avaliação das alternativas de tratamento de esgoto. De acordo com o fluxograma (Figura 10), a eficiência de tratamento é avaliada anteriormente aos demais requisitos associados à operação e manutenção, custos e confiabilidade dos sistemas de tratamento de esgotos (EPA, 2002).

Figura 9 Etapas associadas ao planejamento de estações de tratamento de esgotos



Fonte: Tchobanoglous et al.(2016)

Figura 10 Etapas associadas ao projeto de sistemas se tratamento de esgoto



Fonte: EPA (2002)

De acordo com as Figuras 9 e 10, pode-se constatar que o processo de seleção e o projeto de um sistema de tratamento de esgoto devem ser baseados na análise de diferentes variáveis.

Com o advento da Política Nacional de Recursos Hídricos, em que se determinou a bacia hidrográfica como unidade de planejamento de recursos hídricos, é importante destacar a necessidade de se considerar a avaliação do corpo receptor, conforme mostrado na Figura 10. Ao se avaliar a capacidade do corpo receptor para o lançamento e diluição de efluentes, um aspecto fundamental é analisar os requisitos de eficiência (EPA, 2002) para que assim seja possível determinar quais tecnologias de tratamento de esgoto implementar. Algumas metodologias foram realizadas, com o intuito de avaliar a resposta dos corpos hídricos receptores finais de esgotos tratados, por meio do emprego combinado de modelo de qualidade de água e técnicas de otimização, como exemplos Andrade, Mauri e Mendonça (2013) e Louzada, Reis e Mendonça (2013). Cabe ressaltar que estes trabalhos tiveram como foco a determinação de níveis mínimos de eficiência de tratamento para atendimentos aos padrões de qualidade ambiental, não havendo, portanto, o objetivo de também selecionar configurações de tratamento de esgoto.

Função das particularidades e especificidades das tecnologias de tratamento de esgoto, sobretudo em função das variáveis envolvidas no processo de seleção (TCHOBANOGLIOUS et al., 2016) – critérios de seleção – que abrangem aspectos qualitativos e quantitativos, é visível a necessidade de uma análise que envolva os mais diferentes aspectos relacionados. A Análise Multicritério usualmente apresenta-se como alternativa para o processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos, que permite ordenar diversas alternativas por meio de uma estrutura que considere vários critérios (WERNKE; BORNIA, 2001). Souza (1992), Leoneti (2009), Kalbar, Karmakar, Asolekar (2012) aplicaram análise multicriterial para seleção de tecnologias de tratamento de esgoto. Gobbetti (1993) aplicou as técnicas Programação de Compromisso (CP), Função Utilidade Multidimensional, Electre I e Promethee para seleção de tecnologias para pequenas comunidades. Souza (1992) desenvolveu o modelo PROSEL-I que envolveu os métodos CP e Electre I. Reami (2011) empregou a Teoria de Utilidade Multiatributo (MAUT), a CP e a Teoria dos Jogos Cooperativos (CGT). Cornelli (2014) utilizou o MAUT para seleção da alternativa mais sustentável para tratamento dos esgotos.

A Figura 11 apresenta um comparativo entre os métodos utilizados por diferentes pesquisadores para seleção de sistemas de tratamento de esgotos, incluindo-se os critérios priorizados na tomada de decisão.

Observa-se que a Teoria da Utilidade Multiatributo, AHP, CP e Electre tem sido bem utilizados como métodos multicriteriais. No entanto, a adoção da análise multicriterial para seleção de alternativas tecnológicas para tratamento de esgoto no Brasil ainda tem sido pouco utilizada quando comparado às pesquisas internacionais (CAMPOS, 2011).

Em função do emprego, neste estudo, da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), a seção apresentará, de forma sumária, considerações sobre este método de análise multicritério. Detalhadas discussões acerca da concepção e aplicação do MAUT podem ser encontradas em trabalhos como Keeny e Raiffa (1976), Vincle (1992) e Gomes e Gomes (2014).

Figura 11 Comparativo entre Métodos de Seleção de Sistemas de Tratamento de Esgoto

PESQUISADORES	MÉTODO DE SELEÇÃO										CRITÉRIOS			
	MAUT	AHP	FAHP	CP	CGT	PROSEL	ELECTRE	Promethee	Equilíbrio de Nash	Árvore de Decisão	E	T	A	S
Teclé et al. (1988)				x	x		x				x	x	x	
Gobbetti (1993)				x			x	x			x	x	x	
Oliveira (2004)										x	x			
Leoneti (2009)		x							x			x	x	
Karimi et al. (2011)		x	x								x	x	x	
Reami (2011)	x			x	x						x	x	x	x
Leoneti (2012)		x									x		x	x
Souza (1992)				x		x	x				x	x	x	x
Hunt (2013)	x										x	x	x	x
Cornelli (2014)	x										x	x	x	x
Bringer (2017)							x				x	x	x	x

Fonte: Elaboração própria

Nota: E- Econômico, T – Tecnológico, A – Ambiental, S – Social. AHP – Método da Análise Hierárquica (*Analytic Hierarchy Process*); CGT – Teoria do Jogos Cooperativo (*Cooperative Game Theory*); CP – Programação de compromisso (*Compromise Programming*); ELECTRE - Eliminação e Escolha como Expressão da Realidade (*Elimination and Choice Expressing Reality*); FAHP – Método Fuzzy AHP (*Fuzzy Analytic Hierarchy Process Method*); MAUT – Teoria da Utilidade Multiatributo (*Multi-Attribute Utility Theory*); PROMETHEE - *Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations*; PROSEL – Process Selection.

2.4.2. Considerações sobre a Teoria da Utilidade Multiatributo

Num processo de tomada de decisão, quando se busca a seleção entre diferentes alternativas para um determinado problema, usualmente busca-se a maximizar um objetivo. Segundo Gomes e Gomes (2014), este contexto envolve, adicionalmente, uma avaliação sobre as consequências do problema.

A Teoria da Utilidade permite avaliar estas consequências a partir de um processo de elicitaco de preferências, cujo objetivo  incorporar  seleo as preferências do decisor e seu comportamento em relao ao risco. Este processo permite criar uma escala – escala de utilidade – que estabelece para cada consequência um valor de utilidade. Desta forma, o processo de seleo passa a ser conduzido com base na escala de utilidade, agregando as incertezas inerentes ao processo de tomada de decisão (GOMES; GOMES, 2014).

A Teoria da Utilidade Multiatributo (do inglês *Multi-Attribute Utility Theory*, do qual derivou a sigla MAUT)  derivada da Teoria da Utilidade, permitindo o tratamento de problemas com múltiplos critérios (ALMEIDA FILHO, 2008; GARCEZ, 2013; GOMES; GOMES, 2014).

Gomes e Gomes (2014) observam que, no conjunto de métodos que oferecem suporte  tomada de decisão amparada em critérios múltiplos, o MAUT  o único reconhecido como uma teoria, ainda que eventualmente seja tratado como método. Os referidos autores observam que esta distino entre método e teoria está associada  maneira por meio da qual se obtm a funo utilidade multiatributo. Enquanto teoria, o estabelecimento da funo utilidade multiatributo  decorrente da confirmao da relao entre a estrutura axiomática da teoria e a estrutura de preferências do decisor; enquanto método, o MAUT prescinde da referida confirmao, pelo menos em algumas etapas do processo de decisão.

Almeida Filho (2008) e Gomes e Gomes (2014) observam que o MAUT tem sido mais recorrentemente aplicado em problemas discretos, ainda que em sua concepo inicial associada  Teoria da Decisão permitisse a soluço de problemas com conjunto discreto ou contínuo de aoes.

Segundo Almeida Filho (2008), o emprego do MAUT parte da avaliao de diferentes condioes de independência do decisor acerca de suas preferências, adequadas ao problema objeto de análise. Obtm-se, desta maneira, uma estrutura funcional adequada às condioes consideradas. Pode-se, adicionalmente, incorporar as incertezas inerentes ao processo de tomada de decisão, permitindo abordagem mais consistente para problemas multicritério sob

situações de incerteza. A estrutura funcional para o problema multicritério deve agregar, portanto, as funções utilidade de cada atributo na forma estabelecida por meio da Equação (11)

$$u(x_1, x_2, \dots, x_n) = f[u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_n)] \quad (11)$$

Na Equação (11), $u(x_1)$, $u(x_2)$, ..., $u(x_n)$ representam as funções utilidades unidimensionais para as alternativas x_1 , x_2 , ..., x_n , respectivamente.

Almeida Filho (2008) e Gomes e Gomes (2014) sugerem que função de utilidade aditiva é a forma mais comumente empregada para a função de utilidade multiatributo. A função de utilidade aditiva está apresentada por meio da Equação (12).

$$u(a) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(a) \quad (12)$$

Na Equação (12) $u_i(a)$ representa a função utilidade unidimensional da alternativa a segundo o i -ésimo atributo e k_i ($k_i > 0$) representa uma constante de escala para o i -ésimo atributo. Gomes e Gomes (2014) observam que a constante de escala é “ocasionalmente, e indevidamente, chamada de peso”. Almeida Filho (2008) e Gomes e Gomes (2014) observam, adicionalmente, que a função de utilidade aditiva só pode ser empregado se as condições de preferência forem satisfeitas, cabendo as constantes k_i estabelecer a utilidade de determinado atributo dentro da escala de valores a ser empregada na função de utilidade aditiva; desta forma, as constantes k_i não representam a importância relativa dos atributos, conforme significado usualmente empregado para a palavra peso em outras metodologias.

2.4.3. Critérios do processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos

Para Tchobanoglous et al. (2016), diferentes aspectos devem ser observados quando da concepção dos sistemas de tratamento de esgotos. São eles: *i*) o conhecimento dos princípios de funcionamento, vantagens e limitações das diferentes opções de tratamento disponíveis, *ii*) a compatibilidade entre os sistemas de tratamento selecionáveis e a estrutura disponível para a implantação e operação da planta de tratamento de esgotos, *iii*) a mão de obra disponível e sua qualificação, *iv*) os custos de implantação, operação e manutenção associados aos sistemas de tratamento, *v*) os impactos ambientais decorrentes de determinadas opções de tratamento e *vi*) a perspectiva de atendimento dos padrões de qualidade ambiental.

O custo é, usualmente, o aspecto de maior relevância para a seleção de sistemas de tratamento de esgotos, incluindo-se aí o custo inicial de construção e os custos anuais de operação e

manutenção. Compõem os custos operacionais das estações de tratamento de esgoto os gastos com pessoal (encargos e benefícios), energia elétrica, materiais de tratamento, serviços, água, materiais e rateio de despesas de pessoal de apoio (TCHOBANOGLOUS et al., 2016). Segundo Sampaio e Gonçalves (1999), os custos com pessoal, encargos sociais e benefícios, energia elétrica e materiais de tratamento correspondem aproximadamente 75% do custo operacional de uma estação de tratamento de esgotos.

Uma comparação entre os aspectos de maior relevância na seleção de sistemas de tratamento para países desenvolvidos e para países em desenvolvimento foi apresentada por von Sperling (1996), Yu, Tay e Wilson (1997) e von Sperling (2005). Segundo os referidos autores, para os países desenvolvidos, a eficiência, a confiabilidade, os aspectos de disposição do lodo e os requisitos de área são aspectos críticos no processo de escolha do sistema de tratamento. Já para os países em desenvolvimento são considerados críticos no processo de seleção os custos de construção, a sustentabilidade, a simplicidade e custos operacionais.

As Tabelas 2 e 3 apresentam, para diferentes opções de tratamento, critérios técnicos e econômicos aplicáveis ao processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos. As referidas tabelas, além de sumarizarem os critérios recorrentemente empregados no processo de seleção, apresentam as faixas de aplicação de cada critério para os diferentes sistemas de tratamento de esgotos. Cabe destacar que os sistemas de tratamento apresentados nas tabelas seguintes são constituídos de tecnologias em nível de tratamento primário, secundário e terciário.

Tabela 2 Critérios técnicos e custos de implantação, operação e manutenção de sistemas de tratamento de esgotos

Sistemas de Tratamento	DBO do Efluente Tratado (mg/L)	Eficiência de Remoção de DBO (%)	Demanda de área (m ² /hab)	Volume de lodo desidratado a ser disposto (L/hab.ano)	Consumo de energia elétrica (kWh/hab.ano)	Custos de Implantação (R\$/hab)	Custos de Operação e Manutenção (R\$/hab.ano)	Simplicidade Operacional
Tratamento primário (tanques sépticos)	200-250	30-35	0,03-0,05	15-35	0	30-50	1,50-2,50	Simple
Tratamento primário convencional	200-250	30-35	0,02-0,04	30-50	0	30-50	1,50-2,50	Simple
Tratamento primário avançado	60-150	45-80	0,04-0,06	40-110	0	40-60	8,00-15,00	Simple
Lagoa facultativa	50-80	75-85	2,00-4,00	15-30	0	40-80	2,00-4,00	Simple
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa	50-80	75-85	1,50-3,00	20-60	0	30-75	2,00-4,00	Simple
Lagoa aerada facultativa	50-80	75-85	0,25-0,50	7-30	11-18	50-90	5,00-9,00	Relativamente simples
Lagoa aerada mistura completa + lagoa de sedimentação	50-80	75-85	0,20-0,40	10-35	16-22	50-90	5,00-9,00	Relativamente simples
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação	40-70	80-85	3,00-5,00	20-60	0	50-100	2,50-5,00	Relativamente simples
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa alta taxa	40-70	80-85	2,00-3,50	20-60	<2	50-90	3,50-6,00	Relativamente simples
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas	30-50	85-90	1,70-3,20	25-70	0	50-90	3,50-6,00	-
Infiltração lenta	<20	90-99	10,0-50,0	0	0	20-60	1,00-3,00	Simple
Infiltração rápida	<20	85-98	1,00-6,00	0	0	30-70	1,50-3,50	Simple
Escoamento superficial	30-70	80-90	2,00-3,50	0	0	40-80	2,00-4,00	Simple
Terras úmidas construídas	30-70	80-90	3,00-5,00	0	0	50-80	2,50-4,00	Simple
Tanque séptico + filtro anaeróbio	40-80	80-85	0,20-0,35	25-50	0	80-130	6,00-10,00	-
Tanque séptico + infiltração	<20	90-98	1,0-1,5	15-35	0	60-100	3,00-5,00	-
Reator UASB	70-100	60-75	0,03-0,10	10-35	0	30-50	2,50-3,50	Simple
UASB + lodos ativados	20-50	83-93	0,08-0,20	15-60	14-20	70-110	7,00-12,00	Simplicidade idem ao pós-tratamento
UASB + biofiltro aerado submerso	20-50	83-93	0,05-0,15	15-55	14-20	65-100	7,00-12,00	Simplicidade idem ao pós-tratamento
UASB + filtro anaeróbio	40-80	75-87	0,05-0,15	10-50	0	45-70	3,50-5,50	Simplicidade idem ao pós-tratamento
UASB + filtro biológico de alta carga	20-60	80-93	0,10-0,20	15-55	0	60-90	5,00-7,50	Simplicidade idem ao pós-tratamento
UASB + flotação por ar dissolvido	20-50	83-93	0,05-0,15	25-75	8-12	60-90	6,00-9,00	Simplicidade idem ao pós-tratamento
UASB + lagoas de polimento	40-70	77-87	1,50-2,50	10-35	0	40-70	4,50-7,00	Simplicidade idem ao pós-tratamento
UASB + lagoa aerada mistura completa + lagoa decantação	50-80	75-85	0,10-0,30	15-50	4-8	40-90	5,00-9,00	Simplicidade idem ao pós-tratamento

Tabela 2 Critérios técnicos e custos de implantação, operação e manutenção de sistemas de tratamento de esgotos (conclusão)

Sistemas de Tratamento	DBO do Efluente Tratado (mg/L)	Eficiência de Remoção de DBO (%)	Demanda de área (m ² /hab)	Volume de lodo desidratado a ser disposto (L/hab.ano)	Consumo de energia elétrica (kWh/hab.ano)	Custos de Implantação (R\$/hab)	Custos de Operação e Manutenção (R\$/hab.ano)	Simplicidade Operacional
UASB + escoamento superficial	30-70	77-90	1,5-3,00	10-35	0	50-90	5,00-7,00	Simplicidade idem ao pós-tratamento
Lodos ativados convencional	15-40	85-93	0,12-0,25	35-90	18-26	100-160	10,00-20,00	Operação sofisticada
Lodos ativados de aeração prolongada	10-35	90-97	0,12-0,25	40-105	20-35	90-120	10,00-20,00	Mais simples que lodos ativados convencional
Lodos ativados por batelada	10-35	90-97	0,12-0,25	40-105	20-35	90-120	10,00-20,00	Mais simples que os demais sistemas de lodos ativados
Lodos ativados convencional com remoção biológica de N	15-40	85-93	0,12-0,25	35-90	15-22	110-170	10,00-22,00	Operação sofisticada
Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P	15-40	85-93	0,12-0,25	35-90	15-22	130-190	15,00-25,00	Operação sofisticada
Lodos ativados convencional + filtração terciária	10-20	93-98	0,15-0,30	40-100	18-26	130-190	15,00-25,00	Operação sofisticada
Filtro biológico percolador de baixa carga	15-40	85-93	0,15-0,30	35-80	0	120-150	10,00-15,00	Mais simples que lodos ativados
Filtro biológico percolador de alta carga	30-60	80-90	0,12-0,25	35-80	0	120-150	10,00-15,00	Mais simples que lodos ativados
Biofiltro aerado submerso com nitrificação	15-35	88-95	0,10-0,15	35-90	18-26	70-120	8,00-15,00	Mais sofisticada que os filtros percoladores
Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N	15-35	88-95	0,10-0,15	35-90	15-22	80-130	8,00-15,00	Mais sofisticada que os filtros percoladores
Tanque Séptico + Biodisco	15-35	88-95	0,10-0,20	20-75	0	120-150	10,00-15,00	-

Fonte: Adaptado de von Sperling (2005) e Jordão e Pessoa (2005).

Tabela 3 Critérios técnicos para seleção de sistemas de tratamento de esgotos

Sistemas de Tratamento	Declividade do Terreno (%)	Taxa de Percolação (cm ³ /h)	Profundidades (espessuras) mínimas de solo aceitável (m)	Profundidade mínima da camada do solo aceitável (m)	Profundidade Lençol Freático (m)	Permite Afloramento de Rocha?
Tratamento primário (tanques sépticos)	1-20	0	0	0	0	N
Tratamento primário convencional	1-20	0	0	0	0	N
Tratamento primário avançado	1-20	0	0	0	0	N
Lagoa facultativa	1-20	0	0	0	0	N
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa	1-20	0	0	0	0	N
Lagoa aerada facultativa	1-20	0	0	0	0	N
Lagoa aerada mistura completa + lagoa de sedimentação	1-20	0	0	0	0	N
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação	1-20	0	0	0	0	N
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa alta taxa	1-20	0	0	0	0	N
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas	1-20	0	0	0	0	N
Infiltração lenta	1-20	0,3	0,3	1	1,5	N
Infiltração rápida	1-20	0,3	0,3	1	1,5	N
Escoamento superficial	1-20	0	0	0	0	N
Terras úmidas construídas	1-20	0	0	0	0	N
Tanque séptico + filtro anaeróbio	1-20	0	0	0	0	N
Tanque séptico + infiltração	1-20	0,3	0,3	1	1,5	N
Reator UASB	1-20	0	0	0	0	S
UASB + lodos ativados	1-8	0	0	0	0	S
UASB + biofiltro aerado submerso	1-20	0	0	0	0	N
UASB + filtro anaeróbio	1-20	0	0	0	0	N
UASB + filtro biológico de alta carga	1-20	0	0	0	0	N
UASB + flotação por ar dissolvido	1-20	0,3	0,3	0	1,5	S
UASB + lagoas de polimento	1-20	0	0	0	0	N
UASB + lagoa aerada mist. Completa + lagoa decantação	1-20	0	0	0	0	N
Lodos ativados convencional	1-8	0	0	0	0	S
Lodos ativados de aeração prolongada	1-8	0	0	0	0	S
Lodos ativados batelada	1-8	0	0	0	0	S
Lodos ativados convencional com remoção biológica de N	1-8	0	0	0	0	S
Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P	1-8	0	0	0	0	S
Lodos ativados convencional + filtração terciária	1-8	0	0	0	0	S
Filtro biológico percolador de baixa carga	1-20	0	0	0	0	N
Filtro biológico percolador de alta carga	1-20	0	0	0	0	N
Biofiltro aerado submerso com nitrificação	1-20	0	0	0	0	N
Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N	1-20	0	0	0	0	N
Tanque Séptico + Biodisco	1-20	0	0	0	0	N

Fonte: Adaptado de USP (2004)

3. METODOLOGIA

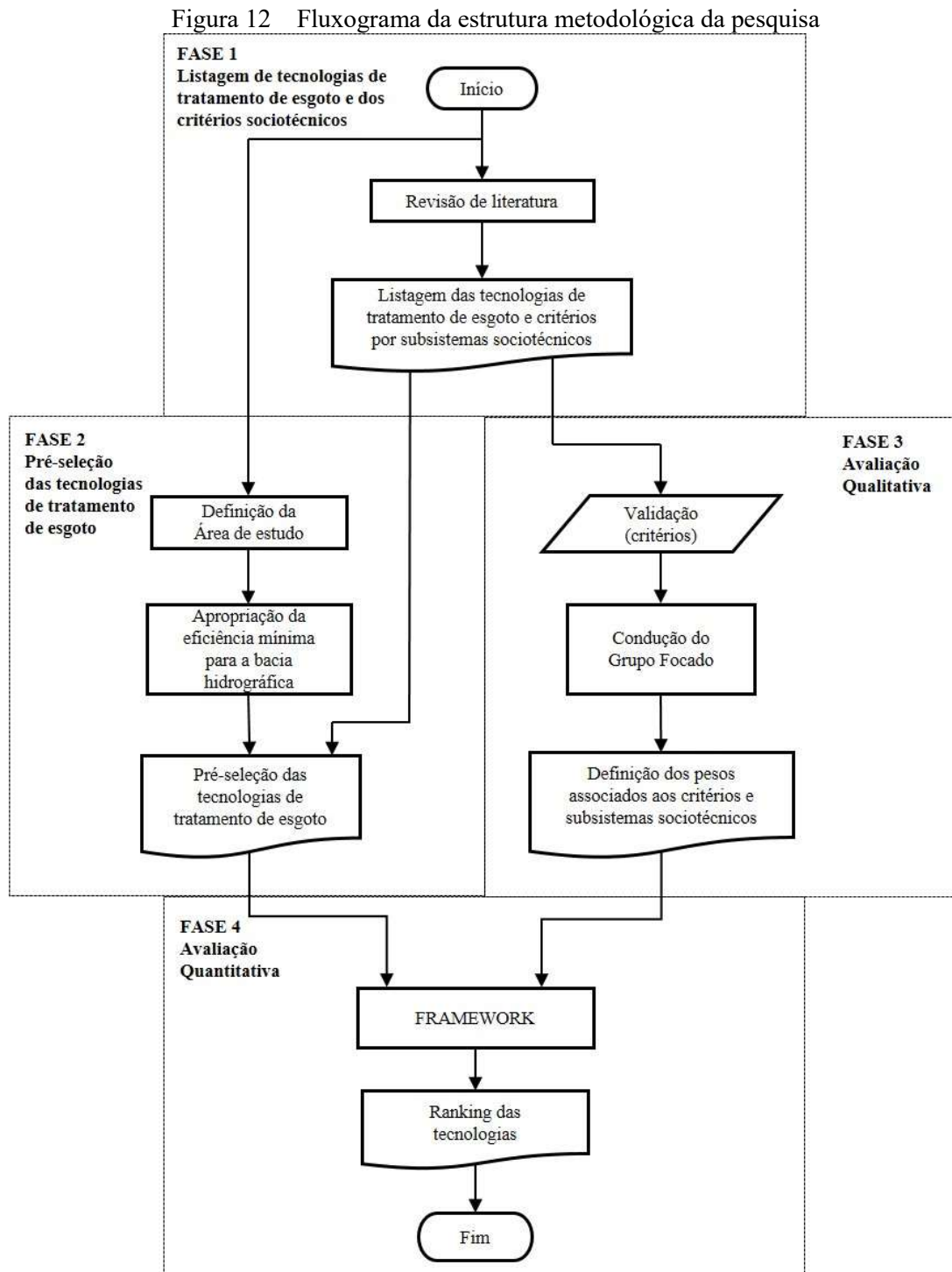
Este capítulo apresenta uma sistemática para a seleção de sistemas de tratamento de esgoto, no âmbito de uma bacia hidrográfica - unidade de planejamento de recursos hídricos, conforme a Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997). A estrutura contempla um conjunto de atividades que conduzem desde uma identificação de um elenco de tecnologias de tratamento de esgoto passíveis de serem implementadas em uma bacia hidrográfica, seguindo para uma posterior seleção dessas tecnologias para a bacia do Rio Pardo – Espírito Santo. Esta seleção, por sua vez, na metodologia apresentada, foi realizada por meio de uma análise multicriterial, considerando aspectos sociotécnicos. O primeiro critério considerado nesta análise, e adotado nesta pesquisa como critério de corte, foi a eficiência mínima de remoção de matéria orgânica, um dos aspectos centrais no processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos (EPA, 2002; VON SPERLING, 1996; YU; TAY; WILSON, 1997; VON SPERLING, 2005; TCHOBANOGLIOUS et al., 2016). A partir das eficiências mínimas de remoção de matéria orgânica nos pontos de disposição de esgotos na bacia em estudo, uma pré-seleção de tecnologias de tratamento de esgoto foi realizada. Estas tecnologias pré-selecionadas, juntamente com os demais critérios a serem definidos, conformaram uma análise qualitativa, por meio de Grupo Focado. Participaram desta etapa da pesquisa especialistas das áreas de Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos, que forneceram subsídios à análise multicriterial que conduz à seleção final dos sistemas de tratamento de esgotos para a área de estudo.

