



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica & Escola de Química
Programa de Engenharia Ambiental

Camilla Carolina Hunt

MODELO MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO APLICADO À SELEÇÃO DE
SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTO PARA PEQUENOS MUNICÍPIOS

Rio de Janeiro
2013

Camilla Carolina Hunt

MODELO MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO APLICADO À SELEÇÃO DE
SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTO PARA PEQUENOS MUNICÍPIOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Fabiana Valéria da Fonseca Araújo

Co-orientador: Estevão Freire

Rio de Janeiro

2013

Hunt, Camilla Carolina.

Modelo Multicritério de Apoio à Decisão Aplicado à Seleção de Sistema de Tratamento de Esgoto para Pequenos Municípios / Camilla Carolina Hunt. - 2013.

118f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2013.

Orientadora: Fabiana Valéria da Fonseca Araújo

Co-orientador: Estevão Freire

1. Apoio Multicritério à Decisão. 2. Teoria da Utilidade Multiatributo. 3. Sistema de Tratamento de Esgoto. I. Araújo, Fabiana Valéria da Fonseca e Freire, Estevão II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de Química. III. Modelo Multicritério de Apoio à Decisão Aplicado à Seleção de Sistema de Tratamento de Esgoto para Pequenos Municípios.

MODELO MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO APLICADO À SELEÇÃO DE
SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTO PARA PEQUENOS MUNICÍPIOS

Camilla Carolina Hunt

Orientadora: Fabiana Valéria da Fonseca Araújo

Co-orientador: Estevão Freire

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada pela banca:

Fabiana Valéria da Fonseca Araújo, D.Sc., EQ/UFRJ

Estevão Freire, D.Sc., EQ/UFRJ

Eduardo Pacheco Jordão, Dr.Eng., COPPE/UFRJ

Camille Ferreira Mannarino, D.Sc., DESMA/UERJ

Luiz Alberto Cesar Teixeira, Ph.D., DEMA/PUC-RJ

Rio de Janeiro

2013

RESUMO

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

A situação do saneamento básico no Brasil é preocupante, principalmente para a população de baixa renda e nas áreas rurais, que possuem cobertura abaixo da média nacional e representam a maioria dos municípios brasileiros. Existem muitas alternativas para o tratamento de esgoto, sendo que as alternativas comumente empregadas são a lagoa facultativa, o reator anaeróbio, a lagoa anaeróbia, o filtro biológico e a lagoa de maturação (IBGE, 2008). A seleção de tecnologias de tratamento de esgoto é uma decisão intrinsecamente complexa, pois envolve incertezas, múltiplos objetivos e critérios, e a participação de muitos atores, sendo que, nestes casos, uma metodologia de Apoio Multicritério à Decisão (AMD) é recomendada (GOMES; GOMES, 2012). Essa dissertação apresenta um sistema para auxiliar a seleção de processos de tratamento de esgoto utilizando o AMD, particularmente a teoria da utilidade multiatributo (na língua inglesa, Multi-attribute Utility Theory - MAUT). Neste sistema, as trinta e duas alternativas consideradas foram separadas em alternativas factíveis e não factíveis, onde as factíveis atendem aos objetivos de tratamento e as restrições de cada tecnologia. Para comparar as alternativas factíveis, utilizou-se o método MAUT e consideraram-se dezenove critérios econômicos, ambientais, sociais e tecnológicos. Os resultados indicam que o sistema poderá auxiliar na escolha de tecnologias de tratamento de esgoto. Verificou-se que, os critérios econômicos e tecnológicos são priorizados no Brasil.

Palavras chaves: Apoio Multicritério à Decisão. Teoria da Utilidade Multiatributo. Sistema de Tratamento de Esgoto.

ABSTRACT

HUNT, Camilla Carolina. **Multicriteria Decision Aid Model for the Selection of Wastewater Treatment Systems for Small Villages**. Rio de Janeiro, 2013. Thesis (Master) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

Most Brazilian communities live in deprived sanitation conditions, particularly in rural areas and in low income states. The sewage treatment alternatives commonly employed in Brazil are: facultative lagoon, Upflow Anaerobic Sludge Blanket, anaerobic lagoon, biological filter and maturation lagoon (IBGE, 2008). The selection of technologies for wastewater treatment is an inherently complex decision. It involves multiple objectives and criteria and requires future projections which are subject to uncertainties and many stakeholders participation in the decision process. In these cases, a methodology for Multicriteria Decision Aid (MCDA) is recommended (GOMES; GOMES, 2012). This thesis presents a system to assist the selection process of sewage treatment for small towns using MCDA, in particular the Multi-attribute Utility Theory (MAUT). With the system, the thirty-three alternatives considered in the study were separated into feasible and not-feasible alternatives, where the feasible alternatives meet the treatment goals and constraints of each technology. The feasible alternatives were then compared, used the MAUT where nineteen criteria were considered from the economic, environmental, social and technological aspects. The results indicate that the decision support system can assist in the choice of wastewater treatment systems. It was verified that the economic and technological criteria are prioritized in Brazil.

Keywords: Multicriteria Decision Aid. Multi-attribute Utility Theory. Sewage Treatment Systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mapa do Brasil com o atendimento de redes de esgoto sanitário.....	13
Figura 2: Esquema da composição físico-química dos esgotos domésticos.....	23
Figura 3: Etapas da digestão anaeróbia.....	28
Figura 4: Fluxograma típico de uma ETE.....	36
Figura 5: Fluxograma para seleção de sistemas de tratamento de esgotos em pequenas comunidades.....	46
Figura 6: Fluxograma para escolha de tratamento de esgoto doméstico.....	47
Figura 7: Mapa do Brasil com a temperatura no inverno e no verão.....	57
Figura 8: Aspectos críticos e importantes na seleção de sistemas de tratamento de esgoto em regiões desenvolvidas e em desenvolvimento.	61
Figura 9: Representação gráfica para o cálculo do valor presente.....	68
Figura 10: Critérios e subcritérios do modelo de decisão.....	72
Gráfico 1: Número de municípios sem rede coletora de esgoto, com rede coletora e sem tratamento de esgoto e, com rede coletora e com tratamento de esgoto por região do Brasil.	15
Gráfico 2: Nível de saneamento para as diferentes camadas de renda da população no país.	16
Gráfico 3: Distribuição de percentagem das soluções alternativas para o esgotamento sanitário nos municípios sem rede coletora de esgoto.....	16
Gráfico 4: Distribuição percentual dos sistemas de tratamento de esgoto utilizados no Brasil.	44
Gráfico 5: Custo total por habitante de acordo com o custo do metro quadrado.....	82
Gráfico 6: Custo total por habitante de acordo com o custo do metro quadrado.....	83
Gráfico 7: Custo total por habitante de acordo com o custo do metro quadrado.....	84
Gráfico 8: Variação dos critérios.	93
Gráfico 9: Análise de sensibilidade.	94
Quadro 1: Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios.	28
Quadro 2: As vantagens e desvantagens da disposição controlada no solo.	34
Quadro 3: Descrição sucinta dos principais sistemas de tratamento de esgotos.....	36
Quadro 4: Trabalhos anteriores de seleção de tecnologia de tratamento de esgoto.....	48
Quadro 5: Sistemas de tratamento de esgotos considerados.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Quantidade de municípios por faixa do tamanho da população.	14
Tabela 2: Características físico-químicas dos esgotos sanitários.	26
Tabela 3: Teores mínimos permissíveis de oxigênio dissolvido em corpos d'água doce.	31
Tabela 4: Padrões de lançamento de efluentes federal e da região sudeste.	33
Tabela 5: Tecnologias indicadas para cidades de pequeno e médio porte.	54
Tabela 6: Faixas de temperatura por tipo de bactéria.	56
Tabela 7: Maior e menor valor dos critérios a serem normalizados.	74
Tabela 8: Função de valor da amônia e do Nitrogênio total.	75
Tabela 9: Função de valor do Fósforo total.	75
Tabela 10: Função de valor da remoção dos Coliformes fecais.	75
Tabela 11: Função de valor dos ovos helmintos.	76
Tabela 12: Conversão de valores dos critérios sociais e tecnológicos.	76
Tabela 13: Modelo da matriz de Decisão.	77
Tabela 14: Parâmetros utilizados na avaliação do modelo para os estudos de caso 1, 2 e 3.	86
Tabela 15: Tecnologias que atenderam aos objetivos e as restrições para os três casos desta pesquisa.	87
Tabela 16: Critérios, subcritérios e pesos.	89
Tabela 17: Valor e ordem das alternativas dos estudos de caso.	90
Tabela 18: Pesos para análise de sensibilidade.	93
Tabela 19: Alternativas com as melhores avaliações.	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i> (Análise Hierárquica de Processos)
Alt.	Alternativa
CETESB	Centro Tecnológico de Saneamento Básico
CGT	<i>Cooperative Game Theory</i> (Teoria dos Jogos Cooperativos)
CMMAD	Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	<i>Compromisse Programming</i> (Programação por Compromisso)
ELECTRE	<i>Elimination et Choix Traduisant la Réalité</i> (Representação da realidade por eliminação e escolha)
Eq.	Equação
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
Hab.	Habitante
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MAUT	<i>Multiattribute Utility Theory</i> (Teoria da Utilidade Multiatributo)
Max.	Máximo
MCD A	<i>MultiCriteria Decision Aid</i> (Apoio Multicritério à Decisão)
MCDM	<i>MultiCriteria Decision Making</i> (Tomada de Decisão com Múltiplos Critérios)
Min.	Mínimo
N.	Normalizado
O&M	Operação e Manutenção
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
PROSAB	Programa de Pesquisas em Saneamento Básico
RAFAALL	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente Através do Leito de Lodo
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i> (Reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente)
UNDP	<i>United Nations Development Programme</i> (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento)
WHO	<i>World Health Organization</i> (Organização Mundial da Saúde)

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Carga orgânica produzida por dia (Kg DBO/dia)
CH ₄	Metano
CF	Coliforme Fecal
CO ₂	Dióxido de carbono
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
m ²	Metro quadrado
N	Nitrogênio
NT	Nitrogênio total
P	Fósforo
PT	Fósforo total
pH	Potencial Hidrogeniônico
SS	Sólidos Suspensos
T	Temperatura

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 APRESENTAÇÃO	10
1.2 OBJETIVOS.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 SITUAÇÃO DO SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL.....	13
2.2 APOIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO (AMD)	17
2.3 ESGOTO DOMÉSTICO	21
2.3.1 Características do esgoto doméstico	22
2.3.2 Operações e processos de tratamento de esgoto	26
2.3.3 Formas de disposição de esgoto	29
2.3.3.1 Lançamento nos corpos d'água	29
2.3.3.2 Disposição no solo	34
2.3.4 Sistemas de tratamento de esgoto	35
2.4 SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO	44
2.4.1 Objetivos do tratamento e fatores restritivos	51
2.4.2 Critérios de decisão	59
3 METODOLOGIA	62
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	62
3.2 FASES DA PESQUISA.....	63
3.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	79
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
4.1 ANÁLISE DOS CUSTOS DAS TECNOLOGIAS.....	81
4.2 ESTUDOS DE CASO	85
5 CONCLUSÃO	96
REFERÊNCIAS	97
GLOSSÁRIO	106
APÊNDICE A - Matriz dos critérios econômicos	108
APÊNDICE B - Matriz dos critérios ambientais: 1º parte	110
APÊNDICE C - Matriz dos critérios ambientais: 2º parte	112
APÊNDICE D - Matriz dos critérios sociais	114
APÊNDICE E - Matriz dos critérios tecnológicos	115
APÊNDICE F - Custos totais por habitante de acordo com o valor do metro quadrado	117

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O principal objetivo do tratamento de esgotos é proteger, de maneira econômica e socialmente aceitável, o meio ambiente e a saúde pública (METCALF; EDDY, 2003). A falta de acesso à água potável e a serviços de saneamento produz situações de vulnerabilidade socioambiental, principalmente em áreas ocupadas por segmentos sociais mais pobres, com consequências sobre a saúde da população, sendo a principal causa de mortalidade infantil nos países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento (IVIG, 2011). Do ponto de vista econômico, são muitos os benefícios do tratamento do esgoto. Um deles é a redução de gastos com a saúde pelo governo, pois metade dos leitos hospitalares nos países em desenvolvimento é ocupado por pessoas que sofrem de doenças associadas à água impura, a falta de saneamento e de higiene. Outros benefícios são a ampliação da capacidade produtiva dos trabalhadores, redução de gastos com medicamentos pelo paciente e a inclusão social de moradores de áreas carentes (UNDP, 2006).

Devido a estas variáveis, um estudo da Organização Mundial de Saúde (OMS) demonstrou um benefício econômico potencial de US\$5 a US\$28 para cada US\$1 investido em saneamento e acesso a água potável em países em desenvolvimento (HUTTON; HALLER, 2004). O Programa de Água e Saneamento do Banco Mundial realizou um outro estudo em cinco países do sudeste Asiático (Camboja, Indonésia, Vietnã, República Democrática Popular do Laos e Filipinas) para avaliar o impacto na economia destes países com a falta de saneamento. Estimou-se uma perda de cerca de US\$9 bilhões por ano, devido à falta de saneamento destes cinco países. Isso representa cerca de 2% do PIB de cada um deles (WHO, 2010).

Apesar do retorno sobre o investimento ser muito atrativo, muitas vezes a água e o saneamento são negligenciados na agenda de desenvolvimento global, mesmo sendo constantemente citados como prioridade pela própria comunidade. No Brasil, apenas 55,2% dos municípios brasileiros possuem serviço de esgotamento sanitário por rede coletora de esgoto, sendo que apenas 68,8% do esgoto coletado é tratado (IBGE, 2008). Além disso, cerca de 75% da população rural (23 milhões de

habitantes) não possui sistemas de tratamento de esgoto ou utilizam apenas a fossa rudimentar, sendo que a população não assistida por este serviço encontra-se nas camadas mais pobres (IBGE, 2009).

Diante deste cenário, é visível a necessidade de um grande investimento em sistemas de tratamento de esgoto. Muitas alternativas tecnológicas estão disponíveis, desde tecnologias mais avançadas a tratamentos convencionais. No entanto, a decisão pela tecnologia de tratamento de esgoto mais adequada é um desafio para muitos administradores e governantes, pois estes, geralmente, não são especialistas nesta área e as decisões devem ser tomadas com base na avaliação de múltiplos objetivos, na participação de múltiplos atores e sob a influência de vários critérios por vezes conflitantes. Além do critério econômico, os requisitos legais e os critérios técnicos, ambientais e sociais também devem ser ponderados.

Por isso, a escolha de um sistema de tratamento de esgotos é considerada uma atividade intrinsecamente complexa, em que se deve escolher, dentre as alternativas possíveis, a mais adequada considerando diversos pontos de vista e as formas de avaliação (KALBAR; KARMAKAR; ASOLEKAR, 2012). Quando os problemas se tornam complexos e quando as consequências de uma escolha podem trazer grandes impactos financeiros, ambientais ou estratégicos, é necessário se tomar decisões com o auxílio de ferramentas que possam classificar, e auxiliar de forma coerente e consistente a tomada de decisão (KIKER et al., 2005).

Em tal contexto, recomenda-se o desenvolvimento de um modelo que desenvolva o entendimento a respeito do contexto decisório para facilitar nas escolhas mais adequadas. A metodologia de Apoio Multicritério à Decisão (AMD) ajuda a retratar as situações complexas pelo uso de modelos que permitam uma melhor compreensão da realidade. O AMD consiste em um conjunto de métodos e técnicas para auxiliar ou apoiar pessoas a tomarem decisões, sob a influência de uma multiplicidade de critérios. Estes métodos atuam sob a forma de auxílio à decisão e buscam representar o mais fielmente possível as preferências do decisor. O AMD procura avaliar matematicamente os critérios, demonstrando a subjetividade de forma transparente, reduzindo as incertezas e integrando os critérios com os objetivos da análise (GOMES; GOMES, 2012).

Por conseguinte, esta pesquisa objetiva criar um sistema para apoiar a escolha de um sistema de tratamento de esgoto empregando o Apoio Multicritério à

Decisão (AMD), utilizando questões não apenas econômicas, como também ambientais, sociais e tecnológicas. Este sistema será um esquema de representação e organização dos elementos primários de avaliação, que possa servir de base à aprendizagem, à investigação, à comunicação e à discussão interativa entre os envolvidos no contexto decisório. Dentro do AMD, utilizou-se a abordagem de critério único de síntese, ou, na língua inglesa, *Multiattribute Utility Theory* (MAUT). Portanto, pretende-se que o sistema proposto seja uma ferramenta útil, podendo permitir que os tomadores da decisão negociem melhor os contratos com os prestadores de serviço na área de saneamento.

Esta dissertação foi dividida em cinco capítulos, dos quais esta introdução é o primeiro deles, que inclui os objetivos gerais e específicos. O capítulo 2 descreve a revisão de literatura existente sobre o tema escolhido. O capítulo 3 apresenta a metodologia do trabalho. No capítulo 4 encontram-se os resultados da pesquisa e, no capítulo 5, as conclusões finais. Na parte final encontram-se as referências bibliográficas, o glossário e o apêndice.

1.2 OBJETIVOS

➤ Objetivo geral

Este estudo tem como objetivo geral desenvolver um sistema para a seleção de tecnologia de tratamento de esgoto, especificamente para pequenos municípios brasileiros.

➤ Objetivos específicos

- Avaliar os custos das tecnologias considerando o investimento, os gastos de operação e manutenção (O&M) e o custo do terreno.
- Comparar as tecnologias de tratamento de esgoto sob os critérios econômico, ambiental, social e tecnológico, com os respectivos pesos aplicados.
- Verificar como as variações introduzidas nos parâmetros característicos do método influenciam os resultados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SITUAÇÃO DO SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL

A atual conjuntura do saneamento básico brasileiro é bastante preocupante, uma vez que existem carências tanto nas áreas rurais como urbanas. Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) de 2008, o contingente populacional sem a cobertura de serviço de esgotamento sanitário no Brasil, considerando-se apenas os municípios sem rede coletora, era de aproximadamente 34,8 milhões de pessoas ou cerca de 18% da população brasileira (IBGE, 2008). É importante ressaltar que a estatística de acesso à rede coletora de esgoto refere-se somente à existência do serviço no município, sem considerar a extensão da rede, a qualidade do atendimento, o número de domicílios atendidos, ou se o esgoto, depois de recolhido, é tratado. A Figura 1 permite visualizar os municípios onde pelo menos um distrito (mesmo que apenas parte dele) possui atendimento de rede de esgoto sanitário no Brasil.

■ Municípios com atendimento de rede de esgoto sanitário



Figura 1: Mapa do Brasil com o atendimento de redes de esgoto sanitário.
Fonte: IBGE (2008)

Nos municípios mais populosos há uma maior presença de rede coletora de esgoto, com cobertura total dos municípios com população superior a 500.000 habitantes. Nos municípios situados na classe de tamanho da população com 100.000 a 500.000 habitantes, o serviço de coleta de esgoto está presente em mais de 90%. Os municípios preponderantemente rurais com até 50.000 habitantes e densidade menor que 80 habitantes por quilômetro quadrado possuem cobertura abaixo da média nacional de 55,2% (IBGE, 2008) e representam 90% dos municípios brasileiros (OLIVEIRA, 2004) (Tabela 1). Um outro dado é que em 45% dos municípios com serviço de esgotamento sanitário por rede coletora não existe cobrança do serviço. Deste percentual, 83% correspondem aos municípios com menos de 50.000 habitantes (IBGE, 2008).

Tabela 1: Quantidade de municípios por faixa do tamanho da população.

Tamanho da população dos municípios	Quantidade de municípios	Quantidade percentual de municípios
Superior a 500.000 habitantes	34	0,5%
De 100.000 a 500.000 habitantes	219	4%
De 50.000 a 100.000 habitantes	309	5,5%
Menos de 50.000 habitantes	4.998	90%

Fonte: Adaptado de Oliveira (2004, p. 100)

Adicionalmente, nem todo esgoto coletado é tratado no Brasil. As diferenças com relação à coleta e ao tratamento de esgotos entre as regiões no Brasil são significativas conforme se pode verificar no Gráfico 1.

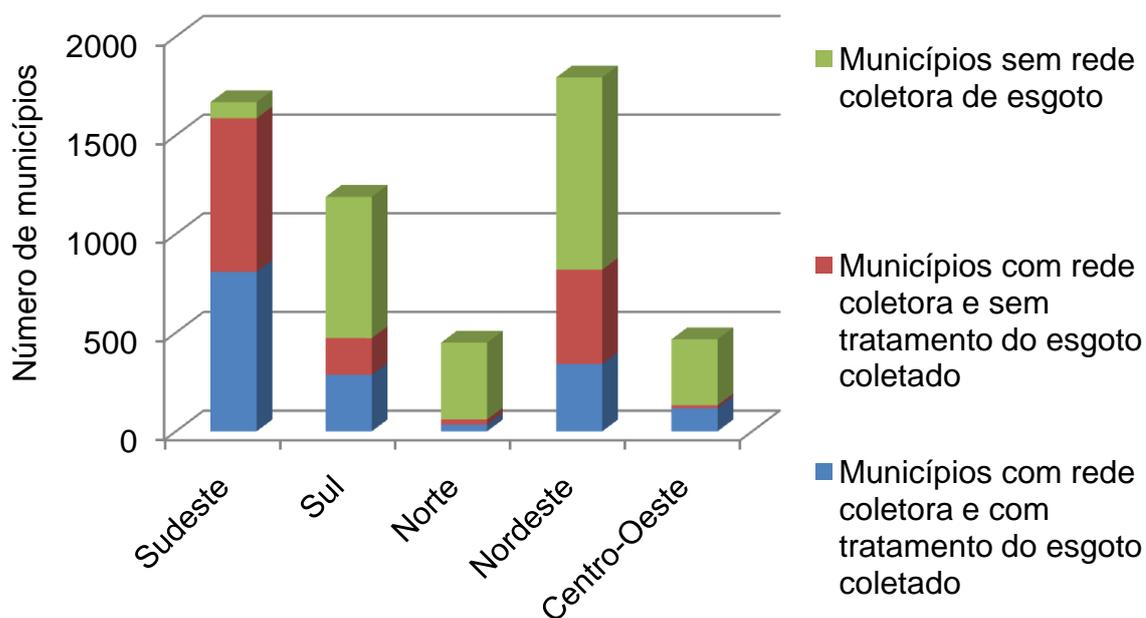


Gráfico 1: Número de municípios sem rede coletora de esgoto, com rede coletora e sem tratamento de esgoto e, com rede coletora e com tratamento de esgoto por região do Brasil.
 Fonte: Elaborado pela autora com os dados do IBGE (2008).

Além da disparidade regional para o atendimento do serviço de esgotamento sanitário, existe também uma grande diferença no atendimento deste serviço nas classes sociais, pois a população não assistida pelo serviço de esgotamento sanitário está nas camadas mais pobres (IBGE, 2009). O Gráfico 2 mostra a diferença entre o nível de saneamento para diferentes camadas de renda da população no país. Neste gráfico, verifica-se que por volta de 15% da população com rendimento de até um salário mínimo possui saneamento adequado a legislação. Em contrapartida, por volta de 50% da população que recebe acima de cinco salários possui saneamento adequado à legislação.

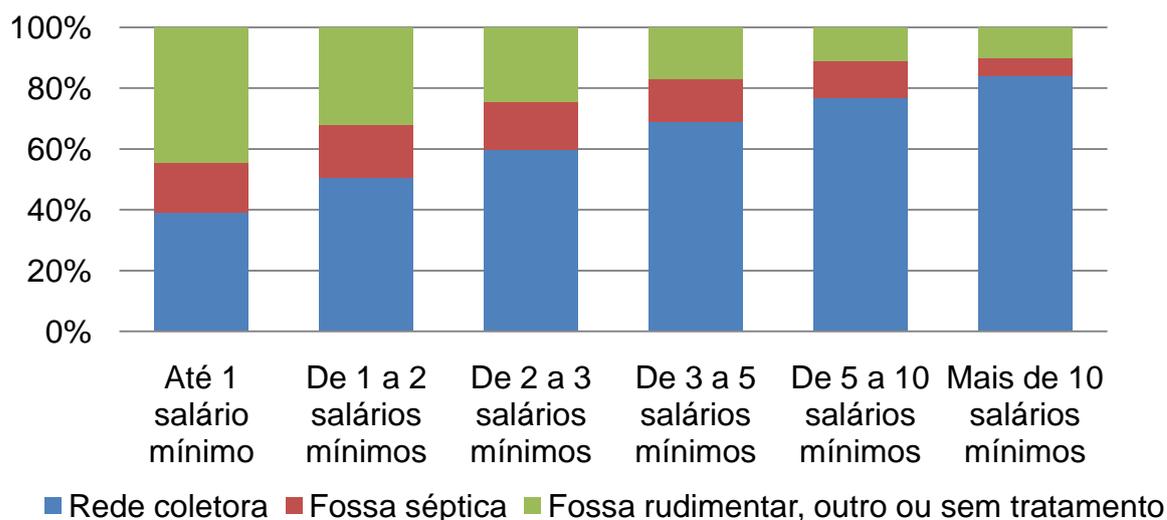


Gráfico 2: Nível de saneamento para as diferentes camadas de renda da população no país.
Fonte: Elaborado pela autora com dados do IBGE (2011)

Caso não haja rede coletora de esgotos, a legislação brasileira determina a utilização de fossas sépticas com sumidouros, com orientação da ABNT NBR 7229/1993 e da ABNT NBR 13.969/1997. Contudo, segundo o IBGE (2008), verifica-se a utilização de soluções alternativas para o tratamento de esgoto que são prejudiciais ao meio ambiente e oferecem um risco para a saúde da população, como as fossas rudimentares, as fossas secas, as valas a céu aberto, o lançamento em corpos d'água, dentre outros (Gráfico 3). Como agravante, uma em cada quatro casas do Estado do Ceará não dispõe de um sanitário ou banheiro ainda nos dias hoje (BOTTO, 2006).

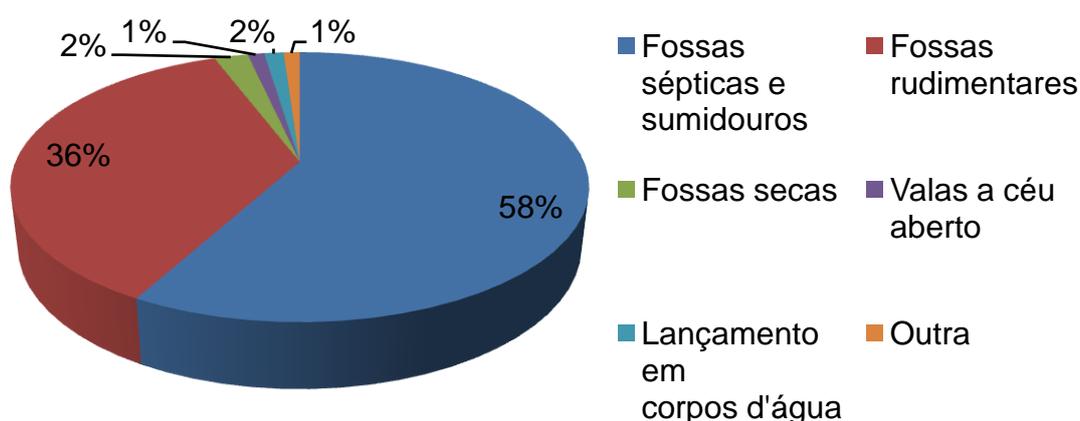


Gráfico 3: Distribuição de percentagem das soluções alternativas para o esgotamento sanitário nos municípios sem rede coletora de esgoto.
Fonte: Elaborado pela autora com os dados do IBGE (2008).

2.2 APOIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO (AMD)

Permanente­mente somos confrontados com situações decisórias tanto no campo profissional quanto na nossa vida particular. A decisão é tomada em um ambiente mutável e não controlável, e com incertezas, imprecisão e ambiguidade. Visando diminuir o grau de incerteza nas decisões, surgiu a teoria da decisão que pode ser definida como um conjunto de procedimentos e métodos de análise que buscam garantir a coerência, a eficácia e a eficiência das decisões, tomadas em função das informações disponíveis, antevendo possíveis cenários (GOMES; GOMES, 2012). O número de ferramentas e métodos de apoio à decisão disponíveis na literatura é bastante alto. Estes métodos variam de técnicas de otimização a abordagens cognitivas, de ferramentas de inteligência artificial a métodos de análise decisória multicriterial, de ferramentas extremamente sofisticadas como argumentação lógica e conjuntos ordenados a ferramentas mais simples (BOUYSSOU et al., 2000).

Nos anos 50, representando as técnicas quantitativas, surgiu a Pesquisa Operacional (PO). A PO é um método científico de tomada de decisões que procura aperfeiçoar as operações existentes e ajudar no processo de decisão, visando fornecer subsídios racionais para a tomada de decisão. Foram desenvolvidos métodos estritamente matemáticos para se encontrar a solução ótima de um problema. Algumas disciplinas dentro da PO são a Programação Linear, a Teoria das Filas, a Simulação, a Programação Dinâmica, a Teoria dos Jogos, dentre outras (GOMES; GOMES, 2012). Em 1974, as técnicas qualitativas sobressaíram-se com os estudos de Herbert Simon, que dividiu a tomada de decisão nas seguintes etapas (CHIAVENATO, 2000, p. 418):

1. Percepção da situação;
2. Análise e definição do problema;
3. Definição dos objetivos;
4. Procura de alternativas de solução;
5. Avaliação e comparação dessas alternativas;
6. Escolha da alternativa mais adequada;
7. Implementação da alternativa escolhida.

