

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS DE
DESAGUAMENTO DE LODOS PRODUZIDOS EM
ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO**

ALINY STRADIOTTI VANZETTO

ORIENTADOR: MARCO ANTONIO ALMEIDA DE SOUZA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS**

PUBLICAÇÃO: PTARH.DM - 139/12
BRASÍLIA/DF: NOVEMBRO – 2012

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS DE
DESAGUAMENTO DE LODOS PRODUZIDOS EM ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ESGOTO**

ALINY STRADIOTTI VANZETTO

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS
HÍDRICOS.**

APROVADO POR:

**Prof. Marco Antonio Almeida de Souza, PhD (ENC-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Oscar de Moraes Cordeiro Netto, Dr (ENC-UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Eraldo Henriques de Carvalho, Dr (UFG)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 26 DE NOVEMBRO DE 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

VANZETTO, ALINY STRADIOTTI

Análise das Alternativas Tecnológicas de Desaguamento de Lodos Produzidos em Estações de Tratamento de Esgoto [Distrito Federal] 2012.

xx, 185p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2012).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Análise tecnológica

2. Desaguamento de lodo de esgoto

3. Análise multicritério

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VANZETTO, A. S. (2012). Análise das Alternativas Tecnológicas de Desaguamento de Lodos Produzidos em Estações de Tratamento de Esgoto. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM 139/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 185p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Aliny Stradiotti Vanzetto.

TÍTULO: Análise das Alternativas Tecnológicas de Desaguamento de Lodos Produzidos em Estações de Tratamento de Esgotos.

GRAU: Mestre

ANO: 2012

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Aliny Stradiotti Vanzetto

alinyvanzetto@yahoo.com.br

Aos meus pais,
Élia e Jeime (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que me capacitou e me deu forças em todos os momentos.

Aos meus pais, por todo amor e incentivo, por sempre colocarem a minha educação em primeiro lugar. A minha mãe em especial por me encorajar a enfrentar todos os desafios que a vida nos oferece.

Ao meu esposo, Lúcio, pelo amor, carinho e compreensão, por acreditar que as dificuldades sempre passariam e que a aflição não seria em vão.

A todos os meus sinceros e verdadeiros amigos, desde a infância até os mais recentes. Obrigada pelo apoio e pela certeza de que este dia chegaria.

Ao professor, orientador, amigo, Marco Antonio, não só pela orientação técnica nesta dissertação, mas também, pela atenção e dedicação, apoio e incentivo. Agradeço também pelos conselhos, que foram muito importantes para o mestrado e serão levados para toda a vida.

Aos colegas e amigos do PTARH, que estiveram presentes nos momentos mais difíceis e intensos da minha vida acadêmica. Larissa, Jana, Lucas, Genilda, Weliton, Bruna, Caleb, Cristiane, Paulo Cesar, Bruno, Liane, Jackeline, Glenda, Izabela, Nara, Orlandina, Bernardo, Eduardo, Alessandra, Leonor, entre vários outros não menos importantes.

Aos professores do programa, Koide, Cristina, Néstor, Oscar, Ariuska, Ricardo, Yovanka, Lenora, Carlos, Conceição e Dirceu. Aos funcionários e colaboradores, Boy, Marcilene, Junior, Carla e Adélias, bem como o pessoal da limpeza e todos os outros.

A Caesb e seus funcionários que sempre me receberam bem, principalmente ao Carlos Daidi Nakazato, Karina Bassan Rodrigues e Fernanda Alves Machado.

Aos especialistas que colaboraram com a resposta dos questionários.

A CAPES e ao CNPQ pelo fomento à pesquisa e concessão de bolsa de estudos.

A todos, muito obrigada.

ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS DE DESAGUAMENTO DE LODOS PRODUZIDOS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi desenvolver uma metodologia para realizar a análise tecnológica das alternativas de desaguamento de lodos produzidos em Estações de Tratamento de Esgotos – ETEs, tendo como base uma abordagem multiobjetivo e multicritério. Um dos principais motivos para a utilização dessa abordagem neste trabalho advém da complexidade da problemática envolvida no tema, a qual deve incluir diversos atores e objetivos, muitas vezes conflitantes, várias alternativas e critérios de análise. A metodologia utilizada nesta pesquisa incluiu a obtenção de informação por meio de questionários e consulta a especialistas, o que permitiu obter, principalmente, os objetivos do desaguamento, critérios para avaliar as alternativas e os pesos de cada critério. A metodologia proposta para a análise tecnológica das alternativas de desaguamento de lodos, ao final, ficou composta por sete fases a serem seguidas por quem se propuser a utilizá-la. Para a avaliação das alternativas de desaguamento, foram identificados, juntamente com os especialistas, vinte e três critérios de avaliação, e, para quantificá-los, foram desenvolvidas planilhas pontuadas. Para o processamento dos dados e informações, foram utilizados na metodologia proposta os métodos multiobjetivo Programação de Compromisso - CP, TOPSIS, ELECTRE III e AHP. Na sequência, aplicou-se a metodologia desenvolvida ao caso da ETE Brasília Sul, operada pela Caesb, sendo que isso resultou na conclusão de que a metodologia, como desenvolvida, mostrou ser eficiente e aplicável com relativa simplicidade operacional. Os resultados obtidos foram coerentes com o que já é realizado pela companhia de saneamento, que utiliza processos mecânicos para o desaguamento de lodos na ETE Brasília Sul, alternativas essas que a metodologia desenvolvida também mostrou que deveriam ser as preferenciais para esse caso. O emprego dos métodos multiobjetivo e multicritério selecionados permitiu acrescentar na análise do problema as perspectivas de diferentes objetivos, como econômicos, ambientais, sociais e técnicos. A metodologia proposta mostrou-se promissora para aplicações em outras ETEs, podendo ser aperfeiçoada a cada nova aplicação.

PALAVRAS-CHAVE: tratamento de esgoto; desaguamento de lodos; análise tecnológica; multiobjetivo.

ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL ALTERNATIVES FOR DEWATERING SLUDGE PRODUCED IN SEWAGE TREATMENT PLANTS

ABSTRACT

The main objective of this research was to develop a methodology to perform the analysis of technological alternatives for dewatering sludge produced in Sewage Treatment Plants - STP, based on a multiobjective-multicriteria approach. One of the main reasons to using this approach in this research comes from the complexity of the issues involved in this theme, which should include many actors and objectives, often conflicting, as well as several alternatives and criteria for analysis. The methodology used in this research included the acquisition of information through questionnaires and experts consulting. This procedure allowed obtaining, specially, the objectives of dewatering, criteria for evaluating alternatives and the weights of each criterion. The proposed methodology for the analysis of technological alternatives for sludge dewatering comprises seven steps that should be followed for those who intend to apply it. To evaluate the dewatering alternatives, twenty-three evaluation criteria were identified along with the experts, and score tables were developed to quantify them. For processing data and information, were applied the multiobjective methods Compromise Programming - CP, TOPSIS, ELECTRE III e AHP. In sequence, the methodology was applied to the STP Brasília Sul, which is operated by Caesb, and this application showed that the proposed methodology proved to be efficient and applicable with relative operational simplicity. The results proved to be coherent with what is already carried out by the sanitation company, which uses mechanical processes for sludge dewatering, since the applied methodology also showed that alternatives such those should be preferred for this case. The use of the selected multiobjective and multicriteria methods allowed the analysis of the problem with the addition of the perspectives of different objectives such as the economic, environmental, social and technical ones. The proposed methodology proved to be promising for applications in other STPs, may being improved with each new application.

KEYWORDS: sewage treatment; dewatering sludge; technology analysis; multiobjective