A metodologia apresentada nesta pesquisa é estruturada em 4 fases (Figura 12), sumariamente descritas da seguinte maneira:

- A Fase 1: teve como perspectiva identificar as diferentes tecnologias de tratamento centralizado de esgoto e os critérios sociotécnicos aplicáveis ao processo de seleção de sistemas de tratamento de esgoto.
- A Fase 2: teve por objetivo a definição da área de estudo e a condução da pré-seleção de tecnologias de tratamento de esgotos para a área selecionada. A eficiência de tratamento de esgoto, estabelecida como níveis de remoção de matéria orgânica do esgoto bruto, constituiu critério utilizado para a etapa de pré-seleção.
- Na Fase 3: nesta fase foi realizada a pesquisa qualitativa por meio da condução de grupos focados, etapa do trabalho na qual se pretendia identificar a taxonomia dos critérios sociotécnicos que levariam a termo, no âmbito de uma bacia hidrográfica, o processo de seleção de sistemas de tratamento de esgoto.

- A Fase 4, por sua vez, teve como principal objetivo a realização de análise quantitativa, amparada em *Framework* estabelecido numa abordagem multicriterial, estruturado na matriz MAUT (FRANK et al., 2016).

A estrutura metodológica proposta para esta pesquisa está representada pelo fluxograma da Figura 12.



Fonte: Elaboração própria

3.1. FASE 1 – LISTAGEM DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO E DOS CRITÉRIOS SOCIOTÉCNICOS

A primeira fase teve como principal finalidade a identificação das tecnologias de tratamento de esgotos e dos critérios sociotécnicos aplicáveis ao processo de seleção de sistemas centralizados de tratamento de esgotos. A revisão de literatura, além de trabalhos de referência para a área de tratamento centralizado de esgoto (como exemplos, merecem registro Henze et al. (2002), Jordão e Pessoa (2005), von Sperling (2005) e Tchobanoglous et al. (2016)), envolveu consultas a) a teses e dissertações disponíveis em repositórios de instituições de ensino e pesquisa e b) a artigos científicos em periódicos disponíveis em bases de acesso público e no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Neste trabalho foram definidos os critérios de seleção numa abordagem sociotécnica, dentro de uma estrutura de quatro subsistemas: a) pessoas, b) tecnologias, c) operação e, d) ambiente externo/social (FRANK; RIBEIRO; ECHEVESTE, 2015).

Na sequência, para as diferentes tecnologias centralizadas de tratamento de esgoto foram obtidos, por critério sociotécnico identificado, os valores quantitativos e/ou qualitativos correspondentes às referidas tecnologias de tratamento. Os critérios foram então classificados nos subsistemas sociotécnicos: ambiental, tecnológico, operação e social. Os critérios e subsistemas sociotécnicos foram posteriormente validados por especialistas da área de recursos hídricos e saneamento ambiental. A validação, objeto da terceira fase da estrutura metodológica proposta, encontra-se detalhada no item 3.3.1. As tecnologias de tratamento e os critérios validados, por sua vez, compuseram o *Framework* que estão detalhados na quarta fase da estrutura metodológica (item 3.4).

3.2. FASE 2 – PRÉ-SELEÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Na Fase 2 foi realizada a pré-seleção das tecnologias de tratamento de esgoto passíveis de implementação na área de estudo considerando-se, como critério de corte, as eficiências mínimas apropriadas para a bacia hidrográfica pesquisada. Para a implementação desta metodologia, foi definida a bacia hidrográfica (área de estudo) onde se pretende instalar a(s) tecnologia(s) de tratamento de esgoto e foi também realizada a apropriação das eficiências mínimas, para posterior pré-seleção das tecnologias de tratamento de esgotos. A área de estudo, objeto desta pesquisa, é a Bacia Hidrográfica do Rio Pardo, para a qual as eficiências mínimas de tratamento de esgotos, utilizadas na metodologia proposta como critério de corte, foram

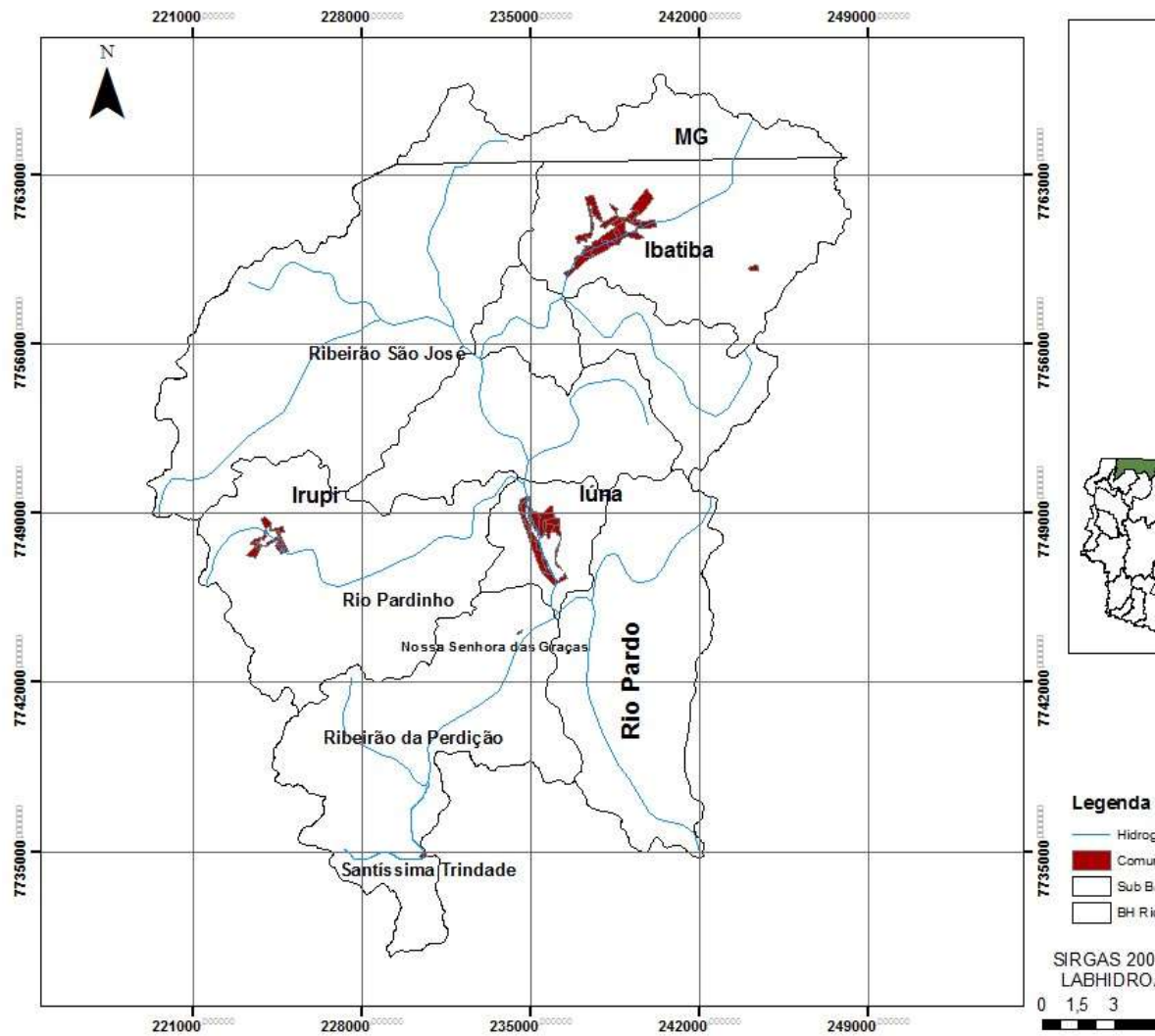
obtidas por Santoro, Reis e Mendonça (2016). A Bacia Hidrográfica do Rio Pardo constituiu a área de estudo do presente trabalho. O Rio Pardo – curso d'água principal da área de estudo – é afluente do rio Itapemirim, principal curso d'água da porção Sul do estado do Espírito Santo. Segundo Calmon et al. (2016), na bacia do Rio Pardo estão total ou parcialmente inseridos os municípios capixabas de Ibatiba, Irupi, Muniz Freire e Iúna, além de parte do município mineiro de Lajinha, numa área de aproximadamente 611 km².

O Rio Pardo possui extensão de 57,9 km, com nascente localizada no município de Ibatiba, numa altitude de 1.244 m. O exutório do Rio Pardo, estabelecido na confluência com o rio Itapemirim, encontra-se numa altitude de 400 m (CALMON et al., 2016).

As sedes municipais e povoados rurais inseridos na Bacia Hidrográfica do Rio Pardo não dispõem de estações de tratamento de esgoto (ETE) (CALMON et al., 2016). O Rio Pardo constitui destino final dos esgotos brutos das sedes dos municípios de Ibatiba e Iúna. Adicionalmente, afluem ao Rio Pardo o rio Pardinho – curso d'água que recebe o esgoto bruto produzido pela sede municipal de Irupi – e o ribeirão perdição – curso d'água que recebe esgotos brutos dos povoados de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças, povoados da zona rural do município de Iúna. Uma representação da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo é apresentada por meio da Figura 13. O diagrama unifilar do sistema hídrico da bacia, por sua vez, é apresentado por meio da Figura 14.

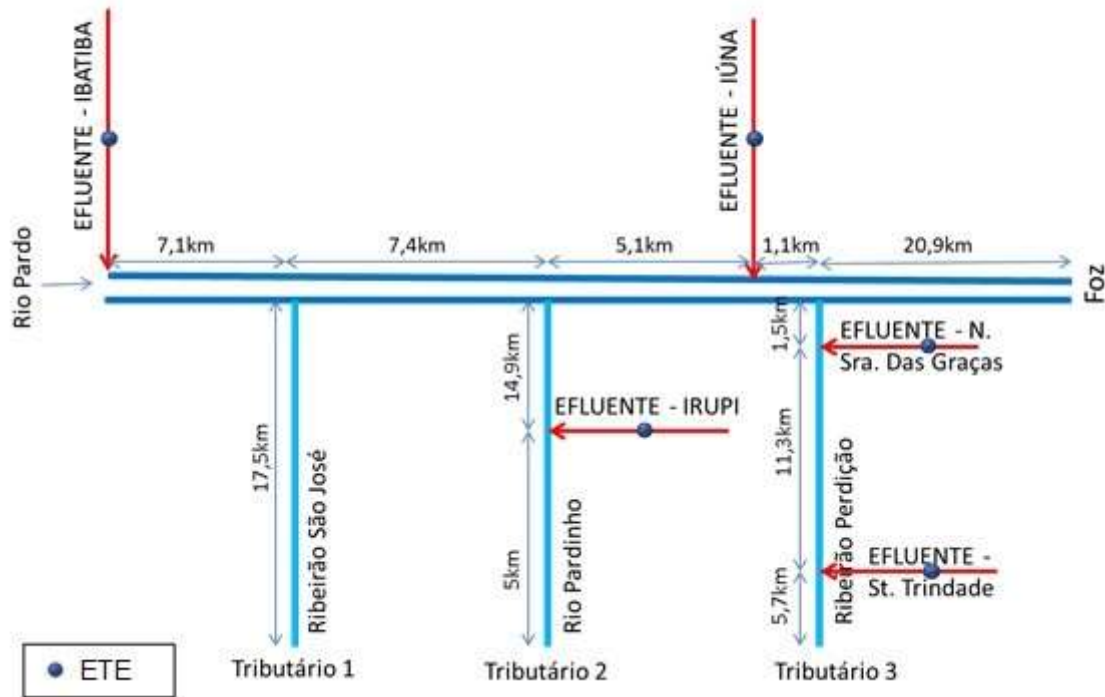
A economia da região se baseia fortemente na extração e beneficiamento de mármore e granito. No entanto, também são encontradas indústrias alcooleiras, frigoríficos e cooperativas de derivados do leite. Também constituem atividades comuns aos municípios da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo a pecuária e a agricultura, com particular destaque para a cafeicultura, fruticultura e culturas tradicionais como arroz, feijão, milho, mandioca e cana-de-açúcar (INCAPER, 2011a; INCAPER, 2011b; INCAPER, 2011c; INCAPER, 2011d).

Figura 13 Representação da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo



Fonte: Fantin, Reis e Mendonça (2017)

Figura 14 Diagrama unifilar dos cursos d'água da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo



Fonte: Santoro (2016)

No diagrama unifilar (Figura 14) estão representados pelo símbolo ETE os pontos nos quais podem ser implementadas as estações de tratamento de esgotos. Na Bacia Hidrográfica do Rio Pardo, os pontos de lançamento de efluentes brutos (Efluente – Ibatiba, Efluente – Iúna, Efluente – Irupi, Efluente – St. Trindade, Efluente – N. Sr. das Graças), são significativos e, considerando a inexistência de ETE nesta bacia (CALMON et al., 2016), justifica-se a aplicação desta pesquisa nesta área de estudo. A seleção de tecnologias de tratamento de esgotos para a bacia do Rio Pardo pode propiciar um impacto relevante sobre a região, tendo em vista que a pesquisa propõe uma visão sistêmica do processo.

3.2.1. Apropriação de eficiências mínimas de tratamento de esgotos

As eficiências mínimas de tratamento de esgotos foram estabelecidas, nesta pesquisa, como critério de corte, isto é, serviram para realizar a pré-seleção das tecnologias elencadas na Fase 2. A eficiência de remoção de matéria orgânica constitui um elemento importante no tratamento de esgotos, uma vez que representa o percentual da carga orgânica que não será assimilada pelo corpo d'água no qual se fará a disposição final dos esgotos tratados.

Neste trabalho, as eficiências mínimas de tratamento de esgotos foram obtidas da pesquisa conduzida por Santoro, Reis e Mendonça (2016), por meio da qual foram avaliados diferentes modelos de otimização aplicáveis à determinação de eficiências de tratamento de esgotos no âmbito de bacias hidrográficas. A Bacia Hidrográfica do Rio Pardo também constituiu área de estudo dos referidos autores.

Para a modelagem dos cursos da bacia do Rio Pardo, Santoro, Reis e Mendonça (2016) utilizaram modelo computacional de qualidade de água desenvolvido no ambiente do software MatLab, modelo que reproduz as formulações matemáticas e as estruturas conceitual e computacional do modelo QUAL-UFMG.

Os modelos de otimização selecionados por Santoro, Reis e Mendonça (2016) para estimativa de eficiências de tratamento de esgotos na Bacia Hidrográfica do Rio Pardo foram conformados por funções objetivos e restrições que consideraram três diferentes aspectos: *a*) a minimização do somatório das eficiências de tratamento no âmbito da bacia, *b*) a minimização da inequidade entre os esforços de tratamento associados aos diferentes sistemas de tratamento e *c*) a manutenção dos padrões de qualidade ambiental fixados para corpos d'água pelas Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) n^{os} 357/2005 e 430/2011. Os modelos de otimização avaliados foram originalmente propostos por Mulligan (1991), Marsh e Schilling (1994), Burn e Yuliant (2001), Valory, Reis e Mendonça (2016) e Reis, Valory e Mendonça (2015).

Para aplicação dos modelos de otimização selecionados foram estabelecidas restrições correspondentes aos padrões de qualidade ambiental fixados pelas Resoluções CONAMA n^{os} 357/2005 e 430/2011 para corpos de água doce e efluentes. Adicionalmente, foram fixadas restrições para garantia da não negatividade e um limite superior para as eficiências de remoção de matéria orgânica.

Para a solução dos diferentes modelos de otimização, Santoro, Reis e Mendonça (2016) empregaram como técnica de otimização a Metaheurística Algoritmo Genético. Os operadores e parâmetros empregados pelos referidos autores foram a codificação real, crossover aritmético, população inicial de 300 (trezentos) indivíduos, taxa de crossover de 50%, seleção do tipo torneio, mutação adaptativa, preservação de 3 (três) indivíduos pelo elitismo.

3.2.2. Pré-seleção de tecnologias de tratamento de esgoto

Em função das eficiências mínimas de remoção de matéria orgânica, obtidas por Santoro, Reis e Mendonça (2016), foram então pré-selecionadas as tecnologias aplicáveis às sedes municipais e povoados da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo, para posterior ordenamento por meio de Análise Multicriterial.

3.3. FASE 3 - AVALIAÇÃO QUALITATIVA

Na Fase 3, os critérios para a seleção final dos sistemas de tratamento de esgotos e os subsistemas sociotécnicos, identificados a partir das atividades que compuseram a Fase 1, passaram por uma validação, por meio da qual obteve-se a classificação dos diferentes critérios nos subsistemas sociotécnicos. Após o processo de validação, três grupos focados foram planejados. A partir da condução dos grupos focados foi possível estabelecer, por meio da obtenção dos pesos associados aos critérios e aos subsistemas sociotécnicos, a estrutura de preferência aplicável ao processo de seleção de tecnologias de tratamento de esgotos. Os pesos dos critérios e subsistemas identificados nesta etapa do trabalho preencheram o *Framework* proposto por Frank et al. (2016).

3.3.1. Validação dos critérios e dos subsistemas sociotécnicos

Os subsistemas sociotécnicos (Ambiental, Tecnológico, Operação e Social) e os critérios de seleção passaram por um processo de validação por especialistas, antes de serem utilizados no *Framework*. Cabe destacar que para subsistema sociotécnico há um elenco de critérios que foram selecionados em função da existência de dados para as tecnologias que pré-selecionadas no item 3.2.2.

Os especialistas que realizaram a validação possuem *expertise* nas áreas que se relacionam com o tema desta pesquisa. Participaram da validação especialistas das áreas *a)* Academia; *b)* Tratamento; *c)* Regulação, com o propósito de haver maior abrangência entre as áreas da pesquisa.

A validação ocorreu, por meio de formulário (APÊNDICE A) e sob duas formas:

- Validação 01 – validação quanto à classificação dos critérios nos subsistemas ambiental, tecnológico, operação e social.

- Validação 02 – validação dos critérios a serem considerados na seleção de tecnologias de tratamento de esgotos.

ou seja:

Os especialistas, na Validação 01, verificaram se a classificação dos critérios estava de acordo com os subsistemas sociotécnicos propostos. Na Validação 02, os especialistas avaliaram se o critério era relevante ou não e, assim, se deveria ser incluído ou excluído no processo de seleção de tecnologias de tratamento de esgotos. Foram considerados validados aqueles dados em que 60% dos especialistas, no mínimo, apresentaram-se favoráveis àquela proposição.

O formulário dispunha de um campo para que os especialistas pudessem adicionar outros critérios. No entanto, os critérios sugeridos só seriam adicionados caso houvessem dados para as mais diferentes tecnologias de tratamento de esgotos.

Os dados validados pelos especialistas foram computados majoritariamente pela soma dos critérios (Validação 02) e pela soma daqueles critérios associados aos subsistemas sociotécnicos (Validação 01).

3.3.2. Planejamento e condução dos Grupos Focados

Neste trabalho, o Grupo Focado foi empregado como técnica de Pesquisa Qualitativa. Embora pouco utilizado na Engenharia de Produção, tem aplicações na área de marketing e saúde, mas que produzem um considerável número de dados, que podem ser classificados de acordo com vários critérios (RIBEIRO; NEWMANN, 2012). Segundo Lervorino e Pelicioni (2001) e, Ribeiro e Newmann (2012), o Grupo Focado constitui técnica de pesquisa que pode ser empregada quando se deseja compreender percepções e atitudes acerca de um fato, prática, produto ou serviço. Segundo os referidos autores, o grupo focado consiste, essencialmente, na interação entre os participantes e o pesquisador, objetivando-se reunir dados por meio de discussão focada em tópicos específicos e diretivos.

No planejamento dos grupos focados foram definidos o objetivo da reunião, os participantes, o local e as questões a serem discutidas, em que a autora desta pesquisa atuou como moderador (RIBEIRO; NEWMANN, 2003). O objetivo das entrevistas por grupo focado foi realizar uma análise taxonômica dos critérios sociotécnicos predefinidos na Fase 3 (item 3.3.1). Os participantes integraram três grupos focados:

- GRUPO FOCADO 1 (GF1) – ACADEMIA: grupo formado por acadêmicos e pós-graduandos, com experiência nas áreas de recursos hídricos e saneamento ambiental (universidades e institutos federais);
- GRUPO FOCADO 2 (GF2) – TRATAMENTO: grupo formado por profissionais da área de saneamento, com experiência nas áreas de tratamento de esgotos e recursos hídricos (Concessionária responsável pela operação de sistemas de tratamento de esgotos no estado do Espírito Santo) e;
- GRUPO FOCADO 3 (GF3) – REGULAÇÃO: grupo formado por profissionais vinculados ao órgão regulador de recursos hídricos (agência reguladora dos recursos hídricos do estado do Espírito Santo).

Em relação às questões utilizadas nos grupos focados, buscando-se facilitar os trabalhos desta fase da pesquisa, foram utilizados formulários com os critérios já validados – entregues aos participantes (APENDICE B). Nas reuniões também foram apresentadas as tecnologias pré-selecionadas para os participantes que comentaram sobre a inclusão ou exclusão de uma ou outra tecnologia de tratamento de esgotos.

O moderador utilizou, para condução dos grupos focados, notebook, projetor e gravador para registro dos comentários dos participantes nas sessões.

As sessões tiveram duração de, no máximo, duas horas e foram conduzidas pelo moderador. Nas reuniões não foram utilizadas gravação em vídeo para evitar um eventual incômodo dos participantes e prejuízo na obtenção de informações.

Os participantes dos grupos focados atribuíram pesos aos critérios e subsistemas sociotécnicos, utilizando uma escala de 1 a 10. Em função do julgamento do nível de importância de cada um dos critérios e dos subsistemas sociotécnicos, o participante atribuiu peso 1 para o critério e/ou subsistema com menor importância dentre os demais dados e; peso 10 para aquele critério e/ou subsistema com maior importância em relação aos outros critérios e/ou subsistemas.

3.3.3. Definição dos pesos de importância associados aos critérios de seleção

Como resultado da pesquisa qualitativa foram obtidos os pesos de importância associados aos critérios de seleção de tratamento de esgotos e aos subsistemas sociotécnicos. Por meio da média aritmética dos pesos obtidos nos três grupos focados, obteve-se a estrutura de preferência para os subsistemas e critérios sociotécnicos. Essa estrutura de preferência constituiu a matriz MAUT na Fase 4 da estrutura metodológica proposta nesta pesquisa (Avaliação Quantitativa), descrita na seção subsequente.

3.4. FASE 4 - AVALIAÇÃO QUANTITATIVA

A Fase 4 contemplou a construção de um *Framework* para a obtenção de um *ranking* das tecnologias de tratamento de esgoto. Nesta fase utilizou-se o *Framework* proposto por Frank et al. (2013) e Frank et al. (2016), que estruturam a construção de um índice geral, aqui denominado Índice Sociotécnico para os sistemas de tratamento de esgoto, tendo em vista a heterogeneidade das variáveis envolvidas na comparação entre os sistemas. A implementação do Índice Sociotécnico propiciou a comparação entre as tecnologias de tratamento de esgotos, bem como ofereceu condições para se estabelecer um *ranking* entre esses sistemas.

O *Framework* proposto por Frank et al. (2013) e Frank et al. (2016) é baseado numa abordagem multicritério, que utiliza uma transformação de escala Curva-S para padronizar os indicadores e a Teoria da Utilidade Multiatributo para consolidar esses indicadores (FRANK et al., 2016). O referido *Framework* tem como objetivo a proposição de um índice integrativo de sustentabilidade ambiental para *benchmarking* na indústria de petróleo e gás.