Cada etapa teria influência sobre a outra, sugerindo assim o termo “processo decisório”. Segundo esta teoria, as decisões relacionam-se com uma parte da situação ou com apenas alguns aspectos dela porque nem todas as informações estão disponíveis no processo decisório, gerando uma racionalidade limitada. Com

isso, não existem soluções perfeitas e a realização completa dos objetivos visados não é atingida. A alternativa escolhida representa apenas a melhor solução encontrada naquelas circunstâncias e o nível que se pode atingir na consecução de um objetivo nunca é ótimo, mas apenas satisfatório (CHIAVENATO, 2000). Gomes (1999 apud GOMES; GOMES, 2012, p. 33), ao fazer uma revisão bibliográfica sobre processos de decisão em trabalhos de vários autores, propõe a seguinte abordagem para estudo e busca de solução de um problema, denominada “metodologia sintética para abordagem de problemas”, que segue as etapas:

1. Identificação, formulação e análise do problema;
2. Definição de objetivos e preferências;
3. Identificação das restrições e/ou relaxações;
4. Identificar critérios e/ou atributos de decisão;
5. Construção e teste de um modelo para estudo;
6. Realimentação do modelo de estudo;
7. Estabelecimento de medidas de eficácia;
8. Identificação de alternativas que solucionem o problema;
9. Mensuração das consequências das alternativas e do grau que permite alcançar o objetivo;
10. Comparação das alternativas;
11. Escolha(s) da(s) alternativa(s);
12. Implementação;
13. Realimentação.

Por volta dos anos 70, uma série de métodos multicritério foram propostos (ZUFFO, 1998), visando auxiliar no processo de escolher, ordenar ou classificar as alternativas e, diferentemente dos métodos monocritérios da pesquisa operacional tradicional, incorporar múltiplos aspectos neste processo (ENSSLIN; MONTIBELLER NETO; NORONHA, 2001). Quando a escolha de determinada alternativa depende da análise de diferentes pontos de vista, denominados critérios, o problema de decisão é considerado um problema multicritério (GOMES; GOMES, 2012). Normalmente, os critérios utilizados na análise de um conjunto de alternativas são conflitantes. Com isso, é muito difícil uma solução que potencialize todos os “desejos” dos atores simultaneamente (KIKER et al., 2005).

Na abordagem do problema de decisão, pela óptica do Auxílio (ou Apoio) Multicritério à Decisão (AMD), diferentemente da Pesquisa Operacional tradicional, os resultados não podem ser considerados como solução ótima, mas como soluções que atendem aos objetivos e valores dos *stakeholders*. Os resultados obtidos a partir do modelo são apenas recomendações, que podem ser seguidas ou não pelos decisores. O objetivo da modelagem é a geração do conhecimento aos decisores. Assim sendo, o modelo é apenas uma ferramenta útil aos decisores no apoio ao

processo decisório, pois desenvolve o entendimento a respeito de um dado contexto decisório (ENSSLIN; MONTIBELLER NETO; NORONHA, 2001).

Em outras palavras, a AMD não visa apresentar ao agente de decisão solução definitiva para seu problema, elegendo uma única verdade representada pela alternativa selecionada. Essa abordagem visa apoiar o processo decisório com a recomendação de alternativas que estejam em sintonia com as preferências do decisor. Os métodos do AMD procuram esclarecer o processo de decisão, buscando incorporar o julgamento de valores dos atores, ao estabelecer uma relação de preferências entre alternativas que estão sendo avaliadas sob a influência de vários critérios. Entende-se o processo como aprendizagem (GOMES; GOMES, 2012).

O AMD propõe-se à clarificação do problema segundo modelos definidos e claros. Segundo Gomes e Gomes (2012), as vantagens da metodologia AMD são:

- Propiciar uma maior compreensão do problema por ser um método lógico e transparente;
- Possui abordagem mais abrangente e realista dos problemas complexos de decisão, podendo englobar tanto critérios quantitativos como qualitativos;
- Permite a contribuição de vários participantes, tornando o processo decisório mais democrático;
- Facilidade do uso por não especialistas, preferencialmente quando transformada em um programa de computador.

Mundialmente, a AMD tem sido cada vez mais utilizada na busca de soluções para problemas complexos (KIKER et al., 2005; GOMES; GOMES, 2012). Uma decisão é considerada complexa quando envolve incertezas sobre quais os objetivos a serem alcançados, sobre quais alternativas e critérios devem ser considerados e sobre quais os grupos de pessoas envolvidas e atingidas pela decisão. Além disso, situações complexas envolvem vários decisores, cada um com o seu sistema de valores e diferentes níveis de poder, múltiplos objetivos com conflitos de interesses, além de uma enorme quantidade de informações qualitativas e quantitativas, sendo que as informações disponíveis estão usualmente incompletas (ENSSLIN; MONTIBELLER NETO; NORONHA, 2001). Segundo Gomes e Gomes (2012, p. 63), os problemas cuja resolução implicam em um considerável grau de complexidade, possuem pelo menos algumas das características abaixo relacionadas:

- i. os critérios de resolução do problema são em número de, pelo menos, dois e conflitam entre si;
- ii. tanto os critérios como as alternativas de solução não são claramente definidos e as consequências da escolha de dada alternativa com relação a pelo menos um critério não são claramente compreendidas;
- iii. os critérios e as alternativas podem estar interligados, de tal forma que um critério parece refletir parcialmente outro critério, ao passo que a eficácia da escolha de uma dada alternativa depende da outra alternativa ter sido ou não também escolhida, no caso em questão as alternativas não são mutuamente exclusivas;
- iv. a solução do problema depende de um conjunto de pessoas, cada uma das quais tem seu próprio ponto de vista, muitas vezes conflitante com os demais;
- v. as restrições do problema não são bem definidas, podendo mesmo haver alguma dúvida a respeito do que é critério e do que é restrição;
- vi. alguns dos critérios são quantificáveis, ao passo que outros só o são por meio de julgamentos de valor efetuados sobre uma escala;
- vii. a escala para um dado critério pode ser cardinal, verbal, ou ordinal, dependendo dos dados disponíveis e da própria natureza dos critérios.

As duas principais vertentes do AMD são a Tomada de Decisão Multicritério (em inglês, *Multiple Criteria Decision Making* - MCDM) e o Auxílio à Decisão Multicritério (em inglês, *Multiple Criteria Decision Aid* - MCDA), sendo estes da escola americana e francesa, respectivamente (GOMES; GOMES, 2012). A escola americana baseia-se na Teoria da Utilidade Multiatributo e pressupõe que a todo critério pode ser associado um valor que será utilizado no cálculo global de cada alternativa, permitindo a comparação e ordenação destas alternativas. Como extensão desta teoria, em 1976, surgiram o método MAUT (*Multiattribute Utility Theory*) de Ralph Keeney e Howard Raiffa e, em 1977, o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) de Thomas Saaty (GOMES; GOMES, 2012). Estes métodos não admitem a incomparabilidade e baseiam-se nos conceitos de modelagem de preferência tradicional, admitindo apenas duas situações: Preferência Estrita (P) e a Indiferença (I), ambas transitivas (ENLISSIN et al., 2001). O decisor pode escolher somente uma dentre as afirmações abaixo quando comparando duas alternativas:

- “a” é preferível à “b”, a P b
- “b” é preferível à “a”, b P a
- “a” é indiferente à “b”, a I b

A transitividade está presente nesse método da seguinte forma:

- Transitividade da preferência: Se a alternativa “a” é preferível a “b”; e a alternativa “b” é preferível a “c”, então “a” é preferível a “c”.
- Transitividade da indiferença: Se a alternativa “a” é indiferente a “b”; e a alternativa “b” é indiferente a “c”, então “a” é indiferente a “c”.

A Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), método utilizado nesta pesquisa, fundamenta-se no julgamento a partir de uma função de valor multiatributo que é uma modelagem matemática para a expressão dos critérios e dos seus pesos, e de como estes se relacionam para refletir o valor de uma alternativa (DE MONTIS et al., 2004; GOMES; GOMES, 2012). Uma propriedade importante do método MAUT é a possibilidade de compensação entre critérios com a atribuição de pesos, ou a possibilidade de *trade-off*¹ (GOMES, 1998). No capítulo 3, o passo a passo deste método será melhor detalhado.

Na escola francesa não existe uma função de valor ou utilidade. Esta escola introduziu dois novos conceitos a modelagem das preferências, a preferência fraca e a incomparabilidade. Na preferência fraca os argumentos são insuficientes para definir uma relação de indiferença ou uma relação de preferência estrita, definindo, contudo, alguma preferência. A incomparabilidade admite que duas alternativas quaisquer dentre as pertencentes a um processo decisório não podem ser comparadas. Não há a transitividade de preferências ou indiferenças. Os trabalhos pioneiros foram, em 1968, de Bernard Roy com o método ELECTRE (*Elimination Et Choix Traduisant la Réalité*) e, em 1984, de Jean-Pierre Brans, Bertrand Marechal e Philippe Vincke com o método PROMÉTHÉE (*Preference Ranking Organization method for Enrichment Valuations*) (GOMES; GOMES, 2012).

2.3 ESGOTO DOMÉSTICO

Os esgotos domésticos provêm principalmente das residências, edificações comerciais, instituições ou quaisquer edificações que contenham instalações de banheiro, lavanderias e cozinhas, e são compostos principalmente de água, excretas, papel higiênico, restos de comida, sabão e detergentes (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2007). Nos itens subsequentes, serão descritos de forma sucinta as características do esgoto doméstico, a operação e os processos de tratamento de esgoto, as formas de disposição de esgoto, podendo ser nos corpos d'água ou no solo e os sistemas de tratamento de esgoto.

¹ O *trade-off* é o valor de compensação entre dois critérios, ou seja, um grande ganho num critério de menor importância compensa uma pequena perda em um critério de grande importância. Os *trade-offs* permitem deduzir pesos de importância relativa (GOMES; GOMES, 2012).

2.3.1 Características do esgoto doméstico

Para avaliar o potencial poluidor do esgoto, é preferível a utilização de parâmetros indiretos, que definem a qualidade do esgoto. Tais parâmetros podem ser divididos em três categorias: parâmetros biológicos, físicos e químicos (SPERLING, 2005). Com relação às características biológicas, os principais organismos encontrados nos rios e esgotos são as bactérias, os fungos, os protozoários, os vírus, as algas e os grupos de plantas e de animais (JORDÃO; PESSÔA, 2011). As características físicas do esgoto podem ser interpretadas pela obtenção das grandezas correspondentes às seguintes determinações: matéria sólida, temperatura, odor, cor e turbidez. Em termos de dimensionamento e controle de operações das unidades de tratamento, o teor de matéria sólida é o de maior importância, apesar de representar apenas 0,08% dos esgotos e a água compor os restantes 99,92% (JORDÃO; PESSÔA, 2011).

A origem dos esgotos permite classificar as características químicas como provenientes de matéria orgânica e de matéria inorgânica. A matéria inorgânica é formada, principalmente, pela presença de areia e de substâncias minerais dissolvidas e compõe cerca de 30% dos sólidos do esgoto. Os outros 70% são de origem orgânica. Geralmente, os compostos orgânicos são uma combinação de carbono e hidrogênio (em alguns contêm também nitrogênio). Os grupos de substâncias orgânicas nos esgotos são constituídos principalmente por (JORDÃO; PESSÔA, 2011):

- Compostos de proteínas (40% a 60%): contém carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio (em alguns contém fósforo, enxofre e ferro) e são encontrados nos animais e vegetais.
- Carboidratos (25 a 50%): contém carbono, hidrogênio e oxigênio. São as primeiras substâncias a serem destruídas pelas bactérias, produzindo ácidos orgânicos.
- Gordura (10%): É a matéria graxa e óleos provenientes de manteiga, óleos vegetais, carne, etc. As gorduras podem gerar problemas como: aderir às paredes das tubulações, produzindo odores e diminuindo a vazão; formar a “escuma” (camada de matéria flutuante) nos decantadores, que poderá vir a entupir os filtros; interferir e inibir a vida biológica;

- Outros: Uréia, fenóis, pesticidas, surfactantes, etc. Os Surfactantes são constituídos por moléculas orgânicas com propriedades de formar espuma no corpo receptor. O tipo mais comum é o chamado ABS (alquil-benzeno-sulfonato), típico dos detergentes sintéticos e que apresentam resistência à ação biológica. Este tipo de surfactante teve seu uso proibido nos Estados Unidos em 1965, sendo substituído pelos do tipo LAS (alquil-sulfonato-linear) que é biodegradável.

A Figura 2 mostra um esquema simplificado da composição físico-química dos esgotos domésticos.

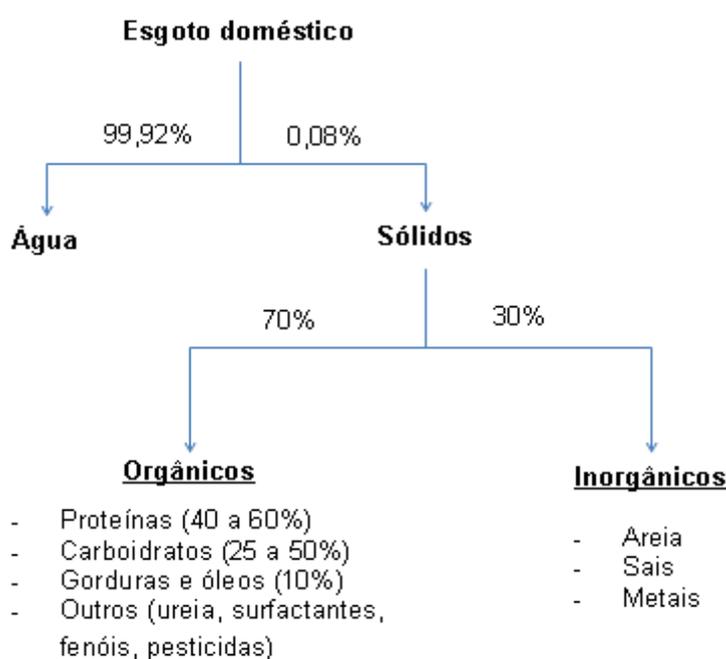


Figura 2: Esquema da composição físico-química dos esgotos domésticos.
Fonte: Elaborado pela autora

Para elaboração de um projeto de sistema de tratamento de efluentes é necessário determinar a qualidade dos esgotos através de análises físicas, químicas e biológicas a fim de se verificar alguns parâmetros. Os principais parâmetros relativos a esgotos domésticos a serem analisados são (SPERLING, 2005):

- Sólidos: Os sólidos podem ser classificados de acordo com o seu tamanho, as suas características químicas e a sua decantabilidade.
- Indicadores de matéria orgânica: Métodos diretos e indiretos podem ser adotados para determinação da matéria orgânica. Um método indireto muito utilizado tanto na legislação ambiental nacional quanto na internacional é a

Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). A DBO mede a quantidade de oxigênio necessária para estabilizar biologicamente a matéria orgânica presente numa amostra, ou seja, representa o teor de matéria orgânica biodegradável presente num efluente, sendo expressa em mg O₂/L. Como o ensaio da DBO é longo, convencionou-se realizá-lo durante cinco dias a uma temperatura de 20°C (DBO₅²⁰). Caso este teste fosse conduzido por um tempo maior, haveria a oxidação completa dos poluentes biodegradáveis presentes na amostra e o valor da DBO seria estável, sendo denominado de DBO última (DBO_u). Quanto maior o grau de poluição orgânica, maior a DBO do corpo d'água. A DBO dos esgotos domésticos varia entre 100 e 400 mg/l.

- c) Nitrogênio: O nitrogênio é um elemento indispensável para o crescimento dos microorganismos responsáveis pelo tratamento de esgotos. Entretanto, o nitrogênio pode gerar poluição através de fenômenos de eutrofização de lagos e represas, do consumo de oxigênio dissolvido e aumento da alcalinidade com a nitrificação, a deterioração da sedimentabilidade do lodo com a desnitrificação, e da geração de toxicidade para os peixes. E também, o Nitrato ingerido por seres humanos pode ocasionar doenças como a metahemoglobinemia. Nos esgotos domésticos brutos, as formas predominantes são o nitrogênio orgânico e a amônia. O parâmetro nitrogênio total é constituído de nitrogênio orgânico, amônia, nitrito e nitrato.
- d) Fósforo: Assim como o nitrogênio, o fósforo é um nutriente essencial para o crescimento dos microorganismos responsáveis pela estabilização da matéria orgânica e, também, para o crescimento de algas podendo conduzir a fenômenos de eutrofização de lagos e represas.
- e) Indicadores de contaminação fecal: Os principais grupos de organismos de interesse do ponto de vista de saúde pública são as bactérias, os vírus, os protozoários e os helmintos. Por estarem em um meio com condições adversas para sua sobrevivência, os agentes patogênicos tendem a decrescer em número, caracterizando o decaimento. Para identificar a existência de possíveis microrganismos patogênicos na água, utiliza-se como indicador a concentração de coliformes, que são bactérias que habitam o intestino humano e de outros animais. Estas bactérias do grupo coliforme não representam um risco para a saúde humana e tendem a morrer depois que os

microrganismos patogênicos, o que faz dos coliformes um bom indicador de adequação sanitária da água. Os ovos helmintos são um parâmetro importante ao se avaliar o uso do efluente tratado para irrigação, no qual os trabalhadores podem ter contato com a água contaminada e os consumidores podem ingerir o alimento cru ou com casca. Por isso, nesta pesquisa, os indicadores de contaminação fecal utilizados nesta pesquisa foram o *coliforme fecal* (CF), ou termotolerantes, e os ovos helmintos.

Geralmente, a produção de esgotos corresponde aproximadamente ao consumo de água. A fração de esgoto que adentra a rede coletora (coeficiente de retorno) pode variar, sendo que um valor frequentemente adotado é o de 80%. A carga afluyente a uma ETE (Estação de Tratamento de Esgoto) corresponde à quantidade de poluente por unidade de tempo. A carga per capita representa a contribuição de cada indivíduo, expressa em termos de massa do poluente, por unidade de tempo. Nos esgotos sanitários, a concentração varia em função da contribuição per capita do poluente, o consumo per capita de água, a presença de despejos industriais e outros. A relação entre concentração, carga e vazão pode ser verificada na Equação 1 (SPERLING, 2005):

$$\text{Concentração} = \text{carga/vazão} \quad (\text{Eq. 1})$$

Em locais com baixo consumo per capita de água, geralmente os esgotos são concentrados, podendo exceder aos valores das faixas típicas do Tabela 2 (SPERLING, 2005).

Tabela 2: Características físico-químicas dos esgotos sanitários.

Parâmetro	Contribuição per capita (g/hab.d)		Concentração		
	Faixa	Típico	Unidade	Faixa	Típico
Sólidos totais	120–220	180	mg/L	700–1350	1100
DBO ₅	40–60	50	mg/L	250–400	300
Nitrogênio total	6,0–10,0	8,0	mgN/L	35–60	45
Fósforo	0,7–2,5	1,0	mgP/L	4–15	7
pH	-	-	-	6,7–8,0	7,0
Alcalinidade	20–40	30	mgCaCO ₃ /L	100–250	200
Metais pesados	≅ 0	≅ 0	mg/L	traços	traços
Compostos orgânicos tóxicos	≅ 0	≅ 0	mg/L	traços	traços

Fonte: Adaptado de Sperling (2005, p. 112)

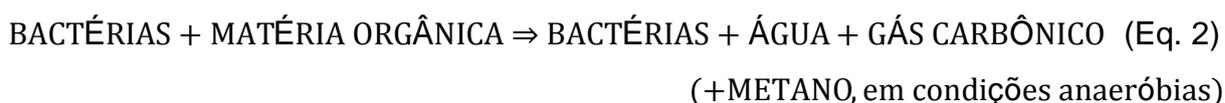
2.3.2 Operações e processos de tratamento de esgoto

Os métodos de tratamento dividem-se em operações e processos unitários, e a integração destes compõe os sistemas de tratamento (SPERLING, 2005). As operações unitárias são usadas para remoção de substâncias indesejáveis ou para a transformação destas substâncias em outras de forma aceitável. As mais importantes operações unitárias empregadas nos sistemas de tratamento de esgoto são: a troca de gás, o gradeamento, a sedimentação, a flotação, a coagulação química, a precipitação química, a filtração, a desinfecção e a oxidação biológica (JORDÃO; PESSÔA, 2011).

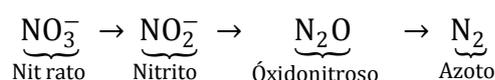
Os processos de tratamento de esgotos podem ser classificados em físicos, químicos e biológicos, sendo definidos em função do fenômeno predominante. Os processos físicos caracterizam-se principalmente nos processos de remoção das substâncias em suspensão no esgoto, que estão fisicamente separadas dos líquidos ou que não se encontram dissolvidas. Com isso, há a remoção de sólidos grosseiros, dos sólidos sedimentáveis e de sólidos flutuantes. Nos processos químicos a remoção ou conversão de contaminantes ocorre pela adição de produtos químicos e são utilizados quando os processos físicos e biológicos não atendem ao objetivo do tratamento, sendo raramente adotados isoladamente (JORDÃO;

PESSÔA, 2011), por resultarem em maiores custos operacionais e menor eficiência na remoção de matéria orgânica biodegradável (REAMI, 2011).

Os processos biológicos dependem da ação dos microrganismos presentes nos esgotos, que utilizam a matéria orgânica biodegradável como alimento, para o seu crescimento e reprodução. A decomposição biológica do material orgânico requer a manutenção de condições ambientais favoráveis, como oxigênio, temperatura, pH, tempo de contato, dentre outros (SPERLING, 2005). Com a presença de oxigênio no ambiente, o metabolismo bacteriano é aeróbio, e, na ausência de oxigênio e de Nitrato, o metabolismo é anaeróbio (PROSAB, 1999). Basicamente, no metabolismo bacteriano, a matéria orgânica é convertida em gás carbônico, água, material celular e, em condições anaeróbias, metano, segundo a Equação 2 (SPERLING, 2005):



O metabolismo anóxico ocorre com a presença de outros compostos, como, por exemplo, o nitrato, o nitrito, o sulfato e o CO₂ (condições anaeróbias). O uso do nitrato como receptor de elétron é denominado de desnitrificação e segue os seguintes passos (SPERLING, 2005):



A digestão anaeróbia é composta por várias reações sequenciais, cada uma com a sua população bacteriana específica. Para a digestão anaeróbia de material orgânico complexo, como proteínas, carboidratos e lipídeos, podem-se distinguir quatro etapas diferentes (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese) cada uma com um produto diferente (Figura 3).

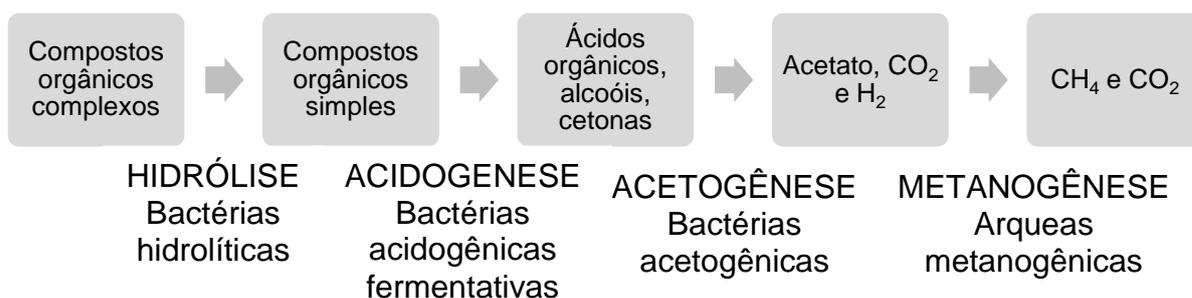


Figura 3: Etapas da digestão anaeróbia.
Fonte: Adaptado de Chernicharo (1997)

Atualmente, os sistemas anaeróbios encontram uma grande aplicabilidade no Brasil. As diversas características favoráveis destes sistemas, como o baixo custo, simplicidade operacional e baixa produção de sólidos, aliadas às condições ambientais no Brasil, onde há a predominância de elevadas temperaturas, têm contribuído para a colocação dos sistemas anaeróbios de tratamento de esgotos em posição de destaque, particularmente os reatores de manta de lodo ou reatores UASB (PROSAB, 2006). O Quadro 1 apresenta as principais vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios em relação aos processos aeróbios.

Quadro 1: Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios (continua).

Vantagens
❖ produção de lodo cerca de 5 a 10 vezes menor que os processos aeróbios;
❖ baixo consumo de energia, usualmente associado a uma elevatória de chegada;
❖ baixa demanda de área;
❖ baixos custos de implantação;
❖ produção de metano;
❖ possibilidade de preservação da biomassa, sem alimentação do reator, por vários meses;
❖ tolerância a elevadas cargas orgânicas;
❖ aplicabilidade em pequena e grande escala;
❖ baixo consumo de nutrientes.

Quadro 1: Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios (conclusão)

Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ❖ as bactérias anaeróbias são susceptíveis a inibição por um grande número de compostos; ❖ a partida do processo pode ser lenta, na ausência de lodo de semente adaptado; ❖ o pós-tratamento é geralmente necessário; ❖ a bioquímica e microbiologia da digestão anaeróbia são complexas e ainda precisam ser mais estudadas; ❖ possibilidade de geração de maus odores, porém controláveis; ❖ possibilidade de geração de efluentes com aspecto desagradável; ❖ remoção de nitrogênio, fósforo e patógenos insatisfatória.

Fonte: Adaptado de CHERNICHARO (1997, p. 17)

2.3.3 Formas de disposição de esgoto

A disposição de esgotos brutos no solo ou corpos receptores naturais, como lagoas, rios e oceanos, é uma alternativa ainda muito empregada. Dependendo da carga orgânica lançada, os esgotos podem provocar a degradação do ambiente ou, através da autodepuração, o ecossistema decompõe os contaminantes, não causando grandes danos. Os processos de tratamento de esgoto buscam aumentar a eficiência na redução da carga orgânica, utilizando um tempo e espaço inferiores em relação ao que se espera que ocorra no ambiente natural (SPERLING, 2005). Os itens a seguir detalham as formas de disposição nos corpos d'água e no solo.

2.3.3.1 Lançamento nos corpos d'água

O lançamento de esgoto bruto nos corpos receptores pode acarretar sérios problemas à vida aquática, alterando as suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Três importantes inconvenientes da poluição das águas causada por esgotos domésticos são os agentes patogênicos, a eutrofização e o consumo do oxigênio dissolvido. O lançamento de um efluente com agentes transmissores de doenças em um corpo d'água pode afetar os seus usos preponderantes, tais como o abastecimento de água potável, a irrigação e a balneabilidade (SPERLING, 2005).

A eutrofização é o crescimento excessivo das plantas aquáticas especialmente em lagos e represas devido à baixa turbidez e velocidade destes corpos d'água. Este fenômeno é consequência do lançamento de efluentes ricos em nutrientes, principalmente o nitrogênio e o fósforo. A eutrofização interfere nos usos desejáveis dos corpos d'água, pois diminui o uso da água para recreação e balneabilidade, ocasiona eventual mortandade de peixe, eleva os custos de tratamento da água, dentre outros (SPERLING, 2005).

A autodepuração dos cursos d'água é o restabelecimento do equilíbrio no meio aquático, onde os compostos orgânicos são convertidos em compostos estáveis (estabilização da matéria orgânica), como gás carbônico e água, e não prejudiciais do ponto de vista ecológico. As bactérias decompositoras consomem o oxigênio dissolvido do meio aquático para estabilizar a matéria orgânica (SPERLING, 2005). Os rios mais velozes apresentam maior turbulência, e, com isso, maior capacidade de mistura e de depuração dos efluentes lançados (JORDÃO; PESSÔA, 2011). Com isso, como repercussão da poluição de um corpo d'água por matéria orgânica, há a queda dos níveis de oxigênio dissolvido, que podem impactar toda a comunidade aquática.

Desta forma, o grau de tratamento de esgoto necessário será sempre função do corpo receptor, das características de uso da água a jusante do ponto de lançamento, de sua capacidade de autodepuração, e das características e condições dos despejos (JORDÃO; PESSÔA, 2011). A legislação que estabelece os padrões ambientais permitidos para o lançamento de efluentes é a Resolução CONAMA nº 430, de 2011, que complementou e alterou recentemente a Resolução CONAMA nº 357, de 2005, a qual regulamentava estes padrões anteriormente. A Resolução CONAMA nº 357 divide as águas do território nacional em águas doces, salobras e salinas. Em função dos usos previstos, há 13 classes, onde cada uma corresponde uma determinada qualidade a ser mantida no corpo d'água. Por exemplo, para os corpos de água doce, os teores mínimos de oxigênio dissolvido a serem mantidos nos corpos d'água variam em função da classe em que o corpo d'água está classificado (SPERLING, 2005), conforme se pode verificar na Tabela 3.

Tabela 3: Teores mínimos permissíveis de oxigênio dissolvido em corpos d'água doce.

Classe	OD mínimo (mg/L)
Especial	Não são permitidos lançamentos, mesmo tratados.
1	6,0
2	5,0
3	4,0
4	2,0

Fonte: Adaptado de Resolução CONAMA 357 (2005) apud SPERLING (2005)

A capacidade de suporte do corpo receptor é o valor máximo de determinado poluente que o corpo hídrico pode receber, sem comprometer a qualidade da água e seus usos determinados pela classe de enquadramento (Resolução CONAMA nº 430). A Resolução CONAMA nº 430 determina que os efluentes poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores somente após o devido tratamento e desde que obedçam às exigências legais, não podendo exceder as condições e padrões de qualidade de água estabelecidos para as respectivas classes. Nas águas de classe especial é vedado o lançamento de efluentes de quaisquer fontes poluentes, mesmo que tratados (CONAMA 403).