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
2 – OBJETIVOS	4
2.1 – OBJETIVO GERAL	4
2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3 – REVISÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
3.1 – CONCEITOS	5
3.2 – PRODUÇÃO DE LODO NOS SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS ..	6
3.2.1 – Características do lodo	10
3.2.2 – Umidade do lodo	12
3.3 – PROCESSAMENTO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO	14
3.3.1 – Adensamento.....	15
3.3.2 – Estabilização	17
3.3.2.1 – Estabilização biológica	18
3.3.2.2 – Estabilização química	19
3.3.3 – Condicionamento	19
3.3.4 – Desaguamento	20
3.3.5 - Higienização	21
3.3.6 - Tratamento no solo e destinação final	22
3.4 – REMOÇÃO DE UMIDADE: DESAGUAMENTO.....	24
3.4.1 – Leitos de secagem	25
3.4.1.1 – Convencionais (<i>Sand drying beds</i>).....	25
3.4.1.2 – Leitos de secagem pavimentados (<i>Paved drying beds</i>).....	29
3.4.1.3 – Leitos de secagem a vácuo (<i>Vacuum-assisted drying beds</i>).....	30
3.4.1.4 – Leitos de secagem rápida ou leitos secos de filtragem rápida (<i>Quick dry filter beds</i>).....	31
3.4.1.5 – Leitos de secagem de junco (<i>Reed beds</i>)	33
3.4.1.6 – Leitos de secagem com meio artificial (<i>Artificial media drying beds</i>).....	35
3.4.2 – Lagoas de secagem ou de lodo (<i>Sludge lagoons ou biosolids lagoons</i>)	36
3.4.3 – Bag, tubo ou membrana de geotêxtil (<i>Geotube</i>)	38
3.4.4 – Centrífuga (<i>Centrifuge</i>).....	39

3.4.5 – Filtro a vácuo (<i>Vacuum filter</i>).....	42
3.4.6 – Filtro prensa de esteira ou prensa desaguadora (<i>Belt filter press</i>)	43
3.4.7 - Filtro prensa de placas (<i>Pressure filter press</i>).....	45
3.4.8 – Prensa parafuso (<i>Screw press</i>)	47
3.5 – MÉTODOS MULTIOBJETIVO MULTICRITÉRIO	48
3.5.1 – Classificação dos Métodos Multiobjetivo e Multicritério.....	49
3.5.2 – Método PROMETHEE	51
3.5.3 – Método da Programação de Compromisso - CP.....	53
3.5.4 – Método TOPSIS	54
3.5.5 – Métodos da família ELECTRE	56
3.5.6 – Método Analítico Hierárquico – AHP	61
3.6 – APLICAÇÕES DE ANÁLISE MULTIOBJETIVO E MULTICRITÉRIO	64
3.7 – OBTENÇÃO DE INFORMAÇÕES COM GRUPOS DE PESSOAS (MULTIGESTORES).....	67
3.7.1 – Técnicas de Decisão em Grupo.....	67
3.7.1.1 - Técnica Nominal de Grupo (TNG)	68
3.7.1.2 - Técnica <i>Delphi</i>	69
3.7.2 - Método para a Definição dos Pesos.....	70
3.7.2.1 - Método baseado na distância (<i>Distance-based</i>).....	70
3.8 – AVALIAÇÃO TECNOLÓGICA.....	72
4 - METODOLOGIA DE PESQUISA.....	75
4.1 – PESQUISA BIBLIOGRÁFICA (1ª ETAPA).....	77
4.2 – SELEÇÃO DOS MÉTODOS DE AUXÍLIO À DECISÃO (2ª ETAPA)	77
4.3 – DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS E AGENTES DECISORES (3ª ETAPA)	78
4.4 – GERAÇÃO DE ALTERNATIVAS (4ª ETAPA).....	79
4.5 – DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS DE DECISÃO (5ª ETAPA).....	79
4.6 – CONSULTA AOS ESPECIALISTAS (6ª ETAPA).....	80
4.7 – DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE TECNOLÓGICA PARA DESAGUAMENTO DE LODO DE ESGOTO (7ª ETAPA).....	81
4.8 – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA A UM CASO REAL E CONSTRUÇÃO DA MATRIZ DE AVALIAÇÃO (8ª ETAPA).....	81
4.9 - APLICAÇÃO DOS MÉTODOS MULTIOBJETIVO E MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO (9ª ETAPA)	82