O *Framework* proposto por Frank et al. (2013) e Frank et al. (2016), além de ser um modelo já validado por constituir publicação em periódicos internacionais, pode ser adaptado para o contexto objeto desta tese. Adicionalmente, a Teoria de Utilidade Multiatributo é de fácil aplicação e permite ao decisor estruturar um problema complexo em uma hierarquia simples e, que envolvem múltiplos critérios de análise (MIN, 1994, THEVENOT et al., 2006). Além disso, os diversos fatores (critérios) e a heterogeneidade entre eles - que influenciam na tomada de decisão - são ponto em comum nas pesquisas. No caso da seleção de tecnologia de tratamento de esgoto, os critérios são qualitativos e quantitativos devendo, portanto, serem padronizados e comparados para avaliar os mais diversos fatores influenciam na escolha de uma tecnologia de tratamento de esgotos.

No *Framework* apresentado por Frank et al. (2016), os indicadores (impactos ambientais) passaram por uma transformação de escala empregando-se o método de transformação de escala com base em padronização de Curva-S. A Teoria de Utilidade Multiatributo foi utilizada para posicionar a combinação de múltiplos critérios em um único índice integrador.

Nas seções seguintes são apresentados a estruturação do *Framework* para aplicação na seleção de tecnologias de tratamento de esgotos em uma bacia hidrográfica (distinção e padronização dos critérios, padronização das avaliações e cálculo do índice geral) e o *ranking* das tecnologias de tratamento de esgotos.

3.4.1. Estruturação do *Framework*

Após a validação e a definição dos pesos dos critérios e dos subsistemas sociotécnicos, o *Framework* proposto por Frank et al. (2013) e Frank et al. (2016) foi estruturado na matriz MAUT e preenchido para as tecnologias pré-selecionadas na Fase 2.

A matriz utilizada nesta pesquisa está apresentada na Tabela 4, que conforma o *Framework* proposto para o *ranking* dos sistemas de tratamento de esgotos.

Tabela 4 *Framework* proposto para o ranking dos sistemas de tratamento de esgotos

Subsistemas Sociotécnicos	Critérios	Peso dos subsistemas sociotécnicos	Peso dos critérios	Pontuação do índice dos critérios das tecnologias de tratamento de esgotos			
				A ₁	A ₂	...	A _j
C ₁	I ₁	wc ₁	w ₁	r'' _{A11}	r'' _{A21}	...	r'' _{Aj1}

C ₂	...	wc ₂	...	...	...	...	...

...
C _k	...	wc _k	...	...	...	...	...

	I _i		w _i	r'' _{A1ji}	r'' _{A2ji}	...	r'' _{Aji}
		$\sum WC_k = 1$	$\sum W_i = k$	I _{A1}	I _{A2}	...	I _{Si}

Nota: (1) O *Framework* é estruturado na matriz MAUT.

Fonte: Frank et al. (2016).

A primeira coluna refere-se aos subsistemas sociotécnicos (Ambiental, Tecnológico, Operação, Social). A segunda coluna, por sua vez, relaciona os critérios associados a cada um dos subsistemas sociotécnicos elencados. Os critérios e os subsistemas sociotécnicos descritos nas fases anteriores, foram validados e após a condução dos grupos focados, foram obtidos os pesos associados correspondentes.

- Padronização dos critérios

Os critérios de seleção utilizados nesta pesquisa são qualitativos e quantitativos e foram identificados, nesta etapa, como “Benefícios” ou “Limitações” para adoção de determinada tecnologia, o que conduziu à distinção dos critérios em “diretamente proporcionais” (“Benefícios”) ou “inversamente proporcionais” (“Limitações”) ao Índice Sociotécnico.

Frank et al. (2016) observam que os critérios, para serem comparados na matriz MAUT, devem possuir uma mesma escala de mensuração. Na pesquisa de Frank et al. (2016) duas transformações foram realizadas, sendo a primeira associada ao valor absoluto do indicador ambiental das empresas de petróleo e gás, o que permitiria uma comparação do mesmo indicador entre empresas com diferentes volumes de produção. Deste modo, realizou-se uma normalização em função do volume de produção da empresa de petróleo e gás, conforme a Equação (13).

$$r'_{Aji} = \frac{r_{Aji}}{P_{Aj}} \times 100 \quad (13)$$

Na Equação (11), r'_{Aji} representa o valor normalizado do indicador i da empresa Aj e p_{Aj} é o volume de produção de petróleo e gás natural da empresa Aj no ano analisado. Para a tese, r'_{Aji} representa o valor normalizado do critério i da tecnologia Aj . No caso das tecnologias de tratamento de esgotos não foi necessária a normalização dos critérios, tendo em vista que as tecnologias devem tratar o mesmo o volume de esgotos gerados individualmente em cada ponto de disposição final de efluente. A vazão de esgotos afluente às estações de tratamento é a mesma, independente da tecnologia que eventualmente venha a ser implantada.

A segunda transformação tem como propósito tornar adimensionais os valores resultantes da primeira transformação (FRANK et al., 2016). Para isto, foi utilizada uma escala de transformação aplicando a função da Curva-S, com limites inferiores e superiores definidos, conforme a Equação (14) para Curva-S invertida e, conforme a Equação (15) para Curva-S normal.

$$r''_{Aji} = e^{-\left[\frac{L+(r'_{Aji})}{\theta}\right]^Y} \quad (14)$$

$$r''_{Aji} = 1 - e^{-\left[\frac{L+(r'_{Aji})}{\theta}\right]^Y} \quad (15)$$

Nas Equações (14) e (15), r''_{Aji} representa o valor normalizado r'_{Aji} do critério i para a tecnologia Aj , em um intervalo de escala entre 0 e 1. O parâmetro de referência L representa o melhor valor que o critério pode assumir. Para a seleção dos sistemas de tratamento de esgotos, a segunda transformação foi conduzida para os critérios validados e utilizados para a condução do processo de seleção de tecnologias de tratamento de esgotos.

O parâmetro de referência L assumiu, nesta pesquisa, valor nulo para os critérios identificados como “Limitação”, enquanto que para aqueles critérios identificados como “Benefícios”, o parâmetro L assumiu o valor máximo dentre os possíveis valores associados a este subconjunto de critérios.

Na pesquisa de Frank et al. (2016), o parâmetro de referência L assumiu valor nulo, pois o melhor valor para os impactos ambientais seria a nulidade.

Os parâmetros de forma γ e o de amplitude θ são parâmetros da Curva-S utilizada para a transformação (FRANK et al., 2013). Esses parâmetros são determinados conforme as Equações (16) e (17), para a Curva-S invertida e conforme as Equações (18) e (19) para a Curva-S normal.

$$\gamma = \frac{\ln\left(\frac{\ln(0,1)}{\ln(0,9)}\right)}{\ln\left(\frac{ri_{m\acute{a}x}}{ri_{m\acute{i}n}}\right)} \quad (16)$$

$$\theta = \frac{ri_{m\acute{i}n}}{(-\ln(0,9))^{1/\gamma}} \quad (17)$$

$$\gamma = \frac{\ln\left(\frac{\ln(1-0,9)}{\ln(1-0,1)}\right)}{\ln\left(\frac{L+ri_{m\acute{a}x}}{L+ri_{m\acute{i}n}}\right)} \quad (18)$$

$$\theta = \frac{L+ri_{m\acute{a}x}}{(-\ln(1-0,9))^{1/\gamma}} \quad (19)$$

Nas Equações de (16) a (19), $ri_{m\acute{a}x}$ representa o valor máximo do critério i e $ri_{m\acute{i}n}$ o valor mínimo.

Após o preenchimento da matriz estruturada MAUT (*Framework*) apresentada na Tabela 4, foi calculado o Índice Sociotécnico I_{Si} a partir da Equação (20) (FRANK et al., 2016).

$$I_{Si} = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n w_{Ck} \times w_i \times r_{Aji}'' \quad (20)$$

Na Equação (20), I_{Si} representa o Índice Sociotécnico resultante da consolidação dos critérios das tecnologias A_j , em que w_i é o peso obtido para o critério i , w_{ck} é o peso atribuído para o subsistema sociotécnico k e r_{Aji} representa o valor normalizado do critério i para a tecnologia A_j . O valor obtido para o Índice Sociotécnico permite estabelecer o ranking dos sistemas de tratamento de esgotos.

3.4.2. *Ranking* das tecnologias de tratamento de esgotos para a área de estudo

O Índice Sociotécnico determinado por meio da Equação (20) possibilitou estabelecer o *ranking* das tecnologias de tratamento de esgotos para a área de estudo. Os diferentes critérios, classificados nos subsistemas sociotécnicos, foram agregados num único índice integrativo (Índice Sociotécnico), facilitando assim a tomada de decisão entre as tecnologias de tratamento de esgotos.

4. RESULTADOS

Os resultados reunidos neste capítulo estão apresentados em conformidade com as diferentes fases do fluxograma que estabelece a estrutura metodológica da pesquisa (Figura 10). Desta forma, os itens subsequentes apresentam as tecnologias centralizadas de tratamento de esgotos e suas características técnicas e operacionais (Fase 1), as eficiências mínimas de tratamento de esgotos e as tecnologias pré-selecionadas por ponto de disposição de efluente na área de estudo (Fase 2), a estrutura de preferência estabelecida a partir da pesquisa qualitativa (Fase 3) e a seleção final das tecnologias decorrente da análise multicriterial (Fase 4).

4.1. FASE 1 - TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO E CRITÉRIOS SOCIOTÉCNICOS ASSOCIADOS

Na Fase 1 foram identificadas as tecnologias de tratamento de esgotos passíveis de eventual implementação na Bacia Hidrográfica do Rio Pardo, priorizando-se os sistemas centralizados de tratamento de esgotos (Tabela 5). Foram identificadas, a partir da revisão de literatura, 34 (trinta e quatro) tecnologias.

Tabela 5 Tecnologias de tratamento de esgotos, com faixa típica de eficiência de remoção da fração carbonácea da matéria orgânica

IDENTIFICAÇÃO	TECNOLOGIAS	Faixa típica de Eficiência de Remoção de DBO (%)
A1	Tratamento primário (Tanques sépticos)	30-35
A2	Tratamento primário convencional	30-35
A3	Tratamento primário avançado	45-80
A4	Lagoa facultativa	75-85
A5	Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa	75-85
A6	Lagoa aerada facultativa	75-85
A7	Lagoa aerada mistura completa + lagoa de sedimentação	75-85
A8	Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação	80-85
A9	Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa alta taxa	80-85
A10	Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas	85-90
A11	Infiltração lenta	90-99
A12	Infiltração rápida	85-98
A13	Escoamento superficial	80-90
A14	Terras úmidas construídas (<i>Wetlands</i>)	80-90
A15	Tanque séptico + filtro anaeróbio	80-85
A16	Reator UASB	60-75

Tabela 5 Tecnologias de tratamento de esgotos, com faixa típica de eficiência de remoção da fração carbonácea da matéria orgânica (continuação)

IDENTIFICAÇÃO	TECNOLOGIAS	Faixa típica de Eficiência de Remoção de DBO (%)
A17	UASB + lodos ativados	83-93
A18	UASB + biofiltro aerado submerso	83-93
A19	UASB + filtro anaeróbio	75-87
A20	UASB + filtro biológico de alta carga	80-93
A21	UASB + lagoas de polimento	77-87
A22	UASB + lagoa aerada facultativa	75-85
A23	UASB + lagoa aerada mist. completa + lagoa decantação	75-85
A24	UASB + escoamento superficial	77-90
A25	Lodos ativados convencional	85-93
A26	Lodos ativados de aeração prolongada	90-97
A27	Lodos ativados batelada	90-97
A28	Lodos ativados convencional com remoção biológica de N	85-93
A29	Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P	85-93
A30	Lodos ativados convencional + filtração terciária	93-98
A31	Filtro biológico percolador de baixa carga	85-93
A32	Filtro biológico percolador de alta carga	80-90
A33	Biofiltro aerado submerso com nitrificação	88-95
A34	Tanque séptico + biodisco	88-95

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 6 apresenta, por tecnologia centralizada de tratamento de esgotos identificada, outras características operacionais como eficiências típicas (médias) de remoção dos principais poluentes de esgotamento doméstico (matéria orgânica, nutriente e coliformes termotolerantes), potência demandada para aeração, demanda por área, custos de implantação e operação e volumes de lodo produzidos (volumes líquidos a serem tratados e volumes desidratados a serem dispostos). A Tabela 7, por sua vez, apresenta outras características (confiabilidade, simplicidade de operação e manutenção, capacidade de resistência a variações do efluente e cargas de choque e possibilidade de estabelecimento de problemas ambientais tais como geração de odor, ruído, aerossóis e a possibilidade de atração de insetos), expressas de forma qualitativa. Estas características são apresentadas em uma avaliação relativa, em que as gradações mais altas se referem a sistemas mais favoráveis e, gradações mais baixas se referem a sistemas menos favoráveis, conforme proposta originalmente estabelecida por von Sperling (2005).

Tabela 6 Tecnologias de tratamento de esgotos e suas características operacionais

Tecnologias	Eficiência Média de Remoção				Potência para aeração (kWh/hab.ano)	Demanda de área (m ² /hab)	Custos		Volume de Lodo	
	DBO ₅ (%)	N total (%)	P total (%)	Coliformes (unid. log)			Implantação (R\$/hab)	Operação e Manutenção (R\$/hab.ano)	Lodo líquido a ser tratado (L/hab.ano)	Lodo desidratado a ser disposto (L/hab.ano)
A1	32,5	30	35	1	0	0,04	40	2	235	25
A2	32,5	30	35	1	0	0,03	40	2	530	27,5
A3	62,5	30	90	1	0	0,05	52,5	11,25	1615	75
A4	80,0	60	35	1,5	0	3	60	3	62,5	22,5
A5	80,0	60	35	1,5	0	2,25	52,5	3	107,5	40
A6	80,0	30	35	1,5	14,5	0,38	70	7	125	18,5
A7	80,0	30	35	1,5	19	0,3	70	7	207,5	22,5
A8	82,5	65	50	4	0	4	75	3,75	107,5	40
A9	82,5	90	60	3,5	1	2,75	70	4,75	107,5	40
A10	87,5	60	35	3,5	0	2,45	70	4,75	125	47,5
A11	94,5	75	85	4	0	30	40	2	0	0
A12	91,5	65	50	4,5	0	3,5	50	2,5	0	0
A13	85,0	65	35	2,5	0	2,75	60	3	0	0
A14	85,0	60	35	3,5	0	3	65	3,25	0	0
A15	82,5	60	35	1,5	0	0,28	105	8	590	37,5
A16	67,5	60	35	1	0	0,07	40	3	145	22,5
A17	88,0	60	35	1,5	17	0,14	90	9,5	290	37,5
A18	88,0	60	35	1,5	17	0,1	82,5	9,5	290	35
A19	81,0	60	35	1,5	0	0,1	57,5	4,5	225	30
A20	86,5	60	35	1,5	0	0,15	75	6,25	290	35

Tabela 6 Tecnologias de tratamento de esgotos e suas características operacionais (conclusão)

Tecnologias	Eficiência Média de Remoção				Potência para aeração (kWh/hab.ano)	Demanda de área (m ² /hab)	Custos		Volume de Lodo	
	DBO ₅ (%)	N total (%)	P total (%)	Coliformes (unid. log)			Implantação (R\$/hab)	Operação e Manutenção (R\$/hab.ano)	Lodo líquido a ser tratado (L/hab.ano)	Lodo desidratado a ser disposto (L/hab.ano)
A21	82,0	65	50	4	0	2	60	5,75	200	22,5
A22	80,0	30	35	1,5	3,5	0,23	65	7	225	32,5
A23	80,0	30	35	1,5	6	0,2	65	7	225	32,5
A24	83,5	65	35	2,5	0	2,25	65	6	145	22,5
A25	89,0	60	35	1,5	22	0,19	130	15	2050	62,5
A26	93,5	60	35	1,5	27,5	0,19	105	15	1600	72,5
A27	93,5	60	35	1,5	27,5	0,19	105	15	1600	72,5
A28	89	75	35	1,5	18,5	0,19	140	16	2050	62,5
A29	89	75	81,5	1,5	18,5	0,19	160	20	2050	62,5
A30	95,5	60	55	4	22	0,23	160	20	2150	70
A31	89,0	60	35	1,5	0	0,23	135	12,5	730	57,5
A32	85,0	60	35	1,5	0	0,19	135	12,5	1200	57,5
A33	91,5	60	35	1,5	22	0,13	95	11,5	2050	62,5
A34	91,5	60	35	1,5	0	0,15	135	12,5	915	47,5

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2005) e Jordão e Pessoa (2005).

Nota (1): A1 – Tratamento primário (Tanques sépticos), A2 - Tratamento primário convencional, A3 - Tratamento primário avançado, A4 - Lagoa facultativa, A5 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa, A6 - Lagoa aerada facultativa, A7 - Lagoa aerada mistura completa + lagoa de sedimentação, A8 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação, A9 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa alta taxa, A10 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas, A11 - Infiltração lenta, A12 - Infiltração rápida, A13 - Escoamento superficial, A14 - Terras úmidas construídas (Wetlands), A15 - Tanque séptico + filtro anaeróbio, A16 - Reator UASB, A17 - UASB + lodos ativados, A18 - UASB + biofiltro aerado submerso, A19 - UASB + filtro anaeróbio, A20 - UASB + filtro biológico de alta carga, A21 - UASB + lagoas de polimento, A22 - UASB + lagoa aerada facultativa, A23 - UASB + lagoa aerada mistura completa + lagoa decantação, A24 - UASB + escoamento superficial, A25 - Lodos ativados convencional, A26 - Lodos ativados de aeração prolongada, A27 - Lodos ativados batelada, A28 - Lodos ativados convencional com remoção biológica de N, A29 - Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P, A30 - Lodos ativados convencional + filtração terciária, A31 - Filtro biológico percolador de baixa carga, A32 - Filtro biológico percolador de alta carga, A33 - Biofiltro aerado submerso com nitrificação, A34 - Tanque séptico + biodisco.

Tabela 7 Tecnologias de Tratamento de esgotos e suas características qualitativas

Tecnologias	Confiabilidade	Simplicidade Operação e Manutenção	Capacidade de resistência a variações do efluente e cargas de choque			Menor possibilidade de problemas ambientais			
			Vazão	Qualidade	Tóxicos	Maus Odores	Ruídos	Aerossóis	Insetos e Vermes
A1	4	3	4	5	4	2	4	5	3
A2	4	3	4	5	4	2	4	5	3
A3	4	3	4	5	4	3	4	5	3
A4	4	5	4	4	3	3	5	5	2
A5	4	5	4	4	3	1	5	5	2
A6	4	4	4	4	3	4	1	1	3
A7	3	3	3	4	3	3	1	1	2
A8	4	5	4	4	3	3	5	5	2
A9	4	3	4	4	3	3	2	2	2
A10	4	3	4	4	3	3	5	5	2
A11	4	4	4	4	4	2	5	3	2
A12	4	4	4	4	4	2	5	5	2
A13	4	5	4	4	3	2	5	3	2
A14	4	5	4	4	3	2	5	5	2
A15	3	4	3	3	2	2	4	5	4
A16	3	4	2	2	2	2	4	5	4
A17	4	1	2	2	2	2	1	3	4
A18	4	2	2	2	2	2	2	5	4
A19	3	4	2	2	2	2	4	5	4
A20	4	3	4	5	4	2	4	5	3

Tabela 7 Tecnologias de Tratamento de esgotos e suas características qualitativas (conclusão)

Tecnologias	Confiabilidade	Simplicidade Operação e Manutenção	Capacidade de resistência a variações do efluente e cargas de choque			Menor possibilidade de problemas ambientais			
			Vazão	Qualidade	Tóxicos	Maus Odores	Ruídos	Aerossóis	Insetos e Vermes
A21	4	3	2	2	2	2	4	4	3
A22	4	5	2	2	2	2	5	5	2
A23	4	4	2	2	2	2	1	1	3
A24	3	3	2	2	2	2	1	1	2
A25	4	5	2	2	2	2	5	3	2
A26	4	1	3	3	2	4	1	3	4
A27	4	2	4	4	3	5	1	3	4
A28	4	3	4	4	3	3	1	3	4
A29	4	1	3	3	2	4	1	3	4
A30	4	1	3	3	2	4	1	3	4
A31	4	1	3	3	2	4	1	3	4
A32	4	3	3	2	2	4	4	4	2
A33	4	3	4	3	3	4	4	4	3
A34	4	2	3	3	2	5	2	5	4

Fonte: Adaptado de von Sperling (2005) e Jordão e Pessoa (2005).

Nota (1): A1 – Tratamento primário (Tanques sépticos), A2 - Tratamento primário convencional, A3 - Tratamento primário avançado, A4 - Lagoa facultativa, A5 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa, A6 - Lagoa aerada facultativa, A7 - Lagoa aerada mistura completa + lagoa de sedimentação, A8 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação, A9 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa alta taxa, A10 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas, A11 - Infiltração lenta, A12 - Infiltração rápida, A13 - escoamento superficial, A14 - Terras úmidas construídas (Wetlands), A15 - Tanque séptico + filtro anaeróbio, A16 - Reator UASB, A17 - UASB + lodos ativados, A18 - UASB + biofiltro aerado submerso, A19 - UASB + filtro anaeróbio, A20 - UASB + filtro biológico de alta carga, A21 - UASB + lagoas de polimento, A22 - UASB + lagoa aerada facultativa, A23 - UASB + lagoa aerada mistura completa + lagoa decantação, A24 - UASB + escoamento superficial, A25 - Lodos ativados convencional, A26 - Lodos ativados de aeração prolongada, A27 - Lodos ativados batelada, A28 - Lodos ativados convencional com remoção biológica de N, A29 - Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P, A30 - Lodos ativados convencional + filtração terciária, A31 - Filtro biológico percolador de baixa carga, A32 - Filtro biológico percolador de alta carga, A33 - Biofiltro aerado submerso com nitrificação, A34 - Tanque séptico + biodisco.

Nota (2): As gradações mais altas se referem a sistemas mais favoráveis e, as gradações mais baixas se referem a sistemas menos favoráveis, considerando condições locais (VON SPERLING, 2005).

As características dos sistemas centralizados de tratamento de esgotos reunidas nas Tabelas 6 e 7 estabeleceram 19 (dezenove) critérios de seleção (ou critérios sociotécnicos), critérios que ofereceram subsídio necessário para escolha por uma tecnologia em detrimento de outra. Os referidos critérios, sendo 10 (dez) critérios quantitativos e 9 (nove) critérios qualitativos, foram assim identificados:

1. Eficiência de Remoção de Matéria Orgânica (%)
2. Eficiência de Remoção de Nitrogênio (%)
3. Eficiência de Remoção de Fósforo (%)
4. Eficiência de Remoção de Coliformes (unid. log)
5. Requisitos de Energia (kWh/hab.ano)
6. Demanda por Área de Implantação (m²/hab)
7. Custos de Implantação (R\$/hab)
8. Custos de Operação (R\$/hab.ano)
9. Quantidade de Lodo a ser tratado (L/hab.ano)
10. Quantidade de Lodo a ser disposto (L/hab.ano)
11. Confiabilidade do sistema (adimensional)
12. Simplicidade Operacional (adimensional)
13. Capacidade de Resistência a Variações de Vazão (adimensional)
14. Capacidade de Resistência a Variações das Características do Afluente (adimensional)
15. Capacidade de Resistência a Constituintes Tóxicos (adimensional)
16. Interferência decorrente da geração de Odor (adimensional)
17. Interferência decorrente da Geração de Ruído (adimensional)
18. Interferência decorrente da Geração de Aerossóis (adimensional)
19. Possibilidade de atração de Insetos (adimensional)

Os critérios foram definidos **a)** em função da avaliação dos critérios mais recorrentemente utilizados em pesquisas (dissertações, teses e artigos) e; **b)** considerando-se a existência de dados (qualitativos e/ou quantitativos) para os sistemas de tratamento de esgotos elencados na Tabela 5.

É importante destacar que na Fase 1 da pesquisa foram reunidas todas as tecnologias centralizadas de tratamento de esgotos passíveis de implementação, não havendo seleção das tecnologias de tratamento para os diferentes pontos de disposição final de esgotos da área de estudo. A pré-seleção de tecnologias de tratamento – primeira das etapas da metodologia de

seleção proposta nesta pesquisa – foi realizada na Fase 2, cujos resultados estão reunidos na seção subsequente.

4.2. FASE 2 – PRÉ-SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS A PARTIR DO CRITÉRIO DE CORTE

Para a condução da Fase 2, dois importantes aspectos foram inicialmente definidos: **a)** a área de estudo e **b)** a eficiência mínima de remoção da fração carbonácea da matéria orgânica carbonácea como critério de corte.

A área de estudo desta pesquisa - Bacia Hidrográfica do Rio Pardo - está descrita no item 3.2.1 (“Definição da área de estudo”) do capítulo 3 (“Metodologia”). Cabe destacar que o Rio Pardo recebe os esgotos brutos das sedes dos municípios de Ibatiba e Iúna, o rio Pardinho (que recebe o esgoto bruto produzido pela sede municipal de Irupi) e o ribeirão perdição (que recebe esgotos brutos dos povoados de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças). Desta forma, os resultados serão apresentados pelas sedes municipais e distritos inseridos na bacia hidrográfica (sedes dos municípios de Ibatiba, Irupi e Iúna e distritos de Santíssima Trindade, Nossa Senhora das Graças).