Segundo a Resolução CONAMA 430, Art. 21, I, para o lançamento direto de efluentes oriundos de sistemas de tratamento de esgotos sanitários deverão ser obedecidas às seguintes condições e padrões específicos (BRASIL, 2011):

- a) pH entre 5 e 9;
- b) 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;
- c) materiais sedimentáveis: até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone Imhoff. Para o lançamento em lagos e lagoas, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes;
- d) Demanda Bioquímica de Oxigênio- DBO 5 dias, 20°C: máximo de 120 mg/L, sendo que este limite somente poderá ser ultrapassado no caso de efluente de sistema de tratamento com eficiência de remoção mínima de 60% de DBO, ou mediante estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor.
- e) substâncias solúveis em hexano (óleos e graxas) até 100 mg/L;
- f) ausência de materiais flutuantes.

O padrão de lançamento de efluente é necessário porque é difícil manter o controle efetivo das fontes poluidoras com base apenas na qualidade do corpo receptor. Entretanto, o atendimento aos padrões de lançamento deve garantir também o atendimento aos padrões do corpo receptor. Duas situações podem ocorrer (SPERLING, 2005, p. 236):

1. Caso o efluente satisfaça os padrões de lançamento, mas não satisfaça os padrões do corpo receptor, as características do lançamento deverão ser tais que, necessariamente, atendam ao padrão do corpo receptor.
2. Caso o efluente não satisfaça os padrões de lançamento, mas satisfaça os padrões do corpo receptor, o órgão ambiental poderá autorizar lançamentos com valores acima dos padrões de lançamento.

Cabe ressaltar que, as legislações estaduais e municipais também devem ser sempre consultadas, pois podem eventualmente ser mais restritivas que a legislação nacional, bem como incluir padrões de lançamento para determinados constituintes não abrangidos na legislação federal. Em uma compilação das legislações estaduais e a CONAMA 430/2011 com o lançamento de efluentes da região sudeste, os seguintes parâmetros foram levantados (Tabela 4): Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Sólidos em Suspensão Totais (SST), Fósforo e Nitrogênios Totais (P-t e N-t, respectivamente). Nestas legislações não houve menção aos índices de remoção de Coliformes Fecais (CF). No estado do Rio de Janeiro as exigências estabelecidas são função das cargas orgânicas brutas geradas, onde, quanto menor for a geração de carga orgânica, menor será a eficiência de remoção requerida e maior será a concentração admissível no efluente (VEROLA; VOLSCHAN, 2007).

Tabela 4: Padrões de lançamento de efluentes federal e da região sudeste.

Estado	Legislação	Concentrações exigidas nos efluentes					% remoção		
		DQO	DBO	SST	N	P	DBO	SST	DQO
RJ	Norma Técnica FEEMA NT 202.R10 e Diretriz FEEMA DZ 215.R4	-	180 (C < 5) ⁽¹⁾ 100 (5 < C < 25) 60 (25 < C < 80) 40 (C > 80)	180 (C < 5) ⁽¹⁾ 100 (5 < C < 25) 60 (25 < C < 80) 40 (C > 80)	10 ⁽²⁾	1 ⁽²⁾	30 (C < 5) ⁽¹⁾ 65 (5 < C < 25) 80 (25 < C < 80) 85 (C > 80)	-	-
MG	Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG N.º 1, de 05 de Maio de 2008	180	60	100 150 ⁽³⁾	20 ⁽⁴⁾	-	60 ⁽⁵⁾	-	55% ⁽⁶⁾
SP	Decreto Estadual 8.468 de 08/09/1976	-	60	-	-	-	80	-	-
ES	COMDEMA 02/1991 (Legislação do município de Vitória)	200	-	100	-	-	90	-	-
BRASIL	CONAMA 430/2011	-	120	-	-	-	60%	-	-

(1) Variável de acordo com a carga orgânica diária bruta (kgDBO/dia)

(2) Lançamentos em corpos hídricos contribuintes de lagoas ou lagunas ou estuários

(3) Nos casos de lagoas de estabilização

(4) Nitrogênio Amoniacal

(5) Média anual igual ou superior a 70%

(6) Média anual igual ou superior a 65%

Fonte: Adaptado de Verola e Volschan (2007); FEEMA (1986), FEEMA (2007), COPAM e CERH-MG (2008), SÃO PAULO (1976), BRASIL (2011).

2.3.3.2 Disposição no solo

A aplicação de esgotos no solo pode ser considerada uma forma de disposição final e/ou de tratamento, onde vários mecanismos de ordem física (sedimentação, filtração, radiação, volatilização, desidratação), química (oxidação e reações químicas, precipitação, adsorção, troca iônica e complexação) e biológica (biodegradação e predação) atuam na remoção dos poluentes no solo. A assimilação de compostos orgânicos complexos pelo solo varia conforme as condições climáticas e as propriedades deste, como a boa aeração, a taxa de infiltração e os tipos de cobertura vegetal. Quase todos os tipos de solos são eficientes na remoção de material orgânico das águas residuárias. A remoção resulta da ação filtrante do solo seguida pela oxidação biológica do material orgânico. Os mecanismos de adsorção, precipitação e troca iônica, que também reterão os constituintes da água residuárias, ocorrem nos solos argilosos ou solos com uma considerável quantidade de matéria orgânica (SPERLING, 2005). O Quadro 2 apresenta as vantagens e as desvantagens da disposição controlada no solo são (ANDRADE NETO, 1997):

Quadro 2: As vantagens e desvantagens da disposição controlada no solo.

Vantagens
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Alto potencial produtivo, ❖ Custos subsidiados pela atividade produtiva, ❖ Não gera efluentes ou o efluente gerado apresenta boa segurança sanitária e alta remoção de nutrientes e matéria orgânica, como é o caso do escoamento superficial, ❖ Não produz lodo a ser disposto, ❖ Construção simples.
Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Necessita de grandes áreas para implantação, ❖ Requer operação cuidadosa e constante, ❖ Sofre influência das chuvas, ❖ Risco de maus odores e proliferação de insetos.

Fonte: Adaptado de ANDRADE NETO (1997)

A disposição de efluentes no solo, mesmo tratados, não está sujeita aos parâmetros e padrões de lançamento dispostos da Resolução CONAMA nº 403 e não há uma Resolução que dispõe de parâmetros e padrões de lançamento (SPERLING, 2005). Caso o solo apresente boas condições de infiltração e o nível do lençol de água subterrânea encontre-se a uma profundidade que garanta a não contaminação do mesmo, esta prática é uma forma bem sucedida de tratamento e disposição final de efluentes (BRASIL, 2011).

2.3.4 Sistemas de tratamento de esgoto

O tratamento de esgotos é frequentemente classificado através dos níveis preliminar, primário, secundário e terciário. No tratamento preliminar, os mecanismos básicos são de ordem física. A remoção de sólidos grosseiros é feita por meio de grades, peneiras ou trituradores. A remoção de areia é feita através dos desarenadores (caixas de areia), por sedimentação. Além de unidades de sólidos grosseiros, inclui-se também uma unidade para medição da vazão. O tratamento primário destina-se, por meio de mecanismos de ordem física, à remoção de sólidos flutuantes e à remoção de sólidos em suspensão sedimentáveis e, em decorrência, parte da DBO em suspensão associada à matéria orgânica componente dos sólidos em suspensão sedimentáveis (SPERLING, 2005).

No tratamento secundário, onde predominam os mecanismos biológicos, há a remoção da DBO solúvel associada à matéria orgânica na forma de sólidos dissolvidos. Caso seja precedido pelo tratamento primário, há também a remoção da DBO em suspensão finamente particulada associada à matéria orgânica em suspensão não sedimentável e, caso contrário, há a remoção da DBO em suspensão associada à matéria orgânica em suspensão. Por fim, o tratamento terciário, de ordem biológica e química, objetiva-se a remoção de nutrientes, organismos patogênicos, compostos não biodegradáveis, metais pesados, sólidos inorgânicos dissolvidos e sólidos em suspensão remanescentes (SPERLING, 2005).

Os tratamentos primário, secundário e terciário produzem lodo e gases, que devem ser dispostos de forma adequada para evitar que o tratamento não cause outros impactos em sua disposição final. O lodo deve ser adensado, digerido, secado e disposto (PROSAB, 1999). A quantidade de produção de lodo varia de

acordo com o sistema de tratamento. O volume de lodo gerado em uma ETE representa cerca de 1 a 2% do volume de esgoto tratado, entretanto o custo do tratamento e de disposição final do lodo pode chegar a atingir entre 30 a 50% do custo operacional da ETE (SANEPAR, 1999). O fluxograma típico de uma ETE pode ser observado na Figura 4:

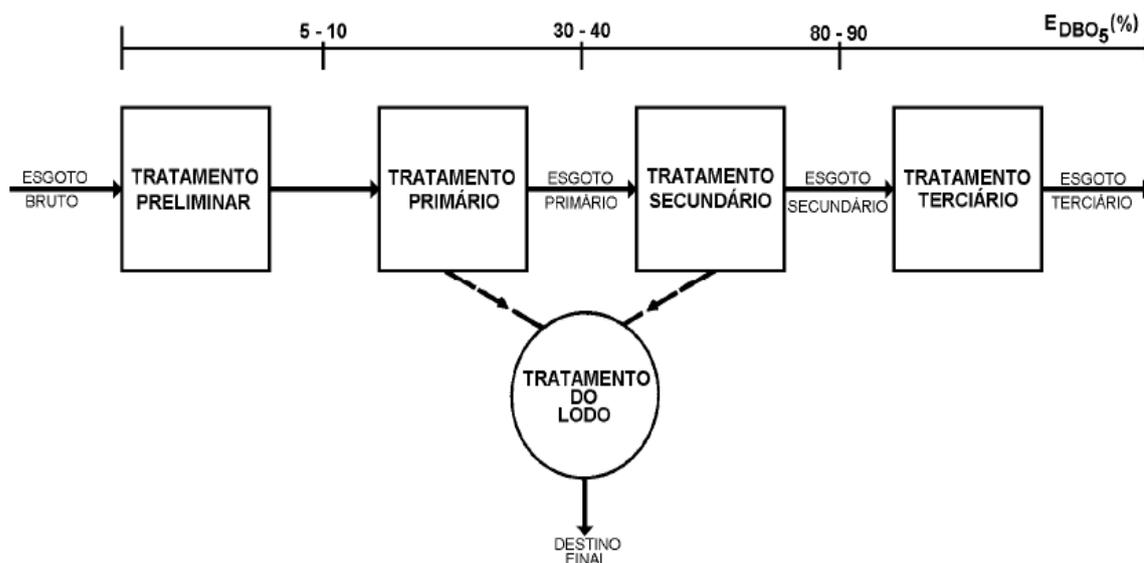


Figura 4: Fluxograma típico de uma ETE.
Fonte: Aisse (2000) apud Pacheco (2011)

Os sistemas existentes podem ser classificados em tecnologias de sistemas simplificados ou mecanizados e processos aeróbios ou anaeróbios. O Quadro 3 representa os sistemas de tratamento, divididos em cinco grandes grupos, onde se descreveu sucintamente os sistemas de tratamento de esgotos mais comuns destes grupos.

Quadro 3: Descrição sucinta dos principais sistemas de tratamento de esgotos (continua).

Disposição controlada no solo
Terras úmidas construídas (banhados artificiais)
Processo de tratamento de esgoto que consiste de lagoas ou canais rasos, que abrigam plantas aquáticas, e que se baseiam em mecanismos biológicos, químicos e físicos para tratar o esgoto. As terras úmidas artificiais não funcionam bem no tratamento de esgoto bruto, sendo que, alguma forma de tratamento primário e secundário deve ser realizado antes deste processo.

Quadro 3: Descrição sucinta dos principais sistemas de tratamento de esgotos (continuação)

Infiltração rápida (alta taxa ou infiltração-percolação)
No sistema de infiltração rápida, as águas são dispostas em “tabuleiros” rasos e sem revestimento, onde a água percola verticalmente pelo solo, que funciona como um filtro, purificando a água que recarrega as águas subterrâneas. O crescimento da vegetação poderá ou não ocorrer, não interferindo na eficiência do processo.
Infiltração subsuperficial
A diferença do sistema de infiltração subsuperficial para o da infiltração-percolação é que a aplicação não é feita por inundação sobre a superfície do solo, mas por formas de condução e aplicação abaixo do nível do solo. Exemplos de sistemas de infiltração subsuperficial são as valas de filtração e os sumidouros.
Escoamento superficial
No escoamento superficial, enquanto o efluente percola por um terreno inclinado, grande parte evapora, uma menor parte infiltra no solo e o restante é coletado em canais. Os solos indicados são de baixa permeabilidade e requer declividade do terreno entre 2 a 8%. O uso de culturas em crescimento aumenta a taxa de absorção dos nutrientes, a perda de água por transpiração, a retenção de sólidos em suspensão e evita a erosão.
Infiltração lenta
Este sistema pode ser classificado de dois tipos: sistema de infiltração lenta e sistema de irrigação de culturas. No sistema de infiltração lenta, o principal objetivo é o tratamento de esgotos, onde os sistemas são projetados para maximizar a quantidade de esgotos aplicados por unidade de área. No sistema de irrigação de culturas, a ideia é aproveitar os efluentes tratados para irrigar lavouras, uma tecnologia já utilizada em diversos países. A utilização de esgotos tratados na agricultura representa uma economia de água no setor agrícola e funciona como um adubo orgânico, podendo substituir parte da adubação mineral, gerando economia para os agricultores. O reúso agrícola alia impacto ambiental positivo e redução de custo quando é realizado dentro de critérios seguros. É a solução mais correta ambientalmente, pois promove o retorno dos nutrientes ao solo, colaborando para o fechamento no ciclo dos elementos.

Quadro 3: Descrição sucinta dos principais sistemas de tratamento de esgotos (continuação)

Lagoas de estabilização
Lagoa facultativa
<p>Parte da DBO particulada tende a sedimentar formando o lodo de fundo, que sofre decomposição por microorganismos anaeróbios. A DBO solúvel e finamente particulada não sedimenta e é estabilizada por bactérias facultativas dispersas no meio líquido. O oxigênio requerido é fornecido pelas algas, através da fotossíntese. Por esta razão, busca-se locais com elevada radiação solar e baixa nebulosidade.</p>
Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa
<p>A remoção de DBO é da ordem de 50 a 70% na lagoa anaeróbia (mais profunda e com menor volume), enquanto a DBO remanescente é removida na lagoa facultativa. O sistema ocupa uma área inferior ao de uma lagoa facultativa única.</p>
Lagoa aerada facultativa
<p>Os mecanismos de remoção da DBO são similares aos de uma lagoa facultativa. No entanto, o oxigênio é fornecido por aeradores mecânicos, ao invés da fotossíntese, fazendo com que a decomposição da matéria orgânica seja mais rápida e o requisito de área seja menor. Uma grande parte dos sólidos do esgoto e da biomassa sedimenta, formando o lodo de fundo, a ser decomposto anaerobiamente.</p>
Lagoa aerada de mistura completa - lagoa decantação
<p>O nível de aeração é elevado, o que faz com que os sólidos permaneçam dispersos no meio líquido, ou em mistura completa. A decorrente maior concentração de bactérias no meio líquido e o maior contato entre a matéria orgânica e as bactérias, aumenta a eficiência do sistema na remoção de DBO, o que permite que a lagoa tenha um volume inferior ao de uma lagoa aerada facultativa. No entanto, os efluentes contém elevados teores de sólidos (bactérias) e a lagoa de decantação a jusante proporciona condições para a remoção. A área requerida é a menor dentre os sistemas de lagoas, no entanto, o período de armazenagem do lodo também é menor, o que é ruim porque a remoção do lodo é uma tarefa laboriosa e cara.</p>

Quadro 3: Descrição sucinta dos principais sistemas de tratamento de esgotos (continuação)

Lagoas de alta taxa
Em um ambiente totalmente aeróbio, busca-se maximizar a produção de algas com uma profundidade reduzida para garantir a penetração de energia luminosa em toda massa líquida. As altas concentrações de oxigênio dissolvido e a elevação do pH contribuem para o aumento na taxa de mortalidade de microorganismos patogênicos e para a remoção de nutrientes.
Lagoa de maturação
As lagoas de maturação possibilitam um polimento no efluente de qualquer sistema de tratamento de esgotos, sendo usualmente projetadas como uma série de lagoas, ou como uma lagoa única com divisões por chicanas. O objetivo principal é a remoção de patogênicos, através de mecanismos associados a baixa profundidade da lagoa, como: a radiação solar, elevado pH, elevada concentração de OD. A eficiência na remoção de coliformes é bastante elevada e usualmente atingem remoção total de ovos helmintos. As lagoas que recebem o efluente de reatores anaeróbios tem sido designadas de lagoas de polimento, para diferenciar as concepções clássicas das lagoas facultativas e de maturação.
Sistemas anaeróbios
Tanque séptico
Neste reator uma parcela dos sólidos presentes nos esgotos sedimenta, compõe o lodo de fundo e é submetida à decomposição por microorganismos anaeróbios que degradam a matéria orgânica. Auxiliada pelas bolhas de gás produzidas pelo metabolismo microbiano anaeróbio que ocorre neste reator, outra parcela dos sólidos “flota” até a superfície formando uma espuma.
Filtro anaeróbio
O sistema requer decantação primária, frequentemente os tanques sépticos, tendo sido amplamente utilizado no meio rural e em comunidades de pequeno porte. A DBO é convertida anaerobiamente por bactérias aderidas a um meio suporte no reator. O tanque trabalha submerso, e o fluxo é ascendente. A produção de lodo é baixa, e o lodo já sai estabilizado.

Quadro 3: Descrição sucinta dos principais sistemas de tratamento de esgotos (continuação)

Reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB)
<p>O fluxo do líquido é ascendente e a DBO é convertida anaerobiamente por bactérias dispersas no reator. A parte superior do reator possui um separador trifásico, separando o líquido, os sólidos e os gases (principalmente metano e gás carbônico). Os sólidos sedimentam, retendo grande parte da biomassa no sistema, o que permite saída de um efluente relativamente clarificado. A produção de lodo é baixa, e o lodo já sai adensado e estabilizado.</p>
Lodos ativados
Lodos ativados convencional
<p>A etapa biológica corresponde ao reator biológico (tanque de aeração) e ao decantador secundário. A montante do reator há uma unidade de decantação primária, de forma a remover os sólidos sedimentáveis do esgoto bruto. A concentração de biomassa no reator é bastante elevada, devido à recirculação dos sólidos sedimentados no fundo do decantador secundário. A aeração é responsável, não apenas pela introdução de oxigênio, mas pela manutenção da biomassa em suspensão e pela sua mistura em todo tanque. Há a necessidade da remoção do lodo biológico excedente, que pode ser extraído do reator ou da linha de recirculação. Este lodo removido necessita de uma estabilização na etapa de tratamento de lodo. O fornecimento de oxigênio é feito por aeradores, mecânicos ou por ar difuso. Este sistema ocupa áreas reduzidas e tem elevadas eficiências de remoção.</p>
Lodos ativados por aeração prolongada
<p>Este sistema é similar ao sistema de lodos ativados convencional, com a diferença de que a biomassa permanece por mais tempo no sistema. Com isto, há menos substrato disponível para as bactérias, o que faz com que elas se utilizem da matéria orgânica do próprio material celular para sua manutenção. Em decorrência, o lodo excedente retirado já sai estabilizado. Para evitar a necessidade de se estabilizar o lodo primário, usualmente não incluem unidades de decantação primária, dispensando, assim, unidades de digestão do lodo. É um dos processos de tratamento de esgotos mais eficientes na remoção de DBO.</p>

Quadro 3: Descrição sucinta dos principais sistemas de tratamento de esgotos (continuação)

Lodos ativados de fluxo intermitente (batelada)
<p>Todas as unidades, processos e operações associados ao tratamento convencional de lodos ativados (decantação primária, oxidação biológica, decantação secundária e bombeamento do lodo) ocorrem em um mesmo tanque e a operação do sistema é intermitente. Assim, no mesmo reator ocorrem, em fases diferentes, as etapas de reação (aeradores ligados), e sedimentação (aeradores desligados). Após a sedimentação dos sólidos, com os aeradores desligados, se retira o efluente. Ao se religar os aeradores, os sólidos sedimentados retornam à massa líquida, o que dispensa as elevatórias de recirculação. Pode ser na modalidade convencional ou aeração prolongada.</p>
Lodos ativados com remoção biológica de nitrogênio
<p>A remoção biológica de nitrogênio é alcançada em condições de ausência de oxigênio, mas na presença de nitratos. Os nitratos formados pela nitrificação que ocorre na zona aeróbia são utilizados na respiração de microorganismos facultativos nas zonas anóxicas, sendo reduzidos a nitrogênio gasoso (desnitrificação), o qual escapa para a atmosfera.</p>
Lodos ativados com remoção biológica de nitrogênio e fósforo
<p>Além das zonas aeróbias e anóxicas, o reator biológico incorpora ainda uma zona anaeróbia, que é considerada um seletor biológico para os microorganismos acumuladores de fósforo. Estes microorganismos absorvem o fósforo do meio líquido, em quantidades bem superiores às que seriam normalmente necessárias para seu metabolismo. É essencial que, nestes sistemas, os teores de sólidos suspensos no efluente final sejam baixos porque a biomassa contém teores elevados de fósforo, os quais foram retirados da massa líquida. Além disso, a retirada do lodo excedente também implica na retirada de fósforo do reator biológico.</p>

Quadro 3: Descrição sucinta dos principais sistemas de tratamento de esgotos (continuação)

Reatores aeróbios com biofilme
Filtros biológicos percoladores de baixa carga
<p>Nos reatores com biofilme a biomassa cresce aderida a um meio suporte, como pedras, brita, escória de alto-forno, ripas ou material plástico. O esgoto é aplicado na superfície do tanque através de distribuidores rotativos. O líquido percola pelo tanque, saindo pelo fundo, ao passo que a matéria orgânica fica retida, sendo posteriormente estabilizada aerobiamente pelas bactérias. No sistema de baixa carga há pouca disponibilidade de DBO para as bactérias, o que faz com que estas sofram uma autodigestão, saindo estabilizadas do sistema. Por isso, não há a necessidade de que o lodo passe por digestores de lodo, necessitando apenas ser desidratado. As placas de bactérias que se despregam das pedras são removidas no decantador secundário. O sistema necessita de decantação primária.</p>
Filtro biológicos percoladores de alta carga
<p>Similar ao sistema de filtros de baixa carga, com a diferença de que a carga de DBO aplicada é maior e o efluente do decantador secundário é recirculado para o filtro. Com o aumento de carga, os requisitos de área e a eficiência de remoção da DBO são menores e o lodo não é digerido no filtro. Com isso, o tratamento do lodo deve incluir, não apenas a remoção da umidade (adensamento e desidratação), mas também a digestão. Os objetivos da recirculação são: manter a vazão uniforme, equilibrar a carga afluyente, possibilitar um novo contato da matéria orgânica efluente com as bactérias e trazer oxigênio dissolvido para o líquido afluyente.</p>

Quadro 3: Descrição sucinta dos principais sistemas de tratamento de esgotos (conclusão)

Biofiltro aerado submerso
<p>O biofiltro aerado submerso é um reator trifásico composta por fases sólidas, líquidas e gasosas. O reator é constituído por um tanque preenchido com um material poroso, através do qual esgoto e ar fluem permanentemente. O fluxo de ar no biofiltro é sempre ascendente, ao passo que o fluxo do líquido pode ser ascendente ou descendente. Os biofiltros com meios granulares realizam, no mesmo reator, a remoção de compostos orgânicos solúveis e de partículas em suspensão presentes nos esgotos. Além de servir de meio suporte para os microorganismos, o material granular constitui-se em meio filtrante. Os filtros biológicos aerados submersos com leito estruturado utilizam o mesmo tipo de enchimento dos filtros biológicos percoladores e, por isso, não retêm a biomassa em suspensão e necessitam de decantadores secundários. Em ambos biofiltros, são necessárias lavagens periódicas para se eliminar o excesso de biomassa acumulada, reduzindo as perdas de carga hidráulica através do meio. Com isso, as duas fontes de geração de lodo são os decantadores primários e a lavagem do biofiltro (lodo misto), sendo que este lodo necessita de tratamento completo. Este sistema alcança boa eficiência de nitrificação, e podem ser adaptados para a remoção biológica de nitrogênio.</p>
Biodisco
<p>A biomassa cresce aderida a um meio suporte, o qual é constituído por discos, formando um biofilme. Os discos, parcialmente imersos no líquido, giram, ora expondo a superfície ao líquido, ora ao ar, promovendo a aeração do esgoto. Quando a camada biológica atinge uma espessura excessiva, ela se desgarra dos discos. Uma parte destes organismos é mantida em suspensão no meio líquido aumentando a eficiência do sistema. Os biodiscos podem ser precedidos por decantadores primários ou por reatores anaeróbios.</p>

Fonte: SPERLING (2005), SOUZA (2008) e SPERLING (2002).

A substituição do decantador primário por reatores UASB apresenta benefícios para os sistemas de lodos ativados, filtros biológicos, biofiltros aerados submerso e biodiscos. O lodo em excesso, removido pela lavagem dos filtros, é retornado ao reator UASB, onde sofre adensamento e digestão, conjuntamente com o lodo anaeróbio. Com isso, há a redução da produção de lodo e o tratamento do

lodo é bastante simplificado, pois não há a necessidade de adensadores e digestores, havendo apenas a etapa de desidratação. Adicionalmente, devido a maior eficiência de remoção de DBO nos reatores UASB, há uma grande economia de energia (SPERLING, 2005).

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2008, as principais alternativas tecnológicas para tratamento de esgoto utilizadas hoje no Brasil estão descritas no Gráfico 4. Verifica-se que a lagoa facultativa, o reator anaeróbio, a lagoa anaeróbia, o filtro biológico e a lagoa de maturação representam juntos 75% das tecnologias utilizadas em Estações de Tratamento de Esgoto existentes no Brasil (IBGE, 2008).

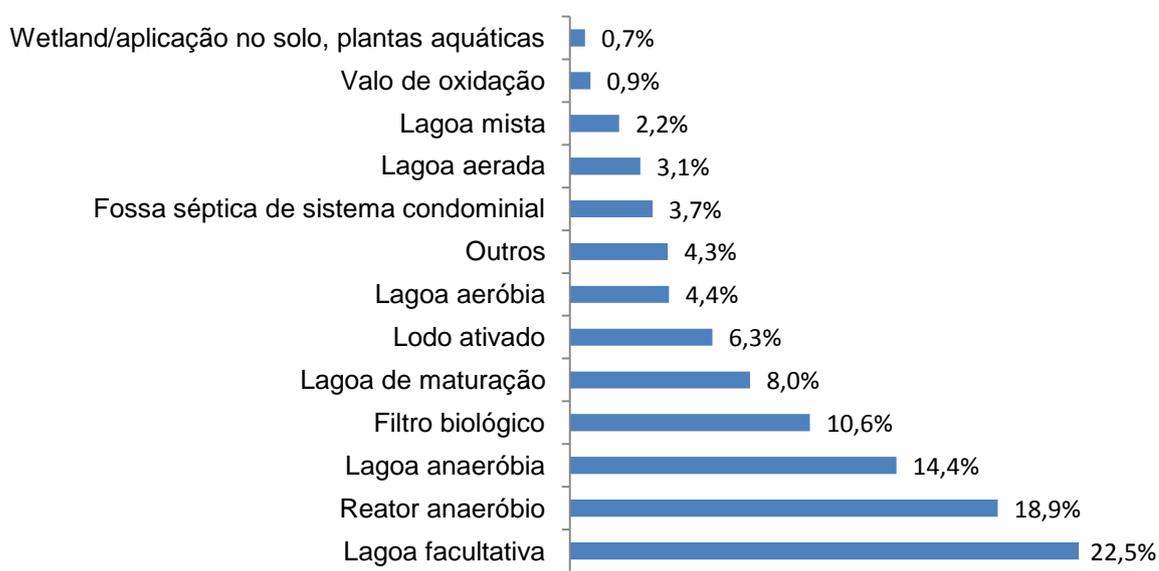


Gráfico 4: Distribuição percentual dos sistemas de tratamento de esgoto utilizados no Brasil.
Fonte: Elaborado pela autora com dados do IBGE (2008).

2.4 SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO

A decisão em sistemas de gerenciamento de recursos hídricos envolve incertezas, a existência de conflitos, grandes investimentos, a necessidade de planejamento de longo prazo, o dinamismo ao longo da vida útil, repercussões econômicas, ambientais e sociais, e a participação de grupos heterogêneos no processo decisório (PORTO, 1997 apud OLIVEIRA, 2004). Neste contexto de incertezas, múltiplos objetivos e critérios, e muitos atores, pode-se considerar a seleção de tecnologias de tratamento de esgoto uma decisão complexa e, nestes

casos, uma metodologia de apoio multicritério à decisão é recomendada (GOMES; GOMES, 2012; KIKER et al., 2005).

As primeiras informações do uso de processos decisórios estruturados aplicados em estudos voltados ao planejamento de recursos hídricos, sob a perspectiva de planejamento ambiental, datam da década de 30 (ZUFFO, 1998). Desde então, vários estudos têm sido feitos para auxiliar no processo de seleção de um sistema de tratamento de esgoto sanitário.

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) elaborou uma metodologia para a escolha do sistema de tratamento mais adequado, utilizando um fluxograma de seleção de alternativas de tratamento possíveis para situações específicas (CETESB, 1988 apud SOARES, 2010). O fluxograma contém perguntas que direcionam para a melhor alternativa. Segundo a CETESB, os principais fatores que devem ser considerados para a escolha de uma tecnologia de tratamento de esgoto doméstico são a disponibilidade de área a custo acessível, a inclinação e permeabilidade do terreno, a disponibilidade de mão de obra especializada, a possibilidade de efetuar movimento de terra, dentre outros (Figura 5).