Para a Bacia Hidrográfica do Rio Pardo, foram apropriadas as eficiências mínimas, que constituem o “critério de corte”, a partir do qual foram pré-selecionadas as tecnologias de tratamento de esgoto, conforme descrito no item subsequente.

4.2.1. Eficiências mínimas e pré-seleção de sistemas de tratamento

Conforme estabelecido na Seção 3.2 (“Apropriação de eficiências mínimas de tratamento de esgotos”), as eficiências mínimas de tratamento para os diferentes pontos de disposição final de efluentes na Bacia Hidrográfica do Rio Pardo foram obtidas a partir de Santoro (2016) e Santoro, Reis e Mendonça (2016).

Os referidos autores estudaram sete diferentes modelos de otimização aplicáveis à determinação de eficiências mínimas de tratamento de esgotos no âmbito de uma bacia hidrográfica. Dentre os modelos considerados adequados por Santoro (2016) e Santoro, Reis e Mendonça (2016), as eficiências mínimas de tratamento utilizadas neste estudo foram aquelas obtidas a partir do modelo originalmente proposto por Mulligan (1991), modelo conformado por uma medida de inequidade na função objetivo (Equação (21)).

$$\text{Minimizar } [f(e)] = \sum_{i=1}^n \left[\left| \frac{CO_{\text{Efluente Bruto}(i)}}{CO_{\text{Efluente Bruto}}} - \frac{E_i}{\bar{E}} \right| \right] \quad (21)$$

Na Equação (21) E_i representa a eficiência do i -ésimo sistema de tratamento de efluente considerado para a bacia hidrográfica em estudo, \bar{E} a eficiência média do conjunto de estações de tratamento avaliadas, $CO_{\text{Efluente Bruto}(i)}$ a carga orgânica (em Kg/dia) do i -ésimo ponto de lançamento de efluente considerado na bacia e $\overline{CO}_{\text{Efluente Bruto}}$ a carga orgânica média do conjunto de estações de tratamento avaliadas (em Kg/dia).

Considerando-se o fato de que os cursos d'água da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo não passaram por processo de enquadramento, foram consideradas, para as etapas subsequentes do presente estudo, as eficiências mínimas necessárias ao atendimento dos padrões de qualidade associados aos rios classe 2. É relevante registrar que a Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece que, enquanto não aprovados os respectivos enquadramentos, as águas doces serão consideradas classe 2 (BRASIL,2005).

Os valores de eficiências mínimas de tratamento associados aos diferentes pontos de disposição final da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo estão reunidos na Tabela 8. Foram reunidas eficiências mínimas referentes a três diferentes condições de tratamento estudadas por Santoro (2016) e Santoro, Reis e Mendonça (2016). São elas:

- **Condição 1:** admite-se o lançamento de efluentes brutos, sendo a capacidade de autodepuração do corpo receptor responsável pela manutenção das concentrações de OD e DBO em conformidade com os padrões de qualidade ambiental estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005.
- **Condição 2:** os efluentes tratados devem apresentar concentração máxima de DBO de 120 mg/L, conforme padrão de qualidade estabelecido para efluentes pela Resolução CONAMA nº 430/2011.
- **Condição 3:** os efluentes tratados devem apresentar eficiência mínima de tratamento de 60%, condição na qual a Resolução CONAMA nº 430/2011 admite que os valores de DBO no efluentes tratados sejam superiores a 120 mg/L.

Tabela 8 Eficiências mínimas (em %) associados à diferentes condições de tratamento

Localidade	Eficiências mínima de tratamento (%)		
	Condição 1	Condição 2	Condição 3
Ibatiba	95	95	95
Irupi	73	70	73
Nossa Senhora das Graças	<25 (1)	70	60
Santíssima Trindade	<25 (1)	70	60
Iúna	94	95	95

Nota: (1) Este valor corresponde ao limite inferior do espaço de busca das eficiências (1 a 95%).

Fonte: Santoro, Reis e Mendonça (2016)

A partir das eficiências mínimas de tratamento reunidas na Tabela 8 e das faixas típicas de remoção de DBO associadas aos diferentes sistemas de tratamento (Tabela 5), foram pré-selecionados os sistemas de tratamento de esgotos aplicáveis a cada ponto de disposição final de esgotos na Bacia Hidrográfica do Rio Pardo. Os resultados desta etapa do trabalho, para as condições de tratamento 1, 2 e 3, estão reunidos nas Tabelas 9 (para a condição 1) e na Tabela 10 (para as condições 2 e 3).

Em função das pequenas cargas orgânicas produzidas pelos distritos de Nossa Senhora das Graças e de Santíssima Trindade, e considerando a perspectiva de que a capacidade de autodepuração seja responsável pela manutenção dos padrões de qualidade dos corpos d'água classe 2 (Condição 1) sugere-se, a princípio, que todos os sistemas de tratamento reunidos na Tabela 5 sejam aplicáveis naqueles locais.

Adicionalmente, em função de entrevista com especialistas da área de recursos hídricos e saneamento ambiental (entrevistas que compuseram os grupos focados, conforme discussões apresentadas em seção subsequente), foram suprimidas da listagem as tecnologias infiltração lenta (A11), infiltração rápida (A12), escoamento superficial (A13) e *wetlands* (A14). Segundo os referidos especialistas, estes sistemas, ainda que ofereçam elevadas eficiências de remoção de matéria orgânica, dependem fortemente da litologia local e, usualmente, requerem grande área para implantação, aspectos que raramente tem permitido suas aplicações para o tratamento centralizado de esgotos. Adicionalmente, função das mesmas ponderações, foi suprimida também a tecnologia UASB combinado com escoamento superficial (A24), devido à associação do escoamento superficial ao UASB.

Tabela 9 Tecnologias de tratamento de esgotos pré-selecionados para a Condição 1

Localidade	Tecnologias de tratamento pré-selecionadas
Ibatiba e Iúna	A26 - Lodos ativados de aeração prolongada A27 - Lodos ativados por batelada A30 - Lodos ativados convencional + filtração terciária A33 - Biofiltro aerado submerso com nitrificação A34 - Tanque séptico + Biodisco
Irupi	A3 - Tratamento primário avançado A4 - Lagoa facultativa A5 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa A6 - Lagoa aerada facultativa A7 - Lagoa aerada mistura completa + lagoa de sedimentação A8 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação A9 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa alta taxa A10 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas A15 - Tanque séptico + filtro anaeróbio A16 - Reator UASB A17 - UASB + lodos ativados A18 - UASB + biofiltro aerado submerso A19 - UASB + filtro anaeróbio A20 - UASB + filtro biológico de alta carga A21 - UASB + lagoas de polimento A22 - UASB + lagoa aerada facultativa A23 - UASB + lagoa aerada mist. Completa + lagoa decantação A25 - Lodos ativados convencional A26 - Lodos ativados de aeração prolongada A27 - Lodos ativados por batelada A28 - Lodos ativados convencional com remoção biológica de N A29 - Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P A30 - Lodos ativados convencional + filtração terciária A31 - Filtro biológico percolador de baixa carga A32 - Filtro biológico percolador de alta carga A33 - Biofiltro aerado submerso com nitrificação A34 - Tanque séptico + Biodisco

Tabela 9 Tecnologias de tratamento de esgotos pré-selecionados para a Condição 1 (continuação)

Localidade	Tecnologias de tratamento pré-selecionadas
	A1 - Tratamento primário (tanques sépticos) A2 - Tratamento primário convencional A3 - Tratamento primário avançado A4 - Lagoa facultativa A5 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa A6 - Lagoa aerada facultativa A7 - Lagoa aerada mistura completa + lagoa de sedimentação A8 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação A9 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa alta taxa A10 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas A15 - Tanque séptico + filtro anaeróbio A16 - Reator UASB
Nossa Sra. Das Graças e Santíssima Trindade	A17 - UASB + lodos ativados A18 - UASB + biofiltro aerado submerso A19 - UASB + filtro anaeróbio A20 - UASB + filtro biológico de alta carga A21 - UASB + lagoas de polimento A22 - UASB + lagoa aerada facultativa A23 - UASB + lagoa aerada mist. Completa + lagoa decantação A25 - Lodos ativados convencional A26 - Lodos ativados de aeração prolongada A27 - Lodos ativados por batelada A28 - Lodos ativados convencional com remoção biológica de N A29 - Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P A30 - Lodos ativados convencional + filtração terciária A31 - Filtro biológico percolador de baixa carga A32 - Filtro biológico percolador de alta carga A33 - Biofiltro aerado submerso com nitrificação A34 - Tanque séptico + Biodisco

Fonte: Elaboração própria

Tabela 10 Tecnologias de tratamento de esgotos pré-selecionados para as Condições 2 e 3

Localidade	Tecnologias de tratamento pré-selecionadas
Ibatiba e Iúna	A26 - Lodos ativados de aeração prolongada A27 - Lodos ativados por batelada A30 - Lodos ativados convencional + filtração terciária A33 - Biofiltro aerado submerso com nitrificação A34 - Tanque séptico + Biodisco
Irupi, Nossa Senhora das Graças e Santíssima Trindade	A3 - Tratamento primário avançado A4 - Lagoa facultativa A5 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa A6 - Lagoa aerada facultativa A7 - Lagoa aerada mistura completa + lagoa de sedimentação A8 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação A9 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa alta taxa A10 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas A15 - Tanque séptico + filtro anaeróbio A16 - Reator UASB A17 - UASB + lodos ativados A18 - UASB + biofiltro aerado submerso A19 - UASB + filtro anaeróbio A20 - UASB + filtro biológico de alta carga A21 - UASB + lagoas de polimento A22 - UASB + lagoa aerada facultativa A23 - UASB + lagoa aerada mist. Completa + lagoa decantação A25 - Lodos ativados convencional A26 - Lodos ativados de aeração prolongada A27 - Lodos ativados por batelada A28 - Lodos ativados convencional com remoção biológica de N A29 - Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P A30 - Lodos ativados convencional + filtração terciária A31 - Filtro biológico percolador de baixa carga A32 - Filtro biológico percolador de alta carga A33 - Biofiltro aerado submerso com nitrificação A34 - Tanque séptico + Biodisco

Fonte: Elaboração própria

Para os municípios de Ibatiba e Iúna foram pré-selecionados os mesmos sistemas de tratamento de esgotos (tecnologias A26, A27, A30, A33 e A34), independente da condição de tratamento analisada. Para estes municípios foram estimadas elevadas eficiências de remoção de matéria orgânica (eficiências de 94% ou 95%), com valores próximos ou no limite superior do limite assumido para a eficiência de tratamento.

Os sistemas de tratamento pré-selecionados para o município de Irupi e para os distritos de Nossa Senhora das Graças e Santíssima Trindade foram os mesmos naquelas condições em que se estabelece um valor máximo de 120 mg/L para a DBO do esgoto tratado (Condição 2) ou uma eficiência mínima de tratamento de esgotos de 60% (Condição 3). Nestas condições, foram pré-selecionados sistemas de tratamento secundário com eficiências mínimas de tratamento variando entre 60% e 73%. Esta perspectiva se repete para o município de Irupi, quando o processo de pré-seleção admite que a capacidade de autodepuração do corpo d'água poderia assimilar os esgotos produzidos pelos municípios (Condição 1), desde que respeitados os padrões de qualidade dos cursos d'água.

Caso particular foi observado para os distritos de Nossa Senhora das Graças e Santíssima Trindade quando da avaliação da Condição 1 de tratamento de esgoto, condição na qual qualquer tecnologia de tratamento de esgotos atenderia à eficiência mínima estimada para a condução do processo de pré-seleção. Conforme observa Santoro (2016), para os resultados obtidos a partir do modelo de otimização proposto originalmente por Mulligan, não seria necessária a implementação de qualquer tecnologia de tratamento de esgotos, uma vez que a capacidade de autodepuração do Ribeirão Perdição permitiria a manutenção dos padrões de qualidade dos corpos d'água classe 2.

4.3. FASE 3 – AVALIAÇÃO QUALITATIVA

Nesta etapa da pesquisa foram obtidos os subsistemas sociotécnicos e os critérios de seleção validados, por meio de consulta aos especialistas da área de saneamento ambiental e recursos hídricos. Com os dados validados, foram realizadas reuniões com três grupos focados (Academia, Tratamento e Regulação), o que possibilitou a obtenção dos pesos para os critérios e subsistemas sociotécnicos e, assim, a definição da estrutura de preferência utilizada para a composição da matriz MAUT. Estes resultados estão reunidos nas subseções subsequentes.

4.3.1. O processo de validação

O processo de validação visou consolidar a proposição de critérios de seleção (elencados no item 4.1) e a classificação desses critérios nos subsistemas sociotécnicos ambiental, tecnológico, operação e social.

A validação foi realizada por 13 (treze) especialistas vinculados aos segmentos da academia, de regulação e tratamento (operação de sistemas de tratamento de esgotos). Foram consultados profissionais nas áreas de gestão e gerenciamento de recursos hídricos e nas áreas operacional e de gestão de efluentes, cujas informações encontram-se sintetizadas na Figura 15.

No Segmento Academia, os dados foram validados por cinco professores de universidades federais, com atuação nas áreas de gerenciamento de recursos hídricos e saneamento ambiental, doutorado em Engenharia Civil (com ênfases em Hidráulica ou Saneamento) ou Engenharia de Recursos Hídricos, com mais de dez anos de docência no ensino superior e experiência profissional na área em análise. Também foram consultados quatro especialistas do Segmento Regulação, profissionais vinculados ao Instituto Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA) ou à Agência Reguladora de Recursos Hídricos (AGERH) do Estado do Espírito Santo, com formação em Engenharia Civil, Engenharia Química ou Engenharia Agrícola (todos com mestrado na área ambiental), com atuação na gestão de recursos hídricos e experiência em licenciamento ou outorga de Estação de Tratamento de Esgoto. Quatro representantes de concessionária de tratamento de água e esgoto (Concessionárias de Saneamento) também participaram do processo de validação, todos com experiência profissional na gestão e na operação de sistemas de tratamento de esgoto, com mestrado e/ou especialização na área ambiental.

Figura 15 Informações dos Especialistas participantes do processo de validação

Segmento	ESPECIALISTAS	LOCAL DE TRABALHO	EXPERIÊNCIA PROFISSIONAL (ANOS)	GRADUAÇÃO	MESTRADO	D
ACADEMIA	ESPECIALISTA 1	UFV	13	Engenharia Civil	Engenharia Hidráulica e Saneamento	Engen
	ESPECIALISTA 2	UFES	10	Engenharia Química	Engenharia Hidráulica e Saneamento	Engen
	ESPECIALISTA 3	UFES	40	Engenharia Civil	Engenharia Hidráulica e Saneamento	Engen
	ESPECIALISTA 4	UFES	22	Engenharia Civil	Engenharia Ambiental	Engen
	ESPECIALISTA 5	UFES	32	Engenharia Civil	Hidráulica e Saneamento	Engen
TRATAMENTO	ESPECIALISTA 6	Concessionária de Saneamento	9	Tecnologia em Saneamento Ambiental	Gestão e Regulação de Recursos Hídricos	
	ESPECIALISTA 7	Concessionária de Saneamento	12	Ciências Biológicas	Engenharia Ambiental	
	ESPECIALISTA 8	Concessionária de Saneamento	11	Química Industrial	-	
	ESPECIALISTA 9	Concessionária de Saneamento	12	Engenharia Civil	Engenharia Ambiental	
REGULAÇÃO	ESPECIALISTA 10	AGERH/ES	12	Engenharia Civil	Engenharia Ambiental	
	ESPECIALISTA 11	AGERH/ES	2	Engenharia Química	-	
	ESPECIALISTA 12	IEMA	9	Engenharia Química	-	
	ESPECIALISTA 13	IEMA	11	Engenharia Agrícola	Engenharia Agrícola	

Fonte: Elaboração Própria

O processo de validação ocorreu em duas etapas. Na primeira etapa da validação (Validação 01), os especialistas deveriam indicar se concordavam com uma proposta de alocação dos critérios nos subsistemas Ambiental, Tecnológico, Operação e Social, conforme formulário apresentado no Apêndice A; caso não concordassem com a distribuição proposta, poderiam alocar os critérios objetos de análise em qualquer outro sistema sociotécnicos. Num segundo momento da validação (Validação 02) os especialistas poderiam sugerir a inclusão de novos critérios de seleção, bem como sugerir a supressão de critérios que fossem considerados desnecessários, ainda que previamente associados a algum subsistema. Os resultados decorrentes da Validação 01 estão reunidos na Tabela 11.

Na Tabela 11 está apresentado o percentual de concordância dos especialistas quanto a alocação de cada critério nos subsistemas sociotécnicos com os quais foram inicialmente associados (proposta original apresentada no Apêndice A). Os menores percentuais de concordâncias (67%) foram registrados para a alocação dos critérios a) Quantidade de lodo a ser tratado e b) Quantidade de lodo a ser disposto no subsistema tecnológico. As propostas de alocação dos demais critérios por subsistema sociotécnicos receberam aprovação de, no mínimo, 75% dos especialistas consultados. É relevante observar que todos os especialistas consultados concordaram com os critérios propostos para a conformação do subsistema ambiental.

Alguns dos especialistas consultados sugeriram a inserção de um mesmo critério em mais de um subsistema, sob a justificativa de transversalidade do critério assinalado. Nesta pesquisa optou-se por enquadrar os critérios em um único subsistema sociotécnico, tornando mais objetiva a condução dos grupos focados, principalmente quando da atribuição dos pesos aos critérios e subsistemas.

Tabela 11 Validação 01 – Classificação dos critérios nos subsistemas sociotécnicos

PROPOSIÇÃO DE CLASSIFICAÇÃO DOS CRITÉRIOS NOS SUBSISTEMAS SOCIOTÉCNICOS		% Concordância entre especialistas
Subsistemas Sociotécnicos	Crítérios de seleção propostos	
AMBIENTAL	Eficiência de Remoção de Matéria Orgânica	100%
	Eficiência de Remoção de Nitrogênio	100%
	Eficiência de Remoção de Fósforo	100%
	Eficiência de Remoção de Coliformes	100%
TECNOLÓGICO	Requisitos de Energia	83%
	Demanda por Área de Implantação	100%
	Custos de Implantação	92%
	Custos de Operação	100%
	Quantidade de Lodo a ser tratado	67%
	Quantidade de Lodo a ser disposto	67%
OPERAÇÃO	Confiabilidade do sistema	83%
	Simplicidade Operacional	75%
	Capacidade de Resistência a Variações de Vazão	100%
	Capacidade de Resistência a Variações das Características do Afluente	75%
	Capacidade de Resistência a Constituintes Tóxicos	75%
SOCIAL	Interferência decorrente da geração de Odor	100%
	Interferência decorrente da Geração de Ruído	92%
	Interferência decorrente da Geração de Aerossóis	92%
	Possibilidade de atração de Insetos	92%

Fonte: Elaboração própria

Na Validação 02, os especialistas poderiam sugerir a incorporação de novos critérios ou a supressão dos critérios originalmente propostos. Os resultados desta etapa do processo de validação estão reunidos na Tabela 13. A manutenção dos critérios *a)* eficiência de remoção de matéria orgânica, *b)* eficiência de remoção de coliformes, *c)* custos de operação, *d)* capacidade de resistência a variações de vazão e *e)* interferência decorrente da geração de odor foi sugerida por todos os especialistas consultados. Os menores níveis de concordâncias entre os especialistas foram observados para os critérios: *a)* resistência a constituintes tóxicos (critério considerado relevante para o processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos por 62% dos especialistas consultados) e *b)* possibilidade de atração de insetos (relevante para 77% dos especialistas). Para os demais critérios, mais de 85% dos especialistas apresentaram-se favoráveis à inclusão daqueles critérios no processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos na tese.

Tabela 12 Validação 02 – Critérios de seleção

PROPOSIÇÃO DE CRITÉRIOS DE SELEÇÃO	% Concordância entre especialistas
Eficiência de Remoção de Matéria Orgânica	100%
Eficiência de Remoção de Nitrogênio	92%
Eficiência de Remoção de Fósforo	85%
Eficiência de Remoção de Coliformes	100%
Requisitos de Energia	92%
Demanda por Área de Implantação	85%
Custos de Implantação	85%
Custos de Operação	100%
Quantidade de Lodo a ser tratado	92%
Quantidade de Lodo a ser disposto	92%
Confiabilidade do sistema	92%
Simplicidade Operacional	92%
Capacidade de Resistência a Variações de Vazão	100%
Capacidade de Resistência a Variações das Características do Afluente	92%
Capacidade de Resistência a Constituintes Tóxicos	62%
Interferência decorrente da geração de Odor	100%
Interferência decorrente da Geração de Ruído	92%
Interferência decorrente da Geração de Aerossóis	85%
Possibilidade de atração de Insetos	77%

Fonte: Elaboração própria

Outros critérios foram sugeridos por alguns dos especialistas consultados, como **a)** possibilidade de reaproveitamento de subprodutos e do efluente tratado, **b)** possibilidade de cogeração de energia, **c)** capacidade de autodepuração do corpo receptor dos efluentes tratados, **d)** vazão remanescente no ponto de lançamento para diluição e depuração de efluentes tratados, segundo critério de outorga do órgão de controle de recursos hídricos, **e)** características dos corpos d'água a jusante do ponto de lançamento (ambientes lênticos, lóticos ou intermediários), **f)** características relacionadas com meio ambiente da área de implantação da ETE e **g)** localização da ETE em relação a área urbanizada; menor consumo de insumos químicos (por exemplo: no acondicionamento do afluente e tratamento do lodo).

A possibilidade de reaproveitamento de subprodutos e do efluente tratado e a possibilidade de cogeração de energia, embora de indiscutíveis importâncias não foram incluídos nesta pesquisa pela inexistência de dados de desempenho das tecnologias de tratamento envolvidas na tese.

As características do corpo d'água e a capacidade de autodepuração do corpo receptor dos efluentes tratados constituíram aspectos analisados por Santoro (2016), quando da apropriação das eficiências mínimas de tratamento de esgotos. Constituem, portanto, aspectos que ofereceram suporte à pré-seleção dos sistemas de tratamento, sendo parte fundamental do arcabouço metodológico proposto por meio da presente pesquisa.

Já as características relacionadas com meio ambiente da área de implantação da ETE e localização da ETE em relação a área urbanizada, apesar de importantes, estão relacionadas com o processo de licenciamento ambiental das ETE's, associadas com impactos decorrentes da construção do empreendimento, como desapropriação, interferência com vizinhança (odor, ruído, aerossóis) que, de alguma forma, já se encontram contemplados por meio dos critérios do subsistema social.

4.3.2. Definição dos pesos de importância dos subsistemas sociotécnicos e critérios

A determinação dos pesos de importância para os critérios e subsistemas sociotécnicos – que conformam a estrutura de preferência empregada para a seleção dos sistemas de tratamento de esgotos – foram definidos após condução dos grupos focados. Os pesos utilizados no processo de seleção, tanto para os critérios quanto para os subsistemas sociotécnicos, foram obtidos a partir da média aritmética dos valores obtidos nos grupos focados.

Os pesos dos critérios de seleção e dos subsistemas sociotécnicos estão reunidos nas Tabelas 13 e 14, respectivamente.

Tabela 13 Pesos dos critérios de seleção obtidos por meio dos Grupos Focados

CRITÉRIOS DE SELEÇÃO VALIDADOS	GF 1 (Academia)	GF 2 (Tratamento)	GF 3 (Regulação)	PESO DOS CRITÉRIOS
Eficiência de Remoção de Matéria Orgânica	10	10	10	10,0
Eficiência de Remoção de Nitrogênio	8	6	7	7,0
Eficiência de Remoção de Fósforo	8	6	8	7,3
Eficiência de Remoção de Coliformes	10	8	8	8,7
Requisitos de Energia	8	8	8	8,0
Demanda por Área de Implantação	5	7	7	6,3
Custos de Implantação	8	7	6	7,0
Custos de Operação	9	8	6	7,7
Quantidade de Lodo a ser tratado	7	5	5	5,7
Quantidade de Lodo a ser disposto	7	8	5	6,7
Confiabilidade do sistema	3	9	6	6,0
Simplicidade Operacional	6	7	5	6,0
Capacidade de Resistência a Variações de Vazão	5	7	6	6,0
Capacidade de Resistência a Variações das Características do Afluente	5	7	6	6,0
Capacidade de Resistência a Constituintes Tóxicos	3	4	3	3,3
Interferência decorrente da geração de Odor	6	8	6	6,7
Interferência decorrente da Geração de Ruído	2	7	5	4,7
Interferência decorrente da Geração de Aerossóis	2	4	2	2,7
Possibilidade de atração de Insetos	2	3	2	2,3

Fonte: Elaboração própria

Tabela 14 Pesos dos subsistemas sociotécnicos obtidos por meio dos Grupos Focados

SUBSISTEMA SOCIOTÉCNICO	GF 1 (Academia)	GF 2 (Tratamento)	GF 3 (Regulação)	PESO DOS SUBSISTEMAS SOCIOTÉCNICOS
AMBIENTAL	10	9	10	9,6
TECNOLÓGICO	8	9	8	8,3
OPERAÇÃO	6	8	7	7,0
SOCIAL	3	7	8	6,0

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 15 apresenta, de maneira sintética, a estrutura de preferência empregada no processo de seleção.

Tabela 15 Estrutura de preferência utilizada para o processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos

Subsistemas Sociotécnicos	Peso dos Subsistemas	Crítérios de seleção	Peso dos Crítérios
AMBIENTAL	9,6	Eficiência de Remoção de Matéria Orgânica	10,0
		Eficiência de Remoção de Nitrogênio	7,0
		Eficiência de Remoção de Fósforo	7,3
		Eficiência de Remoção de Coliformes	8,7
TECNOLÓGICO	8,3	Requisitos de Energia	8,0
		Demanda por Área de Implantação	6,3
		Custos de Implantação	7,0
		Custos de Operação	7,7
		Quantidade de Lodo a ser tratado	5,7
		Quantidade de Lodo a ser disposto	6,7
OPERAÇÃO	7,0	Confiabilidade do sistema	6,0
		Simplicidade Operacional	6,0
		Capacidade de Resistência a Variações de Vazão	6,0
		Capacidade de Resistência a Variações das Características do Afluente	6,0
		Capacidade de Resistência a Constituintes Tóxicos	3,3
SOCIAL	6,0	Interferência decorrente da geração de Odor	6,7
		Interferência decorrente da Geração de Ruído	4,7
		Interferência decorrente da Geração de Aerossóis	2,7
		Possibilidade de atração de Insetos	2,3

Fonte: Elaboração própria

O primeiro grupo focado (GF1 – Academia) foi conduzido em reunião da qual participaram três especialistas, sendo um professor de Universidade Federal do Espírito Santo, um professor de Instituto Federal do Espírito Santo e um doutorando de Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Espírito Santo, este último proprietário de empresa de consultoria na área de tratamento de esgotos. Os professores são doutores em Engenharia Civil, com ênfase em Hidráulica e Saneamento, com experiência comprovada em recursos hídricos e saneamento. Já segundo grupo focado (GF2 – Tratamento) participaram cinco especialistas da área de saneamento, com experiência em operação de sistemas de tratamento de esgoto e/ou processos de outorga e licenciamento de ETE's. O (GF3 – Regulação) foi constituído por três especialistas da área de regulação em recursos hídricos, com atuação em outorga e/ou experiência em licenciamento ambiental.

Da simples inspeção da Tabela 15 é possível observar que, dentre os subsistemas sociotécnicos avaliados, o subsistema Ambiental tem prevalência sob os demais, independentemente do grupo focado analisado (para o segundo grupo focado, os subsistemas Ambiental e Tecnológico assumiram igual importância). De maneira similar, para o conjunto dos grupos focados, os aspectos associados ao subsistema Social foram os considerados menos importantes para o processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos. No entanto, é relevante observar que no primeiro grupo focado (Academia), o subsistema Social apresentou importância relativa muito menor que aquela que lhe foi atribuída nos demais grupos focados. O grupo focado (Academia) argumentou que, ao se garantir tecnologias com maiores eficiências, consequentemente seriam assegurados sistemas que possivelmente trariam menores impactos sociais. Já o grupo focado (Tratamento) justificou a atribuição de valores relativamente maiores para o subsistema Social função do número de reclamações e exigências da população nos canais de atendimento da concessionária.

Os subsistemas Tecnológico e Operação, nesta ordem, completaram o ordenamento dos subsistemas sociotécnicos.

A análise dos pesos atribuídos aos critérios de seleção (pesos reunidos na Tabela 15) permite observar que a Eficiência de remoção de matéria orgânica foi considerada como o critério de maior importância para o processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos, constituindo o único critério que recebeu peso 10 (máximo valor atribuível para um critério) em todos os grupos focados. O GF1, no entanto, foi o único grupo em que atribuiu peso 10 (dez) para um outro critério de seleção – a eficiência de remoção de coliformes – apontando-o com mesmo nível de importância que a eficiência de remoção de matéria orgânica. Para o GF1 não há como dissociar a importância desses dois critérios no tratamento de esgotos. Para a média dos grupos focados, a Eficiência de remoção de matéria orgânica, Eficiência de remoção de coliformes e Requisitos de energia, nesta ordem, constituíram os critérios de maior importância para o processo de seleção, todos com pesos iguais ou superiores a 8,0 (oito).

Alguns critérios apresentaram valores diferenciados entre os grupos, dentre os quais merecem destaque a confiabilidade do sistema e a interferência decorrente da geração de ruído. O GF1 argumentou que, ambos os critérios seriam automaticamente atendidos pela escolha de tecnologias que garantissem o nível de eficiência de remoção de DBO e coliformes em valores mais representativos. Já o GF3 entendeu que, a Interferência decorrente da geração de odor teria maior influência comparativamente à Geração de ruído.

No conjunto dos grupos focados, os critérios considerados menos importantes foram a Capacidade de resistência a constituintes tóxicos, a Interferência decorrente da geração de aerossóis e a Possibilidade de atração de insetos, todos com pesos médios inferiores a 4,0 (quatro).

4.4. FASE 4 – AVALIAÇÃO QUANTITATIVA – RANKING DAS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO

Nesta fase são apresentados os resultados do *Framework*, isto é, o *ranking* das tecnologias de tratamento de esgoto, em função das eficiências mínimas de tratamento de esgoto associados às condições elencadas na Seção 4.2.1 (Eficiências mínimas e pré-seleção de sistemas de tratamento). Para cada uma das três condições de tratamento avaliadas são apresentados, por localidade, os resultados decorrentes do ordenamento das tecnologias de tratamento de esgoto pré-selecionadas.

Os critérios utilizados nesta pesquisa para a seleção de sistemas de tratamento de esgotos são qualitativos e quantitativos. Adicionalmente, constituem critérios “diretamente proporcionais” (“Benefícios”) ou “inversamente proporcionais” (“Limitações”) ao Índice Sociotécnico. Ao se analisar, por exemplo, o critério “eficiência de remoção de matéria orgânica”, pode-se considerar este critério como um benefício para a adoção de uma tecnologia, logo a Curva-S é normal. No entanto, ao se considerar o critério “interferência decorrente da geração de odor”, por exemplo, avalia-se como uma limitação à adoção de uma determinada tecnologia. Neste último caso, a Curva-S é invertida. Com esta análise foi possível distinguir, para cada critério de seleção utilizado, a tendência a ser assumida para a da Curva-S quando da implementação do MAUT.

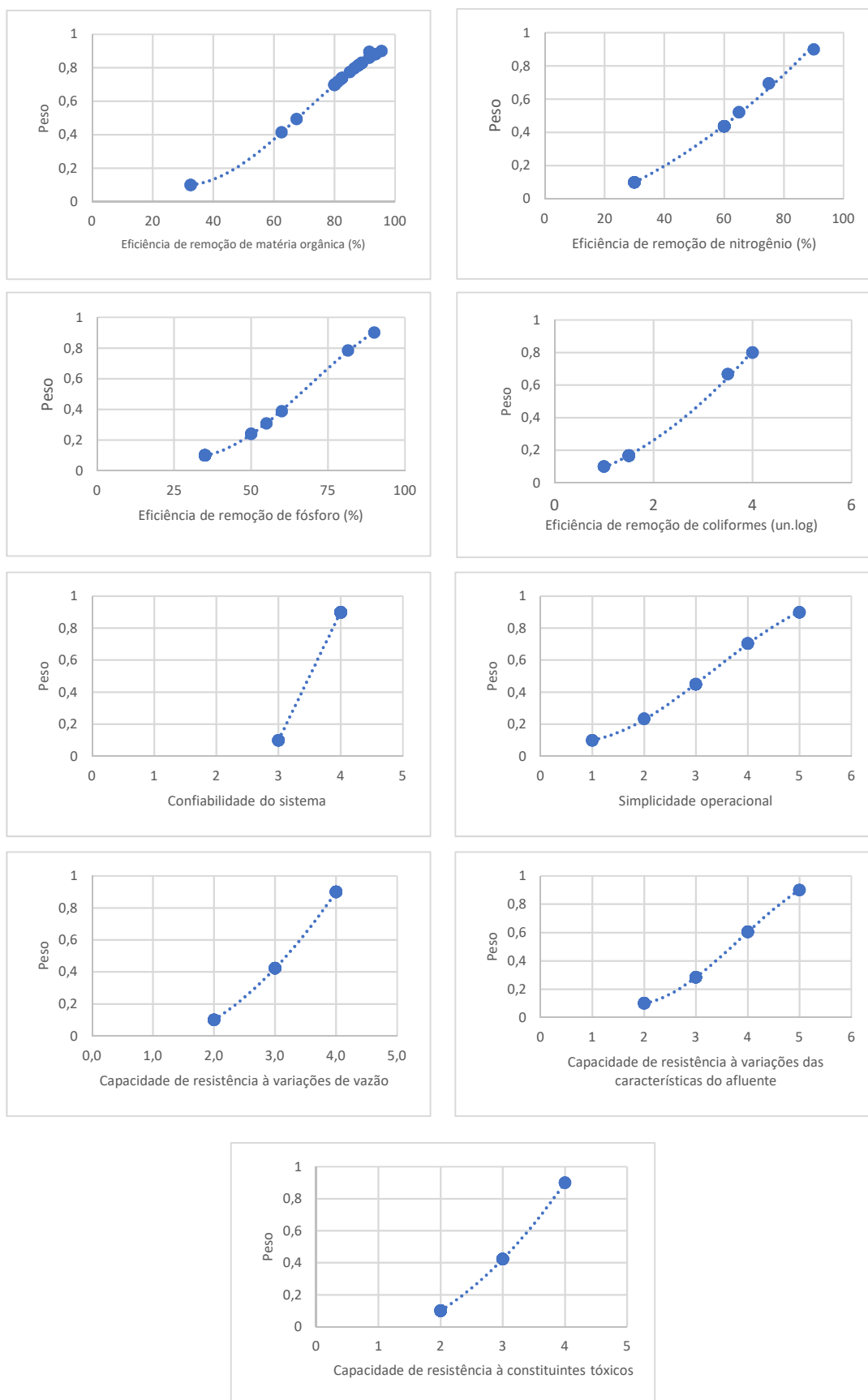
Neste contexto, para a padronização dos critérios de seleção (etapa que antecedeu a ordenação final das tecnologias) foram utilizadas Curvas-S normal (para os critérios diretamente proporcionais ao Índice Sociotécnico) ou invertida (para os critérios inversamente proporcionais), conforme apresentado na Tabela 16. As Figuras 16 e 17 apresentam as Curvas-S utilizadas na etapa de padronização dos critérios.

Tabela 16 Distinção dos critérios por Benefícios ou Limitações

CRITÉRIOS DE SELEÇÃO VALIDADOS	Benefício ou Limitação para adoção da tecnologia?	Direta ou inversamente proporcional?	CURVA-S
Eficiência de Remoção de Matéria Orgânica	BENEFÍCIO	diretamente	NORMAL
Eficiência de Remoção de Nitrogênio	BENEFÍCIO	diretamente	NORMAL
Eficiência de Remoção de Fósforo	BENEFÍCIO	diretamente	NORMAL
Eficiência de Remoção de Coliformes	BENEFÍCIO	diretamente	NORMAL
Requisitos de Energia	LIMITAÇÃO	inversamente	INVERTIDA
Demanda por Área de Implantação	LIMITAÇÃO	inversamente	INVERTIDA
Custos de Implantação	LIMITAÇÃO	inversamente	INVERTIDA
Custos de Operação	LIMITAÇÃO	inversamente	INVERTIDA
Quantidade de Lodo a ser Tratado	LIMITAÇÃO	inversamente	INVERTIDA
Quantidade de Lodo a ser Disposto	LIMITAÇÃO	inversamente	INVERTIDA
Confiabilidade do sistema	BENEFÍCIO	diretamente	NORMAL
Simplicidade Operacional	BENEFÍCIO	diretamente	NORMAL
Capacidade de Resistência a Variações de Vazão	BENEFÍCIO	diretamente	NORMAL
Capacidade de Resistência a Variações das Características do Afluente	BENEFÍCIO	diretamente	NORMAL
Capacidade de Resistência a Constituintes Tóxicos	BENEFÍCIO	diretamente	NORMAL
Interferência decorrente da geração de Odor	LIMITAÇÃO	inversamente	INVERTIDA
Interferência decorrente da Geração de Ruído	LIMITAÇÃO	inversamente	INVERTIDA
Interferência decorrente da Geração de Aerossóis	LIMITAÇÃO	inversamente	INVERTIDA
Possibilidade de atração de Insetos	LIMITAÇÃO	inversamente	INVERTIDA

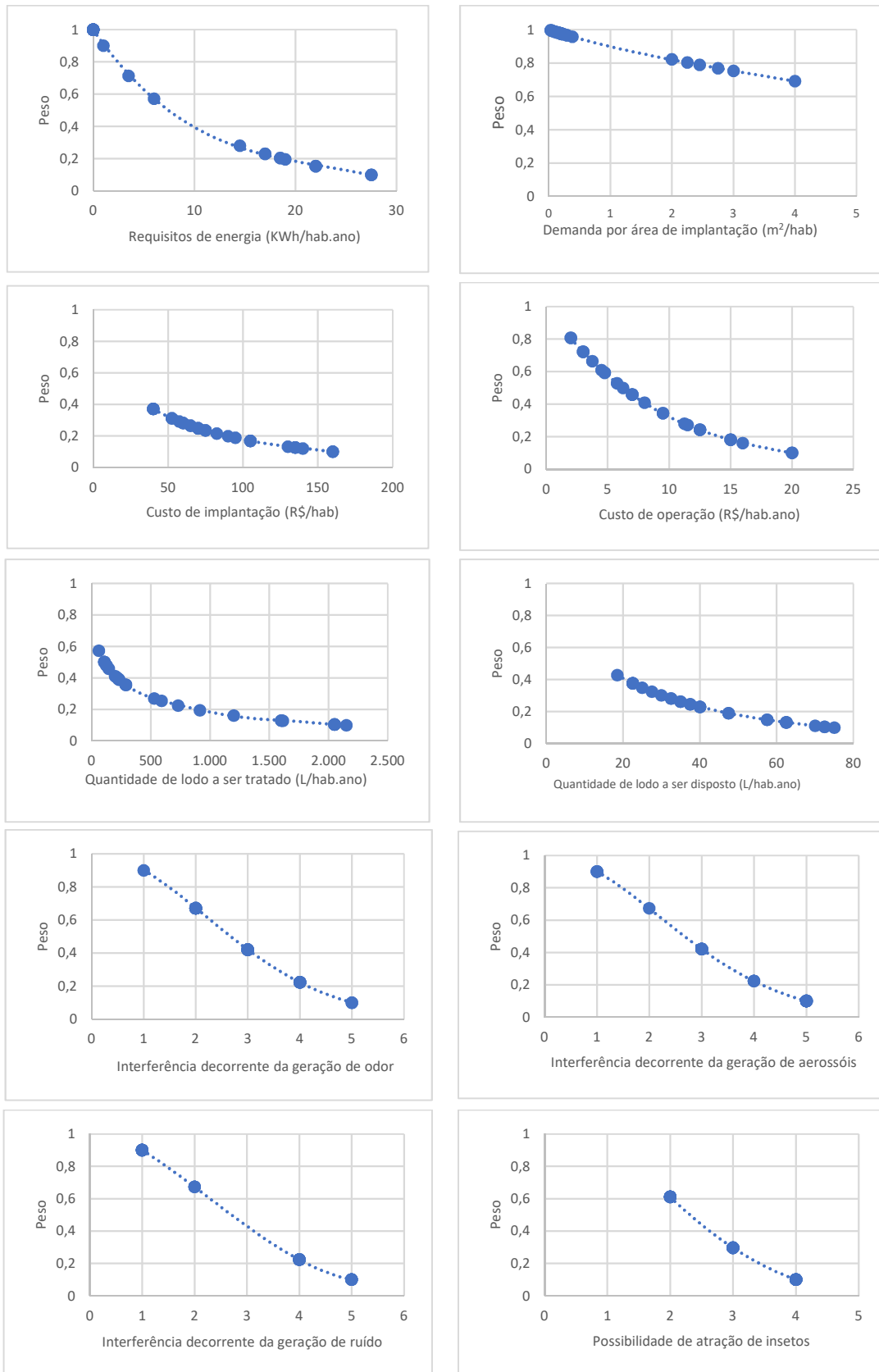
Fonte: Elaboração própria

Figura 16 Curva-S - critérios de seleção diretamente proporcionais ao Índice Sociotécnico



Fonte: Elaboração própria

Figura 17 Curva-S - critérios de seleção inversamente proporcionais ao Índice Sociotécnico



Fonte: Elaboração própria

Após a padronização dos critérios de seleção e a estruturação do *Framework*, o Índice Sociotécnico foi apropriado a partir da Equação (20). Nas seções subsequentes, por condição de tratamento e por localidade que constitui a área de estudo, serão apresentados os ordenamentos finais das tecnologias de tratamento de esgotos, função dos valores do Índice Sociotécnico associado a cada tecnologia pré-selecionada.

4.4.1. Condição 1 – Não imposição de requisitos de qualidade para o efluente final

Na Condição 1, o modelo proposto por Santoro (2016) determinou as eficiências mínimas sem a imposição de requisitos de qualidade para o efluente, ou seja, o modelo de simulação e o algoritmo genético buscaram as eficiências mínimas considerando a possibilidade de disposição de efluente bruto. Logo, na condição 1 admite-se o lançamento de efluentes brutos, sendo a capacidade de autodepuração do corpo receptor responsável pela manutenção das concentrações de OD e DBO, em conformidade com os padrões de qualidade ambiental estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005. A Tabela 17 apresenta as eficiências mínimas das tecnologias de tratamento de esgotos associados à Condição 1.

Tabela 17 Eficiências mínimas de tratamento de esgoto associados à Condição 1

Localidade	Eficiências mínimas (%)
Ibatiba	95
Irupi	73
Iúna	94
Nossa Senhora das Graças	<25
Santíssima Trindade	<25

Fonte: Santoro (2016)

Os resultados para a Condição 1, referente ao *ranking* das tecnologias de tratamento de esgotos pré-selecionadas para as diferentes localidades da área de estudo, podem ser observados na Tabela 18.

Tabela 18 *Ranking* das tecnologias de tratamento de esgoto para a Condição 1

LOCALIDADE	TECNOLOGIAS																												
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22	A23	A25	A26	A27	A28	A29	A30	A31	A32	A33	A34
E (%)	35	35	80	85	85	85	85	85	85	90	85	75	93	93	87	93	87	85	85	93	97	97	93	93	98	93	90	95	95
IBATIBA																					0,38	0,41			0,41			0,33	0,37
																						2°	1°			1°			4°	3°
IRUPI			0,48	0,47	0,49	0,40	0,34	0,54	0,53	0,50	0,38	0,35	0,34	0,34	0,37	0,40	0,48	0,36	0,31	0,33	0,39	0,41	0,35	0,41	0,41	0,39	0,42	0,33	0,37
			5°	6°	4°	9°	15°	1°	2°	3°	11°	14°	15°	15°	12°	9°	5°	13°	17°	16°	10°	8°	14°	8°	8°	10°	7°	16°	12°
IÚNA																					0,38	0,41			0,41			0,33	0,37
																						2°	1°			1°			4°	3°
SANT. TRINDADE	0,43	0,43	0,49	0,48	0,50	0,41	0,35	0,55	0,55	0,51	0,39	0,37	0,35	0,35	0,39	0,42	0,49	0,37	0,33	0,34	0,39	0,42	0,36	0,41	0,42	0,40	0,43	0,34	0,38
	6°	6°	4°	5°	3°	8°	14°	1°	1°	2°	10°	12°	14°	14°	10°	7°	4°	12°	16°	15°	10°	7°	13°	8°	7°	9°	6°	15°	11°
N.SRA GRAÇAS	0,43	0,42	0,48	0,48	0,50	0,41	0,35	0,55	0,54	0,50	0,39	0,36	0,35	0,35	0,38	0,41	0,49	0,37	0,32	0,34	0,39	0,42	0,36	0,41	0,42	0,40	0,43	0,34	0,37
	6°	7°	5°	5°	3°	8°	14°	1°	2°	3°	10°	13°	14°	14°	11°	8°	4°	12°	16°	15°	10°	7°	13°	8°	7°	9°	6°	15°	12°

Fonte: Elaboração própria

Nota: A1 – Tratamento primário (Tanques sépticos), A2 - Tratamento primário convencional, A3 - Tratamento primário avançado, A4 - Lagoa facultativa, A5 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa, A6 - Lagoa aerada facultativa, A7 - Lagoa aerada mistura completa + lagoa de sedimentação, A8 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação, A9 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa alta taxa, A10 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas, A11 - Infiltração lenta, A12 - Infiltração rápida, A13 - Escoamento superficial, A14 - Terras úmidas construídas (Wetlands), A15 - Tanque séptico + filtro anaeróbio, A16 - Reator UASB, A17 - UASB + lodos ativado, A18 - UASB + biofiltro aerado submerso, A19 - UASB + filtro anaeróbio, A20 - UASB + filtro biológico de alta carga, A21 - UASB + lagoas de polimento, A22 - UASB + lagoa aerada facultativa, A23 - UASB + lagoa aerada mistura completa + lagoa decantação, A24 - UASB + escoamento superficial, A25 - Lodos ativado convencional, A26 - Lodos ativado de aeração prolongada, A27 - Lodos ativado batelada, A28 - Lodos ativado convencional com remoção biológica de N, A29 - Lodos ativado convencional com remoção biológica de N/P, A30 - Lodos ativado convencional + filtração terciária, A31 - Filtro biológico percolador de baixa carga, A32 - Filtro biológico percolador de alta carga, A33 - Biofiltro aerado submerso com nitrificação, A34 - Tanque séptico + biodisco.

Para Ibatiba e Iúna, na Condição 1, as tecnologias devem apresentar eficiências de tratamento iguais ou superiores a 94%. É relevante observar que a área de estudo apresenta localidades com populações (e, por consequência, com volumes de esgotos brutos produzidos) substancialmente diferentes. Neste contexto, quando de emprego de modelo de otimização, que buscou minimizar a inequidade entre sistemas de tratamento de esgoto, aos núcleos urbanos mais populosos da área de estudo, foram associadas as maiores eficiências possíveis de tratamento de esgotos.

A partir dos índices ambientais apropriados, as tecnologias lodos ativados por batelada e lodos ativados convencional + filtração terciária (ambas com Índice Sociotécnico de 0,41) foram indicadas como as mais adequadas para as sedes dos municípios de Ibatiba e Iúna. Ainda de acordo com o *ranking*, seguiram lodos ativados de aeração prolongada (Índice Sociotécnico de 0,38), seguidos de tanque séptico + biodisco (0,37) e biofiltro aerado submerso com nitrificação (0,33). A tecnologia de tratamento de esgoto por lodos ativados e suas variações constituem interessantes alternativas de tratamento naquelas condições em que são demandadas elevadas eficiências de remoção de matéria orgânica e impostos baixos requisito de área (características extensíveis ao tanque séptico + biodisco e biofiltro aerado submerso).

Para Irupi, núcleo urbano que na Condição 1 demandou eficiência mínima de 73%, foram excluídas as tecnologias A1 (tanque séptico) e A2 (tratamento primário convencional), tecnologias que usualmente apresentam eficiência máxima de 35%. O *ranking* das tecnologias de tratamento apresentou a associação de lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação como uma das potenciais tecnologias a serem implementadas na localidade (tecnologia que apresentou o maior Índice Sociotécnico, 0,54), seguida de lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa alta taxa (Índice Sociotécnico de 0,53) e da associação entre lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas (0,50). Na sequência, o *Framework* indicou a lagoa anaeróbia + lagoa facultativa (Índice Sociotécnico de 0,49), seguida de tratamento primário avançado (0,48) e lagoa aerada facultativa (0,47). Os sistemas que, segundo o Índice Sociotécnico, apresentaram pior perspectiva de implantação para a sede municipal de Irupi foram UASB + filtro biológico de alta carga e Lodos ativados convencional com remoção biológica de N (ambos com Índice Sociotécnico de 0,33) e UASB + filtro anaeróbio (0,31).