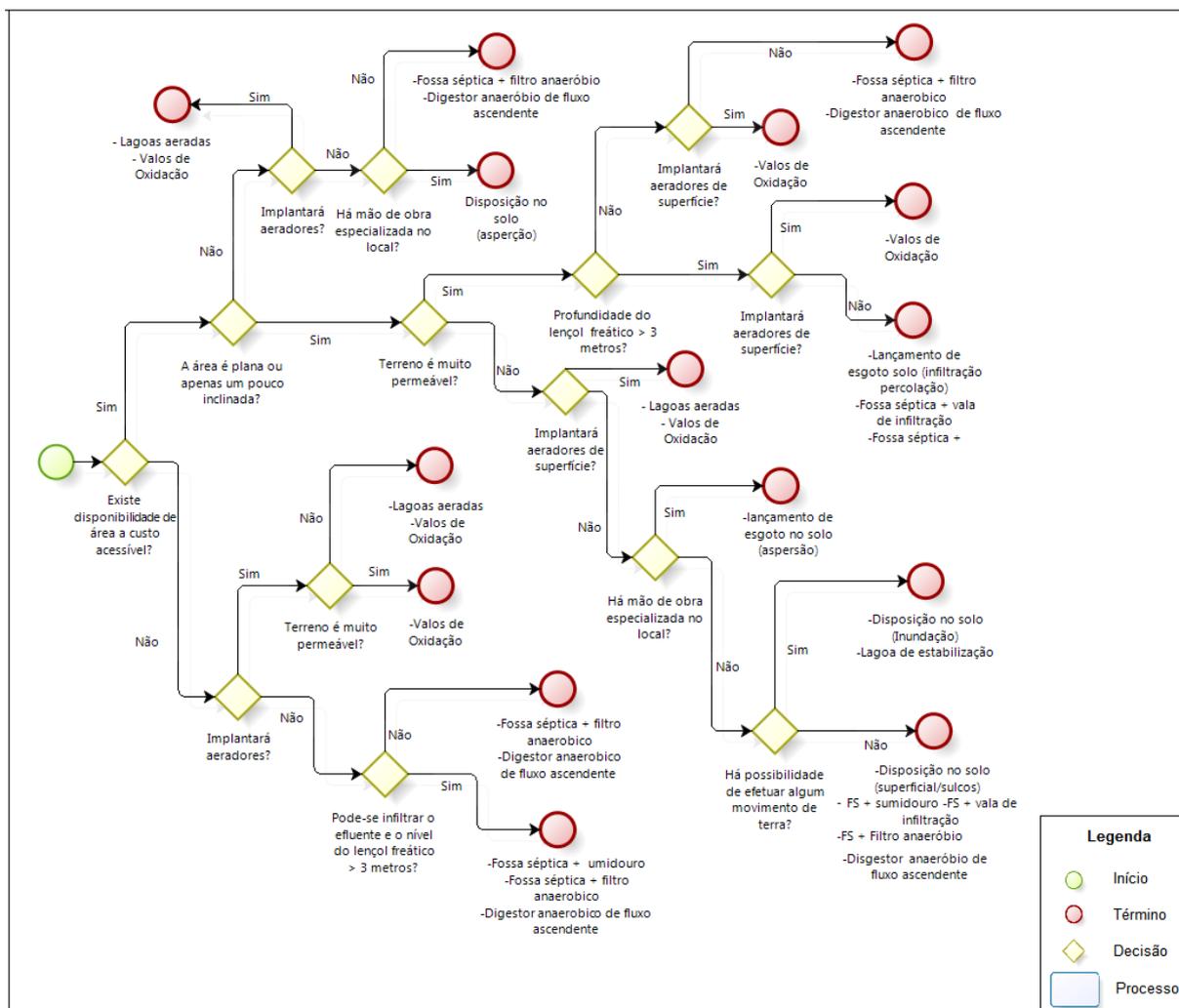


Figura 5: Fluxograma para seleção de sistemas de tratamento de esgotos em pequenas comunidades.

Fonte: Adaptado pela autora de Cetesb (1988) apud Soares (2010)

A *United Nations Environment Programme* (UNEP) também elaborou um fluxograma para facilitar a seleção de sistemas de tratamento de esgoto (Figura 6). Segundo a UNEP, os principais fatores que devem ser considerados para a escolha de uma tecnologia de tratamento de esgoto doméstico são a disponibilidade de água encanada, a presença de um sistema de coleta de esgoto, a densidade populacional, a disponibilidade de uma gestão eficiente e de pessoal qualificado, a disponibilidade de terras, a disponibilidade e o custo da energia, os padrões de qualidade das águas onde os efluentes tratados serão lançados, as condições hidrogeológicas e de clima e a oportunidade de reuso de efluentes (UNEP, 2003).

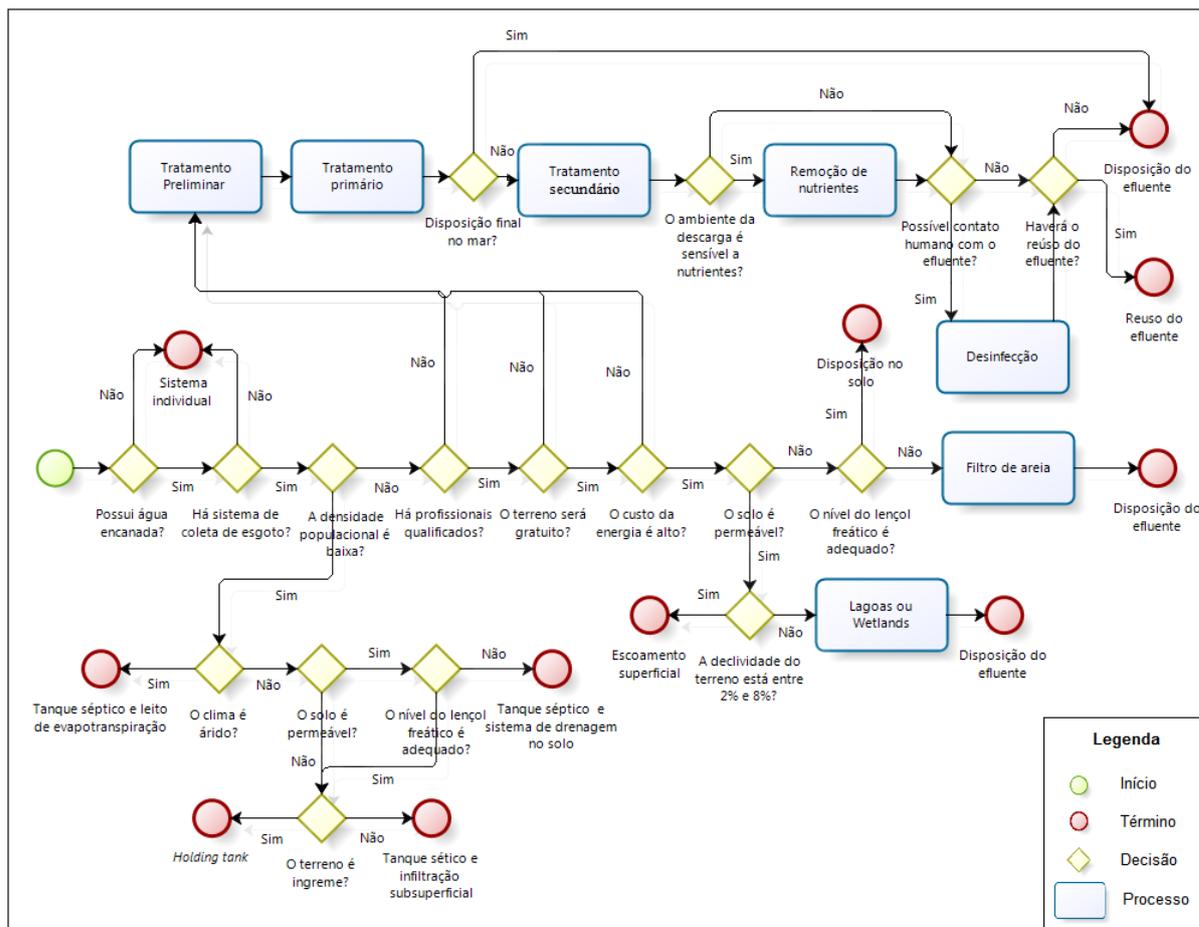


Figura 6: Fluxograma para escolha de tratamento de esgoto doméstico.
Fonte: Adaptado pela autora de UNEP (2003)

Bernal et al. (2003) também desenvolveu um fluxograma para o processo de seleção de tecnologia de tratamento de esgoto para tecnologias de disposição no solo e lagoas de estabilização, e identificou os seguintes fatores que influenciam na seleção: aspectos demográficos e socioculturais, característica da água residual, fatores climáticos, objetivos do tratamento, aspectos tecnológicos, disponibilidade de recursos, custos, capacidade e disponibilidade de pagamento, disponibilidade de terreno e as características do terreno, sendo os três últimos considerados pelo autor como os principais critérios. Galvis, Cardona e Bernal(2005) desenvolveram o modelo Seltar, um fluxograma de seleção de tecnologia de tratamento de esgoto e disposição do lodo para localidades colombianas menores que 30.000 habitantes.

O Quadro 4 apresenta trabalhos relevantes que utilizaram métodos multicriteriais para a seleção de tecnologia de tratamento de esgoto.

Quadro 4: Trabalhos anteriores de seleção de tecnologia de tratamento de esgoto (continua).

Referência	Alt.	Critérios	Métodos multicriteriais	Observações
Teclé et al. (1988)	15	Vulnerabilidade à poluição, qualidade da água, nível do tratamento, reúso, confiabilidade, compatibilidade, resistência a cargas de choque, flexibilidade, investimento, custo de O&M custo, demanda de área e energia.	CP, teoria dos jogos, ELECTRE I	Aplicou a metodologia em um estudo de caso nos Estados Unidos.
Carneiro et al. (2001)	6	Custo de implantação, custo de O&M, demanda de área, quantidade de lodo produzida, confiabilidade, resistência a choques de carga, simplicidade operacional, impacto ambiental e aceitação pública.	Ponderação aditiva simples, ELECTRE III, ELECTRE IV e CP	Aplicou a metodologia no estudo de caso Santa Maria (DF).
Alves (2003)	6	Distância ao ponto de descarga e a localização da ETE, altitude (sistemas elevatórios), declividade, requisito de área, potência necessária, custo de O&M, tempo de detenção hidráulico, confiabilidade do sistema, simplicidade operacional, quantidade de lodo a ser tratado, eficiência de remoção (DBO, N, P, Coliformes), qualidade da água do corpo receptor, zoneamento e possibilidade de problemas ambientais.	CP, CGT e PROMETHEE II.	Aplicou a metodologia no estudo de caso de Paulínia (SP).

Quadro 4: Trabalhos anteriores de seleção de tecnologia de tratamento de esgoto (continuação)

Referência	Alt.	Crítérios	Métodos multicriteriais	Observações
Oliveira (2004)	8	Investimento inicial e custos de O&M	Árvore de decisão.	O principal foco do trabalho foi a estimativa dos custos de implantação e de O&M.
Anagnostopoul os, Gratziou e Vavatsikos (2007)	6	Demanda de área, investimento, custo de implantação e de O&M, desempenho (DBO, SS, N e P), produção de lodo, resistência a variações do afluente, estética.	Fuzzy AHP	Propõe uma metodologia para avaliação de tecnologias de tratamento de esgoto.
Leoneti (2009)	8	Investimento inicial e custos de O&M	AHP e equilíbrio de jogos proposto por Nash.	Avaliou a qualidade das respostas do modelo de Oliveira (2004).
Karimi et al. (2011)	5	Confiabilidade, capacidade de resistência a variações do afluente e cargas de choque, clima, instalações locais, flexibilidade, simplicidade operacional, Custo de implantação e de custo de O&M, demanda de área. custo de disposição do lodo, exigência de tratamento, odor, risco, quantidade de lodo gerado, impactos ambientais. aplicabilidade e desempenho (DBO, SS, N e P).	AHP e Fuzzy AHP	Avaliação dos processos aeróbios utilizados no Iran.

Quadro 4: Trabalhos anteriores de seleção de tecnologia de tratamento de esgoto (conclusão)

Referência	Alt.	Critérios	Métodos multicriteriais	Observações
Reami (2012)	8	Custo de implantação e de O&M, participação da Prefeitura Municipal no custo de implantação, demanda de área, impacto urbanístico e arquitetônico, transporte de esgoto, acessibilidade, valor da área, qualidade do efluente final, geração de odor e distância em relação ao perímetro urbano, necessidade de mão de obra especializada, possibilidade de reuso agrícola, geração de lodo, consumo de energia elétrica, emissão de gases de efeito estufa	MAUT, o CP e o CGT.	Aplicar a metodologia no estudo de caso Restinga (SP).

Fonte: Elaborado pela autora

Alguns sistemas foram desenvolvidos utilizando métodos multicritério para avaliação de sistemas de tratamento de esgoto, como o *Process Selection Model - Version I* (Modelo PROSEL-I), o Sistema de Apoio à Decisão (SAD), o *Sanitation Expert Systems* (SANEX) e o *Water and Wastewater Treatment Technologies Appropriate for Reuse* (WAWTTAR). O Modelo PROSEL-I foi construído com o objetivo de auxiliar a seleção do processo de tratamento de esgoto para um caso específico, considerando como um problema de multiobjetivos e multicritérios. Foram consideradas 106 combinações de processos de tratamento de esgoto (SOUZA, 1998).

O SAD, desenvolvido pelo PROSAB (Programa de Pesquisa em Saneamento Básico), auxilia na seleção tecnológica de alternativas de pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Este software utiliza a análise tecnológica global de multicritério e visa fornecer a alternativa mais aceitável com bases sociais, culturais, ambientais e econômicas. Primeiro há a informação de dados, seguido da pré-seleção de alternativas viáveis, da avaliação tecnológica e da análise tecnológica global (PROSAB, 2000; CORDEIRO NETTO et al., 2000; SOUZA; NETTO; LOPES, 2001).

O programa SANEX foi desenvolvido por Thomas Loetscher para avaliação de sistemas sanitários de países em desenvolvimento. Os aspectos utilizados na escolha são sócio-culturais, financeiros e técnicos e são utilizadas técnicas de análise de decisão multicritério com 176 alternativas, muitas delas individuais ou para pequenas comunidades. O WAWTTAR visa auxiliar nas estratégias sustentáveis de gestão de recursos hídricos e saneamento, a fim de minimizar seus impactos, sendo aplicável somente nas primeiras etapas de planejamento de estações (LEONETI, 2009).

2.4.1 Objetivos do tratamento e fatores restritivos

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) elaborou a ABNT NBR 12.209:2011, uma norma para a elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgoto sanitário, que possui o objetivo de apresentar as condições recomendadas para a elaboração de projetos hidráulicos e de processo

de Estações de Tratamento de Esgoto sanitário, abordando o tratamento da fase líquida, sólida e gasosa. Não estão contemplados, os tanques sépticos, as lagoas de estabilização e a disposição final de subprodutos do tratamento. Os tanques sépticos estão representados pelas normas da ABNT NBR 7229/1993 e NBR 13.969/1997.

Segundo a ABNT NBR 12.209:2011 é necessário avaliar as opções de processo de tratamento para a fase líquida e para a fase sólida, considerando os custos de implantação e o de operação e manutenção das diversas opções, bem como, efetuar uma comparação técnico-econômica e ambiental para a escolha da solução. Também de acordo com esta norma, alguns dos requisitos necessários para o projeto são (ABNT, 2011):

- População atendida;
- Vazão e demais características do esgoto sanitário afluyente;
- Exigências ambientais e legais a serem atendidas;
- Características requeridas para o efluente tratado;
- Forma de disposição final do efluente líquido: ponto de lançamento, corpo receptor, reuso previsto;
- Tamanho da área selecionada para a construção da ETE e estimativa da cota máxima de enchente;
- Sondagens de reconhecimento do subsolo.

A Lei Federal 11.445/2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, destaca o uso de tecnologias condizentes com a capacidade de pagamento dos usuários e a adoção de soluções graduais e progressivas. Segundo Metcalf e Eddy (2001 apud REAMI, 2011, p. 46) alguns fatores de importância para a avaliação e seleção de sistemas de tratamento são:

- ✓ Aplicabilidade do processo;
- ✓ Vazão aplicável no processo;
- ✓ Variação da vazão aplicável;
- ✓ Características do afluyente;
- ✓ Constituintes inibidores e recalcitrantes (substâncias de difícil degradação) do afluyente;
- ✓ Disponibilidade de área;
- ✓ Condições climáticas;
- ✓ Cinética da reação e seleção do reator;
- ✓ Eficiência do sistema;
- ✓ Tratamento dos resíduos;
- ✓ Processamento do lodo;

- ✓ Restrições ambientais;
- ✓ Requisitos químicos;
- ✓ Requisitos de outros recursos;
- ✓ Requisitos de pessoal;
- ✓ Requisitos de manutenção e operação;
- ✓ Processos auxiliares;
- ✓ Complexidade;
- ✓ Compatibilidade.

Segundo Souza, Netto e Lopes (2001, cap. 1, p. 1), os sistemas devem conjugar os seguintes requisitos principais:

- ✓ baixo custo de implantação;
- ✓ elevada sustentabilidade do sistema, relacionada a pouca dependência de fornecimento de energia, de peças e equipamentos de reposição etc.;
- ✓ simplicidade operacional, de manutenção e de controle (pouca dependência de operadores e engenheiros altamente especializados);
- ✓ baixos custos operacionais;
- ✓ adequada eficiência na remoção das diversas categorias de poluentes (matéria orgânica biodegradável, sólidos suspensos, nutrientes e patogênicos);
- ✓ pouco ou nenhum problema com a disposição do lodo gerado na estação;
- ✓ baixos requisitos de área;
- ✓ existência de flexibilidade em relação às expansões futuras e ao aumento de eficiência;
- ✓ possibilidade de aplicação em pequena escala (sistemas descentralizados), com pouca dependência da existência de grandes interceptores;
- ✓ fluxograma simplificado de tratamento (poucas unidades integrando a estação);
- ✓ elevada vida útil;
- ✓ ausência de problemas que causem transtorno à população vizinha;
- ✓ possibilidade de recuperação de subprodutos úteis.

Não há um sistema de tratamento de esgoto que atenda integralmente a todos estes requisitos e possa ser indicado como melhor para quaisquer condições, mas obtém-se a mais alta relação custo/benefício quando se escolhe um sistema que se adapta às condições locais e aos objetivos em cada caso (PROSAB, 1999). A forma de disposição ou reuso determinam o objetivo do tratamento do efluente, onde, para minimizar os gastos, busca-se fazer o mínimo em termos de tratamento. Geralmente, o grau mínimo do tratamento é estabelecido pela legislação.

Adicionalmente, diante da dificuldade na cobrança de serviços de saneamento básico, da grande demanda por sistemas que atendam municípios com número de habitantes de até 50.000 e do perfil sócio-econômico das comunidades brasileiras, constata-se a necessidade de sistemas simplificados de tratamento dos esgotos (SOUZA; NETTO; LOPES, 2001). As soluções funcionalmente simples são as que utilizam os processos “mais naturais” e os reatores menos mecanizados e

mais fáceis de serem construídos e operados (PROSAB, 1999). Nestes casos, há menor necessidade de mão de obra especializada.

Quanto maior a mecanização da tecnologia, maior é a probabilidade de interrupção do funcionamento da estação de tratamento, de descumprimento dos objetivos e de desconformidade para com a legislação ambiental, e, com isso, maior a necessidade de serviços periódicos de manutenção preventiva e de manutenção corretiva (JORDÃO; VOLCHAN, 1999). Isto acaba aumentando os custos de operação e manutenção. Para cidades pequenas, os custos de operação e manutenção não devem comprometer o caixa da prefeitura, o que muitas vezes ocorre nos casos das prefeituras que obtêm verbas públicas com financiamento não reembolsável para a implantação dos sistemas e não estimam o custo mensal de operação e de manutenção dos sistemas a ser somado no orçamento municipal (REAMI, 2011). Algumas tecnologias são mais indicadas para comunidade de pequeno e médio porte por serem mais simples. A Tabela 5 contém as tecnologias indicadas para comunidades de pequeno e médio porte segundo alguns autores.

Tabela 5: Tecnologias indicadas para cidades de pequeno e médio porte.

Tecnologias de tratamento de esgoto	METCALF e EDDY (2003)	ANDRADE NETO (1997)	SPERLING (2005)	JORDÃO e VOLSCHANN (2009)
Tanque séptico	X	X	X	X
Filtros anaeróbios	X	X	X	X
RAFAALL	X	X	X	X
Lagoas de estabilização	X	X	X	
Disposição no solo	X	X	X	
Terras úmidas construídas	X	X	X	
Lodos ativados	X		X ²	X ²
Filtro biológico	X		X	X
Biodiscos	X		X	
Biofiltro aerado submerso	X		X	X
Rotor biológico de contato				X

Fonte: Elaborado pela autora com dados de Metcalf e Eddy (2003), Andrade Neto (1997), Sperling (2005) e Jordão e Volschan (2009).

² Com exceção da tecnologia de lodos ativados convencional.

Adicionalmente, são diversos os fatores que condicionam a escolha de uma tecnologia de tratamento de esgoto e que fazem com que a tecnologia possa ou não ser utilizada em determinada ocasião. Para escolher a tecnologia apropriada para cada caso, devem-se verificar as cotas de inundação, o nível do lençol freático, a topografia da área, a forma da área, as características do solo, os ventos, as condições de acesso, a facilidade de aquisição do terreno, o custo do terreno e a ocorrência de afloramento rochoso (SPERLING, 2002).

Ao selecionar um terreno, é necessário verificar se a área disponível no terreno atende a demanda de área das tecnologias de tratamento de esgoto (Bernal, 2003). Por exemplo, para uma população de 10.000 habitantes, a lagoa facultativa com uma demanda de área média de 3 m² por habitante, necessita de uma área em torno de 30.000 m². Outros fatores também restringem a escolha da tecnologia de tratamento de esgoto, sendo descritos de forma resumida nos itens subsequentes.

a) Calor

O calor desempenha um papel decisivo na escolha dos processos de tratamento e pode conduzir a uma menor necessidade de terras, melhora dos processos de conversão e aumento da eficiência de remoção. O calor influencia a taxa de transferência de gases (METCALF; EDDY, 2003) e é um parâmetro de extrema importância para o bom funcionamento de reatores anaeróbios, visto que, influencia na velocidade de crescimento e atividade de degradação bioquímica para um determinado substrato (PROSAB, 1999). Os efeitos térmicos sobre as reações bioquímicas podem ser observados por meio da Equação 3, denominada equação de Arrhenius (CHERNICHARO, 1997):

$$K = K_0 \cdot e^{\left(\frac{-E}{R.T}\right)} \quad (\text{Eq.}, 3)$$

onde:

- K = taxas de reação
- K₀ = constante
- E = energia de ativação (cal/mol)
- R = constante dos gases (1,98/mol. °K)
- T = temperatura absoluta (°K)

Conforme mostra a Equação 3, em águas mais quentes, a atividade microbiana é maior. No entanto, a temperatura não pode ser muito elevada, nem tampouco muito fria, porque as bactérias sobrevivem em uma faixa estreita de temperatura. Para uma maior eficiência no processo de tratamento, os efluentes devem estar dentro do intervalo da faixa ótima de temperatura, onde o crescimento microbiano é máximo (METCALF; EDDY, 2003). A atividade de fermentação do lodo não ocorre significativamente em temperaturas abaixo de 17°C e aumenta na proporção de quatro vezes para cada 5°C de elevação de temperatura entre 4°C e 22°C (UEHARA e VIDAL, 1989 apud PROSAB, 1999). Podem ser identificadas três faixas de valores de temperatura de interesse para a atividade de microorganismos, sendo estas a faixa psicofílica, mesofílica e termofílica, conforme demonstrado na Tabela 6.

Tabela 6: Faixas de temperatura por tipo de bactéria.

Tipo de bactéria	Temperatura (°C)	
	Faixa de vida	Faixa ótima
Psicofílicas	10 a 30	12 a 18
Mesofílicas	20 a 50	25 a 40
Termofílicas	35 a 75	55 a 65

Fonte: Metcalf e Eddy (2003)

No caso das lagoas, a atividade biológica máxima ocorre durante o verão, quando a temperatura das lagoas pode atingir valores da ordem de 30°C, situando-se na faixa ótima mesofílica (PROSAB, 1999). Devido a esta particularidade da atividade microbiana, recomenda-se a utilização de sistemas de tratamento de esgoto que utilizem de processos anaeróbios quando a temperatura média anual for superior a 20 °C (e média mensal superior a 15 °C) (CHERNICHARO, 1997; PROSAB, 1999; JORDÃO; PESSÔA, 2011). Como as regiões Sul e parte da Sudeste possuem temperaturas inferiores a 15 °C no inverno (Figura 7), uma avaliação técnica destas tecnologias é necessária.

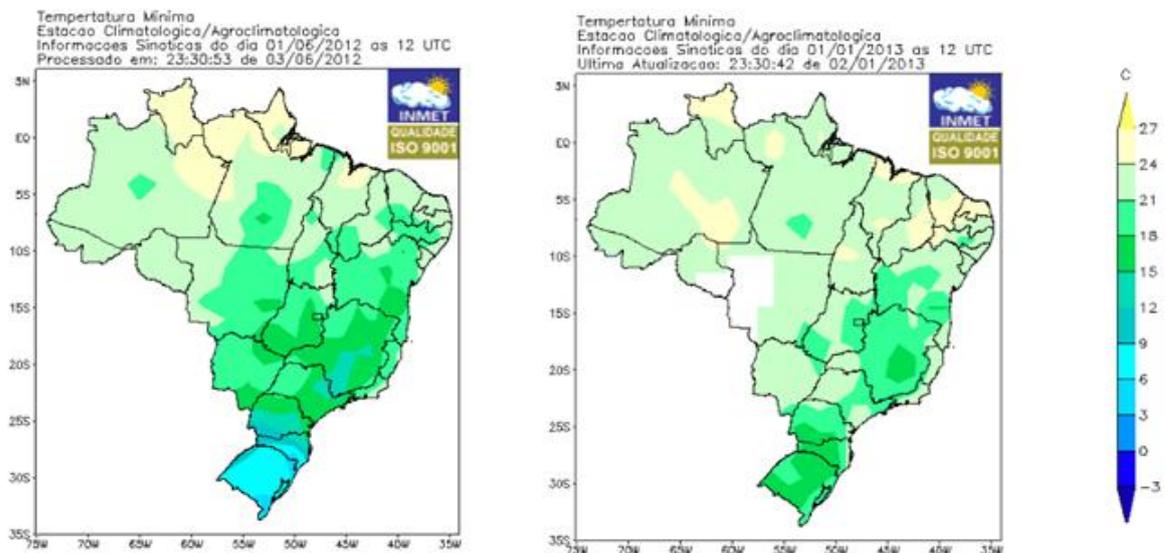


Figura 7: Mapa do Brasil com a temperatura no inverno e no verão.
Fonte: INMET (2013)

b) Características do solo

As lagoas de estabilização e a disposição controlada no solo possuem dependência das características do solo. Por este motivo, é necessário obter informações das taxas de percolação do solo, da profundidade (espessura) do solo, da profundidade do lençol freático, da declividade do terreno, da profundidade da camada impermeável do solo e ocorrência de rochas (SOUZA, 1998). Nos casos em que uma destas características não atendam as necessidades destas tecnologias, as mesmas devem ser evitadas. As características do solo não estão representadas no modelo de apoio à decisão desta pesquisa e devem ser analisadas a parte.

c) Distância de centros urbanos

Um dos aspectos principais a serem considerados para escolha da localização da ETE são a geração de odor, de aerossóis, de ruído e de tráfego (JORDÃO; PESSÔA, 2011) e incômodos gerais, como, por exemplo, a proliferação de insetos e vermes (SPERLING, 2005). A NBR 12.209 da ABNT prevê que em um projeto hidráulico-sanitário de uma estação de tratamento de esgoto está a avaliação destes impactos e a indicação de ações mitigadoras (ABNT, 2011). O ruído estará

presente já na fase construtiva da ETE, não chegando a ser significativo no ambiente do entorno no período de operação, desde que sejam tomadas medidas adequadas de controle (JORDÃO; PESSÔA, 2011).

O odor é uma sensação olfativa, que interage com o gosto (salgado, doce, azedo e amargo) formando o sabor (SPERLING, 2005). Os odores característicos do esgoto são causados pelos gases formados no processo de decomposição, sendo o odor de mofo, típico do esgoto fresco, razoavelmente suportável e o odor de ovo podre, típico do esgoto velho ou séptico, insuportável em virtude da presença de gás sulfídrico (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2007). A produção de sulfeto depende, principalmente, da temperatura, do pH, da concentração de sulfato, de oxigênio dissolvido (abaixo de 1,0 mg/L), da área superficial e do tempo de detenção hidráulica (EPA, 1985 apud SILVA, 2007).

Há a falta de padrões adequados e a falta de uma regulamentação específica devido à subjetividade associada à avaliação de odores. A *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH) propõe concentração de emissão de sulfeto de hidrogênio de no máximo 10 ppm (concentração média ponderada diária). Segundo a *National Institute of Occupational Safety and Health* (NIOSH), o limiar de odor deste gás é de 0,0005 ppm. Os parâmetros meteorológicos, como, direção e velocidade do vento, estabilidade atmosférica, pressão, temperatura, turbulência, podem aumentar ou reduzir os níveis de poluição atmosférica em uma região (SILVA, 2007).