Para Nossa Senhora das Graças e Santíssima Trindade, os resultados obtidos para o Índice Sociotécnico foram muitos semelhantes, consequência de populações de mesma ordem de grandeza e eficiências mínimas de tratamento também semelhantes. Cabe destacar que, de acordo com o modelo proposto por Santoro (2016), não seria necessário a implementação de

quaisquer sistemas de tratamento de esgotos nas duas localidades sem comprometimento dos padrões de qualidade estabelecidos para o sistema hídrico. Considerando o percentual de tratamento de 25% (eficiência mínima de remoção de DBO apresentada por quaisquer sistemas de tratamento de esgotos, mesmo os de nível primário) todas as tecnologias foram pré-selecionadas e incluídas no *Framework*. O *ranking* das tecnologias de tratamento apresentou a tecnologia de lagoas como as preferíveis para Nossa Senhora das Graças e Santíssima Trindade, locais que constituem pequenos núcleos populacionais, com facilidade para implantação desse tipo de tecnologia função da disponibilidade de área. As combinações lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação e lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa alta taxa apresentaram maior Índice Sociotécnico (em torno de 0,55 para ambas as localidades. A associação entre UASB + filtro anaeróbio foi a que apresentou pior desempenho, com Índice Sociotécnico de 0,33 para Santíssima Trindade e de 0,32 para Nossa Senhora das Graças.

Cabe ressaltar que, embora a eficiência mínima requerida para as duas localidades seja relativamente muito baixa, a estrutura de preferências determinou o *ranking* das tecnologias pré-selecionadas. Como Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças constituem pequenos núcleos populacionais, e ainda, considerando que na condição 1 a autodepuração do corpo receptor é responsável pela manutenção das concentrações de OD e DBO em conformidade com os padrões de qualidade ambiental, pode-se implementar tecnologias com menor eficiência, sem prejuízo no sistema hídrico, de acordo com perspectiva sugerida por Santoro (2016).

4.4.2. Condição 2 – Efluentes tratados com limite máximo para concentração de DBO de 120mg/L

Na Condição 2, os efluentes tratados devem apresentar concentração máxima de DBO de 120mg/L, conforme padrão de qualidade estabelecido para efluentes pela Resolução CONAMA nº 430/2011. Como no modelo de simulação empregado por Santoro (2016) foi considerada a DBO do esgoto bruto de 400mg/L, a eficiência mínima estimada para os sistemas de tratamento de esgoto foi de 70%, garantindo-se a DBO do efluente tratado de 120mg/L. A Tabela 19 apresenta as eficiências mínimas das tecnologias de tratamento de esgotos associados à Condição 2. Já o *ranking* das tecnologias de tratamento de esgotos pré-selecionadas é apresentado por meio da Tabela 20.

Tabela 19 Eficiências mínimas de tratamento de esgoto associados à Condição 2

Localidade	Eficiências mínimas (%)
Ibatiba	95
Irupi	70
Iúna	95
Nossa Senhora das Graças	70
Santíssima Trindade	70

Fonte: Santoro (2016)

Na condição 2, as eficiências mínimas de tratamento de esgotos associadas às sedes municipais de Ibatiba e Iúna foram as mesmas que aquelas obtidas na condição 1, conservando-se válidas as considerações apresentadas na seção precedente, incluindo-se o ordenamento e hierarquização das tecnologias de tratamento a partir do Índice Sociotécnico.

Já a sede do município de Irupi e para os povoados de Nossa Senhora das Graças e Santíssima Trindade prevaleceram variações do sistema de lagoas de estabilização. As combinações lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação e lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa alta taxa apresentaram os maiores índices ambientais. O sistema conformado por lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação apresentou Índice Sociotécnico de 0,55 para Nossa Senhora das Graças e Santíssima Trindade e de 0,54 para a Irupi. O sistema Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa alta taxa, por sua vez, apresentou Índice Sociotécnico variando entre 0,53 (para a sede do município de Irupi) e 0,55 (Santíssima Trindade). A associação UASB + filtro anaeróbio foi a que apresentou pior desempenho no conjunto de alternativas de tratamento avaliadas, com Índice Sociotécnico variando entre 0,31 (sede municipal de Irupi) e 0,33 para (Santíssima Trindade).

Um aspecto importante a ressaltar é que, função da estrutura de preferências, o *Framework* apontou para tecnologias com maiores eficiências de remoção de DBO e coliformes termotolerantes, tendo em vista que os maiores pesos foram associados aos critérios para “Eficiência de remoção de matéria orgânica” e “Eficiência de remoção de coliformes”. Associado a isso, o critério “Requisitos de energia”, que apresentou peso considerável e relação inversamente proporcional ao Índice Sociotécnico, favoreceu a seleção de tecnologias que apresentassem baixas demandas por energia para aeração, como as variações dos sistemas de lagoas de estabilização.

Tabela 20 *Ranking* das tecnologias de tratamento de esgoto para Condição 2 e 3

LOCALIDADE	TECNOLOGIAS																										
	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22	A23	A25	A26	A27	A28	A29	A30	A31	A32	A33	A34
DBO MÉDIA (mg/L)	105	65	65	65	65	55	55	40	60	85	35	35	60	40	35	55	65	27,5	22,5	22,5	27,5	27,5	15	27,5	45	25	25
E (%)	80	85	85	85	85	85	85	90	85	75	93	93	87	93	87	85	85	93	97	97	93	93	98	93	90	95	95
IBATIBA																			0,38	0,41			0,41			0,33	0,37
																			2°	1°			1°			4°	3°
IRUPI	0,48	0,47	0,49	0,40	0,34	0,54	0,53	0,50	0,38	0,35	0,34	0,34	0,37	0,40	0,48	0,36	0,31	0,33	0,39	0,41	0,35	0,41	0,41	0,39	0,42	0,33	0,37
	5°	6°	4°	9°	15°	1°	2°	3°	11°	14°	15°	15°	12°	9°	5°	13°	17°	16°	10°	8°	14°	8°	8°	10°	7°	16°	12°
IÚNA																			0,38	0,41			0,41			0,33	0,37
																			2°	1°			1°			4°	3°
SANT. TRINDADE	0,49	0,48	0,50	0,41	0,35	0,55	0,55	0,51	0,39	0,37	0,35	0,35	0,39	0,42	0,49	0,37	0,33	0,34	0,39	0,42	0,36	0,41	0,42	0,40	0,43	0,34	0,38
	4°	5°	3°	8°	14°	1°	1°	2°	10°	12°	14°	14°	10°	7°	4°	12°	16°	15°	10°	7°	13°	8°	7°	9°	6°	15°	11°
N.SRA GRAÇAS	0,48	0,48	0,50	0,41	0,35	0,55	0,54	0,50	0,39	0,36	0,35	0,35	0,38	0,41	0,49	0,37	0,32	0,34	0,39	0,42	0,36	0,41	0,42	0,40	0,43	0,34	0,37
	5°	5°	3°	8°	14°	1°	2°	3°	10°	13°	14°	14°	11°	8°	4°	12°	16°	15°	10°	7°	13°	8°	7°	9°	6°	15°	12°

Fonte: Elaboração própria

Nota: A1 – Tratamento primário (Tanques sépticos), A2 - Tratamento primário convencional, A3 - Tratamento primário avançado, A4 - Lagoa facultativa, A5 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa, A6 - Lagoa aerada facultativa, A7 - Lagoa aerada mistura completa + lagoa de sedimentação, A8 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação, A9 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa alta taxa, A10 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas, A11 - Infiltração lenta, A12 - Infiltração rápida, A13 - Escoamento superficial, A14 - Terras úmidas construídas (Wetlands), A15 - Tanque séptico + filtro anaeróbio, A16 - Reator UASB, A17 - UASB + lodos ativados, A18 - UASB + biofiltro aerado submerso, A19 - UASB + filtro anaeróbio, A20 - UASB + filtro biológico de alta carga, A21 - UASB + lagoas de polimento, A22 - UASB + lagoa aerada facultativa, A23 - UASB + lagoa aerada mistura completa + lagoa decantação, A24 - UASB + escoamento superficial, A25 - Lodos ativados convencional, A26 - Lodos ativados de aeração prolongada, A27 - Lodos ativados batelada, A28 - Lodos ativados convencional com remoção biológica de N, A29 - Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P, A30 - Lodos ativados convencional + filtração terciária, A31 - Filtro biológico percolador de baixa carga, A32 - Filtro biológico percolador de alta carga, A33 - Biofiltro aerado submerso com nitrificação, A34 - Tanque séptico + biodisco.

4.4.3. Condição 3 – Efluentes submetidos a tratamento com eficiência mínima de remoção de DBO

Na Condição 3, os efluentes devem ser submetidos a tratamento eficiência mínima de remoção de DBO 60%, condição na qual a Resolução CONAMA nº 430/2011 admite que os valores de DBO nos efluentes tratados sejam superiores a 120 mg/L. A Tabela 21 apresenta as eficiências mínimas para as tecnologias de tratamento de esgotos associados à Condição 3.

Tabela 21 Eficiências mínimas de tratamento de esgoto associados à Condição 3

Localidade	Eficiências mínimas (%)
Ibatiba	95
Irupi	73
Iúna	95
Nossa Senhora das Graças	60
Santíssima Trindade	60

Fonte: Santoro, Reis e Mendonça (2016)

Os níveis de tratamento impostos pela Condição 3 de tratamento conduziram, para todos os núcleos urbanos da área de estudo, a mesma pré-seleção e hierarquização de sistemas de tratamento estabelecidas por meio da Condição 2. Desta forma, ainda que as condições 2 e 3 imponham perspectivas eventualmente diferenciadas de tratamento para os efluentes, suas aplicações para a área de estudo (caracterizada pela produção de esgotos de natureza doméstica, para os quais se assumiu mesma DBO no esgoto bruto) não conduziram a eficiências mínimas de tratamento capazes de impactar a pré-seleção e, por consequência, a hierarquização das tecnologias de tratamento de esgotos. Logo, os resultados do *Framework* para a Condição 3 são os mesmos apresentados na Condição 2 (Tabela 20).

5. DISCUSSÃO

Esta pesquisa teve como principal perspectiva estabelecer contribuição ao processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos, propondo método amparado nos seguintes aspectos: **a)** a análise deve ser conduzida no âmbito de bacia hidrográfica, unidade de planejamento dos recursos hídricos, conforme um dos fundamentos da Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997); **b)** as eficiências mínimas de tratamento, para conjunto de efluentes brutos existentes numa bacia hidrográfica, devem ser determinadas a partir do emprego combinado de modelo matemático de qualidade de água e técnica de otimização; **c)** as eficiências mínimas de tratamento conformam a pré-seleção de sistemas de tratamento, sistemas posteriormente ordenados a partir de Índice Sociotécnico apropriado com auxílio de técnica de análise multicriterial.

Neste trabalho, a análise multicriterial foi conduzida com auxílio da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), de fácil aplicação e baseada no *Framework* proposto por Frank et al. (2013) e Frank et al. (2016). Análise qualitativa precedeu a análise multicriterial, permitindo a validação de conjunto de critérios de seleção associados aos diferentes subsistemas sociotécnicos (ambiental, tecnológico, operação e social). Nesta etapa do trabalho, grupos focados envolvendo diferentes atores usualmente envolvidos com o processo de definição de tecnologias de tratamento de esgotos (empresas de saneamento, agências reguladoras de recursos hídricos e instituições de ensino e pesquisa), permitiram a definição da estrutura de preferências utilizada na etapa de análise multicriterial.

Trabalhos anteriores abordaram a seleção utilizando diferentes técnicas de análise multicriterial. Teclé et al. (1988), Leoneti (2009), Souza (1992), Gobbetti (1993), Reami (2011), Hunt (2013) e Cornelli (2014), dentre outros, realizaram a seleção de tecnologias de tratamento utilizando diferentes técnicas de análise multicriterial. Estes trabalhos, no entanto, não conduziram processo de seleção no âmbito de uma bacia hidrográfica ou estabeleceram o processo de seleção a partir da avaliação da capacidade de assimilação dos cursos d'água. É relevante observar que a seleção de um sistema de tratamento de esgoto dissociada da avaliação da capacidade de assimilação do curso d'água não permite a utilização de importante recurso natural (a capacidade de autodepuração dos rios), podendo estabelecer seleção de tecnologia de tratamento de esgoto que imponha uma das seguintes condições: **a)** o sistema é superdimensionado, condição na qual a qualidade de curso d'água tende a ser preservada mas com a demanda de maiores recursos para a implantação e operação das plantas de tratamento;

ou **b)** o sistema é subdimensionado, condição que, por conduzir a sistemas de tratamento de esgotos mais simples, demanda menores recursos para implantação e operação das plantas de tratamento mas que, usualmente, não permite o atendimento dos padrões de qualidade dos cursos d'água, principalmente nos períodos de recessão dos rios.

Por definição, o processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos deve envolver critérios de natureza econômica, técnica, ambiental e social. Contudo, não constitui prática recorrente a utilização conjunta dos referidos critérios numa mesma pesquisa. É usual a avaliação exclusiva de critérios econômicos para a seleção de tecnologias, como nos trabalhos propostos por Oliveira (2004), Leoneti (2009) e Fantin, Reis e Mendonça (2017). Neste contexto, a utilização dos subsistemas sociotécnicos constitui um dos diferenciais da presente pesquisa.

Pesquisas mais recentes, como Fantin, Reis e Mendonça (2017) e Bringer (2017) discutiram o processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos no âmbito de bacia hidrográfica, com seus múltiplos lançamentos de esgotos e corpos de água com diferentes capacidades de autodepuração. Fantin, Reis e Mendonça (2017), a partir do emprego combinado de modelo de qualidade de água e técnica de otimização, estimaram as eficiências mínimas de remoção de matéria orgânica em diferentes pontos de disposição final de uma bacia hidrográfica. Na sequência, ordenaram, função apenas de uma análise econômica, os sistemas previamente selecionados. A referida análise econômica constituiu na apropriação dos valores presentes líquidos associados as diferentes opções de tratamento, considerando-se os custos de implantação, custos de operação, vida útil dos sistemas de tratamento e uma taxa de amortização dos investimentos. Já Bringer (2017), além do emprego de modelo de qualidade de água e técnica de otimização para determinação de eficiências mínimas de tratamento de esgotos, empregou análise multiobjetivo, com auxílio do método Electre III, para o ordenamento das tecnologias de tratamento de esgotos. O trabalho conduzido por Bringer (2017), no entanto, não conduziu pesquisas qualitativas que permitissem o estabelecimento de estrutura de preferências consistente, assumindo conjunto de critérios e pesos propostos por Cordeiro Netto, Souza e Lopes Junior (2001), autores buscaram a seleção de tecnologias de tratamento de esgotos para pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios.

Entende-se que o método proposto neste trabalho é aplicável a quaisquer bacias hidrográficas, tanto para aquelas que não dispõem de sistemas de tratamento de esgotos como para as bacias que tratam parcialmente seus efluentes. Ainda que o processo de seleção conduzido tenha tido como foco o tratamento de efluentes de natureza doméstica, poderiam ser considerados

quaisquer outros efluentes de natureza orgânica, independente da carga associada ao efluente bruto. É relevante observar, adicionalmente, que no trabalho foram consideradas 34 (trinta e quatro) tecnologias de tratamento usualmente empregadas em países de clima quente, conforme von Sperling (1996), estabelecendo amplo conjunto inicial de alternativas de tratamento de esgotos. A pré-seleção dos sistemas de tratamento de esgotos foi levada à termo em função das eficiências de remoção de matéria orgânica necessárias para atendimento dos padrões de qualidade ambiental e equidade entre sistemas de tratamento – o que conformou uma das fases da metodologia.

Nesta pesquisa, a eficiência de remoção de matéria orgânica demonstrou-se como critério central para o processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos. Constituiu critério de seleção que, a partir de manifestação unânime dos especialistas que participaram da análise qualitativa, assumiu o maior peso (de fato, assumiu o limite superior da faixa de valores assumida para os critérios de seleção). Além de empregado para a pré-seleção dos sistemas de tratamento de esgotos, constituiu mais importante critério para a apropriação do Índice Sociotécnico decorrente do emprego da análise multicriterial.

A importância atribuída à eficiência de remoção de matéria orgânica é, em certa medida, decorrente da atual oferta do serviço de tratamento de esgotos. No Brasil, a oferta de tratamento de esgotos alcança aproximadamente 40% dos esgotos produzidos (SNIS, 2014b), sendo os tratamentos de nível secundário (nível de tratamento que tem por objetivo central a remoção de matéria orgânica) o foco das empresas de saneamento para o curto prazo.

6. CONCLUSÃO

Esta pesquisa selecionou, numa abordagem sociotécnica, e por meio do modelo proposto e considerando análise qualitativa e quantitativa, sistemas de tratamento de esgotos centralizados para uma bacia hidrográfica. Cabe ressaltar que o modelo tem a perspectiva de ser empregado em quaisquer bacias hidrográficas e para quaisquer tipos de esgotos de natureza orgânica, independente da carga de esgoto bruto.

A sistemática de avaliação multicriterial proposta na tese teve como objetivo estabelecer um ordenamento – *ranking* – das tecnologias de tratamento de esgotos em uma bacia hidrográfica. Considerando a peculiaridade dos corpos hídricos e os múltiplos lançamentos de esgotos, o modelo foi elaborado para aplicação em bacias hidrográficas, tendo-se em vista que a unidade de planejamento dos recursos hídricos, preconizado pela Política Nacional de Recursos Hídricos é a bacia hidrográfica. Adicionalmente, o modelo considerou as eficiências mínimas de remoção de matéria orgânica para a pré-seleção das tecnologias de tratamento de esgoto. Cabe ressaltar que constitui fase importante do modelo a determinação das eficiências mínimas por meio do emprego combinado de modelo de qualidade de água e técnicas de otimização.

As 34 (trinta e quatro) tecnologias de tratamento de esgoto, reunidas nesta pesquisa, constituem tecnologias centralizadas de tratamento de esgotos usualmente empregadas em países de clima quente. É relevante destacar que as 34 tecnologias passaram por um processo de pré-seleção com base nas eficiências mínimas de tratamento de esgotos. As eficiências mínimas, reunidas em três condições de tratamento, foram obtidas por meio de um modelo de otimização conformado por uma medida de inequidade e por restrições que tiveram por objetivo a garantia dos padrões de qualidade ambiental associados aos corpos d'água e efluentes.

As mesmas tecnologias foram pré-selecionadas para os municípios de Ibatiba e Iúna, independentemente da condição de tratamento analisada, uma vez que elevadas eficiências de remoção de matéria orgânica foram estimadas, com valores muito próximos ou no limite superior da faixa assumida para a eficiência de tratamento. Para os distritos de Nossa Senhora das Graças e Santíssima Trindade também foram pré-selecionadas tecnologias idênticas de tratamento nas condições 2 e 3, uma vez que, ambas condições conduzem a valores de eficiência mínima na faixa de 60% a 73% de remoção de matéria orgânica. Esta semelhança ocorreu, pois, a Condição 2, que estabelece um valor máximo de 120 mg/L para a DBO do esgoto tratado, conduz a eficiência mínima de remoção de matéria orgânica de 70%, ao passo que a Condição 3, estabelece eficiência mínima de tratamento de 60%. No caso do município de Irupi, para

todas as condições de tratamento analisadas, iguais tecnologias foram pré-selecionadas, uma vez que as eficiências mínimas das três condições eram em torno de 70%.

A avaliação qualitativa permitiu a validação de quatro subsistemas sociotécnicos e dezenove critérios de seleção. Dos subsistemas sociotécnicos, o Subsistemas Ambiental apresentou-se como mais relevante a partir da avaliação dos especialistas, quando da condução dos Grupos Focados. Quanto aos critérios de seleção, a eficiência de remoção de DBO, ainda que no método usado como critério de pré-seleção, foi considerado o mais importante critério para estabelecimento do Índice Sociotécnico, quando do emprego da análise multicriterial.

O modelo de avaliação multicriterial proposto foi desenvolvido utilizando a Teoria da Utilidade Multiatributo e baseado no *Framework* por Frank et al. (2013) e Frank et al. (2016) com aplicação na Bacia Hidrográfica do Rio Pardo, curso d'água de domínio do estado do Espírito Santo. Na avaliação quantitativa, o Índice Sociotécnico conduziu aos mesmos resultados para os núcleos urbanos da bacia hidrográfica, para as condições 2 e 3. Pelos mesmos motivos que justificaram os resultados da pré-seleção das tecnologias, as condições 2 e 3, embora estabeleçam imposições de tratamento diferenciadas, não conduziram a valores de eficiências mínimas de tratamento capazes de impactar a pré-seleção e, por consequência, o *ranking* das tecnologias de tratamento de esgotos. Para Irupi e para os povoados de Nossa Senhora das Graças e Santíssima Trindade prevaleceram variações do sistema de lagoas de estabilização.

Para as sedes municipais de Ibatiba e Iúna, caracterizados pela maior concentração populacional da bacia, o Índice Sociotécnico conduziu à hierarquização de variações dos sistemas de lodos ativados ou de tanques sépticos associados com biodisco como opções de tratamento. Já para a sede do município de Irupi e para os povoados de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças, o Índice Sociotécnico conduziu à priorização de sistemas mais simples, como diferentes variações dos sistemas de lagoas de estabilização, em função da capacidade de autodepuração dos cursos d'água e/ou da pequena concentração populacional.

6.1. CONTRIBUIÇÕES ACADÊMICAS

Neste trabalho, de natureza mista (exploratória e explicativa) foram utilizadas tanto pesquisas qualitativas como quantitativas. Em relação à pesquisa qualitativa, foram exploradas técnicas que envolvem entrevistas por meio de grupos focados. Utilizou-se, para a pesquisa quantitativa, o emprego combinado de modelo de qualidade de água, técnicas de otimização e a construção de *Framework* utilizando técnica de análise multicriterial – Teoria da Utilidade Multiatributo.

Por meio das técnicas empregadas na tese entende-se como relevantes as seguintes contribuições: **a)** abordagem sociotécnica no processo de seleção de tecnologias de tratamento de esgotos; **b)** a incorporação da bacia hidrográfica no processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos; **c)** inserção da eficiência de remoção de matéria orgânica como critério de seleção – critério de corte - para realização a pré-seleção de tecnologias para a bacia hidrográfica e, inclusão como critério no subsistema ambiental; **d)** emprego combinado de modelo de qualidade de água, técnica de otimização e análise multicriterial para o processo de seleção; **e)** avaliação qualitativa, em que foi possível determinar os pesos de importância para os critérios e subsistemas sociotécnicos, com o posterior estabelecimento de estrutura de preferências.

6.2. CONTRIBUIÇÕES PRÁTICAS

Algumas contribuições específicas da proposta desta tese para o ambiente empresarial são as seguintes: *a)* o modelo empregado é relativamente de fácil aplicação e, por conseguinte, permite melhor entendimento de como o processo de seleção ocorre, inclusive ao se visualizar o *ranking* das tecnologias; *b)* as características da área de estudo e a abordagem em bacia hidrográfica contribuem para que as empresas estabeleçam uma visão macro da região e da inter-relação entre os sistemas e corpos hídricos, sem se distanciar dos aspectos de qualidade e quantidade de água; *c)* o modelo proposto contribui para melhor argumentação nas esferas de licenciamento ambiental e de outorga de lançamento e diluição de efluentes em corpos d'água, pois o modelo incorpora a interface recursos hídricos e esgotamento sanitário; *d)* o modelo propicia às empresas de saneamento a possibilidade de se escolher por sistemas de tratamento de esgoto que não sejam exclusivamente de nível de tratamento secundário, tendo em vista o elenco de sistemas de tratamento abordados na tese; *e)* o modelo apresentado nas discussões finais desta tese ajuda aos gestores da área de recursos hídricos bem como aos gestores da área de saneamento ambiental à visualizar a integralidade dos sistemas água e esgoto, no tocante à sustentabilidade dos sistemas ambientais.

6.3. OPORTUNIDADES PARA FUTURAS PESQUISAS

A partir dos resultados apresentados nesta pesquisa surgem algumas oportunidades para pesquisas futuras, dentre elas: *a)* a obtenção de dados qualitativos e/ou quantitativos para outros critérios, tais como os sugeridos pelos especialistas, quando da validação, a exemplo:

possibilidade de reaproveitamento de subprodutos e a possibilidade de cogeração de energia, pois não há dados consolidados para as tecnologias de tratamento de esgoto abordadas nesta pesquisa. Os critérios ora obtidos deverão, entretanto, passar por uma validação para que os critérios fossem assim empregados no processo de seleção; *b)* aplicação do modelo em outras bacias hidrográficas, de maior porte e com maior diversidade de uso e ocupação do solo; *c)* desenvolvimento de sistema computacional para suporte à decisão voltado para o processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos.

Outras oportunidades para pesquisa estão a incorporação dos custos econômicos no modelo, como auxílio no ranking das tecnologias apresentado pelo modelo, uma vez que a referida pesquisa não aprofundou nos detalhes econômicos das tecnologias selecionadas, embora seja um aspecto que, por vezes, é limitante na implementação de um sistema em detrimento de outro. Esta incorporação, associado à inclusão de novos critérios sociotécnicos, trará contribuições importantes para o processo de tomada de decisão, ampliando o escopo desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ALBERTIN, L. L. Técnica de Gerenciamento da Qualidade Hídrica Superficial Baseada na Otimização Multiobjetivo. 2008. 191 f. **Tese** (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- ALBERTIN, L. L.; MAUAD, F. F.; DANIEL, L. A. Uso de Simulação Computacional para Planejamento de um Sistema Hídrico: Estudo de Caso Qualitativo e Quantitativo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 4, p. 209-219, 2006.
- ANDRADE, I.N; MAURI, R. G; MENDONÇA, A. S F. A General Multiobjective model and a Simulated Annealing Algorithm for Waste-Load Allocation. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.139 n.3 p. 339-344, 2013.
- AQUINO, S. F.; BRANDT, E. M. F.; CHERNICHARO, C. A. L. Remoção de fármacos e desreguladores endócrinos em estações de tratamento de esgoto: revisão da literatura. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 187-204, 2013.
- BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF.
- BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da União, Brasília, DF.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 2005.
- BRINGER, L. M. Seleção de sistemas de tratamento de esgotos no âmbito de bacias hidrográficas a partir do emprego da modelagem de qualidade, otimização e da análise multiobjetivo. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.
- BROWN, L.; BARNWELL Jr, T.O. **The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual**. Report EPA/600/3-87/007. Athens, GA: U.S. Environmental Protection Agency, 1987.
- BURN, D. H.; YULIANTI, J. S. Waste-load allocation using genetic algorithms. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v. 127, n. 2, p. 121-129, 2001.
- CALMON, A. P. S.; SOUZA, J. C. S.; REIS, J. A. T.; MENDONÇA, A. S. F. Uso combinado de curvas de permanência de qualidade e modelagem da autodepuração como ferramenta para suporte ao processo de enquadramento de cursos d'água superficiais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 118-133, 2016.
- CAMPOS, J. R.; Dias, H. G. D. Potencialidade do filtro anaeróbio. **Revista DAE**, v. 49, n. 154, p. 29-23, 1989.
- CAMPOS, J. R. et al. Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo – Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: Rio de Janeiro: ABES, 1999.
- CAMPOS, Vanessa Ribeiro. **Modelo de apoio à decisão multicritério para priorização de projetos em saneamento**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.
- CARRILHO, S. M. A. V.; CARVALHO, E. H. Avaliação da disposição de lodos de fossa e tanque sépticos em lagoas de estabilização que tratam lixiviados de aterro sanitário. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.21, n.1, p.183-196, 2016.
- CHAVAN, A.; MUKHERJI, S. Treatment of hydrocarbon-rich wastewater using oil degrading bacteria and phototrophic microorganisms in rotating biological contactor: effect of N: P ratio. **Journal of hazardous materials**, v. 154, n. 1, p. 63-72, 2008.

- CORNELLI, Renata. Análise e seleção de alternativas sustentáveis de esgotamento sanitário. **Tese** (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- CORRÊA, R. S.; MELO FILHO, B. D.; BERNARDES, R. S. Deposição de esgoto doméstico para controle de poluição e revegetação induzida em área degradada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 2, p. 252-256, 2000.
- DROLC, A.; KONCAN, J.Z. Calibration of QUAL2E model for the Sava River (Slovenia). **Water Science and Technology**, v. 40, n. 10, p. 111-118, 1999.
- EPA – Environmental Protection Agency. **Onsite Wastewater Treatment Systems Manual**. Office of Water, Office of Research and Development and U.S. Environmental Protection Agency. EPA/625/R-00/008, 2002.
- FANG, H.; CHUI, H. Maximum COD Loading Capacity in UASB Reactors at 37°C. **Journal of Environmental Engineering**, v. 119: n. 1, p. 103-119, 1993.
- FANG, X.; ZHANG, J.; CHEN, Y.; XU, X. QUAL2K model used in the water quality assessment of Qiantang River, China. **Water Environment Research**, v. 80, n. 11, p. 2125-2133, 2008.
- FANTIN, L. L. D.; REIS, J. A. T.; MENDONÇA, A. S. F. Proposal of a methodology for pre-selection of sewage treatment systems within watersheds. **RBRH**, v. 22, 2017.
- FERNANDES, G. F. R.; OLIVEIRA, R. A. Desempenho de processo anaeróbio em dois estágios (reator compartimentado seguido de reator UASB) para tratamento de águas residuárias de suinocultura. **Engenharia Agrícola**, v.26, n.1, p.243-256, 2006.
- FRANK, A. G., RIBEIRO, J.L.D.; ECHEVESTE, M.E. Factors influencing knowledge transfer between NPD teams: a taxonomic analysis based on a sociotechnical approach. **R&D Management**, v. 45, n. 1, p. 1-22, 2015.
- FRANK, A. G., SOUZA, D. V. S. D., RIBEIRO, J. L. D., ECHEVESTE, M. E. A *Framework* for decision-making in investment alternatives selection. **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 19, p. 5866-5883, 2013.
- FRANK, A.G., MOLLE, N.D., GERSTLBERGER, W., BERNARDI, J. A. B., PEDRINI, D. C. An integrative environmental performance index for benchmarking in oil and gas industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 1190-1203, 2016.
- GALÁN, M. J. G.; DÍAZ-CRUZ, M. S.; BARCELÓ D. Removal of sulfonamide antibiotics upon conventional activated sludge and advanced membrane bioreactor treatment. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, v. 404, n. 5, p.1505 -1515, 2012.
- GIKAS, P.; TCHOBANOGLIOUS, G. The role of satellite and decentralized strategies in water resources management. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 1, p. 144-152, 2009.
- GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6ed. São Paulo: Atlas, 2008, 200p.
- GOBBETTI, L. E. C. Análise Multiobjetivo Aplicada ao Planejamento de Sistemas de Recursos Hídricos. **Dissertação** (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- GOLMOHAMMADI, Davood; MELLAT-PARAST, Mahour. Developing a grey-based decision-making model for supplier selection. **International Journal of Production Economics**, v. 137, n. 2, p. 191-200, 2012.
- HAJKOWICZ, S.; COLLINS, K. A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management. **Water resources management**, v. 21, n. 9, p. 1553-1566, 2007.
- HENZE, M.; HARREMOËS, P.; JANSEN, J. L. C.; ARVIN, E. **Wastewater treatment: biological and chemical processes**. Berlin: Springer Science & Business Media, 2002.
- HYLAND, K. C.; DICKENSON, E. R. V.; DREWES, J. E.; HIGGINS, C. P. Sorption of ionized and neutral emerging trace organic compounds onto activated sludge from different wastewater treatment configurations, **Water Research**, v. 46, n. 6, p. 1958-1968, 2012.
- INCAPER - Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. **Programa de Assistência Técnica e Extensão Rural – PROATER 2011 – 2013 – Ibatiba**. Vitória: Incaper, 2011a.
- INCAPER - Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. **Programa de Assistência Técnica e Extensão Rural – PROATER 2011 – 2013 – Iúna**. Vitória: Incaper, 2011a.

- INCAPER - Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. **Programa de Assistência Técnica e Extensão Rural – PROATER 2011 – 2013 – Irupi**. Vitória: Incaper, 2011a.
- INCAPER - Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. **Programa de Assistência Técnica e Extensão Rural – PROATER 2011 – 2013 – Muniz Freire**. Vitória: Incaper, 2011a.
- INGALLINELLA, A. M.; SANGUINETTI, G.; FERNÁNDEZ, R.G.; STRAUSS, M.; MONTANGERO, A. Cotreatment of sewage and septage in waste stabilization ponds. **Water Science & Technology**, v. 45, n. 1, p. 9-15, 2002.
- JAIL A.; BOUKHOUBZA, F.; NEJMEDDINE, A.; SAYADI, S.; HASSANI, L. Co-treatment of olive-mill and urban wastewaters by experimental stabilization ponds. **Journal of Hazardous Materials**, v. 176, n. 1 – 3, p. 893-900, 2010.
- JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. Rio de Janeiro: ABES, 2005.
- JORSARAEI, A.; GOUGOL, M; VAN LIER, J. B. A cost-effective method for decentralized sewage treatment. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 92, n. 6, p. 815-821, 2014.
- JOUNG, J. Y.; LEE, H. W.; CHOI, H.; LEE, M. W.; PARK, J. M. Influences of organic loading disturbances on the performance of anaerobic filter process to treat purified terephthalic acid wastewater. **Bioresource Technology**, v.100, n. 8, p. 2457-2461, 2009.
- KALBAR, P. P.; KARMAKAR, S.; ASOLEKAR, S. R. Selection of an appropriate wastewater treatment technology: A scenario-based multiple-attribute decision-making approach. **Journal of environmental management**, v. 113, p. 158-169, 2012.
- KARIMI, A. R.; MEHRDADI N.; HASHEMIAN S. J.; NABI BIDHENDI G. R., TAVAKKOLI MOGHADDAM R. Selection of wastewater treatment process based on the analytical hierarchy process and fuzzy analytical hierarchy process methods. **International Journal of Environmental Science & Technology**, v. 8, n. 2, p. 267-280, 2011.
- KIVAISI, A. K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review. **Ecological Engineering**, v. 16, n. 4, p. 545-560, 2001.
- KUNZ, A.; PERALTA-ZAMORA, P.; DE MORAES, S. G.; DURÁN, N. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química nova**, v. 25, n. 1, p. 78-82, 2002.
- LEME, E. J. A. Manual prático de tratamento de águas residuárias. São Carlos: UFSCar, 2010.
- LERVORINO, S.A.; PELICIONI, M. C. F. A utilização do grupo focal como metodologia qualitativa na promoção da saúde. **Revista da Escola de Enfermagem da USP**, v. 35, n.2, p.115-21, 2001.
- LEONETI, A. B. Avaliação de modelo de tomada de decisão para escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário. **Dissertação** (Mestrado em Administração de Organizações) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto (FEARP). Ribeirão Preto. 2009.
- LI, Z. Evaluation of decentralized treatment of sewage employing bio-contact oxidation reactor integrated with filter bed. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 91, n. 4, p. 295-303, 2013.
- LIBRALATO, G.; GHIRARDINI, A. V.; AVEZZÙ, F. To centralise or to decentralise: An overview of the most recent trends in wastewater treatment management. **Journal of environmental management**, v. 94, n. 1, p. 61-68, 2012.
- LIMA, A. F. Avaliação da eficiência das lagoas facultativas fotossintéticas. **Engenharia sanitária**, v. 23, n. 1, p. 62-4, 1984.
- LOFRANO, Giusy; BROWN, Jeanette. Wastewater management through the ages: A history of mankind. **Science of the total environment**, v. 408, n. 22, p. 5254-5264, 2010.
- LOURES, A. P.; SOARES, A. A.; MATOS, A. T.; CECON, P. R.; PEREIRA, O. G. Remoção de fósforo em sistema de tratamento de esgoto doméstico, por escoamento superficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 706-714, 2006.
- LOUZADA, J. P.; REIS, J. A. T.; MENDONÇA, A. S. F. Uso de otimização e modelagem de qualidade de água no planejamento de implantação de sistemas de tratamento de esgotos sanitários em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, p. 277 – 286, 2013.

- MA, B.; PENG, Y.; ZHANG, S.; WANG, J.; GAN, Y.; CHANG, J.; WANGA, S.; WANGC, S.; ZHU, G. Performance of anammox UASB reactor treating low strength wastewater under moderate and low temperatures. **Bioresource technology**, v. 129, p. 606-611, 2013.
- MARSH, M. T.; SCHILLING, D. A. Equity measurement in facility location analysis: A review and *Framework*. **European Journal of Operational Research**, v. 74, p. 1-17, 1994.
- MASSOUD, M. A.; TARHINI, A.; NASR, J. A. Decentralized approaches to wastewater treatment and management: applicability in developing countries. **Journal of environmental management**, v. 90, n. 1, p. 652-659, 2009.
- MBA, D.; BANNISTER, R. Ensuring effluent standards by improving the design of Rotating Biological Contactors. **Desalination**, v. 208, n. 1, p. 204-215, 2007.
- MEHRDADI, N.; GHOBADI, M.; NASRABADI, T.; HOVEIDI, H. Evaluation of the quality and self-purification potential of Tajan river using QUAL2E model. **Journal of Environmental Health Science & Engineering**, v. 3, n. 3, p. 199-204, 2006.
- MIGUEL, P. A. C. (organizador). Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2012.
- MIN, Hokey. International supplier selection: a multi-attribute utility approach. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 24, n. 5, p. 24-33, 1994.
- MORAIS, J. L.; SIRTORI, C.; PERALTA-ZAMORA, P. G. Tratamento de chorume de aterro sanitário por fotocatalise heterogênea integrada a processo biológico convencional. **Química Nova**, v. 29, n. 1, p. 20-23, 2006.
- MOUSSAVI, G.; KAZEMBEIGI, F.; FARZADKIA, M. Performance of a pilot scale up-flow septic tank for on-site decentralized treatment of residential wastewater. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 88, n. 1, p. 47-52, 2010.
- MULLIGAN, G. F. Equality measures and facility location. **Regional Science**. v. 70, n.4, p. 345-365, 1991.
- OLIVEIRA, S. V. W.B. Modelo para tomada de decisão na escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário. **Dissertação (Mestrado)**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- ORLOB, G. T. Water-Quality Modeling for Decision Making. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 118, n. 3, p. 295-307, 1992.
- ORON, G.; CAMPOS, C.; GILLERMAN, L.; SALGOT, M. Wastewater treatment, renovation and reuse for agricultural irrigation in small communities. **Agricultural Water Management**, v. 38, n. 3, p. 223-234, 1999.
- PALIWAL, R.; SHARMA, P. KANSAL, A. Water quality modelling of the river Yamuna (India) using QUAL2E-UNCAS. **Journal of Environmental Management**, v. 83, p. 131-144, 2007.
- PARK, S.S.; LEE, Y.S. A multiconstituent moving segment model for the water quality predictions in steep and shallow streams. **Ecological Modelling**, n. 89, 121-131, 1996.
- PARK, SEOK SOON; LEE, YONG SEOK. A water quality modeling study of the Nakdong River, Korea. **Ecological Modelling**, v. 152, n. 1, p. 65-75, 2002.
- PARMAR, D. L.; KESHARI, A. K. Wasteload Allocation Using Wastewater Treatment and Flow Augmentation. **Environmental Modeling & Assessment**, v. 19, n. 1, p. 35-44, 2014.
- PIRSAHEB, M.; FAZLZADEHDAVIL, M.; HAZRATI, S.; SHARAFI, K.; KHODADADI, T.; SAFARI, Y. A Survey on Nitrogen and Phosphor Compound Variation Processes in Wastewater Stabilization Ponds. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 23, n. 3, p. 831-834, 2014.
- PURANDARA, B. K.; VARADARAJAN, N.; VENKATESH, B.; CHOUBEY, V. K. Surface water quality evaluation and modeling of Ghataprabha River, Karnataka, India. **Environmental monitoring and assessment**, v. 184, n. 3, p. 1371-1378, 2012.
- RAGUSH, C. M.; SCHMIDT, J. J.; KRKOSEK, W. H.; GAGNON, G. A.; TRUELSTRUP-HANSEN, L. JAMIESON, R. C. Performance of municipal waste stabilization ponds in the Canadian Arctic. **Ecological Engineering**, v. 83, n. 10, p. 413-421, 2015.

- REAMI, L. Aplicação de métodos multicriteriais de apoio à tomada de decisão para escolha de tecnologia de tratamento de esgoto: estudo de caso de Restinga SP. **Tese** (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.
- REIS, J.A.T.; VALORY, J.L.; MENDONÇA, A.S.F. Seleção de eficiências de tratamento de esgotos a partir da manutenção de equidade entre sistemas de tratamento - uma abordagem para o gerenciamento de bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 862-871, 2015.
- RIBEIRO, J.L.D.; NEWMANN, C. R. Estudos qualitativos com o apoio de Grupos Focados. **XIII Semana de Engenharia de Produção Sul-americana. Gramado**, 2012.
- RIBEIRO, J.L.D.; NEWMANN, C. R. Planejamento e condução de grupos focados. In: RIBEIRO, J.L.D. (Org.). Grupos focados: teoria e aplicações. Porto Alegre: FEEng; UFRGS, 2003.
- RUIZ, I.; VEIGA, M.C.; SANTIAGO, P.; BLÁZQUEZ, R. Treatment of slaughterhouse wastewater in a UASB reactor and an anaerobic filter. **Bioresource Technology**, v. 60, n. 3, p. 251-258, 1997.
- SABRY, T. Evaluation of decentralized treatment of sewage employing Upflow Septic Tank/Baffled Reactor (USBR) in developing countries. **Journal of hazardous materials**, v. 174, n. 1, p. 500-505, 2010.
- SALLA, M. R.; PEREIRA, C. E.; ALAMY FILHO, J. E.; PAULA, L. M. de; PINHEIRO, A. M. Estudo da autodepuração do Rio Jordão, localizado na bacia hidrográfica do Rio Dourados. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 105-114, 2013.
- SANTORO, M. C. Modelos de otimização para determinação de eficiências de tratamento de efluentes sanitários no âmbito de bacias hidrográficas. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.
- SANTORO, M. C.; REIS, J. A. T.; MENDONÇA, A. S. F. Performance evaluation of optimization models in the determination of wastewater treatment efficiencies inside watersheds. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 4, 2016.
- SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2010**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2012.
- _____. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2012**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2014a.
- _____. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2013**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2014b.
- _____. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 2011.
- SOMLYODY, L.; HENZE, M.; KONCSOS, L.; RAUCH, W.; REICHERT, P.; SHANAHAN, P.; VANROLLEGHEM, P. River quality modelling: III. Future of the art. **Water Science and Technology**, v. 38, n. 11, p. 253–260, 1998.
- SOUSA, J. T.; VAN HAANDEL, A. C.; SILVA COSENTINO, P. R.; GUIMARÃES, A. V. A. Pós-tratamento de efluente de reator UASB utilizando sistemas “wetlands” construídos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 1, p. 87-91, 2000.
- SOUZA, M. A. A. Methodology for Selection of Wastewater Treatment Processes. **PhD Thesis**. The University of Birmingham. Birmingham, 1992.
- SOUZA, M.A.A., FORSTER, C. F. Metodologias para seleção de processos de tratamento de águas residuárias. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 1, n. 2, p 19-31, 1996.
- STREETER H. W.; PHELPS, E. B. **A Study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River – III**. Washington, DC: United States Public Health Service, 1925.
- TCHOBANOGLOUS, G. et al. **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery**. New York: Metcalf & Eddy/ AECOM. 2016.
- TEODORO, A.; IDE, C. N.; RIBEIRO, M. L.; BROCH, A. O.; SILVA, J.B. da. Implementação do conceito Capacidade de Diluição de Efluentes no modelo de qualidade da água QUAL-UFGM: estudo de caso no Rio Taquarizinho (MS). **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 275-288, 2013.

- THEVENOT, Henri J. et al. A Multi-attribute Utility Theory-based approach to product line consolidation and selection. In: **ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference**. American Society of Mechanical Engineers, 2006. p. 441-450.
- TONETTI, A. L.; CORAUCCI FILHO, B.; GUIMARÃES, J. R.; CRUZ, M. O. C.; NAKAMURA, M. S. Avaliação da partida e operação de filtros anaeróbios tendo bambu como material de recheio. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 16, n. 1, p. 11-16, 2011.
- UEHARA, M. Y., VIDAL, W. L., KAWAI, H., FARIA, J. E., BEZERRA, J. F. M., ALÉM, P. **Operação e manutenção de lagoas anaeróbias e facultativas**. São Paulo: CETESB, 1989.
- VALORY, J. L.; REIS, J. A. T.; A. S. F. MENDONÇA. Combining Genetic Algorithms with a Water Quality Model to Determine Efficiencies of Sewage Treatment Systems in Watersheds, **Journal of Environmental Engineering**, v. 142, n. 3, p. 1-9, 2016.
- VERBYLA, M. E.; MIHELICIC, J. R. A review of virus removal in wastewater treatment pond systems. **Water Research**, v. 71, n. 3, p. 107-124, 2015.
- VON SPERLING, M. Comparison among the most frequently used systems for wastewater treatment in developing countries. **Water Science and Technology**, v. 33, n. 3, p. 59-72, 1996.
- VON SPERLING, M. Performance evaluation and mathematical modelling of coliform die-off in tropical and subtropical waste stabilization ponds. **Water Research**, v. 33, n. 6, p. 1435-1448, 1999.
- VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Lagoas de Estabilização**. Belo Horizonte: DESA – UFMG. 1996.
- VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Lodos Ativados**. Belo Horizonte: DESA – UFMG. 1997.
- VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: DESA – UFMG. 1998.
- VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Belo Horizonte: DESA – UFMG, 2005.
- VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. Belo Horizonte: Belo Horizonte: DESA – UFMG. 2007.
- VON SPERLING, M.; FREIRE, V. H.; CHERNICHARO, C. A. L. Performance evaluation of a UASB-activated sludge system treating municipal wastewater. **Water Science and Technology**, v. 43, n. 11, p. 323-328, 2001.
- VYMAZAL, J. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. **Ecological Engineering**, v. 25, n. 5, p. 478-490, 2005.
- WANG, Q.; LI, S.; JIA, P.; QI, C.; DING, F. A Review of Surface Water Quality Models. **The Scientific World Journal**, p. 1-7, 2013, <http://doi.org/10.1155/2013/231768>.
- WERNKE, R.; BORNIA, A. C. A contabilidade gerencial e os métodos multicriteriais. **Revista Contabilidade & Finanças FIPECAFI – FEA – USP**, vol. 14, n.25, p.60, janeiro/abril 2001.
- YHDEGO, M. Pilot Waste-Stabilization Pond in Tanzania. **Journal of Environmental Engineering**, v. 118, n. 2, p. 286-296, 1992.
- YU, Hanqing; TAY, Joo-Hwa; WILSON, Francis. A sustainable municipal wastewater treatment process for tropical and subtropical regions in developing countries. **Water Science and Technology**, v. 35, n. 9, p. 191-198, 1997.
- ZHANG, R.; QIAN, X.; LI, H.; YUAN, X.; YE, R. Selection of optimal river water quality improvement programs using QUAL2K: A case study of Taihu Lake Basin, China. **Science of the Total Environment**, v. 431, p. 278-285, 2012.
- ZHU, W.; LENG, X.; LI, H.; ZHANG, R.; YE, R.; QIAN, X. Application of the QUAL2K model to design an ecological purification scheme for treated effluent of a wastewater treatment plant. **Water Science and Technology**, v. 72, n. 12, p. 2194-2200, 2015.

APÊNDICE A – Formulário de validação dos critérios e subsistemas sociotécnicos



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

VALIDAÇÃO DE CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

O processo de seleção de tecnologias de tratamento de esgotos envolve, usualmente, diferentes critérios de análise. Alguns pesquisadores indicam como solução viável de tratamento aquela que atende à diferentes critérios associados às tecnologias e seus impactos, empregando, para o processo de seleção, uma análise multicritério.

A tese de doutorado “Método de seleção de tecnologias de tratamento de efluentes: uma análise multicriterial aplicada à Bacia Hidrográfica do Rio Pardo – ES”, desenvolvida pela orientanda Adriana de Oliveira Pereira dos Reis, sob orientação do Prof. Dr. Alejandro Germán Frank, utilizará alguns critérios, enquadrados em subsistemas sociotécnicos, os quais devem passar por uma validação por *experts* nas áreas de saneamento ambiental e recursos hídricos.

Os critérios elencados nesta tese são produto de uma análise dos mais recorrentes critérios de seleção utilizados em pesquisas associadas ao tema. Considerando a influência dos critérios em diferentes áreas, desde a tecnológica até a social, foi adotada, para a condução da referida tese, a abordagem sociotécnica. Assim, os critérios foram classificados em quatro subsistemas sociotécnicos: ambiental, tecnológico, operação e social (Tabela 1). Neste trabalho serão analisadas trinta tecnologias como opções de tratamento de esgotos. São elas: Tratamento primário convencional, Tratamento primário avançado, Lagoas (facultativa, anaeróbia + lagoa facultativa, aerada facultativa, aerada mistura completa + lagoa de sedimentação, anaeróbia + facultativa + lagoa de maturação, anaeróbia + facultativa + lagoa alta taxa, anaeróbia + facultativa + remoção de algas), Infiltração lenta, Infiltração rápida, Escoamento superficial, Terras úmidas construídas (*Wetlands*), Tanque séptico + filtro anaeróbio, Reator UASB e variações, Lodos ativados convencional, Lodos ativados de aeração prolongada, Lodos ativados batelada, Filtro biológico percolador de baixa carga, Filtro biológico percolador de alta carga, Biofiltro aerado submerso com nitrificação, Tanque séptico + biodisco.

Considerando um elenco de critérios qualitativos e quantitativos para as tecnologias de tratamento de esgoto enumeradas, o processo de decisão deverá ser baseado no emprego da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT - *Multi-Attribute Utility Theory*).