Algumas tecnologias podem realizar medidas mitigadoras, contendo o odor e tratando o mesmo. Para as lagoas anaeróbias, pela sua extensão, não existem medidas eficazes para conter o odor, exigindo um afastamento mínimo em torno de 500 m de estradas públicas e residências (SPERLING, 2002). Este valor talvez não seja suficiente como proteção a possíveis problemas à saúde, porque os aerossóis, contendo micróbios, podem ser transportados pelo vento a distâncias de mais de 1 km e as bactérias são mais infectivas quando inaladas do que quando ingeridas (FEACHEM, 1980 et al. apud PROSAB, 2000).

2.4.2 Critérios de decisão

Em 1987, a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD) elaborou um documento denominado *Nosso Futuro Comum*, também conhecido como Relatório de *Brundtland*, onde os governos signatários se comprometiam a promover o desenvolvimento econômico e social em conformidade com a preservação ambiental. Neste documento, foi apresentada a definição oficial do conceito de Desenvolvimento Sustentável, que significa, atender as necessidades do presente sem comprometer a capacidade *das* gerações futuras de atenderem as suas (WCED, 1987). O Desenvolvimento Sustentável envolve três elementos principais: a melhoria da eficiência econômica, a proteção e restauração dos sistemas ecológicos e o bem-estar das pessoas.

Nos desenvolvimentos de recursos hídricos os programas e projetos têm focalizado apenas na análise dos benefícios e custos (Zuffo, 1988), buscando otimizar as alternativas de tratamento apenas pelo custo mínimo, o que não deve ser considerado como uma solução viável, já que a opção mais barata necessariamente não é a melhor (Sobalvarro y Batista, 1997; FULOP, 2005). Da mesma forma, otimizar em uma dimensão, por exemplo, a dimensão ambiental, irá melhorar este aspecto do sistema, mas pode ter efeitos indesejados em outras dimensões como, por exemplo, o sistema pode tornar-se inviável economicamente (BALKEMA, 2002).

Portanto, para que uma escolha de uma tecnologia de tratamento de esgoto seja considerada sustentável, o julgamento deve equilibrar as diferentes dimensões da sustentabilidade: a econômica, a ambiental e a sócio-cultural. A sustentabilidade econômica foca no aumento do bem estar humano através da alocação ótima de recursos visando satisfazer as necessidades humanas. Com isso, a sustentabilidade econômica deve estar associada aos valores sociais e ambientais. Alguns indicadores econômicos são o custo do investimento, o custo de operação e manutenção, a capacidade de pagamento, a rentabilidade, a mão-de-obra, dentre outros (BALKEMA, 2002).

A sustentabilidade ambiental refere-se à capacidade do ambiente de sustentar o modo de vida humano. Exemplos de indicadores ambientais são: a utilização de recursos naturais (energia, por exemplo), a fertilidade da terra e a

biodiversidade, a qualidade do efluente e do lodo gerado, a emissão de gases, etc. A sustentabilidade sócio-cultural busca assegurar as necessidades sócio-culturais e espirituais. Os indicadores sócio-culturais são difíceis de quantificar e, por isso, são muitas vezes desconsiderados. Exemplos destes indicadores são: a disponibilidade de mão de obra especializada, a aceitação da população para determinadas tecnologias como, por exemplo, o banheiro seco, dentre outros (BALKEMA, 2002).

Para Balkema (2002), além dos indicadores econômicos, ambientais e sócio-culturais, há também o indicador tecnológico. Em alguns casos, o indicador tecnológico pode ser considerado como uma restrição e não um critério, porque não há como aplicar uma tecnologia eficientemente se na percepção do usuário final isto não proporciona uma solução satisfatória. Por exemplo, a simplicidade operacional poderia ser uma restrição e não um critério. Outros indicadores tecnológicos são: a adaptabilidade (possibilidade de aumento do sistema de tratamento), durabilidade ou vida útil do sistema, capacidade de resistência do sistema a variações do efluente, manutenção, confiabilidade, dentre outros (BALKEMA, 2002).

Após definir quais os critérios que representarão o modelo, o decisor fará as atribuições de pesos para os critérios. Segundo Oliveira (2004, p. 61), os mais relevantes critérios sugeridos por diversos autores, necessários à indicação do sistema apropriado de tratamento de esgotos, de acordo com a ordem de importância, são:

- ✓ Restrições ambientais;
- ✓ Requisitos de manutenção e operação;
- ✓ Requisitos de energia;
- ✓ Características do afluente;
- ✓ Requisitos de pessoal;
- ✓ Custo de construção;
- ✓ Disponibilidade de terreno;
- ✓ Características do local;
- ✓ Custo do terreno.

Sperling (2005) comparou os aspectos de importância na seleção dos sistemas de tratamento nos países desenvolvidos e em desenvolvimento (Figura 8). Nos países desenvolvidos, os itens considerados críticos são a eficiência, a confiabilidade, a disposição do lodo e a área necessária. Em geral, nos países em desenvolvimento, os itens críticos são os custos de construção, a sustentabilidade, os custos operacionais e a simplicidade da tecnologia (SPERLING, 2005).



Figura 8: Aspectos críticos e importantes na seleção de sistemas de tratamento de esgoto em regiões desenvolvidas e em desenvolvimento.

Fonte: Sperling (2005, p. 335)

3 METODOLOGIA

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Existem várias formas de classificação de pesquisas, podendo-se citar (SOUZA et al., 2012): quanto à natureza (pesquisa básica e aplicada), quanto à abordagem do problema (pesquisa quantitativa e pesquisa qualitativa), quanto ao objetivo (exploratória, descritiva e explicativa) e quanto aos procedimentos técnicos (bibliográfica, documental, experimental, levantamento, estudo de caso, *expost-facto*, pesquisa ação e pesquisa participante). Conforme estas classificações, o presente trabalho pode ser caracterizado como:

- Pesquisa aplicada, quanto à sua natureza, pois objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos. Nesta pesquisa, o problema a ser solucionado é a seleção de tecnologia de tratamento de esgoto.
- Pesquisa quantitativa e qualitativa, quanto à abordagem do problema, pois no modelo proposto, além dos aspectos qualitativos, as decisões devem ser fundamentadas também em aspectos quantitativos. Como exemplo, para que o decisor possa considerar aspectos ligados ao custo do empreendimento, e também a simplicidade operacional.
- Pesquisa exploratória, quanto ao objetivo, pois visa proporcionar uma maior familiaridade com o problema.
- Pesquisa bibliográfica, experimental, levantamento e estudo de caso, quanto aos procedimentos técnicos. A pesquisa bibliográfica visou à coleta das informações sobre as tecnologias de tratamento de esgoto sanitário e as metodologias de apoio à decisão. Além dos livros especializados, foram consultadas dissertações, teses e artigos de origem nacional e internacional, e legislações. A fase experimental incluiu o desenvolvimento do modelo e a avaliação de sua aplicabilidade. O estudo de caso envolveu o teste do modelo com a utilização de três estudos de caso.

3.2 FASES DA PESQUISA

O método desta pesquisa para a seleção de sistema de tratamento de esgoto sanitário foi adaptado da “metodologia sintética para abordagem de problemas” de Gomes (1999 apud GOMES; GOMES, 2012). Na etapa desta metodologia onde se comparam as alternativas, adotou-se o método de Apoio Multicritério à Decisão (AMD), utilizando, uma abordagem de critério único de síntese ou a teoria da utilidade multiatributo (na língua inglesa, *Multiattribute Utility Theory* MAUT). O MAUT é um método simples, de fácil entendimento, lógico e transparente. Outras vantagens deste método são a pontuação de critérios tanto qualitativos quanto quantitativos e a facilidade da verificação e análise dos resultados com a ordenação das alternativas (DE MONTIS et al., 2004; CATERINO et al., 2009). Apesar de ser um método simples e de ter sido criado na década de 70, tanto a MCDM quanto a MAUT continuam sendo ativamente aplicadas em pesquisas e na gestão (WALLENIUS, 2008). A MAUT é a metodologia mais apropriada para esta pesquisa porque os envolvidos no processo decisório geralmente não possuem conhecimento aprofundado dos métodos de apoio à decisão. Com isso, uma das propriedades mais importantes buscadas no método são a facilidade de compreensão de sua aplicação, transparência e simplicidade ao processo (DE MONTIS et al., 2004).

Com o desenvolvimento de *softwares* de fácil utilização e entendimento, o tomador de decisão pode expressar com clareza as suas preferências, sem pensar no algoritmo matemático que está por trás do método. A utilização de *softwares* pode ajudar na estruturação de problemas de decisão multicritério, porém, dependendo dos participantes, podem também desencorajar a sua participação (BELTON e STEWART, 2002). Para apoiar o modelo de decisão desta pesquisa, utilizou-se o programa de planilhas eletrônicas Excel da Microsoft, por ser um aplicativo bastante difundido, o que facilitaria a outros usuários utilizarem com uma maior facilidade.

Uma fonte de consulta fundamental para o levantamento das informações das tecnologias foi o livro de Marcos Von Sperling “Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos: Princípio do tratamento biológico de águas residuárias” (SPERLING, 2005), de onde se retirou as trinta e duas alternativas e os dezenove

critérios, dentre eles, econômicos, ambientais, sociais e tecnológicos (Apêndice A, B, C, D e E). Utilizou-se apenas esta referência bibliográfica como base para comparação das alternativas devido às diferenças encontradas na literatura para a valoração dos critérios (ANDRADE NETO, 1997). Neste livro, Sperling (2005) realizou uma análise comparativa entre os principais sistemas de tratamento de esgotos, sendo que, nesta pesquisa, as seguintes informações foram utilizadas:

- Eficiências típicas de remoção dos principais poluentes de interesse nos esgotos domésticos (DBO, SS, amônia, nitrogênio total, fósforo total, coliformes fecais e ovos helmintos);
- Características típicas dos principais sistemas de tratamento de esgotos, expressos em valores per capita (demanda de área, potência instalada para aeração, produção de lodo a ser disposto, custo de implantação e custos de operação e manutenção).
- Análise comparativa qualitativa, abordando diversos aspectos de relevância na avaliação de sistemas de tratamento de esgotos (eficiência, economia, processo e problemas ambientais).

Como este estudo baseia-se nas características físico-químicas dos esgotos sanitários (Tabela 2) e são utilizados a percentagem de remoção dos principais poluentes de interesse nos esgotos domésticos, não é necessário inserir a vazão afluente do esgoto. A tecnologia “reator UASB seguida de flotação por ar dissolvido” não foi considerada por falta de informações complementares desta tecnologia nesta mesma bibliografia. A tecnologia “infiltração lenta” também foi desconsiderada por se tratar de uma forma de reúso agrícola e por não estar contida no escopo desta pesquisa. A tecnologia “tanque séptico” não foi considerada por não possuir uma percentagem de remoção de DBO adequada à legislação Federal.

As alternativas consideradas desta pesquisa estão descritas no Quadro 5:

Quadro 5: Sistemas de tratamento de esgotos considerados (continua).

Tipo de tecnologia	Alternativa	Tecnologia
Lagoas de estabilização	A1	Lagoa facultativa
	A2	Sistema de lagoa anaeróbia - lagoa facultativa
	A3	Lagoa aerada facultativa
	A4	Lagoa aerada mistura completa - lagoa de sedimentação
	A5	Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação
	A6	Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de alta taxa
	A7	Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas
Disposição no solo	A8	Infiltração rápida
	A9	Escoamento superficial
	A10	Terras úmidas construídas (<i>wetlands</i>)
Reatores anaeróbios	A11	Tanque séptico + filtro anaeróbio
	A12	Tanque séptico + infiltração
	A13	Reator UASB
	A14	Reator UASB + lodos ativados convencional
	A15	Reator UASB + biofiltro aerado submerso
	A16	Reator UASB + filtro anaeróbio
	A17	Reator UASB + filtro biológico percolador de alta carga
	A18	Reator UASB + lagoa de polimento
	A19	Reator UASB + lagoa aerada facultativa
	A20	Reator UASB + lagoa aerada mistura completa + lagoa de decantação

Quadro 5: Sistemas de tratamento de esgotos considerados (conclusão)

Tipo de tecnologia	Alternativa	Tecnologia
Lodos ativados	A21	Reator UASB + escoamento superficial
	A22	Lodos ativados convencional
	A23	Lodos ativados - aeração prolongada
		Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)
	A24	Lodos ativados convencional com remoção biológica de nitrogênio
	A25	Lodos ativados convencional com remoção biológica de nitrogênio e fósforo
	A26	Lodos ativados convencional + filtração terciária
Reatores aeróbios com biofilme	A27	Filtro biológico percolador de baixa carga
	A28	Filtro biológico percolador de alta carga
	A29	Biofiltro aerado submerso com nitrificação
		Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de nitrogênio
	A30	Tanque séptico + biodiscos
	A31	
A32		

Fonte: Elaborado pela autora

As fases desta pesquisa foram divididas em nove passos, sendo estes:

1. Analisar os custos das tecnologias;
2. Inserir parâmetros no modelo;
3. Definir os objetivos e preferências;
4. Identificar as restrições;
5. Identificar critérios de decisão;
6. Identificar alternativas factíveis;
7. Comparar as alternativas
 - 7.1. Definir o desempenho da alternativa;
 - 7.2. Elaborar a matriz de decisão;
 - 7.3. Definir as taxas de substituição;

- 7.4. Calcular o valor de cada alternativa;
8. Escolher a alternativa.

Passo 1. Analisar os custos das tecnologias

Nesta etapa, realizou-se um estudo comparativo do custo total por habitante das tecnologias. Para isso, somou-se o investimento inicial ao custo de operação e manutenção (O&M) de toda a vida útil em valor presente, e ao custo do terreno (demanda de área versus o valor do metro quadrado). Apesar dos custos de implantação e de operação e manutenção variarem substancialmente nas regiões do Brasil e em cada Estação de Tratamento de Esgoto, Sperling (2005) estimou estes custos por habitante para cada tecnologia, e considerou que os custos de energia elétrica e de tratamento e disposição final do lodo estão incluídos nos custos de operação e manutenção³. Como as variáveis investimento, custo de operação e manutenção e demanda de área são fixas por habitante (Apêndice F), o que varia na função é o valor do metro quadrado, conforme a Equação 4.

$$\text{Custo total} = \text{investimento} + \text{operação e manutenção} + (\text{demanda de área} \times \text{valor do m}^2) \quad (\text{Eq., 4})$$

Onde:

- Custo de implantação (R\$) = Valor médio do custo de implantação (R\$/habitante);
- Custo de operação e manutenção de toda a vida útil (R\$) = Valor médio do custo de operação e manutenção por habitante (R\$/hab.ano) x fator de conversão financeiro;
- Demanda de área = Valor médio da demanda de área (m²/habitante);
- Valor do m² do terreno (R\$/m²) = Parâmetro a ser definido no modelo, variável de zero a R\$1.000,00 por metro quadrado.

³ Informação fornecida por Marcos Von Sperling por e-mail.

Passo 2. Inserir parâmetros no modelo

Após efetuar a análise dos custos das tecnologias, o modelo de decisão deve ser alimentado com determinados parâmetros pelo usuário nas planilhas eletrônicas. Os parâmetros que devem ser preenchidos pelo usuário no modelo são:

- População futura (número de habitantes): O número de habitantes da cidade ao final da vida útil da estação deve ser pesquisado e definido pelo usuário, porque determinará o tamanho da estação e os seus custos de implantação, de operação e manutenção, e a demanda por área.
- Valor do metro quadrado do terreno (R\$/m²): Em alguns casos o valor do terreno é nulo porque o terreno pertence ao governo. Mesmo nestes casos, o valor do metro quadrado do terreno deve ser estimado e inserido no modelo.
- Tamanho da área disponível (m²): O usuário deverá inserir a área disponível no terreno para receber a estação.
- Fator de conversão financeiro^o: Levando em consideração uma taxa de juros, o estudo do valor presente ou valor atual permite comparar valores futuros com um valor de hoje, para a correção do dinheiro no tempo. Em outras palavras, dado um conjunto de valores futuros é possível calcular o valor presente seguindo a representação gráfica na Figura 9 (MATHIAS; GOMES, 2002).

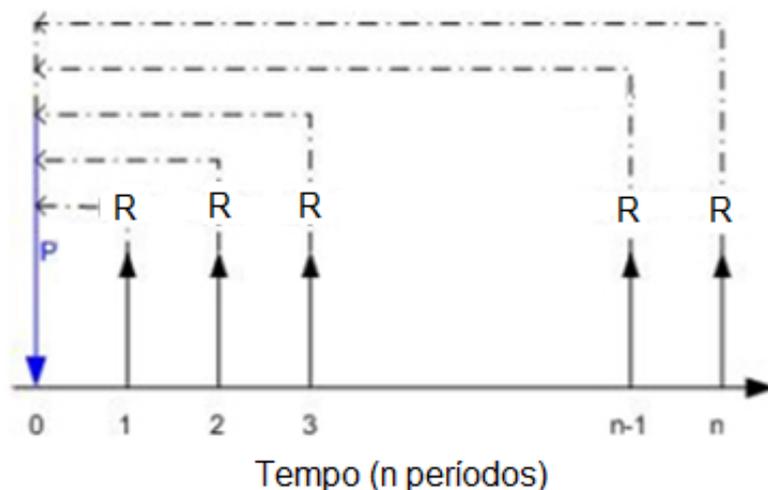


Figura 9: Representação gráfica para o cálculo do valor presente.
Fonte: Adaptado de MATHIAS e GOMES (2002)

A soma do valor atual dos termos na data zero é dada pela Equação 5:

$$P = \frac{R}{(1+i)} + \frac{R}{(1+i)^2} + \frac{R}{(1+i)^3} + \dots + \frac{R}{(1+i)^{n-1}} + \frac{R}{(1+i)^n}$$

$$a_{n|i} = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad \rightarrow \quad P = R \cdot a_{n|i} \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

- P = Valor presente do custo de O&M.
- R = Custo de O&M anual.
- i = Taxa de desconto anual, que é igual ao custo de oportunidade do capital (taxa de juros).
- n = Vida útil da tecnologia.

De acordo com a Equação 5, para trazer um fluxo financeiro de um investimento com número fixo de pagamentos de mesmo valor, a uma determinada taxa de juros para o valor presente, multiplica-se o valor de uma parcela de pagamentos pelo fator de conversão $a_{n|i}$. O valor de $a_{n|i}$ encontra-se tabelado para diversos valores de i ou de n. Considerando uma vida útil de 20 anos ($n = 20$) e uma taxa de juros de 10% ao ano ($i = 10\%$), o valor de $a_{20|10}$ é 8,513564 (MATHIAS; GOMES, 2002).

- e) Distante dos centros urbanos em pelo menos 500 metros: O usuário deverá digitar “sim”, caso o terreno esteja a uma distância superior a 500 metros de áreas urbanizadas, e “não”, caso esta distância seja inferior a 500 metros.
- f) Remoção de DBO: O usuário deverá inserir a percentagem de remoção mínima necessária de DBO.

Passo 3. Definir os objetivos e preferências

Em uma decisão com múltiplos critérios, é necessário especificar qual objetivo o decisor pretende alcançar (GOMES; GOMES, 2012). Segundo Sperling (2005), em estudos de concepção do sistema de tratamento, devem-se elencar os principais constituintes a serem removidos, o nível do tratamento, a eficiência de remoção desejada e o impacto ambiental no corpo receptor. Os requisitos a serem atingidos

para o efluente são função de legislação específica, que prevê padrões de qualidade para o efluente e para o corpo receptor.

Os objetivos e as preferências para a seleção da tecnologia de tratamento de esgoto desta pesquisa são as formas de disposição do esgoto, podendo ser em corpos d'água ou no solo, a percentagem de remoção da DBO mínima definida em legislação e os sistemas simplificados de tratamento de esgoto. Visando atender ao quesito simplicidade operacional, desconsideraram-se as tecnologias com notas 1 e 2 (menos favorável) para simplicidade operacional (SPERLING, 2005), que são as tecnologias (Apêndice E):

- Reator UASB + lodos ativados
- Lodos ativados convencional
- Lodos ativados convencional com remoção biológica de N
- Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P
- Lodos ativados convencional + filtração terciária

Conforme descrito no passo 1, o sistema permite selecionar as tecnologias pelo custo total por habitante. Com isso, por exemplo, caso o objetivo seja a seleção de uma tecnologia com um custo total menor do que R\$ 500,00 por habitante, o usuário poderá excluir as tecnologias com um custo maior do que este valor.

Passo 4. Identificar as restrições

As restrições representam limitações de recursos disponíveis ou a exigência de condições que devem ser cumpridas no problema (GOMES; GOMES, 2012). Deve-se escolher a tecnologia apropriada para cada caso, buscando separar as alternativas em factíveis das não factíveis para dado problema. Nesta pesquisa, serão considerados como fatores restritivos a disponibilidade de área no terreno e a distância de centros urbanos, descritos a seguir:

a) Disponibilidade de área

Neste item, verifica-se se a área disponível do terreno atende a área necessária para determinada tecnologia. A verificação ocorre com a Equação 6:

$A \times B \leq C$ -> se verdadeiro, a alternativa é viável, caso contrário, é inviável. (Eq. 6)

Onde:

- A = média da demanda de área mínima da tecnologia em m²/hab.
- B = população definida no parâmetro.
- C = tamanho da área disponível definida no parâmetro.

b) Distância necessária dos centros urbanos

O respeito à distância de ao menos 500 metros de áreas urbanas foi incluído no modelo. No caso de haver terreno sem esse afastamento, as tecnologias com pontuação 1 e 2 no subcritério “maus odores” serão desconsideradas, com exceção do reator UASB, do tanque séptico e do filtro anaeróbio, por ser possível realizar medidas mitigadoras nestas tecnologias. Com isso, as tecnologias que necessitam de distância de 500 metros dos centros urbanos e serão desconsideradas do modelo caso haja esta proximidade são as ETEs que possuem lagoas anaeróbias e os sistemas de disposição no solo, sendo estas:

- Sistema de lagoa anaeróbia - lagoa facultativa
- Lagoa anaeróbia + Lagoa facultativa + Lagoa de maturação
- Lagoa anaeróbia + Lagoa facultativa + Lagoa de alta taxa
- Lagoa anaeróbia + Lagoa facultativa + Remoção de algas
- Infiltração rápida
- Escoamento superficial
- Terras úmidas construídas (wetlands)
- Tanque Séptico + infiltração (rápida)
- Reator UASB + escoamento superficial

O sistema também possibilita restringir a seleção da tecnologia considerando o custo total, conforme descrito no passo 1 desta pesquisa.

Passo 5. Identificar critérios de decisão

Os critérios são representados pelo conjunto C , contendo um número “ m ” de critérios “ c ” (Equação 7):

$$C = \{c_1, \dots, c_k, \dots, c_m\} \quad (\text{Eq. 7})$$

Os critérios selecionados nesta pesquisa para escolha da tecnologia de tratamento de esgotos foram divididos em critérios econômicos, ambientais, sociais e tecnológicos, cada um com os seus subcritérios (Figura 10).

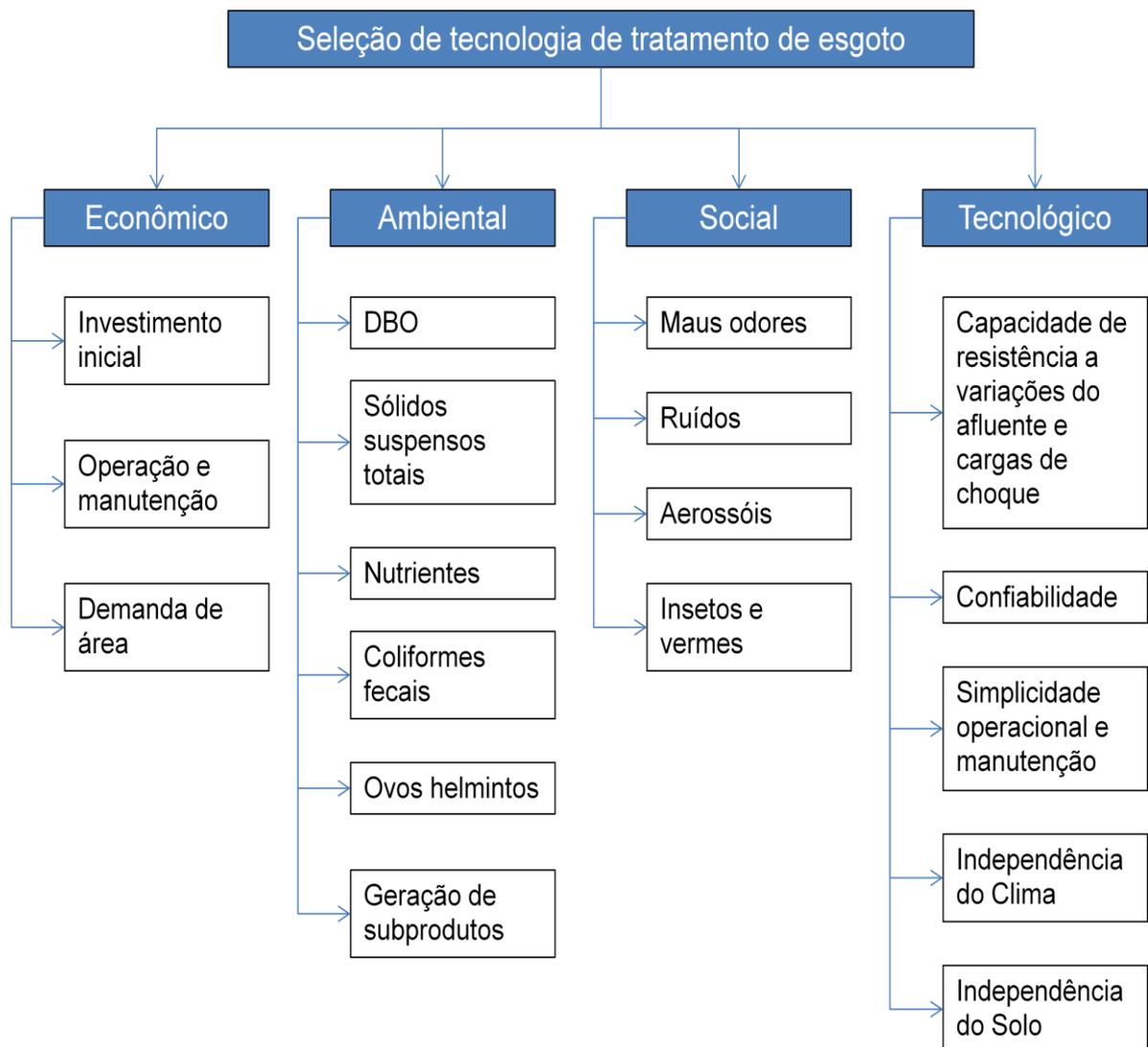


Figura 10: Critérios e subcritérios do modelo de decisão.
Fonte: Elaborado pela autora

Passo 6. Identificar alternativas que solucionem o problema

O processo de decisão requer a existência de um conjunto de alternativas factíveis para sua composição, em que cada decisão tem associado um ganho e uma perda (GOMES; GOMES, 2012). Dentre as alternativas citadas anteriormente, deve-se definir as alternativas factíveis, que atendam aos objetivos e as restrições impostas em cada caso, representadas por um conjunto A, contendo um número “n” de ações potenciais “a”, como segue (Equação 8):

$$A = \{a_1, \dots, a_j, \dots, a_n\} \quad (\text{Eq.}, 8)$$

Passo 7. Comparar as alternativas

Para comparar as alternativas utilizou-se o método MAUT. Neste método, inicialmente, define-se o desempenho da alternativa, elabora-se a matriz de decisão, define-se a taxa de substituição e calcula-se o valor da alternativa, para, finalmente, ordenar as alternativas. Os itens subsequentes explicam melhor o processo.

Passo 7.1. Definir o desempenho da alternativa

Definir o desempenho (valor) de uma alternativa a_k qualquer em respeito a um critério c_j qualquer, sendo representada por:

$$V_{(j,k)}$$

O valor cardinal de uma alternativa a_k é formado por um conjunto de valores $(v_{(1,k)}, v_{(2,k)}, \dots, v_{(m,k)})$ onde cada $v_{(m,k)}$ é o valor assumido pela alternativa a_k em cada um dos “m” critérios. Considerando-se que $v_{(j,k)} \geq v_{(j,n)}$, então a_k é melhor que a_n , segundo o critério c_j , sendo a_k e a_n duas quaisquer alternativas de A. Matematicamente, um critério é uma função real do conjunto A de alternativas de tal forma que se possam comparar duas alternativas a_1 e a_2 de acordo com um ponto de vista particular somente se baseando em dois números $v_{(1,1)}$ e $v_{(1,2)}$ (Bouyssou, 1990; ROY, 2005 apud ENSSLIN; MONTIBELLER NETO; NORONHA, 2001).

Para chegar ao $v_{(j,k)}$ utilizou-se do método para atribuição de utilidade (normalização). Trata-se de um método, dentre outros, para atribuir a utilidade de cada critério. Existem muitas formas de normalização, e nesta pesquisa utilizou-se uma escala linear, variando de 0 a 10 sendo que o valor de utilidade 10 é dado à melhor alternativa e o valor de utilidade 0 é dado à pior alternativa. Os valores intermediários são calculados através da Equação 9 (GOMES; GOMES, 2012):

$$v_{(j,k)}(x) = 10 \times \frac{x - \text{pior valor}}{\text{melhor valor} - \text{pior valor}} \quad (\text{Eq., 9})$$

Quando determinado critério tiver um sentido de minimização como, por exemplo, o custo, as performances correspondentes a este critério foram substituídas, na matriz de decisão, pelo seu inverso (GOMES; GOMES, 2012). O valor a ser normalizado adotado nos critérios econômicos e ambientais é a média do valor máximo com o valor mínimo (Apêndice A, B e C), onde o menor e maior valor estão representados na tabela 7.