Neste contexto, solicita-se contribuição nesta pesquisa para as seguintes validações:

- **Validação 01** – validação quanto à classificação dos critérios nos subsistemas ambiental, tecnológico, operação e social.
- **Validação 02** – validação dos critérios a serem considerados na seleção de tecnologias de tratamento de esgotos.

A Tabela 1 refere-se à matriz de critérios, a serem considerados no processo de seleção de tecnologias de tratamento de esgotos, organizados por subsistemas sociotécnicos (ambiental, tecnológico, operação e social).

Tabela 1 – Matriz de critérios por subsistemas sociotécnicos

SUBSISTEMAS SOCIOTÉCNICOS	CRITÉRIOS A SEREM CONSIDERADOS NA SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS
AMBIENTAL	Eficiência de remoção de matéria orgânica
	Eficiência de remoção de nitrogênio
	Eficiência de remoção de fósforo
	Eficiência de remoção de coliformes
TECNOLÓGICO	Demanda de energia
	Demanda por área de implantação
	Custos de implantação
	Custos de operação
	Quantidade de lodo a ser tratado
	Quantidade de lodo a ser disposto
OPERAÇÃO	Confiabilidade do sistema
	Simplicidade operacional
	Capacidade de resistência a variações de vazão
	Capacidade de resistência a variações das características do afluente
	Capacidade de resistência a constituintes tóxicos
SOCIAL	Interferências devido à geração de odor
	Interferências devido à geração de ruído
	Interferências devido à geração de aerossóis
	Possibilidade de atração de Insetos

VALIDAÇÃO 01

Validação quanto à classificação dos critérios nos subsistemas ambiental, tecnológico, operação e social.

Assinale a classificação do critério em relação ao respectivo subsistema sociotécnico, conforme a seguinte legenda:

- (1) o critério está associado ao subsistema ambiental.
- (2) o critério está associado ao subsistema tecnológico.
- (3) o subsistema está associado ao subsistema operação.
- (4) o subsistema está associado ao subsistema social.

Classificação proposta	Classificação sugerida pelo (a) avaliador (a)	CRITÉRIOS (critérios a serem considerados na seleção de tecnologias)
(1)	()	Eficiência de remoção de matéria orgânica
(1)	()	Eficiência de remoção de nitrogênio
(1)	()	Eficiência de remoção de fósforo
(1)	()	Eficiência de remoção de coliformes
(2)	()	Demanda de energia
(2)	()	Demanda por área de implantação
(2)	()	Custos de implantação
(2)	()	Custos de operação
(2)	()	Quantidade de lodo a ser tratado
(2)	()	Quantidade de lodo a ser disposto
(3)	()	Confiabilidade do sistema
(3)	()	Simplicidade operacional
(3)	()	Capacidade de resistência a variações de vazão
(3)	()	Capacidade de resistência a variações das características do afluente
(3)	()	Capacidade de resistência a constituintes tóxicos
(4)	()	Interferências devido à geração de odor
(4)	()	Interferências devido à geração de ruído
(4)	()	Interferências devido à geração de aerossóis
(4)	()	Possibilidade de atração de Insetos

VALIDAÇÃO 02

Validação dos critérios a serem considerados na seleção de tecnologias de tratamento de esgotos. Assinale quais critérios devam permanecer como critérios, a serem considerados na seleção de tratamento de esgotos, assinalando:

(S) SIM, este critério é relevante e deve ser incluído no processo de seleção de tecnologias de tratamento de esgotos.

(N) NÃO, este critério não é relevante e deve ser excluído do processo de seleção de tecnologias de tratamento de esgotos.

O critério deve ser incluído no processo de seleção? (S) SIM (N) NÃO	CRITÉRIOS (Critérios a serem considerados na seleção de tecnologias)
()	Eficiência de remoção de matéria orgânica
()	Eficiência de remoção de nitrogênio
()	Eficiência de remoção de fósforo
()	Eficiência de remoção de coliformes
()	Demanda de energia
()	Demanda por área de implantação
()	Custos de implantação
()	Custos de operação
()	Quantidade de lodo a ser tratado
()	Quantidade de lodo a ser disposto
()	Confiabilidade do sistema
()	Simplicidade operacional
()	Capacidade de resistência a variações de vazão
()	Capacidade de resistência a variações das características do afluente
()	Capacidade de resistência a constituintes tóxicos
()	Interferências devido à geração de odor
()	Interferências devido à geração de ruído
()	Interferências devido à geração de aerossóis
()	Possibilidade de atração de Insetos

O(A) avaliador(a) considera que outro(s) critério(s) de seleção seja(m) relevante(s) para o processo de seleção de tratamento de esgotos, e que deva(m) ser acrescentado(s) na tese?

Não

Sim. Qual(is) critério(s)?

APÊNDICE B – Formulário para obtenção dos pesos – Grupos Focados

Avaliador(a): _____

1ª etapa - “Avaliação Individual”

Atribuir peso de importância para cada um dos critérios de seleção listados.

Considere a importância destes critérios para a escolha de sistemas de tratamento de esgotos, atribuindo um peso para cada um dos critérios. Utilize uma escala de 1 a 10, sendo:

1 - o critério que tem menor importância entre os demais critérios e;

10 - o critério que tem maior importância entre os demais critérios.

2ª etapa - “Calibração”

CRITÉRIOS DE SELEÇÃO VALIDADOS	AVALIAÇÃO INDIVIDUAL	CALIBRAÇÃO
Eficiência de Remoção de Matéria Orgânica		
Eficiência de Remoção de Nitrogênio		
Eficiência de Remoção de Fósforo		
Eficiência de Remoção de Coliformes		
Requisitos de Energia		
Demanda por Área de Implantação		
Custos de Implantação		
Custos de Operação		
Quantidade de Lodo a ser Tratado		
Quantidade de Lodo a ser Disposto		
Confiabilidade do sistema		
Simplicidade Operacional		
Capacidade de Resistência a Variações de Vazão		
Capacidade de Resistência a Variações das Características do Afluente		
Capacidade de Resistência a Constituintes Tóxicos		
Interferência decorrente da geração de Odor		
Interferência decorrente da Geração de Ruído		
Interferência decorrente da Geração de Aerossóis		
Possibilidade de atração de Insetos		

1ª etapa - “Avaliação Individual”

Atribuir peso de importância para cada um dos subsistemas sociotécnicos.

Considere a importância destes subsistemas para a escolha de sistemas de tratamento de esgotos, atribuindo um peso para cada um dos subsistemas. Utilize uma escala de 1 a 10, sendo:

- 1 - o subsistema que tem menor importância entre os demais subsistemas e;
- 10 - o subsistema que tem maior importância entre os demais subsistemas.

2ª etapa - “Calibração”

SUBSISTEMAS SOCIOTÉCNICOS	AVALIAÇÃO INDIVIDUAL	CALIBRAÇÃO	CRITÉRIOS
AMBIENTAL			Eficiência de Remoção de Matéria Orgânica
			Eficiência de Remoção de Nitrogênio
			Eficiência de Remoção de Fósforo
			Eficiência de Remoção de Coliformes
TECNOLÓGICO			Requisitos de Energia
			Demanda por Área de Implantação
			Custos de Implantação
			Custos de Operação
			Quantidade de Lodo a ser tratado
			Quantidade de Lodo a ser disposto
OPERAÇÃO			Confiabilidade do sistema
			Simplicidade Operacional
			Capacidade de Resistência a Variações de Vazão
			Capacidade de Resistência a Variações das Características do Afluente
			Capacidade de Resistência a Constituintes Tóxicos
SOCIAL			Interferência decorrente da geração de Odor
			Interferência decorrente da Geração de Ruído
			Interferência decorrente da Geração de Aerossóis
			Possibilidade de atração de Insetos

Tabela C.1 Índice Sociotécnico e Ranking das tecnologias de tratamento de esgotos – IBATIBA – Condição 1, Condição 2 e Condição 3

SubSoc	CRITÉRIOS	Peso dos subsistemas sociotécnicos	Peso dos critérios	Σ Pesos	Tecnologias de tratamento de esgoto				
					A26	A27	A30	A33	A34
					score do Índice geral referente às tecnologias				
Ambiental	Eficiência de Remoção de matéria orgânica	0,31	0,34	0,10	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
	Eficiência de remoção de nitrogênio		0,24	0,07	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	Eficiência de remoção de fósforo		0,25	0,08	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1
	Eficiência de remoção de coliformes		0,29	0,09	0,2	0,2	0,8	0,2	0,2
Tecnológico	Requisitos de energia	0,27	0,27	0,07	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0
	Demanda por Área de Implantação		0,21	0,06	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	Custo de implantação		0,24	0,06	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Custo de operação		0,27	0,07	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Quantidade de lodo a ser tratado		0,20	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Quantidade de lodo a ser disposto		0,22	0,06	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Operação	Confiabilidade do sistema	0,23	0,20	0,05	0,9	0,9	0,9	0,9	0,1
	Simplicidade Operacional		0,20	0,05	0,2	0,5	0,1	0,2	0,5
	Capacidade de resistência às variações de vazão		0,20	0,05	0,9	0,9	0,4	0,4	0,4
	Capacidade de res. variações características afluyente		0,21	0,05	0,6	0,6	0,3	0,3	0,3
	Capacidade de resistência aos constituintes tóxicos		0,12	0,03	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1
Social	Interferência decorrente da geração de Odor	0,19	0,22	0,04	0,1	0,4	0,2	0,1	0,2
	Interferência decorrente da Geração de Ruído		0,15	0,03	0,9	0,9	0,9	0,7	0,2
	Interferência decorrente da Geração de Aerossóis		0,09	0,02	0,4	0,4	0,4	0,1	0,1
	Possibilidade de atração de Insetos		0,08	0,02	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3
Total		$\Sigma w_{ck}=1$	4	$\Sigma w_i=1$	0,38	0,41	0,41	0,33	0,37
					<i>Ranking</i>				
					2º 1º 1º 4º 3º				

Tabela C.2 Índice Sociotécnico e *Ranking* das tecnologias de tratamento de esgotos – IRUPI – Condição 1, Condição 2 e Condição 3

SubSoc	CR	Peso SubSoc	Peso CR	Σ Pesos	Tecnologias de tratamento de esgoto																													
					A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22	A23	A25	A26	A27	A28	A29	A30	A31	A32	A33	A34			
					score do índice geral referente às tecnologias																													
Ambiental	1	0,31	0,34	0,10	0,4	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,5	0,8	0,8	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9			
	2		0,24	0,07	0,1	0,4	0,4	0,1	0,1	0,5	0,9	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,1	0,1	0,4	0,4	0,4	0,7	0,7	0,4	0,4	0,4	0,4			
	3		0,25	0,08	0,9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,8	0,3	0,1	0,1	0,1			
	4		0,29	0,09	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,8	0,7	0,7	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,8	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,8	0,2	0,2	0,2			
Tecnológico	5	0,27	0,27	0,07	1,0	1,0	1,0	0,1	0,1	1,0	0,4	1,0	1,0	1,0	0,1	0,1	1,0	1,0	1,0	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0	1,0	0,1	1,0			
	6		0,21	0,06	0,6	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6		
	7		0,24	0,06	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1		
	8		0,27	0,07	0,1	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1		
	9		0,20	0,05	0,1	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1		
10	0,22	0,06	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1				
Operação	11	0,23	0,20	0,05	0,9	0,9	0,9	0,9	0,1	0,9	0,9	0,9	0,1	0,1	0,9	0,9	0,1	0,9	0,9	0,9	0,1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9				
	12		0,20	0,05	0,5	0,9	0,9	0,7	0,5	0,9	0,5	0,5	0,7	0,7	0,1	0,2	0,7	0,5	0,9	0,7	0,5	0,1	0,2	0,5	0,1	0,1	0,1	0,5	0,5	0,2	0,5			
	13		0,20	0,05	0,9	0,9	0,9	0,9	0,4	0,9	0,9	0,9	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,9	0,9	0,4	0,4	0,4	0,4	0,9	0,4			
	14		0,21	0,05	0,9	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,6	0,6	0,3	0,3	0,3	0,1	0,3	0,3			
	15		0,12	0,03	0,9	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,1	0,1			
Social	16	0,19	0,22	0,04	0,4	0,4	0,9	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,2	0,1	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2				
	17		0,15	0,03	0,2	0,1	0,1	0,9	0,9	0,1	0,7	0,1	0,2	0,2	0,9	0,7	0,2	0,2	0,1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,2	0,2				
	18		0,09	0,02	0,1	0,1	0,1	0,9	0,9	0,1	0,7	0,1	0,1	0,1	0,4	0,1	0,1	0,2	0,1	0,9	0,9	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1			
	19		0,08	0,02	0,3	0,6	0,6	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,6	0,3	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,6	0,3	0,1			
Total	$\Sigma w_{ck}=1$	4	$\Sigma w_i=1$	0,48	0,47	0,49	0,40	0,34	0,54	0,53	0,50	0,38	0,35	0,34	0,34	0,37	0,40	0,48	0,36	0,31	0,33	0,39	0,41	0,35	0,41	0,41	0,39	0,42	0,33	0,37				
					<i>Ranking</i>	5º	6º	4º	9º	15º	1º	2º	3º	11º	14º	15º	12º	9º	5º	13º	17º	16º	10º	8º	14º	8º	8º	10º	7º	16º	12º			

Nota: SubSoc – Subsistemas Sociotécnicos, CR – Critérios de seleção em que: 1) Eficiência de Remoção de matéria orgânica, 2) Eficiência de remoção de nitrogênio, 3) Eficiência de remoção de fósforo, 4) Eficiência de remoção de coliformes, 5) Requisitos de energia, 6) Demanda por Área de Implantação, 7) Custo de implantação, 8) Custo de operação, 9) Quantidade de lodo a ser tratado, 10) Quantidade de lodo a ser disposto, 11) Confiabilidade do sistema, 12) Simplicidade Operacional, 13) Capacidade de resistência à variações de vazão, 14) Capacidade de resistência às variações das características do afluente, 15) Capacidade de resistência à constituintes tóxicos, 16) Interferência decorrente da geração de Odor, 17) Interferência decorrente da Geração de Ruído, 18) Interferência decorrente da Geração de Aerossóis, 19) Possibilidade de atração de Insetos

Tabela C.3 Índice Sociotécnico e *Ranking* das tecnologias de tratamento de esgotos – IÚNA – Condição 1, Condição 2 e Condição 3

SUBSISTEMAS SOCIOTÉCNICOS	CRITÉRIOS	Peso dos subsistemas sociotécnicos	Peso dos critérios	Σ Pesos	Tecnologias de tratamento de esgoto				
					A26	A27	A30	A33	A34
					score do Índice geral referente às tecnologias				
Ambiental	Eficiência de Remoção de matéria orgânica	0,31	0,34	0,10	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
	Eficiência de remoção de nitrogênio		0,24	0,07	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	Eficiência de remoção de fósforo		0,25	0,08	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1
	Eficiência de remoção de coliformes		0,29	0,09	0,2	0,2	0,8	0,2	0,2
Tecnológico	Requisitos de energia	0,27	0,27	0,07	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0
	Demanda por Área de Implantação		0,21	0,06	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	Custo de implantação		0,24	0,06	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Custo de operação		0,27	0,07	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Quantidade de lodo a ser tratado		0,20	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Quantidade de lodo a ser disposto		0,22	0,06	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Operação	Confiabilidade do sistema	0,23	0,20	0,05	0,9	0,9	0,9	0,9	0,1
	Simplicidade Operacional		0,20	0,05	0,2	0,5	0,1	0,2	0,5
	Capacidade de resistência às variações de vazão		0,20	0,05	0,9	0,9	0,4	0,4	0,4
	Capacidade de res. variações características afluente		0,21	0,05	0,6	0,6	0,3	0,3	0,3
	Capacidade de resistência aos constituintes tóxicos		0,12	0,03	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1
Social	Interferência decorrente da geração de Odor	0,19	0,22	0,04	0,1	0,4	0,2	0,1	0,2
	Interferência decorrente da Geração de Ruído		0,15	0,03	0,9	0,9	0,9	0,7	0,2
	Interferência decorrente da Geração de Aerossóis		0,09	0,02	0,4	0,4	0,4	0,1	0,1
	Possibilidade de atração de Insetos		0,08	0,02	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3
Total		$\Sigma w_{ck}=1$	4	$\Sigma w_i=1$	0,38	0,41	0,41	0,33	0,37
<i>Ranking</i>					2º	1º	1º	4º	3º

Tabela C.4 Índice Sociotécnico e Ranking das tecnologias de tratamento de esgotos – NOSSA SENHORA DAS GRAÇAS – Condição 2 e Condição 3

SubSoc	CR	Peso SubSoc	Peso CR	Σ Pesos	Tecnologias de tratamento de esgoto																																	
					A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22	A23	A25	A26	A27	A28	A29	A30	A31	A32	A33	A34							
					score do Índice geral referente às tecnologias																																	
Ambiental	1	0,31	0,34	0,10	0,4	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,5	0,8	0,8	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9					
	2		0,24	0,07	0,1	0,4	0,4	0,1	0,1	0,5	0,9	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,1	0,1	0,4	0,4	0,4	0,7	0,7	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4					
	3		0,25	0,08	0,9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,8	0,3	0,1	0,1	0,1					
	4		0,29	0,09	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,8	0,7	0,7	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,8	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,8	0,2	0,2	0,2					
Tecnológico	5	0,27	0,27	0,07	1,0	1,0	1,0	0,2	0,1	1,0	0,4	1,0	1,0	1,0	0,1	0,1	1,0	1,0	1,0	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0	1,0	0,1	1,0						
	6		0,21	0,06	0,7	0,3	0,4	0,6	0,6	0,3	0,3	0,4	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7						
	7		0,24	0,06	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1					
	8		0,27	0,07	0,1	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1					
	9		0,20	0,05	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1					
10	0,22	0,06	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1						
Operação	11	0,23	0,20	0,05	0,9	0,9	0,9	0,9	0,1	0,9	0,9	0,9	0,1	0,1	0,9	0,9	0,1	0,9	0,9	0,9	0,1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9						
	12		0,20	0,05	0,5	0,9	0,9	0,7	0,5	0,9	0,5	0,5	0,7	0,7	0,1	0,2	0,7	0,5	0,9	0,7	0,5	0,1	0,2	0,5	0,1	0,1	0,1	0,5	0,5	0,2	0,5	0,5						
	13		0,20	0,05	0,9	0,9	0,9	0,9	0,4	0,9	0,9	0,9	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,9	0,9	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,9	0,4	0,4					
	14		0,21	0,05	0,9	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,6	0,6	0,3	0,3	0,3	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3					
	15		0,12	0,03	0,9	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,1	0,1	0,1					
Social	16	0,19	0,22	0,04	0,4	0,4	0,9	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,2	0,1	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2						
	17		0,15	0,03	0,2	0,1	0,1	0,9	0,9	0,1	0,7	0,1	0,2	0,2	0,9	0,7	0,2	0,2	0,1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,2	0,2	0,7	0,2					
	18		0,09	0,02	0,1	0,1	0,1	0,9	0,9	0,1	0,7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,1	0,1	0,2	0,1	0,9	0,9	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1					
	19		0,08	0,02	0,3	0,6	0,6	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,6	0,3	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,6	0,3	0,1	0,3					
Total	$\Sigma W_{ck}=1$	4	$\Sigma W_i=1$	0,48	0,48	0,50	0,41	0,35	0,55	0,54	0,50	0,39	0,36	0,35	0,35	0,38	0,41	0,49	0,37	0,32	0,34	0,39	0,42	0,36	0,41	0,42	0,40	0,43	0,34	0,37	0,37							
Ranking					5º	5º	3º	8º	14º	1º	2º	3º	10º	13º	14º	14º	11º	8º	4º	12º	16º	15º	10º	7º	13º	8º	7º	9º	6º	15º	12º							

Nota: SubSoc – Subsistemas Sociotécnicos, CR – Critérios de seleção em que: 1) Eficiência de Remoção de matéria orgânica, 2) Eficiência de remoção de nitrogênio, 3) Eficiência de remoção de fósforo, 4) Eficiência de remoção de coliformes, 5) Requisitos de energia, 6) Demanda por Área de Implantação, 7) Custo de implantação, 8) Custo de operação, 9) Quantidade de lodo a ser tratado, 10) Quantidade de lodo a ser disposto, 11) Confiabilidade do sistema, 12) Simplicidade Operacional, 13) Capacidade de resistência à variações de vazão, 14) Capacidade de resistência às variações das características do afluente, 15) Capacidade de resistência à constituintes tóxicos, 16) Interferência decorrente da geração de Odor, 17) Interferência decorrente da Geração de Ruído, 18) Interferência decorrente da Geração de Aerossóis, 19) Possibilidade de atração de Insetos.

Tabela C.5 Índice Sociotécnico e Ranking das tecnologias de tratamento de esgotos – SANTÍSSIMA TRINDADE – Condição 2 e Condição 3

SubSoc	CR	Peso SubSoc	Peso CR	Σ Pesos	Tecnologias de tratamento de esgoto																													
					A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22	A23	A25	A26	A27	A28	A29	A30	A31	A32	A33	A34			
					score do Índice geral referente às tecnologias																													
Ambiental	1	0,31	0,34	0,10	0,4	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,5	0,8	0,8	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9			
	2		0,24	0,07	0,1	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	0,5	0,9	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,1	0,1	0,4	0,4	0,4	0,7	0,7	0,4	0,4	0,4	0,4			
	3		0,25	0,08	0,9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,8	0,3	0,1	0,1	0,1			
	4		0,29	0,09	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,8	0,7	0,7	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,8	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,8	0,2	0,2	0,2			
Tecnológico	5	0,27	0,27	0,07	1,0	1,0	1,0	0,2	0,1	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	0,1	0,1	1,0	1,0	1,0	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0	1,0	0,1	1,0			
	6		0,21	0,06	0,8	0,3	0,4	0,6	0,6	0,3	0,4	0,4	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,4	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7			
	7		0,24	0,06	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1		
	8		0,27	0,07	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2		
	9		0,20	0,05	0,1	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1		
	10		0,22	0,06	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1		
Operação	11	0,23	0,20	0,05	0,9	0,9	0,9	0,9	0,1	0,9	0,9	0,9	0,1	0,1	0,9	0,9	0,1	0,9	0,9	0,9	0,1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9				
	12		0,20	0,05	0,5	0,9	0,9	0,7	0,5	0,9	0,5	0,5	0,7	0,7	0,1	0,2	0,7	0,5	0,9	0,7	0,5	0,1	0,2	0,5	0,1	0,1	0,1	0,5	0,5	0,2	0,5			
	13		0,20	0,05	0,9	0,9	0,9	0,9	0,4	0,9	0,9	0,9	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,9	0,9	0,4	0,4	0,4	0,4	0,9	0,4			
	14		0,21	0,05	0,9	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,6	0,6	0,3	0,3	0,3	0,1	0,3	0,3			
	15		0,12	0,03	0,9	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,1			
Social	16	0,19	0,22	0,04	0,4	0,4	0,9	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,2	0,1	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1				
	17		0,15	0,03	0,2	0,1	0,1	0,9	0,9	0,1	0,7	0,1	0,2	0,2	0,9	0,7	0,2	0,2	0,1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,2	0,2				
	18		0,09	0,02	0,1	0,1	0,1	0,9	0,9	0,1	0,7	0,1	0,1	0,1	0,4	0,1	0,1	0,2	0,1	0,9	0,9	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,1				
	19		0,08	0,02	0,3	0,6	0,6	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,6	0,3	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,6	0,3				
Total	$\Sigma_{wck}=1$	4	$\Sigma_{wi}=1$	0,49	0,48	0,50	0,41	0,35	0,55	0,55	0,51	0,39	0,37	0,35	0,35	0,39	0,42	0,49	0,37	0,33	0,34	0,39	0,42	0,36	0,41	0,42	0,40	0,43	0,34	0,38				
					Ranking 4º 5º 3º 8º 14º 1º 1º 2º 10º 12º 14º 14º 10º 7º 4º 12º 16º 15º 10º 7º 13º 8º 7º 9º 6º 15º 11º																													

Nota: SubSoc – Subsistemas Sociotécnicos, CR – Critérios de seleção em que: 1) Eficiência de Remoção de matéria orgânica, 2) Eficiência de remoção de nitrogênio, 3) Eficiência de remoção de fósforo, 4) Eficiência de remoção de coliformes, 5) Requisitos de energia, 6) Demanda por Área de Implantação, 7) Custo de implantação, 8) Custo de operação, 9) Quantidade de lodo a ser tratado, 10) Quantidade de lodo a ser disposto, 11) Confiabilidade do sistema, 12) Simplicidade Operacional, 13) Capacidade de resistência à variações de vazão, 14) Capacidade de resistência às variações das características do afluente, 15) Capacidade de resistência à constituintes tóxicos, 16) Interferência decorrente da geração de Odor, 17) Interferência decorrente da Geração de Ruído, 18) Interferência decorrente da Geração de Aerossóis, 19) Possibilidade de atração de Insetos.