Tabela 7: Maior e menor valor dos critérios a serem normalizados.

Critério	Unidade	Menor valor	Maior valor
Econômico			
Investimento inicial	R\$/hab	50	160
O&M	R\$/hab.ano	2,5	20
Demanda de área	m ² /hab	0,065	4
Ambiental			
DBO	% remoção	67,5	95,5
Sólidos Suspensos Totais	% remoção	72,5	95
Lodo líquido a ser tratado	L/hab.ano	0	2150
Lodo líquido a ser disposto	L/hab.ano	0	72,5

Fonte: Adaptado de Sperling (2005)

Para os subcritérios nutrientes, coliformes fecais e ovos helmintos utilizou-se de funções de valor específicas demonstradas nos subitens a seguir (Tabelas 8, 9, 10 e 11).

❖ Nutrientes

Para definir o desempenho do subcritério nutrientes calculou-se a média do valor da função de valor da amônia e do nitrogênio total (NT) com a função de valor do fósforo total (FT).

Tabela 8: Função de valor da amônia e do Nitrogênio total.

Amônia-N (%)	NT (%)	Função de valor
< 30	< 30	0
< 45	< 60	4
< 50	< 60	4
50-85	< 60	6
65-85	< 60	6
> 80	< 60	6
35-65	< 65	6
50-65	50-65	6
> 65	> 65	8
> 80	> 75	10
65-85	75-90	10

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 9: Função de valor do Fósforo total.

FT (%)	Função de valor
< 35	0
> 50	6
50-60	7
75-88	10

Fonte: Elaborado pela autora

❖ Coliformes fecais

Tabela 10: Função de valor da remoção dos Coliformes fecais.

NMP/100ml	Função de valor
10^6 10^7	0
10^4 10^6	6
10^4 10^5	7
10^3 10^4	9
10^2 10^4	10

Fonte: Elaborado pela autora

❖ Ovos helmintos

Tabela 11: Função de valor dos ovos helmintos.

ovo/L	Função de valor
< 1	10
> 1	0

Fonte: Elaborado pela autora

Os critérios sociais e tecnológicos obedeceram à regra da tabela 12. Caso o critério seja variável com o tipo de processo, equipamento, modalidade ou projeto, descrito como +/+++++, com valor correspondente de 1 a 5, considerou-se o valor médio de 3. Para as tecnologias reator UASB seguida de pós-tratamento, utilizou-se a média entre os valores das tecnologias nos critérios confiabilidade, simplicidade operacional e independência do clima.

Tabela 12: Conversão de valores dos critérios sociais e tecnológicos.

Sperling (2005)	Classificação	Valor correspondente	Valor normalizado
+	Menos favorável	1	0
++	Intermediários, em classificação decrecente	2	2,5
+++		3	5
++++		4	7,5
+++++	Mais favorável	5	10

Fonte: Elaborado pela autora

Passo 7.2. Elaborar a Matriz de Decisão

Elaborar a Matriz de Decisão como uma forma de representar a relação entre os critérios e as alternativas:

Tabela 13: Modelo da matriz de Decisão.

	c_1	(...)	c_j	(...)	c_m
a_1	$v_{(1,1)}$	(...)	$v_{(j,1)}$	(...)	$v_{(m,1)}$
a_2	$v_{(1,2)}$	(...)	$v_{(j,2)}$	(...)	$v_{(m,2)}$
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
a_k	$v_{(1,k)}$	(...)	$v_{(j,k)}$	(...)	$v_{(m,k)}$
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
a_n	$v_{(1,n)}$	(...)	$v_{(j,n)}$	(...)	$v_{(m,n)}$

Fonte: Adaptado de Gomes e Gomes (2012, p. 107)

A matriz de decisão desta pesquisa se encontra no Apêndice A, B, C, D e E.

Passo 7.3. Definir as Taxas de substituição

Posteriormente, para agregar os critérios, definem-se as taxas de substituição, vulgarmente conhecidas como “pesos”, pelo conjunto W , contendo um número “ m ” de pesos “ w ” (Equação 10):

$$W = \{w_1, \dots, w_j, \dots, w_m\} \quad (\text{Eq., } 10)$$

O somatório das taxas de substituição deve ser igual a 1 (Equação 11):

$$\sum_i^n w_i = 1 \quad (\text{Eq., } 11)$$

Além disso, as taxas de substituição devem estar em um valor entre 0 e 1 (Equação 12):

$$1 > w_1 > 0 \quad (\text{Eq., } 12)$$

Com isso, os critérios quantitativos e qualitativos serão priorizados, onde determinado critério receberá um peso inferior aos critérios de maior importância caso seja considerado pouco importante diante de outros critérios. Existem diversos métodos para determinar as taxas de substituição. Nesta pesquisa utilizou-se o

método *Swing Weighting*, pois pode ser utilizado em qualquer situação e apresenta um caráter intuitivo (GOMES; GOMES, 2012). A técnica de ponderação *Swing Weighting* é utilizada com frequência em conjunto com a MAUT (FRENCH et al., 2005) e facilita a compreensão dos *stakeholders* clarificando o impacto da importância relativa dos pesos nos resultados (TRAINOR et al., 2007). Neste método, o decisor atribui 100 pontos para o critério que decide elevar à maior pontuação possível. Para os demais critérios, são atribuídos valores inferiores a 100 pontos. Posteriormente, é necessário normalizar os valores de tal forma que a soma dos valores seja igual a 1. Por exemplo, dado três critérios A, B e C, o decisor os pontua de acordo com as suas preferências: A = 30, B = 70 e C = 100. Em seguida, é necessário normalizar estes valores:

$$w_A = \frac{30}{(30 + 70 + 100)} = 0,15 = 15\%$$

$$w_B = \frac{70}{(30 + 70 + 100)} = 0,35 = 35\%$$

$$w_C = \frac{100}{(30 + 70 + 100)} = 0,5 = 50\%$$

Passo 7.4. Calcular o valor da alternativa a_n :

Calcular o valor da alternativa a_n qualquer, sendo representada por:

$$V_{a_n}$$

A função aditiva tem a forma para a alternativa “ a_1 ” (Equação 13):

$$V(a_1) = \sum_{i=1}^m w_i \cdot v_{(i,1)} = w_1 \cdot v_{(1,1)} + w_2 \cdot v_{(2,1)} + \dots + w_m \cdot v_{(m,1)} \quad (\text{Eq., 13})$$

O maior valor de V_{a_n} corresponde à melhor alternativa.

Passo 8. Escolher a alternativa

Após a priorização das alternativas, deve-se avaliar uma combinação de alternativas com as melhores pontuações e realizar uma análise de sensibilidade nas mesmas.

3.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O tratamento do esgoto envolve o sistema de coleta, de transporte e de tratamento. O sistema de coleta representa por volta de 60% dos custos totais. Para pequenas cidades, geralmente, os custos de transporte superam os custos de tratamento devido à distância do local de disposição final (SPERLING; SALAZAR, 2013). Em vista disso, ao selecionar o terreno onde será localizado a ETE, é importante verificar a localização da área em relação ao local de geração de esgotos, a localização da área em relação ao corpo receptor e a localização da área em relação às residências mais próximas para minimizar os custos de transporte (SPERLING, 2002).

Como os custos do sistema de coleta e de transporte são específicos para cada localidade, estes devem ser avaliados separadamente. Esta pesquisa avaliou apenas as tecnologias de tratamento de esgoto. Devido à amplitude deste tema e ao tempo para desenvolver esta pesquisa, alguns aspectos não foram considerados, sendo estes:

- O tratamento de esgoto industrial.
- O reúso da água residuária na agricultura, recarga de aquíferos, em edifícios, para uso urbano não potável, nas indústrias e na aquicultura.
- As tecnologias de tratamento preliminar, as estações elevatórias, os medidores e os dispositivos de entrada e saída.
- A avaliação das formas de tratamento do lodo e a redução de custos de tratamento e disposição final do lodo com o reúso do mesmo na agricultura.
- O possível ganho financeiro com a produção de biogás gerado nos processos anaeróbios.
- Aspectos estéticos das ETEs como a arquitetura, urbanismo e paisagismo.

- A variação dos custos de investimento e de operação e manutenção com o aumento da população. Considerou-se que estes custos têm uma variação linear com o aumento da população.
- A influência da característica do solo na seleção das tecnologias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DOS CUSTOS DAS TECNOLOGIAS

Realizou-se um estudo comparativo do custo total por habitante das tecnologias com o valor do metro quadrado do terreno. Os custos relacionados ao tratamento do esgoto em uma ETE estão divididos da seguinte forma (GAMEIRO, 2001):

- Custo de implantação dos sistemas: custos de construção, equipamentos e montagem;
- Custo de operação e manutenção: inclui os custos de energia, de tratamento e disposição final do lodo, de insumos, de manutenção e da mão-de-obra;
- Custo de desapropriação de terras.

Para calcular o custo total por habitante somou-se o investimento inicial ao custo de operação e manutenção de vinte anos em valor presente e ao custo do terreno (demanda de área da tecnologia versus o valor do metro quadrado). Como as variáveis investimento, custo de operação e manutenção e demanda de área são fixas por habitante, o que varia na função é o valor do metro quadrado. A primeira coluna do Apêndice F, onde o valor do metro quadrado é nulo, representa apenas os custos de investimento somados ao custo de operação e manutenção de vinte anos em valor presente (SPERLING, 2005). A partir desta tabela, gerou-se os Gráficos 5, 6 e 7.

Segundo Gomes e Harada (1997), um dos grandes problemas da locação das unidades de esgotos é a necessidade de desapropriar as benfeitorias e as terras aonde se pretende implantar uma ETE. Os custos de desapropriação do terreno adquirem maior importância à medida que são utilizados sistemas com maior necessidade de área. As tecnologias descritas no Gráfico 5 possuem investimento inicial somado a operação e manutenção relativamente baixos, entre R\$70 e R\$120 por habitante. Entretanto, estas tecnologias possuem grande demanda por área. À medida que o custo de aquisição do terreno aumenta, o custo do terreno se torna muito representativo no custo total e estas tecnologias tornam-se muito caras, podendo custar mais de R\$ 4.000 por habitante caso o preço do metro quadrado

seja de R\$ 1.000, conforme se verifica no Gráfico 5. Isto poderia implicar na rejeição destas tecnologias.

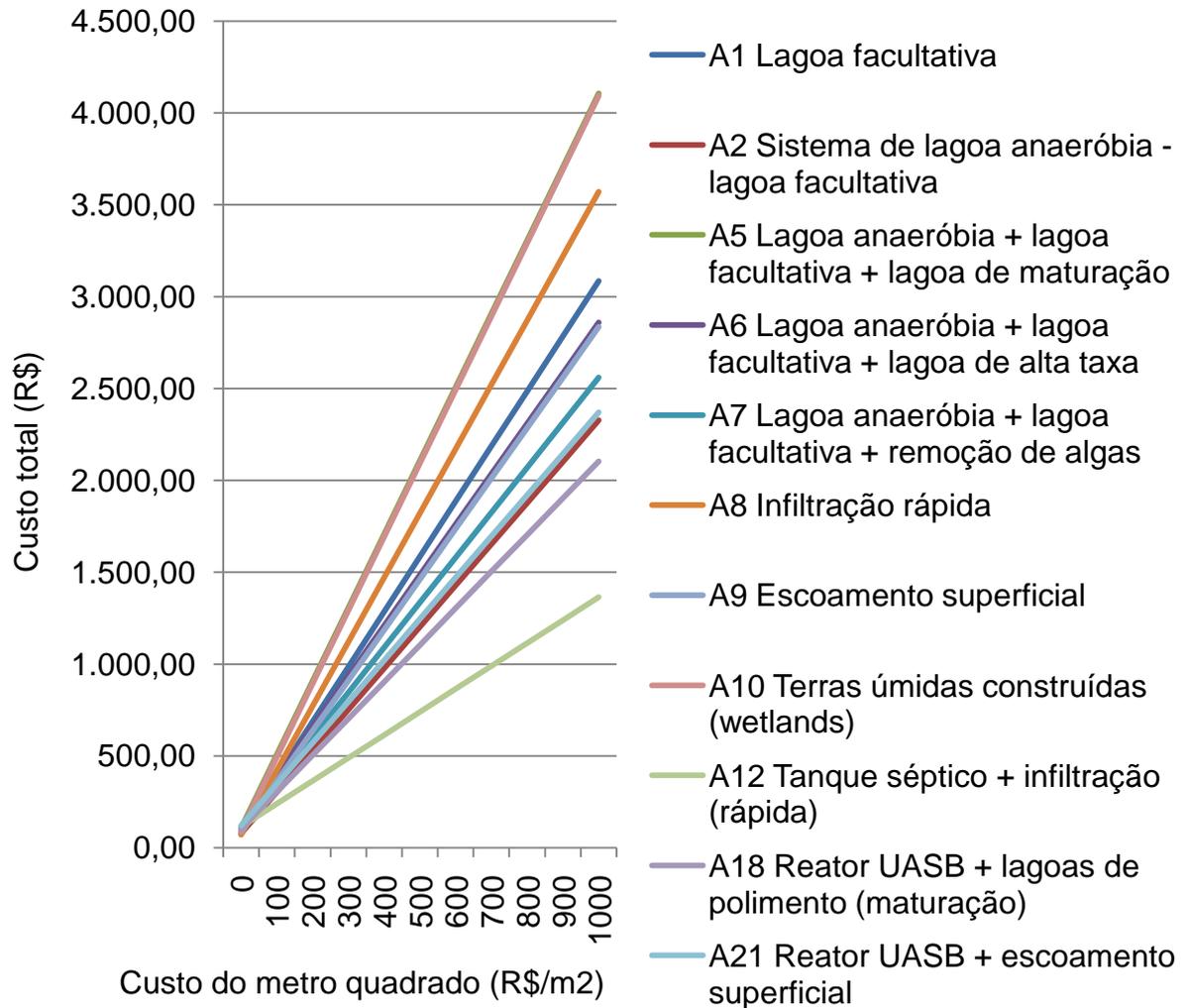


Gráfico 5: Custo total por habitante de acordo com o custo do metro quadrado.
Fonte: Elaborado pela autora

Dentre as opções analisadas, as tecnologias descritas no Gráfico 6 são as que possuem os maiores investimentos iniciais somado aos custos de operação e manutenção de 20 anos, situando-se entre R\$170 e R\$330 por habitante. Em contrapartida, possuem uma demanda de área pequena. Com isso, caso o custo do metro quadrado do terreno seja alto, os custos totais destas tecnologias serão menores do que as tecnologias listadas no Gráfico 5, compensando, assim, os altos investimentos somados aos custos de operação e manutenção.

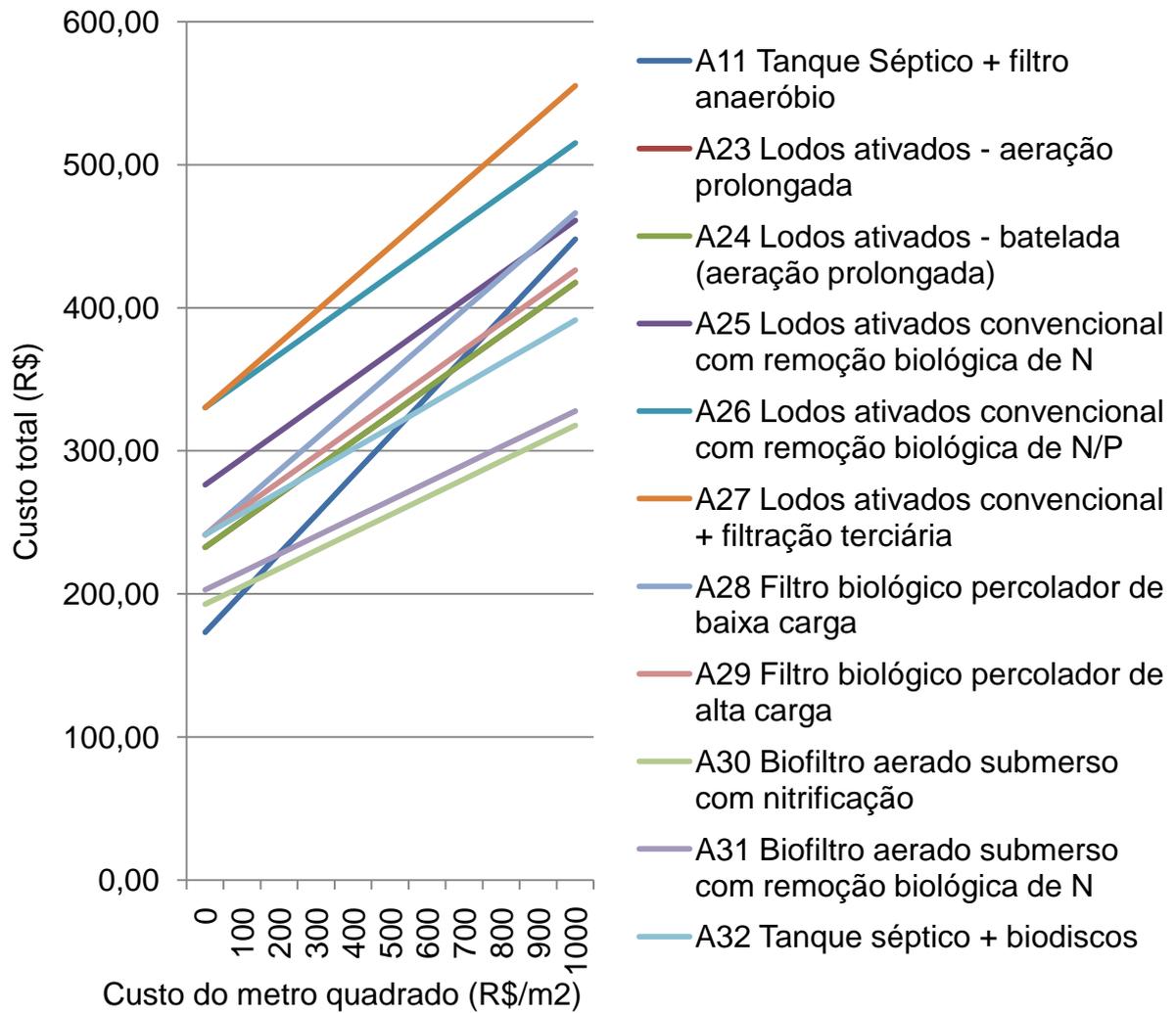


Gráfico 6: Custo total por habitante de acordo com o custo do metro quadrado.
Fonte: Elaborado pela autora

As tecnologias descritas no Gráfico 7 possuem investimentos iniciais somado aos custos de operação e manutenção de 20 anos, entre R\$60 a R\$170 por habitante, e necessidade de menores áreas.

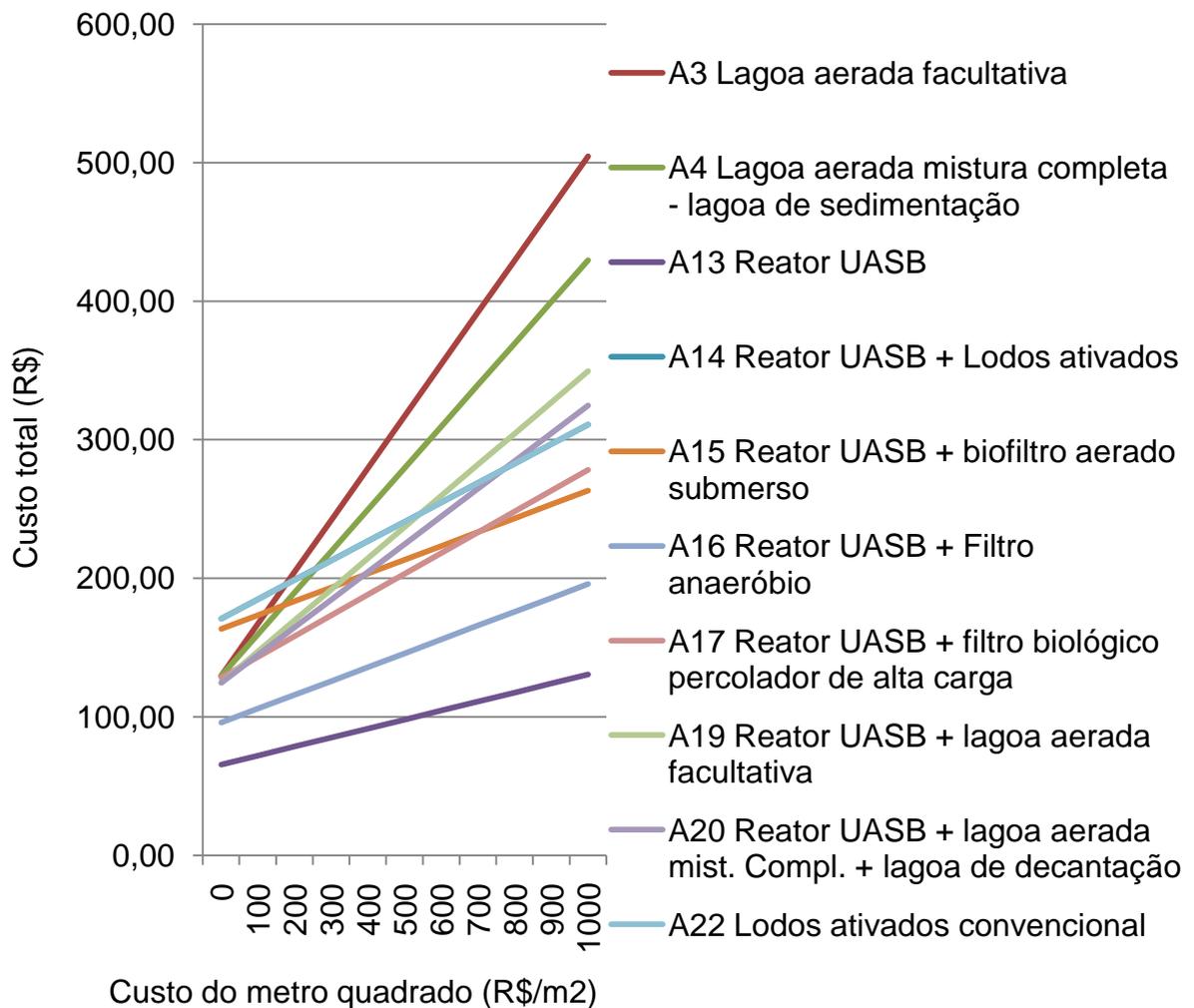


Gráfico 7: Custo total por habitante de acordo com o custo do metro quadrado.
Fonte: Elaborado pela autora

Portanto, para as tecnologias com uma grande demanda de área, o valor do metro quadrado é muito representativo para a escolha destas tecnologias. O reator UASB (alternativa 13) é a tecnologia mais econômica e atende aos padrões de lançamento de efluente da Resolução CONAMA nº 430, de 2011 (BRASIL, 2011). Ainda que o lado econômico seja fundamental, deve-se ressaltar que nem sempre a melhor alternativa é simplesmente a que apresenta o menor custo em estudos econômico-financeiros (SPERLING, 2005), sendo que os outros critérios ambientais, sociais e tecnológicos também devem ser considerados na escolha da tecnologia, o que será abordado nos próximos itens.

4.2 ESTUDOS DE CASO

O modelo para a seleção de tecnologia de tratamento de esgoto desenvolvido neste trabalho é aplicável a qualquer faixa de população, entretanto, nos estudos de caso destacou-se a utilização do modelo para municípios com até 100.000 habitantes, consideradas cidades pequenas segundo a classificação do IBGE. O motivo deste destaque é que esta faixa de população representa 95,5% dos municípios brasileiros e por estes municípios possuírem os menores índices de atendimento do serviço de esgotamento sanitário (IBGE, 2008). A avaliação do modelo foi feita com a introdução de dados de três estudos de caso distintos para populações de 20.000, 50.000 e 100.000 habitantes.

Segundo Jordão e Pessôa (2011), uma estação de tratamento de esgoto tem um horizonte de atendimento de 20 a 25 anos, sendo assim, devem-se estimar os custos de operação e manutenção para este período, trazendo os valores anuais para valor presente. Nesta pesquisa, considerou-se que a vida útil de todas as estações de tratamento como sendo de vinte anos. Para um fluxo financeiro de um investimento com número fixo de vinte de pagamentos de mesmo valor, a uma taxa de juros de 10% ao ano, para trazer estes pagamentos ao valor presente, multiplica-se o valor de uma parcela pelo parâmetro 8,513564 (MATHIAS; GOMES, 2002).

Com relação a percentagem de remoção de DBO, os padrões de lançamento definidos nas legislações Estaduais devem ser consultados por serem mais restritivos que a legislação Federal. Para o estudo de caso 1, considerou-se como sendo no Estado de Minas Gerais, que exige uma remoção média anual de 70% da DBO. O estudo de caso 2 localiza-se no Estado do Rio de Janeiro, onde a legislação deste Estado determina que a remoção mínima de DBO como sendo de acordo com a carga orgânica diária bruta lançada na rede coletora. Considerou-se, para fins de simulação, a remoção mínima de DBO de 80% neste estudo de caso. No estudo de caso 3, representando o Estado de São Paulo, a remoção mínima de DBO exigida na legislação é de 80%. É prudente salientar, que um estudo complementar da capacidade de autodepuração do corpo receptor deve ser realizado para atender aos padrões do corpo receptor.

Nos três estudos de caso, considerou-se que a temperatura média anual é superior a 20°C. Caso a temperatura seja inferior, um estudo complementar sobre a

eficiência de tratamento das tecnologias com processos anaeróbios deve ser realizado. Os parâmetros utilizados para a avaliação do modelo estão representados na tabela 14.

Tabela 14: Parâmetros utilizados na avaliação do modelo para os estudos de caso 1, 2 e 3.

Parâmetros	Unidade	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Fixos				
Vida útil	anos	20	20	20
Temperatura média anual superior a 20 °C	Sim/não	Sim	Sim	Sim
Inseridos no sistema				
População futura	hab.	20.000	50.000	100.000
Valor do metro quadrado	R\$/m ²	50	200	400
Tamanho da área disponível	m ²	50.000	30.000	20.000
Fator de conversão financeiro	-	8,513564	8,513564	8,513564
Distante dos centros urbanos em 500 metros?	sim/não	Sim	Sim	Não
Simplicidade operacional	sim/não	Sim	Sim	Não
Remoção mínima de DBO	%	70	80	80
Estado	-	MG	RJ*	SP

* Considerou-se a remoção de 80% para uma carga orgânica bruta entre 25 e 80 kg DBO/dia.
Fonte: Elaborado pela autora

As alternativas factíveis, que atenderam aos objetivos de disposição final nos corpos d'água, de remoção de DBO adequada à legislação e de simplicidade operacional, e atenderam as restrições de disponibilidade de área e de distância de centros urbanos, para os estudos de caso 1, 2 e 3 estão descritas na Tabela 15.

Tabela 15: Tecnologias que atenderam aos objetivos e as restrições para os três casos desta pesquisa (continua).

Sistemas de tratamento de esgoto		Caso 1	Caso 2	Caso 3
Lagoa facultativa	A1	X		
Sistema de lagoa anaeróbia - lagoa facultativa	A2	X		
Lagoa aerada facultativa	A3	X	X	
Lagoa aerada mistura completa - lagoa de sedimentação	A4	X	X	
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação	A5	X		
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de alta taxa	A6	X		
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas	A7	X		
Infiltração rápida	A8			
Escoamento superficial	A9	X		
Terras úmidas construídas (wetlands)	A10	X		
Tanque séptico + filtro anaeróbio	A11	X	X	
Tanque séptico + infiltração (rápida)	A12			
Reator UASB	A13			
Reator UASB + lodos ativados	A14			X
Reator UASB + biofiltro aerado submerso	A15			X
Reator UASB + filtro anaeróbio	A16	X	X	X
Reator UASB + filtro biológico percolador de alta carga	A17	X	X	X
Reator UASB + lagoas de polimento (maturação)	A18	X		
Reator UASB + lagoa aerada facultativa	A19	X	X	
Reator UASB + lagoa aerada mistura completa + lagoa de decantação	A20	X	X	X
Reator UASB + escoamento superficial	A21	X		
Lodos ativados convencional	A22			X

Tabela 15: Tecnologias que atenderam aos objetivos e as restrições para os três casos desta pesquisa (conclusão).

Sistemas de tratamento de esgoto		Caso 1	Caso 2	Caso 3
Lodos ativados por aeração prolongada	A23			X
Lodos ativados de fluxo intermitente	A24		X	X
Lodos ativados com remoção biológica de nitrogênio	A25			X
Lodos ativados com remoção biológica de nitrogênio e fósforo	A26			X
Lodos ativados convencional + filtração terciária	A27			
Filtro biológico percolador de baixa carga	A28	X	X	
Filtro biológico percolador de alta carga	A29	X	X	X
Biofiltro aerado submerso com nitrificação	A30			X
Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de nitrogênio	A31			X
Tanque séptico + biodiscos	A32	X	X	X

Fonte: Elaborado pela autora

Os pesos foram determinados pela autora com base na análise realizada por Sperling (2005) dos aspectos críticos e importantes na seleção de sistemas de tratamento de esgoto em regiões desenvolvidas e em desenvolvimento (Figura 8). Neste exemplo, o critério econômico e tecnológico tiveram maiores pesos devido à situação sócio-econômica em que se encontra a população brasileira. No entanto, os pesos podem ser ajustados no modelo de acordo com o caso a ser analisado.

Para os subcritérios econômico, considerou-se como mais crítico o investimento inicial, seguido da operação e manutenção e da demanda de área. Para um valor de metro quadrado representativo, recomenda-se que a percentagem referente ao subcritério demanda de área seja maior que o peso dos subcritérios investimento e operação e manutenção.

Para os subcritérios ambientais, consideraram-se como maiores pesos a Demanda Bioquímica de Oxigênio e os Sólidos Suspensos. Considerando que a disposição do efluente nestes estudos de caso será em um rio, os pesos dos critérios dos nutrientes, dos coliformes fecais e dos ovos helmintos são menores.

Caso a disposição seja em uma lagoa, os pesos destes subcritérios deverão ser maiores, e em alguns casos, poderão ser um fator restritivo. A geração de subprodutos e o consumo de energia, vistas apenas sob o ponto de vista ambiental, foram considerados um peso pequeno, já que os custos com a geração de subprodutos e os custos da energia estão incluídos no custo de Operação e Manutenção.

A emissão de odores provenientes de Estações de Tratamento de Esgoto ocasiona muitos incômodos a populações vizinhas a essas estações e geram reclamações que representam 50% das denúncias ambientais encaminhadas pela população aos órgãos de controle ambiental em todo o mundo (KAYE; JIANG, 2000). Por este motivo, o peso com a emissão de odor foi considerado maior do que os outros subcritérios sociais. Para o critério tecnológico, seguindo o estudo de Sperling (2005), a simplicidade operacional e a confiabilidade possuem um maior peso. Para uma estação de tratamento alimentada com esgotos domésticos, tipicamente diluídos, a probabilidade de ocorrência de choques de carga orgânica é reduzida (AQUINO; CHERNICHARO, 2005), por isso, o peso deste subcritério foi menor. Os pesos dos critérios e subcritérios podem ser verificados na Tabela 16.

Tabela 16: Critérios, subcritérios e pesos (continua).

Critérios e subcritérios	Notas	Pesos
Econômico	100	42%
Investimento inicial	100	43%
Demanda de área	50	22%
Operação e manutenção	80	35%
Ambiental	30	13%
Demanda Bioquímica de Oxigênio	100	34%
Sólidos Suspensos	100	34%
Nutrientes	20	7%
Coliformes Fecais	20	7%
Ovos helmintos	20	7%
Geração de subprodutos	20	7%

Tabela 16: Critérios, subcritérios e pesos (conclusão).

Critérios e subcritérios	Notas	Pesos
Social	30	13%
Maus odores	100	40%
Ruído	50	20%
Aerossóis	50	20%
Insetos e vermes	50	20%
Tecnológico	80	33%
Resistência a variações do afluente e a cargas de choque	10	8%
Confiabilidade	70	33%
Simplicidade operacional e manutenção	100	42%
Dependência de variáveis climáticas	10	8%
Solo	10	8%

Fonte: Elaborado pela autora

Após a definição da taxa de substituição, busca-se agregar os critérios em uma única avaliação global, transformando um modelo que tem múltiplos critérios em um modelo com critério único, que é a pontuação final que uma determinada alternativa recebe. Para isso, utiliza-se a fórmula de agregação aditiva, que corresponde à soma dos valores atribuídos aos critérios econômico, ambiental, social e tecnológico multiplicados pela taxa de substituição (Equação 13). Posteriormente, é realizada uma ordenação destas alternativas para cada estudo de caso. Os valores estão representados na Tabela 17.

Tabela 17: Valor e ordem das alternativas dos estudos de caso (continua).

Alt.	Critérios				Valor	Ordem dos estudos de caso		
	Econômico	Ambiental	Social	Tecnológico		1	2	3
A1	7	3	6	9	6,78	5º		
A2	8	3	4	9	6,91	3º		
A3	8	3	4	8	6,59	8º	3º	

Tabela 17: Valor e ordem das alternativas dos estudos de caso (conclusão).

Alt.	Critérios				Valor	Ordem dos estudos de caso		
	Econômico	Ambiental	Social	Tecnológico		1	2	3
A4	8	4	2	4	5,93	15 ^o	8 ^o	
A5	5	5	4	9	6,11	12 ^o		
A6	6	4	1	7	5,29	19 ^o		
A7	7	6	4	7	6,03	14 ^o		
A8	7	9	5	8	6,84			
A9	7	6	4	9	7,00	2 ^o		
A10	6	7	5	9	6,61	7 ^o		
A11	7	4	6	4	6,24	10 ^o	4 ^o	
A12	7	9	5	7	6,68			
A13	10	1	6	4	7,06			
A14	7	6	4	4	5,97			7 ^o
A15	8	6	5	5	6,39			3 ^o
A16	9	4	6	4	7,17	1 ^o	1 ^o	1 ^o
A17	8	6	5	5	6,79	4 ^o	2 ^o	2 ^o
A18	7	5	5	6	6,74	6 ^o		
A19	8	3	2	6	6,23	11 ^o	5 ^o	
A20	8	4	1	3	6,03	13 ^o	6 ^o	6 ^o
A21	7	6	4	6	6,39	9 ^o		
A22	7	6	5	5	5,63			11 ^o
A23	6	6	6	6	5,80			9 ^o
A24	6	6	4	8	5,97		7 ^o	8 ^o
A25	5	6	5	5	4,54			13 ^o
A26	3	6	5	5	4,07			14 ^o
A27	3	9	5	5	4,40			
A28	5	6	6	7	5,70	17 ^o	10 ^o	
A29	5	5	7	7	5,73	16 ^o	9 ^o	10 ^o
A30	7	6	8	6	6,27			4 ^o
A31	6	6	8	6	6,15			5 ^o
A32	5	6	7	3	5,61	18 ^o	11 ^o	12 ^o

Fonte: Elaborado pela autora

Após a priorização das alternativas, é recomendável a realização de uma análise de sensibilidade em relação aos pesos, de forma a se avaliar o grau de robustez da escolha (Gomes; Gomes, 2012). Nesta pesquisa, os critérios de maior peso são o econômico e o tecnológico, que contribuem com, respectivamente, 42% e 33% do valor final de utilidade. Percebe-se que as alternativas que tiveram baixa avaliação nesses critérios provavelmente não terão bons conceitos. Todavia, em um cenário diferente, os pesos alocados aos critérios poderiam variar de forma considerável, levando a uma escolha diferente. Deste modo, por exemplo, em um ambiente em que o odor seja crítico para escolha da tecnologia, o peso do critério social poderia ser maior.

Para verificar a robustez do modelo e analisar a influência dos critérios na avaliação, foi feita uma análise de sensibilidade dos pesos do modelo. Na análise de sensibilidade selecionaram-se as seguintes alternativas com os dez maiores valores:

- A1: Lagoa facultativa
- A2: Sistema de lagoa anaeróbia - lagoa facultativa
- A8: Infiltração rápida
- A9: escoamento superficial
- A10: Terras úmidas construídas
- A12: Tanque séptico + infiltração (rápida)
- A13: Reator UASB
- A16: Reator UASB + filtro anaeróbio
- A17: Reator UASB + filtro biológico percolador de alta carga
- A18: Reator UASB + lagoas de polimento

Verifica-se que as dez alternativas com as maiores pontuações desta pesquisa estão contidas nos principais tipos de sistema de tratamento de esgoto utilizados no Brasil que são a lagoa facultativa, o reator anaeróbio, a lagoa anaeróbia, o filtro biológico e a lagoa de maturação, com exceção do escoamento superficial, das terras úmidas construídas e da infiltração rápida (Gráfico 4). O tratamento do esgoto com a aplicação no solo tem sido pouco utilizado no Brasil apesar de possuir vantagens como: baixo investimento inicial e custos de operação e manutenção, adequada remoção de DBO, baixa geração de subprodutos e alta simplicidade operacional. O motivo para esta conduta pode ser a baixa difusão destas tecnologias no meio especializado (TONETTI et al., 2009).

Assim, como nesta pesquisa os critérios com os maiores pesos foram o econômico e o tecnológico, este resultado reforça a teoria de Sperling (2005) que estes critérios são priorizados no Brasil (Gráfico 8). A Gráfico 8 demonstra a variação dos valores atribuídos a cada critério para estas alternativas.

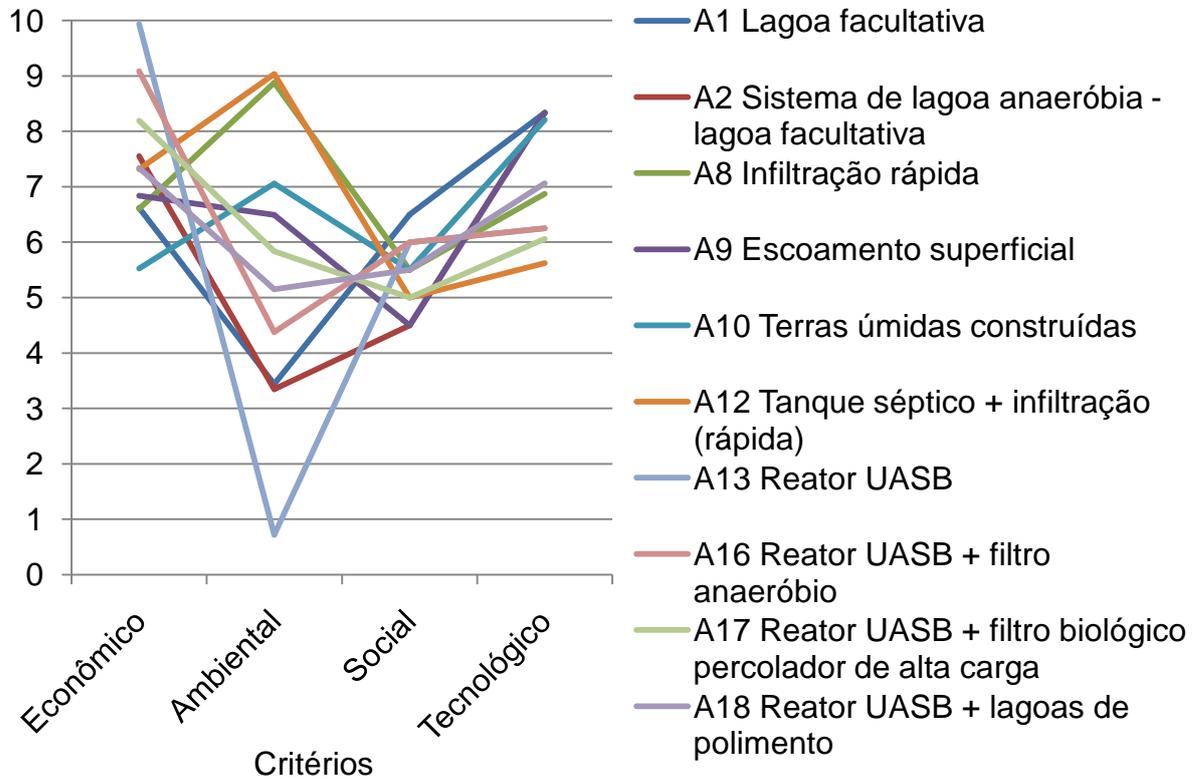


Gráfico 8: Variação dos critérios.
Fonte: Elaborado pela autora

Na análise de sensibilidade, variaram-se os pesos no modelo, priorizando o critério econômico no peso 1, o critério ambiental no peso 2, o critério social no peso 3 e o critério tecnológico no peso 4, conforme a tabela 18.

Tabela 18: Pesos para análise de sensibilidade.

Critério	Peso				
	original	Peso 1	Peso 2	Peso 3	Peso 4
Econômico	41,7%	52,6%	15,8%	15,8%	15,8%
Ambiental	12,5%	15,8%	52,6%	15,8%	15,8%
Social	12,5%	15,8%	15,8%	52,6%	15,8%
Tecnológico	33,3%	15,8%	15,8%	15,8%	52,6%

Fonte: Elaborado pela autora

Os diferentes pesos geraram variações nos valores das alternativas conforme se verifica no Gráfico 9.

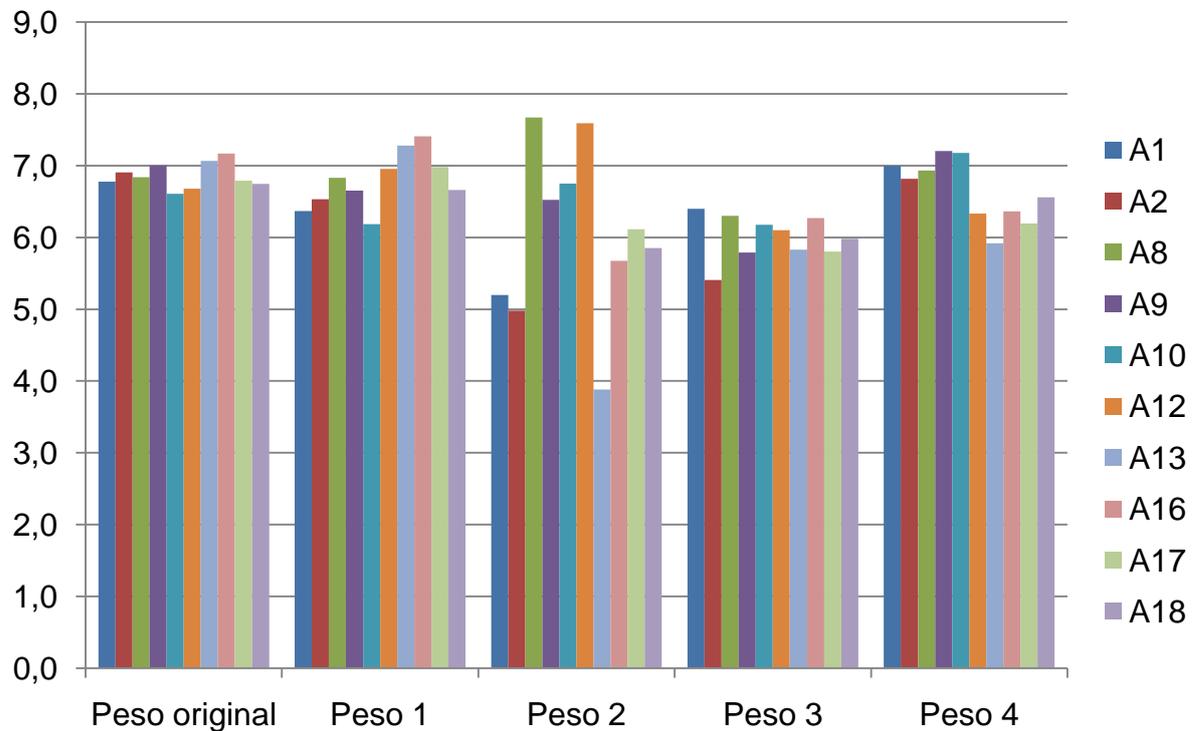


Gráfico 9: Análise de sensibilidade.
Fonte: Elaborado pela autora

Nesta análise de sensibilidade, as alternativa A1, A8, A9 e A16 receberam as melhores avaliações em diferentes pesos, conforme a Tabela 19:

Tabela 19: Alternativas com as melhores avaliações.

Tecnologia	Peso 1 (econômico)	Peso 2 (ambiental)	Peso 3 (social)	Peso 4 (tecnológico)
A1 Lagoa facultativa	6,4	5,2	6,4	7,0
A8 Infiltração rápida	6,8	7,7	6,3	6,9
A9 Escoamento superficial	6,7	6,5	5,8	7,2
A16 Reator UASB + filtro anaeróbio	7,4	5,7	6,27	6,4

Fonte: Elaborado pela autora

Deste modo, conclui-se que não há uma alternativa que seja melhor em todos os critérios, devendo os atores decidirem qual critério deve ser priorizado para a

seleção da alternativa mais adequada para cada situação. Caso os pesos dos subcritérios forem alterados, o resultado do modelo será modificado. Os pesos atribuídos aos diversos critérios e subcritérios são função do cenário em questão e sempre haverá um certo grau de subjetividade.

Cabe ressaltar que o decisor não deve confiar cegamente em um modelo de suporte à decisão, mas sim, deve ser capaz de ponderar as qualidades e limitações que este modelo oferece para o contexto da tomada de decisão, de tal forma que a incerteza seja reduzida ao mínimo possível, e a qualidade da decisão tomada seja incrementada. Os resultados obtidos a partir do sistema são apenas recomendações, que podem ser seguidas ou não pelos decisores. Portanto, este modelo não visa substituir o papel do tomador de decisão, mas sim de proporcionar uma visão macro do problema de decisão.

5 CONCLUSÃO

A seleção de tecnologias de tratamento de esgoto é uma decisão complexa e o sistema desenvolvido nesta pesquisa foi de grande valia, pois poderá auxiliar no processo decisório de seleção destas tecnologias em diversas localidades do Brasil. O sistema é uma ferramenta útil aos decisores e é direcionado aos profissionais das prefeituras e técnicos envolvidos em questões relacionadas à escolha de tecnologias de tratamento de esgoto. Tem como objetivo apoiar a decisão e gerar conhecimento para os atores.

Diante da falta de investimento em saneamento, o fator econômico é prioritário no Brasil. Para as tecnologias com uma grande demanda de área, quando o valor do metro quadrado é alto, o custo do terreno é muito representativo no custo total da tecnologia, sendo que, por este motivo, estas tecnologias poderão ser desconsideradas. Dentre as trinta e duas tecnologias analisadas, o reator UASB é a tecnologia mais econômica.

Sete das dez alternativas que obtiveram as maiores pontuações nesta pesquisa estão contidas nos principais tipos de sistema de tratamento de esgoto utilizados no Brasil, que são a lagoa facultativa, o reator anaeróbio, a lagoa anaeróbia, o filtro biológico e a lagoa de maturação, o que reforça a teoria que os critérios econômicos e tecnológicos são priorizados no Brasil. A disposição no solo apresenta vantagens e a sua utilização deve ser incentivada no Brasil.

Constatou-se que não há um sistema de tratamento de esgoto que seja melhor em todos os critérios e subcritérios, e possa ser indicado como melhor para quaisquer condições. Entretanto, quando se escolhe um sistema que se adapta às condições locais e aos objetivos em cada caso, obtém-se a mais alta relação custo/benefício.

Para aperfeiçoar o sistema criado nesta pesquisa e como recomendação para futuros trabalhos, sugere-se incluir no sistema de apoio à decisão as características do solo como restrição e a indicação de tecnologias que permitem o reúso do efluente. Além disso, outros métodos multicritério de apoio à decisão podem ser aplicados à matriz de decisão.

REFERÊNCIAS

ANAGNOSTOPOULOS, K. P.; GRATZIOU, M.; VAVATSIKOS, A. P. **Using the fuzzy analytic hierarchy process for selecting wastewater facilities at prefecture level**. *European Water*, v 19/20, p. 15-24, 2007. Disponível em <http://www.ewra.net/ew/pdf/EW_2007_19-20_02.pdf>. Acesso em 2 set. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7229**: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13969**: Tanques sépticos: Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos: Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.209**: Elaboração de Projetos Hidráulico-Sanitários de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários. Rio de Janeiro, 2011.

ALVES, F. V. **Seleção de sítio e tecnologia para estação de tratamento de esgoto por meio de sig e métodos multicriterias**. Estudo de caso: Paulínia- SP. 2003. 200 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil), Faculdade de Engenharia civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2003. Disponível em <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000295544>>. Acesso em: 30 mar. 2013.

ANDRADE NETO, C. O. **Sistemas Simples para Tratamento de Esgotos Sanitários**: Experiência Brasileira. Rio de Janeiro, ABES, 1997.

AQUINO, S. F.; CHERNICHARO, C. A. L. **Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs) em reatores anaeróbios sob estresse**: causas e estratégias de controle Engenharia sanitária e ambiental. Vol.10 - Nº 2 - abr-jun, p. 152-161. 2005. Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v10n2/a09v10n2.pdf>>. Acesso em: 07 jun. 2013.

BALKEMA, A. J. et al. **Indicators for the sustainability assessment of wastewater treatment systems**. Elsevier Science Ltd. *Urban Water* 4. p. 153-161. 2002. Disponível em <[http://dx.doi.org/10.1016/S1462-0758\(02\)00014-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1462-0758(02)00014-6)>. Acesso em: 20 dez. 2012.

BERNAL D. P. et al. **Guía de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domesticas por métodos naturales**. Seminario internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales. Universidad del Valle. Colombia. 2003. Disponível em <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/agua2003/berna.pdf>>. Acesso em: 17 fev. 2013.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 357**, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Publicação DOU nº 053, de 18/03/2005, p. 58-63. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>>. Acesso em: 30 mar. 2013.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 430**, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n 357, de 17 de março de 2005. Publicação DOU nº 92, de 16/05/2011, p. 89. 2011. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 30 mar. 2013.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Lei Federal nº 11.445**, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico; Altera as Leis nº 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. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm>. Acesso em: 10 mar. 2012.

BOTTO. **Avaliação do processo de desinfecção solar (SODIS) e de sua viabilidade social no Estado do Ceara**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Ceara, Fortaleza, 2006. Disponível em <<http://www.fundacionsodis.org/sitio/index.php/nuestro-trabajo/biblioteca/category/17-academicas>>. Acesso em: 30 mar. 2013.

BOUYSSOU, D. et al. **Evaluation and decision models: a critical perspective**. Vol. 32. Boston/London/Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, International Series in Operations Research & Management Science 32, 2000. Disponível em <<http://www.lamsade.dauphine.fr/~bouyssou/book54.pdf>>. Acesso em: 30 mar. 2013.

CATERINO, N. et al. **Comparative Analysis of Multi-Criteria Decision-Making Methods for Seismic Structural Retrofitting**. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, p. 432–445, 2009. Disponível em <http://wpage.unina.it/iuniervo/papers/Caterino_et_al_MCDM.pdf>. Acesso em 28 ago. 2013.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ (SANEPAR); PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO. **Uso e Manejo do Lodo de Esgotos na Agricultura**. Apoio do Programa de Pesquisa em Saneamento Básico - PROSAB. Curitiba, 1999. Disponível em <http://www.finep.gov.br/prosab/livros/uso_manejo_lodo_agricultura.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2013.

CORDEIRO NETTO, O. M. et al. **Uma metodologia para análise tecnológica de sistemas com reatores biológicos anaeróbios para tratamento de águas residuárias municipais**. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre, 2000. Disponível em <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/i-102.pdf>>. Acesso em: 04 dez. 2012.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**: Princípio do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG, 1997.

CHIAVENATO, I. **Introdução à Teoria Geral da Administração**. 6 ed. Rio de Janeiro. Editora Campus, 2000.

COPAM; CERH-MG. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01**, de 05 de maio de 2008. Dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento e estabelece as condições e padrões de lançamentos de efluentes. Belo Horizonte: COPAM, 2008. Disponível em <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=8151>>. Acesso em: 24 mar. 2013.

DE MONTIS, A. et al. **Assessing the quality of different MCDA methods**. In: Alternative for Valuing Nature, Oxford, Routedge, 2004, p. 99-133. Disponível em <http://people.unica.it/adm/files/2008/11/05_de_monti_et_al.pdf>. Acesso 28 ago. 2013.

ENSSLIN, L.; MONTIBELLER NETO, G.; NORONHA, S.M. **Apoio à Decisão**: Metodologias para Estruturação de Problemas e Avaliação Multicritério de Alternativas. Florianópolis.SC, Editora Insular, 2001.

FEEMA. **DZ Nº 215.R-4**, aprovada pela Deliberação CECA nº 4886, de 25 de setembro de 2007. Diretriz de controle de carga orgânica biodegradável em efluentes líquidos de origem sanitária. Diário Oficial (do Estado do Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, de 08 de novembro de 2007. Disponível em <<http://www.resol.com.br/textos/dz-0215.r-4.htm>>. Acesso em: 23 mar. 2013.

FEEMA. **NT-202.R-10**, aprovada pela Deliberação CECA nº1007, de 04 de dezembro de 1986. Estabelece critérios e padrões para lançamento de efluentes líquidos. Diário Oficial (do Estado do Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, 12 de dezembro de 1986. Disponível em <http://www.novaambi.com.br/pdfs/FEEMA_NT202.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2013.

FULOP, J. **Introduction to Decision Making Methods**. Laboratory of Operations Research and Decision Systems, Computer and Automation Institute, Hungarian Academy of Sciences, Budapest, 2005. Disponível em

<<http://academic.evergreen.edu/projects/bdei/documents/decisionmakingmethods.pdf>>. Acesso em 28 ago. 2013.

GALVIS, A; CARDONA, D. A.; BERNAL, D. P. Modelo conceptual de selección de tecnología para el control de contaminación por aguas residuales domesticas en localidades colombianas menores de 30.000 habitantes,

SELTAR. Conferência Internacional: De la acción local a las metas globales. 2005. Disponível em <http://objetos.univalle.edu.co/files/Modelo_conceptual_de_seleccion_de_tecnologia_para_control_de_contaminacion.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2013.

GAMEIRO, R. C. P. G. et al. Análise comparativa de custos de sistemas de tratamento de esgoto para os municípios de MS. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Abes. 2001. Disponível em <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/brasil/ii-019.pdf>>. Acesso em: 04 mar. 2013.

GOMES, C. F. S. Principais características da teoria da utilidade multiatributo, e análise comparativa com a teoria da modelagem de preferências e teoria das expectativas. Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 1998. Disponível em <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENESEP1998_ART042.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2012.

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

GOMES, P. M.; HARADA, A. L. As questões ambientais, técnica e implicação social da locação das unidades operacionais de esgotos. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 19., Foz do Iguaçu, PR, p. 727-735, out., 1997. ABES. Rio de Janeiro, 1997. Disponível em <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes97/implicacion.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2013.

HUTTON, G.; HALLER, L. Evaluation of the Costs and Benefits of Water and Sanitation Improvements at the Global Level. Water, Sanitation and Health Protection of the Human Environment World Health Organization. Geneva. 2004. Disponível em <http://www.who.int/water_sanitation_health/wsh0404.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Mapas de condições registradas. 2013. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/mapasCondicoesRegistradas>>. Acesso em 01 mar. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**, 2008. Disponível em <WWW.ibge.gov.br>. Acesso em: 01 ago. 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios** – PNAD, 2009. Disponível em <WWW.ibge.gov.br>. Acesso em: 01 ago. 2012.

INSTITUTO VIRTUAL INTERNACIONAL DE MUDANÇAS GLOBAIS – IVIG-COPPE/UFRJ. **Atlas Soci-água Brasil**. Rio de Janeiro: Editora Synergia, 2011.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. Editora: ABES. 6 edição. 2011.

JORDÃO, E. P e VOLSCHAN JR. I. (2009). **Tratamento de esgotos sanitários em empreendimentos habitacionais**. Brasília: CAIXA, 2009.

KALBAR, P.P.; KARMAKAR, S.; ASOLEKAR, S. R. **Selection of an appropriate wastewater treatment technology**: A scenario-based multiple-attribute decision-making approach. Centre for Environmental Science and Engineering, Indian Institute of Technology Bombay, Powai, Mumbai 400 076, India. *Journal of Environmental Management*. p. 158 a 169. 2012. Disponível em <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23023038>>. Acesso em: 04 jun. 2013.

KARIMI, A. R. et al. **Selection of wastewater treatment process based on the analytical hierarchy process and fuzzy analytical hierarchy process methods**. Faculty of the Environment, University of Tehran, Tehran, *Int. J. Environ. Spring* 2011. Disponível em <<http://www.bioline.org.br/pdf?st11025>>. Acesso em: 28 ago. 2013.

KAYE, R.; JIANG, K. **Comparison study on portable wind tunnel system and isolation chamber of VOC's from areal sources**. *Water Science Technology*, Volume 34, Issues (3/4), p. 583-589. 1996. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0273122396005999>>. Acesso em: 07 mar. 2013.

KIKER, G. A. et al. **Application of Multicriteria Decision Analysis in Environmental Decision Making**. *Integrated Environmental Assessment and Management*, v. 1, n. 2, p. 95–108, 2005. Disponível em <http://allenpress.com/pdf/ieam-01-02_95_108.pdf>. Acesso em 28 ago. 2013.

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. Disponível em

<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/96/96132/tde-06052009-144711/pt-br.php>>. Acesso em: 04 jun. 2013.

MATHIAS, W. F.; GOMES, J. M. **Matemática financeira**. 3 edição. São Paulo. Atlas. 2002.

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

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Manual de Saneamento**: Orientações técnicas. Fundação Nacional da Saúde. 3. ed. rev. 408 p. Brasília: Assessoria de Comunicação e Educação em Saúde. 2007. Disponível em <http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/eng_saneam2.pdf>. Acesso em: 08 mar. 2013.

OLIVEIRA, S. V. W. B. **Modelo para tomada de decisão na escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário**. 2004. 293f. Tese (Doutorado em Administração) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, USP, São Paulo, 2004. Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/12/12139/tde-19092006-125541/pt-br.php>>. Acesso em: 04 jun. 2013.

PACHECO, R. P. **Custos para implantação de sistemas de esgotamento sanitário**. 2011. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011. Disponível em <<http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/handle/1884/29604/R%20-%20D%20-%20RODRIGO%20PINHEIRO%20PACHECO.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 20 mar. 2013.

PROGRAMA DE PESQUISAS EM SANEAMENTO BÁSICO - PROSAB. **Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios**. Coletânea de Artigos Técnicos - volume I. 2000. Disponível em <<http://www.finep.gov.br/prosab/produtos.htm>>. Acesso em: 04 jun. 2013.

PROGRAMA DE PESQUISAS EM SANEAMENTO BÁSICO - PROSAB. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. José Roberto Campos (coordenador). ABES. Rio de Janeiro. 1999.

PROGRAMA DE PESQUISAS EM SANEAMENTO BÁSICO - PROSAB. **Tratamento e utilização de esgotos sanitários**. Lourdina Florencio, Rafael Kopschitz Xavier, Miguel Mansur Aisse (coord.). Rio de Janeiro. ABES. 2006.

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) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, SP, 2011. Disponível em

<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000811482>. Acesso em: 08 jun. 2013.

SÃO PAULO. **Decreto 8.468, de 8 de setembro de 1976**. Aprova o regulamento da lei n 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a Prevenção e o Controle da Poluição do Meio Ambiente. Disponível em <http://www.ambiente.sp.gov.br/leis_internet/estadual/txt_decreto.htm>. Acesso em: 24 mar. 2013.

SILVA, A. B. **Avaliação da produção de odor na estação de tratamento de esgoto Paranoá e seus problemas associados**. SILVA, A. B. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. 2007. Disponível em <http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/2290/1/2007_AlcioneBatistadaSilva.pdf>. Acesso em 21 jun. 2013.

SOARES, M. L. **Estudo de viabilidade técnica e econômica de tratamento de esgoto pra um campus universitário**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil). Departamento de tecnologia. Universidade Regional do Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2010. Disponível em <<http://www.projetos.unijui.edu.br/petegc/wp-content/uploads/tccs/2010/TCC%20Moacir%20da%20Luz%20Soares.pdf>>. Acesso em: 31 mar. 2013.

SOUZA, A. J. B. F. **Produção de forragem verde em sistema hidropônico usando esgoto tratado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Centro de tecnologia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2008. Disponível em <http://bdt.d.bczm.ufrn.br//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=2710>. Acesso em: 15 fev. 2013.

SOUZA, D. I. et al. **Manual de orientações para projetos de pesquisa**. Fundação escola técnica Liberato salzano vieira da cunha. Novo Hamburgo. 2012. Disponível em <<http://www.liberato.com.br/UserFiles/File/noticias/p%20site%20versao%20mar%202012%20word.pdf>>. Acesso em 23 jun. 2013.

SOUZA, M. A. A. **Um modelo para seleção de processos de tratamento de águas residuárias municipais**. In: Anais do XXVI Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, AIDIS. Lima, Peru, Novembro, 1998. Disponível em <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/peru/bratar119.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2013.

SOUZA, M. A. A.; NETTO, O. M. C.; LOPES, R. P. Jr. Capítulo 10: **Sistema de apoio à decisão (SAD) para seleção de alternativas de pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. In Chernicharo, C. A. L (coord.). Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Rio de Janeiro:PROSAB/ABES, 2001. Disponível em <<http://www.finep.gov.br/prosab/livros/ProsabCarlos/Cap-10.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2013.

SPERLING, M. V. **Lagoas de estabilização**. 2 ed. Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2002.

SPERLING, M. V. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**: Princípio do tratamento biológico de águas residuárias. Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Volume 1, 3 edição, 2005.

SPERLING, M. V.; SALAZAR, B. L. **Determination of capital costs for conventional sewerage systems (collection, transportation and treatment) in a developing country**. IWA Publishing - Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development, 2013. Disponível em <<http://www.iwaponline.com/washdev/up/washdev2013063.htm>>. Acesso em: 04 jun. 2013.

TECLE, A. et al. **Multicriterion Selection of Wastewater Management Alternatives**. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 114, n. 4, p.383-398, 1988. Disponível em <<http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%290733-9496%281988%29114%3A4%28383%29>>. Acesso em 2 set. 2013.

TONETTI, A. L. **Tratamento de esgotos de pequenas comunidades pelo método do escoamento superficial no solo**. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n.13, p.69-79, Maio, 2009. Disponível em: <http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art8_N13.pdf>. Acesso em 28 jul. 2013.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME - UNDP. **Human Development Report**, 2006. Beyond scarcity: Power, poverty and the global water crisis. United Nations Development Programme. New York. 2006. Disponível em <<http://hdr.undp.org/en/media/HDR06-complete.pdf>>. Acesso em: 13 fev. 2013.

VEROL, A. P.; VOLSCHAN, I. **Inventário e análise de padrões de lançamento de esgotos sanitários: visão nacional e internacional**. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007, São Paulo. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Disponível em <http://aquafluxus.com.br/wp-content/uploads/2012/03/ALINE_VEROL.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2013.

WALLENIUS, J. et al. **Multiple Criteria Decision Making, Multiattribute Utility Theory**: Recent Accomplishments and What Lies Ahead. Management Science. Vol. 54, No. 7, p. 1336–1349. July 2008, pp. 1336–1349. Disponível em <http://www.sal.tkk.fi/vanhat_sivut/Opinnot/Mat-2.4194/TDDA/Dyer_July2007rev5.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2013

WORLD COMMISSION TO ENVIRONMENTAL DEVELOPMENT - WCED. **Our common future**. Oxford: Oxford University Press, 1987. Disponível em <http://conspect.nl/pdf/Our_Common_Future-Brundtland_Report_1987.pdf>. Acesso em: 17 fev. 2013.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **UN-water global annual assessment of sanitation and drinking-water (GLASS) 2010**: targeting resources for better results. Switzerland, 2010. Disponível em <http://www.unwater.org/downloads/UN-Water_GLAAS_2010_Report.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2012.

ZUFFO, A. C. **Seleção e aplicação de métodos multicriteriais ao planejamento ambiental de recursos hídricos**. 1998. 301 f. Tese (doutorado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Carlos. Disponível em <<http://www.fec.unicamp.br/~zuffo/>>. Acesso em: 04 jun. 2013.

GLOSSÁRIO

- Alternativa: A alternativa é uma ação potencial, ou seja, aquela que existe a possibilidade de ser implementada. Além disso, a ação potencial é o objeto final ao qual está direcionando todo o apoio à decisão e define a existência das alternativas quando há duas ações potenciais mutuamente exclusivas, ou seja, quando não é possível que sejam aplicáveis duas ações potenciais diferentes ao mesmo problema. Quando isto ocorre, estas duas ações potenciais são consideradas duas alternativas (ROY, 2005 apud ENSSLIN; MONTIBELLER NETO; NORONHA, 2001).
- Atores: Os atores da decisão (conhecido na literatura inglesa como *stakeholders*) são compostos pelos decisores, facilitadores e analistas. Os decisores são indivíduos ou grupos de indivíduos que influenciam direta ou indiretamente na decisão através de seu sistema de valores. Raramente as decisões são tomadas por indivíduos únicos e, geralmente, elas são produto de diversas interações entre as preferências de indivíduos e grupos de influência. Os indivíduos que não participam ativamente da decisão, mas que são afetados por suas consequências, também devem ser considerados (ENSSLIN; MONTIBELLER NETO; NORONHA, 2001). Os facilitadores são os líderes e coordenadores do processo decisório e os analistas auxiliam os facilitadores e os decisores na estruturação do problema (GOMES; GOMES, 2012).
- Corpo receptor: corpo d' água que recebe o lançamento de esgotos brutos ou tratados.
- Critérios: Os critérios são ferramentas que permitem mensurar o desempenho das ações de acordo com um ponto de vista particular. São considerados os parâmetros quantitativos e qualitativos, sendo que os quantitativos normalmente são de mensuração mais fácil (GOMES, et al., 2012).
- Esgoto Bruto: esgoto não tratado.

- Esgoto tratado: esgoto após a etapa de tratamento, que remove seus principais poluentes.

- Juízo de valores: são os elementos-chaves para a construção de um modelo. Os valores são subjetivos, pois dependem de cada pessoa (GOMES; GOMES, 2012).

- Modelo: Segundo Gomes e Gomes (2012), um modelo pode ser definido como “uma representação da realidade, planejada para ser usada por alguém no entendimento, mudança, gerenciamento e controle da realidade.” Os modelos permitem a representação, entendimento, análise e quantificação da realidade. Como o mundo real é geralmente complexo, o modelo não deve ser considerado uma reprodução perfeita da realidade, mas uma representação simplificada do mundo real (GOMES; GOMES, 2012).

- Peso: É bastante comum, para os decisores, que alguns critérios sejam mais relevantes do que outros. As medidas que expressam a importância relativa entre os critérios são denominadas pesos dos critérios (GOMES; GOMES, 2012).

- Ponto de vista: É influenciado pelo juízo de valores do decisor. Os decisores determinam quais serão os pontos de vista fundamentais (PVF) e quais os pontos de vistas elementares (PVE) que serão levados em conta no modelo multicritério. Os PVF são aqueles aspectos considerados como fundamentais para avaliar as ações potenciais por pelo menos um dos decisores. Por explicitar os valores que os decisores consideram importantes naquele contexto, os PVF constituem-se os eixos de avaliação do problema. Os PVF definem os critérios de avaliação e os PVE definem os subcritérios de avaliação (ENSSLIN; MONTIBELLER NETO; NORONHA, 2001).

APÊNDICE A - Matriz dos critérios econômicos (continua)

Alt.	Investimento inicial (R\$/hab.)				Operação e manutenção (R\$/hab. ano)				Demanda de área (m2/hab.)			
	Min. ⁴	Max. ⁵	Média	N.	Min. ⁵	Max. ⁵	Média	N.	Min. ⁵	Max. ⁵	Média	N.
A1	40	80	60,00	8	2	4	3	9	2	4	3	3
A2	30	75	52,50	9	2	4	3	9	1,5	3	2,25	4
A3	50	90	70,00	8	5	9	7	7	0,25	0,5	0,375	9
A4	50	90	70,00	8	5	9	7	7	0,2	0,4	0,3	9
A5	50	100	75,00	7	2,5	5	3,75	9	3	5	4	0
A6	50	90	70,00	8	3,5	6	4,75	8	2	3,5	2,75	3
A7	50	90	70,00	8	3,5	6	4,75	8	1,7	3,2	2,45	4
A8	30	70	50,00	9	1,5	3,5	2,5	10	1	6	3,5	1
A9	40	80	60,00	8	2	4	3	9	2	3,5	2,75	3
A10	50	80	65,00	8	2,5	4	3,25	9	3	5	4	0
A11	80	130	105,00	5	6	10	8	7	0,2	0,35	0,275	9
A12	60	100	80,00	7	3	5	4	9	1	1,5	1,25	7
A13	30	50	40,00	10	2,5	3,5	3	9	0,03	0,1	0,065	10
A14	70	110	90,00	6	7	12	9,5	6	0,08	0,2	0,14	10
A15	65	100	82,50	6	7	12	9,5	6	0,05	0,15	0,1	10
A16	45	70	57,50	9	3,5	5,5	4,5	9	0,05	0,15	0,1	10
A17	60	90	75,00	7	5	7,5	6,25	8	0,1	0,2	0,15	10

⁴ SPERLING(2005)

APÊNDICE A - Matriz dos critérios econômicos (conclusão)

Alt.	Investimento inicial (R\$/hab.)				Operação e manutenção (R\$/hab. ano)				Demanda de área (m ² /hab.)			
	Min. ⁵	Max. ⁶	Média	N.	Min. ⁶	Max. ⁶	Média	N.	Min. ⁶	Max. ⁶	Média	N.
A18	40	70	55,00	9	4,5	7	5,75	8	1,5	2,5	2	5
A19	40	90	65,00	8	5	9	7	7	0,15	0,3	0,225	10
A20	40	90	65,00	8	5	9	7	7	0,1	0,3	0,2	10
A21	50	90	70,00	8	5	7	6	8	1,5	3	2,25	4
A22	70	110	90,00	6	7	12	9,5	6	0,08	0,2	0,14	10
A23	90	120	105,00	5	10	20	15	3	0,12	0,25	0,185	10
A24	90	120	105,00	5	10	20	15	3	0,12	0,25	0,185	10
A25	110	170	140,00	2	10	22	16	2	0,12	0,25	0,185	10
A26	130	190	160,00	0	15	25	20	0	0,12	0,25	0,185	10
A27	130	190	160,00	0	15	25	20	0	0,15	0,3	0,225	10
A28	120	150	135,00	2	10	15	12,5	4	0,15	0,3	0,225	10
A29	120	150	135,00	2	10	15	12,5	4	0,12	0,25	0,185	10
A30	70	120	95,00	5	8	15	11,5	5	0,1	0,15	0,125	10
A31	80	130	105,00	5	8	15	11,5	5	0,1	0,15	0,125	10
A32	120	150	135,00	2	10	15	12,5	4	0,1	0,2	0,15	10

Fonte: Elaborado pela autora

⁵ SPERLING(2005)

APÊNDICE B - Matriz dos critérios ambientais: 1º parte (continua)

Alt.	DBO (%)				Sólidos Suspensos Totais (%)				Amônia-N (%)	NT (%)	NT e Amônia-N	PT (%)		Nutrientes
	Min. ⁶	Max. ⁷	Média	N.	Min. ⁷	Max. ⁷	Média	N.	Min./Máx. ⁷	Min./Máx. ⁷	N.	Min./Máx. ⁷	N.	N.
A1	75	85	80	8	70	80	75	4	< 50	< 60	4	< 35	0	2
A2	75	85	80	8	70	80	75	4	< 50	< 60	4	< 35	0	2
A3	75	85	80	8	70	80	75	4	< 30	< 30	0	< 35	0	0
A4	75	85	80	8	80	87	83,5	7	< 30	< 30	0	< 35	0	0
A5	80	85	82,5	8	73	83	78	5	50-65	50-65	6	> 50	6	6
A6	80	85	82,5	8	73	83	78	5	65-85	75-90	10	50-60	7	9
A7	85	90	87,5	9	>90	-	90	9	< 50	< 60	4	< 35	0	2
A8	85	98	91,5	9	>93	-	93	9	> 65	> 65	7	> 50	6	7
A9	80	90	85	8	80	93	86,5	8	35-65	< 65	6	< 35	0	3
A10	80	90	85	8	87	93	90	9	< 50	< 60	4	< 35	0	2
A11	80	85	82,5	8	80	90	85	7	< 45	< 60	3	< 35	0	2
A12	90	98	94	10	93	-	93	9	> 65	> 65	7	> 50	6	7
A13	60	75	67,5	6	65	80	72,5	4	< 50	< 60	4	< 35	0	2
A14	83	93	88	9	87	93	90	9	50-85	< 60	6	< 35	0	3
A15	83	93	88	9	87	93	90	9	50-85	< 60	6	< 35	0	3
A16	75	87	81	8	80	90	85	7	< 50	< 60	4	< 35	0	2

⁶ SPERLING(2005)

APÊNDICE B - Matriz dos critérios ambientais: 1º parte (conclusão)

Alt.	DBO (%)				Sólidos Suspensos Totais (%)				Amônia-N (%)	NT (%)	NT e Amônia-N	PT (%)		Nutrientes
	Min. ⁷	Max. ⁸	Média	N.	Min. ⁸	Max. ⁸	Média	N.	Min./Max. ⁸	Min./Max. ⁸	N.	Min./Max. ⁸	N.	N.
A17	80	93	86,5	9	87	93	90	9	< 50	< 60	4	< 35	0	2
A18	77	87	82	8	73	83	78	5	< 30	50-65	7	> 50	6	7
A19	75	85	80	8	70	80	75	4	< 30	< 30	0	< 35	0	0
A20	75	85	80	8	80	87	83,5	7	< 30	< 30	0	< 35	0	0
A21	77	90	83,5	8	80	93	86,5	8	35-65	< 65	6	< 35	0	3
A22	85	93	89	9	87	93	90	9	> 80	< 60	8	< 35	0	4
A23	90	97	93,5	10	87	93	90	9	> 80	< 60	8	< 35	0	4
A24	90	97	93,5	10	87	93	90	9	> 80	< 60	8	< 35	0	4
A25	85	93	89	9	87	93	90	9	> 80	> 75	9	< 35	0	5
A26	85	93	89	9	87	93	90	9	> 80	> 75	9	75-88	10	10
A27	93	98	95,5	10	93	97	95	10	> 80	< 60	8	50-60	7	8
A28	85	93	89	9	87	93	90	9	65-85	< 60	6	< 35	0	3
A29	80	90	85	8	87	93	90	9	< 50	< 60	4	< 35	0	2
A30	88	95	91,5	9	87	93	90	9	> 80	< 60	8	< 35	0	4
A31	88	95	91,5	9	87	93	90	9	> 80	> 75	9	< 35	0	5
A32	88	95	91,5	9	87	93	90	9	65-85	< 60	6	< 35	0	3

Fonte: Elaborado pela autora

⁷ SPERLING(2005)

APÊNDICE C - Matriz dos critérios ambientais: 2º parte (continua)

Alt.	CF (NMP/100ml)			Ovos helminhos (ovo/L)		Lodo líquido a ser tratado (L/hab.ano)				Lodo líquido a ser disposto (L/hab.ano)				Subprodutos
	Min. ⁸	Max. ⁹	N.	>1 ou <1 ⁹	N.	Min. ⁹	Max. ⁹	Média	N.	Min. ⁹	Max. ⁹	Média	N.	N.
A1	10 ⁶	10 ⁷	0	< 1	10	55	160	107,5	9	20	60	40	4	7
A2	10 ⁶	10 ⁷	0	> 1	0	30	220	125	9	7	30	18,5	7	8
A3	10 ⁶	10 ⁷	0	> 1	0	55	360	207,5	9	10	35	22,5	7	8
A4	10 ⁶	10 ⁷	10	< 1	10	55	160	107,5	9	20	60	40	4	7
A5	10 ²	10 ⁴	7	> 1	0	55	160	107,5	9	20	60	40	4	7
A6	10 ⁴	10 ⁵	7	> 1	0	60	190	125	9	25	70	47,5	3	6
A7	10 ⁴	10 ⁵	9	< 1	10	0	0	0	10	0	0	0	10	10
A8	10 ³	10 ⁴	6	< 1	10	0	0	0	10	0	0	0	10	10
A9	10 ⁴	10 ⁶	7	< 1	10	0	0	0	10	0	0	0	10	10
A10	10 ⁴	10 ⁵	0	> 1	0	180	1000	590	7	25	50	37,5	5	6
A11	10 ⁶	10 ⁷	9	< 1	10	110	360	235	9	15	35	25	7	8
A12	10 ³	10 ⁴	0	> 1	0	70	220	145	9	10	35	22,5	7	8
A13	10 ⁶	10 ⁷	0	> 1	0	180	400	290	9	15	60	37,5	5	7
A14	10 ⁶	10 ⁷	0	> 1	0	180	400	290	9	15	55	35	5	7
A15	10 ⁶	10 ⁷	0	> 1	0	150	300	225	9	10	50	30	6	7
A16	10 ⁶	10 ⁷	0	> 1	0	150	300	225	9	10	50	30	6	7

⁸ SPERLING(2005)

APÊNDICE C - Matriz dos critérios ambientais: 2º parte (conclusão)

Alt.	CF (NMP/100ml)			Ovos helmintos (ovo/L)		Lodo líquido a ser tratado (L/hab.ano)				Lodo líquido a ser disposto (L/hab.ano)				Subprodutos
	Min. ⁹	Max. ¹⁰	N.	>1 ou <1 ¹⁰	N.	Min. ¹⁰	Max. ¹⁰	Média	N.	Min. ¹⁰	Max. ¹⁰	Média	N.	N.
A17	10 ⁶	10 ⁷	0	> 1	0	180	400	290	9	15	55	35	5	7
A18	10 ⁶	10 ⁷	10	< 1	10	150	250	200	9	10	35	22,5	7	8
A19	10 ²	10 ⁴	0	> 1	0	150	300	225	9	15	50	32,5	6	7
A20	10 ⁶	10 ⁷	0	> 1	0	150	300	225	9	15	50	32,5	6	7
A21	10 ⁶	10 ⁷	6	< 1	10	70	220	145	9	10	35	22,5	7	8
A22	10 ⁴	10 ⁶	0	> 1	0	1100	3000	2050	0	35	90	62,5	1	1
A23	10 ⁶	10 ⁷	0	> 1	0	1200	2000	1600	2	40	105	72,5	0	1
A24	10 ⁶	10 ⁷	0	> 1	0	1200	2000	1600	2	40	105	72,5	0	1
A25	10 ⁶	10 ⁷	0	> 1	0	1100	3000	2050	0	35	90	62,5	1	1
A26	10 ⁶	10 ⁷	0	> 1	0	1100	3000	2050	0	35	90	62,5	1	1
A27	10 ⁶	10 ⁷	10	< 1	10	1200	3100	2150	0	40	100	70	0	0
A28	10 ²	10 ⁴	0	> 1	0	360	1100	730	6	35	80	57,5	2	4
A29	10 ⁶	10 ⁷	0	> 1	0	500	1900	1200	4	35	80	57,5	2	3
A30	10 ⁶	10 ⁷	0	> 1	0	1100	3000	2050	0	35	90	62,5	1	1
A31	10 ⁶	10 ⁷	0	> 1	0	1100	1500	1300	4	35	90	62,5	1	3
A32	10 ⁶	10 ⁷	0	> 1	0	330	1500	915	6	20	75	47,5	3	4

Fonte: Elaborado pela autora

⁹ SPERLING(2005)

APÊNDICE D - Matriz dos critérios sociais

Alt.	Maus odores		Ruídos		Aerossóis		Insetos e vermes		Alt.	Maus odores		Ruídos		Aerossóis		Insetos e vermes	
	Ponto ¹⁰	N	Ponto ¹¹	N	Ponto ¹¹	N	Ponto ¹¹	N		Ponto ⁹	N	Ponto ¹¹	N	Ponto ¹¹	N	Ponto ¹¹	N
A1	3	5	5	10	5	10	2	3	A17	2	3	4	8	4	8	3	5
A2	1	0	5	10	5	10	2	3	A18	2	3	5	10	5	10	2	3
A3	4	8	1	0	1	0	3	5	A19	2	3	1	0	1	0	3	5
A4	3	5	1	0	1	0	2	3	A20	2	3	1	0	1	0	2	3
A5	1	0	5	10	5	10	2	3	A21	2	3	5	10	3	5	2	3
A6	1	0	2	3	2	3	2	3	A22	4	8	1	0	3	5	4	8
A7	1	0	5	10	5	10	2	3	A23	5	10	1	0	3	5	4	8
A8	2	3	5	10	5	10	2	3	A24	3	5	1	0	3	5	4	8
A9	2	3	5	10	3	5	2	3	A25	4	8	1	0	3	5	4	8
A10	2	3	5	10	5	10	2	3	A26	4	8	1	0	3	5	4	8
A11	3	5	4	8	2	3	5	10	A27	4	8	1	0	3	5	4	8
A12	2	3	4	8	5	10	2	3	A28	4	8	4	8	4	8	2	3
A13	2	3	4	8	5	10	4	8	A29	4	8	4	8	4	8	3	5
A14	2	3	1	0	5	10	4	8	A30	5	10	2	3	5	10	4	8
A15	2	3	2	3	5	10	4	8	A31	5	10	2	3	5	10	4	8
A16	2	3	4	8	5	10	4	8	A32	4	8	4	8	5	10	3	5

Fonte: Elaborado pela autora

¹⁰ SPERLING(2005)

APÊNDICE E - Matriz dos critérios tecnológicos (continua)

Alt.	Resistência a variações do afluente e a cargas de choque		Confiabilidade		Simplicidade operacional e manutenção		Independência do Clima		Independência do Solo	
	Ponto ¹¹	N	Ponto ¹²	N	Ponto ¹²	N	Ponto ¹²	N	Ponto ¹²	N
A1	3,7	7	4	8	5	10	2	3	3	5
A2	3,7	7	4	8	5	10	2	3	3	5
A3	3,7	7	4	8	4	8	3	5	3	5
A4	3,7	7	3	5	3	5	3	5	4	8
A5	3,7	7	4	8	5	10	2	3	3	5
A6	3,7	7	4	8	3	5	2	3	3	5
A7	3,7	7	4	8	3	5	2	3	3	5
A8	4	8	4	8	4	8	2	3	1	0
A9	3,7	7	4	8	5	10	3	5	2	3
A10	3,7	7	4	8	5	10	2	3	2	3
A11	2,7	4	3	5	4	8	2	3	5	10
A12	4	8	4	8	3	5	2	3	1	0
A13	2	3	3	5	4	8	2	3	5	10
A14	2,0	3	3,5	6	2,5	4	2,5	4	5	10
A15	2,0	3	3,5	6	3	5	3	5	5	10
A16	2	3	3	5	4	8	2	3	5	10

¹¹ SPERLING(2005)

APÊNDICE E - Matriz dos critérios tecnológicos (conclusão)

Alt.	Resistência a variações do afluente e a cargas de choque		Confiabilidade		Simplicidade operacional e manutenção		Independência do Clima		Independência do Solo	
	Ponto ¹²	N	Ponto ¹³	N	Ponto ¹³	N	Ponto ¹³	N	Ponto ¹³	N
A17	2,0	3	3,5	6	3,5	6	2	3	5	10
A18	2	3	3,5	6	4,5	9	2	3	3	5
A19	2,0	3	3,5	6	4	8	2,5	4	3	5
A20	2,0	3	3	5	3,5	6	2,5	4	4	8
A21	2,0	3	3,5	6	4,5	9	2,5	4	2	3
A22	2,67	4	4	8	1	0	3	5	5	10
A23	3,67	7	4	8	2	3	4	8	5	10
A24	3,67	7	4	8	3	5	4	8	5	10
A25	2,67	4	4	8	1	0	3	5	5	10
A26	2,67	4	4	8	1	0	3	5	5	10
A27	2,67	4	4	8	1	0	3	5	5	10
A28	2,3	3	4	8	3	5	2	3	5	10
A29	3,3	6	4	8	3	5	2	3	5	10
A30	2,7	4	4	8	2	3	4	8	5	10
A31	2,7	4	4	8	2	3	4	8	5	10
A32	2,7	4	3	5	3	5	2	3	5	10

Fonte: Elaborado pela autora

¹² SPERLING(2005)

APÊNDICE F - Custos totais por habitante de acordo com o valor do metro quadrado (continua)

Alt.	Custos totais de acordo com o valor do metro quadrado (R\$/hab.)										
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1.000
A1	85,54	385,54	685,54	985,54	1.285,54	1.585,54	1.885,54	2.185,54	2.485,54	2.785,54	3.085,54
A2	78,04	303,04	528,04	753,04	978,04	1.203,04	1.428,04	1.653,04	1.878,04	2.103,04	2.328,04
A3	129,59	167,09	204,59	242,09	279,59	317,09	354,59	392,09	429,59	467,09	504,59
A4	129,59	159,59	189,59	219,59	249,59	279,59	309,59	339,59	369,59	399,59	429,59
A5	106,93	506,93	906,93	1.306,93	1.706,93	2.106,93	2.506,93	2.906,93	3.306,93	3.706,93	4.106,93
A6	110,44	385,44	660,44	935,44	1.210,44	1.485,44	1.760,44	2.035,44	2.310,44	2.585,44	2.860,44
A7	110,44	355,44	600,44	845,44	1.090,44	1.335,44	1.580,44	1.825,44	2.070,44	2.315,44	2.560,44
A8	71,28	421,28	771,28	1.121,28	1.471,28	1.821,28	2.171,28	2.521,28	2.871,28	3.221,28	3.571,28
A9	85,54	360,54	635,54	910,54	1.185,54	1.460,54	1.735,54	2.010,54	2.285,54	2.560,54	2.835,54
A10	92,67	492,67	892,67	1.292,67	1.692,67	2.092,67	2.492,67	2.892,67	3.292,67	3.692,67	4.092,67
A11	173,11	200,61	228,11	255,61	283,11	310,61	338,11	365,61	393,11	420,61	448,11
A12	114,05	239,05	364,05	489,05	614,05	739,05	864,05	989,05	1.114,05	1.239,05	1.364,05
A13	65,54	72,04	78,54	85,04	91,54	98,04	104,54	111,04	117,54	124,04	130,54
A14	170,88	184,88	198,88	212,88	226,88	240,88	254,88	268,88	282,88	296,88	310,88
A15	163,38	173,38	183,38	193,38	203,38	213,38	223,38	233,38	243,38	253,38	263,38
A16	95,81	105,81	115,81	125,81	135,81	145,81	155,81	165,81	175,81	185,81	195,81

APÊNDICE F - Custos totais por habitante de acordo com o valor do metro quadrado (conclusão)

Alt.	Custos totais de acordo com o valor do metro quadrado (R\$/hab.)										
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1.000
A17	128,21	143,21	158,21	173,21	188,21	203,21	218,21	233,21	248,21	263,21	278,21
A18	103,95	303,95	503,95	703,95	903,95	1.103,95	1.303,95	1.503,95	1.703,95	1.903,95	2.103,95
A19	124,59	147,09	169,59	192,09	214,59	237,09	259,59	282,09	304,59	327,09	349,59
A20	124,59	144,59	164,59	184,59	204,59	224,59	244,59	264,59	284,59	304,59	324,59
A21	121,08	346,08	571,08	796,08	1.021,08	1.246,08	1.471,08	1.696,08	1.921,08	2.146,08	2.371,08
A22	170,88	184,88	198,88	212,88	226,88	240,88	254,88	268,88	282,88	296,88	310,88
A23	232,70	251,20	269,70	288,20	306,70	325,20	343,70	362,20	380,70	399,20	417,70
A24	232,70	251,20	269,70	288,20	306,70	325,20	343,70	362,20	380,70	399,20	417,70
A25	276,22	294,72	313,22	331,72	350,22	368,72	387,22	405,72	424,22	442,72	461,22
A26	330,27	348,77	367,27	385,77	404,27	422,77	441,27	459,77	478,27	496,77	515,27
A27	330,27	352,77	375,27	397,77	420,27	442,77	465,27	487,77	510,27	532,77	555,27
A28	241,42	263,92	286,42	308,92	331,42	353,92	376,42	398,92	421,42	443,92	466,42
A29	241,42	259,92	278,42	296,92	315,42	333,92	352,42	370,92	389,42	407,92	426,42
A30	192,91	205,41	217,91	230,41	242,91	255,41	267,91	280,41	292,91	305,41	317,91
A31	202,91	215,41	227,91	240,41	252,91	265,41	277,91	290,41	302,91	315,41	327,91
A32	241,42	256,42	271,42	286,42	301,42	316,42	331,42	346,42	361,42	376,42	391,42

Fonte: Elaborado pela autora