5 – CONSIDERAÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE TECNOLÓGICA DE DESAGUAMENTO DE LODO DE ESGOTO	83
5.1 – CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO	84
5.2 – CUSTOS DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO	85
5.3 – CUSTO DE DESMOBILIZAÇÃO	85
5.4 – IMPACTOS NEGATIVOS NA IMPLANTAÇÃO	85
5.5 – IMPACTOS NEGATIVOS NA OPERAÇÃO	86
5.6 – PRODUÇÃO DE ODOR	86
5.7 – PRODUÇÃO DE RUÍDOS E VIBRAÇÕES	86
5.8 – PROLIFERAÇÃO DE VETORES	87
5.9 – POTENCIAL POLUIDOR DO LODO	87
5.10 – CONTAMINAÇÃO DO LENÇOL FREÁTICO	87
5.11 – GERAÇÃO DE RENDA/EMPREGO	87
5.12 – ACEITABILIDADE DO PROCESSO DE DESAGUAMENTO	88
5.13 – PROTEÇÃO À SEGURANÇA E À SAÚDE NO TRABALHO	89
5.14 – ELIMINAÇÃO DE ORGANISMOS PATOGÊNICOS	89
5.15 – EMANAÇÃO DE GASES E OUTROS SUBPRODUTOS TÓXICOS	89
5.16 – COMPLEXIDADE DE CONSTRUÇÃO E INSTALAÇÃO	90
5.17 – COMPLEXIDADE OPERACIONAL	90
5.18 – DIFICULDADE DE REMOÇÃO DO LODO DO PROCESSO.....	90
5.19 – SENSIBILIDADE DO PROCESSO À QUALIDADE DO LODO A DESAGUAR	90
5.20 – CONFIABILIDADE DO PROCESSO	91
5.21 – INSTABILIDADE NA EFICIÊNCIA DO PROCESSO.....	91
5.22 – DEMANDA POR ENERGIA ELÉTRICA	91
5.23 – DEMANDA POR ÁREA	92
5.24 – CONSUMO DE PRODUTOS QUÍMICOS	93
5.25 – SUSCEPTIBILIDADE AO CLIMA	93
5.26 – TEMPO NECESSÁRIO PARA O DESAGUAMENTO	93
5.27 – EFICIÊNCIA DO DESAGUAMENTO DO LODO	94
5.28 – EFICIÊNCIA DE CAPTURA DE SÓLIDOS	94
6 – CONSULTA AOS ESPECIALISTAS E SEUS RESULTADOS.....	95
6.1 – RESULTADOS DO QUESTIONÁRIO I	96
6.2 – RESULTADOS DO QUESTIONÁRIO II	100

6.3 – COMENTÁRIOS SOBRE A APLICAÇÃO DOS QUESTIONÁRIOS	101
7 – METODOLOGIA DE ANÁLISE TECNOLÓGICA DAS ALTERNATIVAS DE DESAGUAMENTO DE LODO DE ESGOTO	103
7.1 – DEFINIÇÃO DO PROBLEMA LOCAL (FASE 1).....	104
7.2 – IDENTIFICAÇÃO DOS AGENTES DECISORES E OBJETIVOS (FASE 2)....	105
7.3 – LEVANTAMENTO E TRIAGEM INICIAL DAS ALTERNATIVAS (FASE 3)	107
7.4 – DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS E PESOS (FASE 4).....	109
7.5 – CONSTRUÇÃO DA MATRIZ <i>PAYOFF</i> E AVALIAÇÃO DAS ALTERNATIVAS (FASE 5).....	109
7.6 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS A AGENTES DECISORES (FASE 6)	109
7.7 – MODIFICAÇÕES NA METODOLOGIA DE ANÁLISE TECNOLÓGICA (FASE 7).....	110
7.8 - AVALIAÇÃO DOS CRITÉRIOS PARA A ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS DE DESAGUAMENTO DE LODO	110
7.8.1 – DIMENSÃO ECONÔMICA	113
7.8.1.1 – Custos de implantação	113
7.8.1.2 – Custos de operação e manutenção	116
7.8.2 – DIMENSÃO AMBIENTAL	117
7.8.2.1 – Impactos negativos na implantação	118
7.8.2.2 – Impactos negativos na operação	119
7.8.2.3 – Potencial poluidor do lodo.....	121
7.8.2.4 – Contaminação do lençol freático	122
7.8.3 – DIMENSÃO SOCIAL	123
7.8.3.1 – Aceitabilidade do processo de desaguamento	124
7.8.3.2 – Proteção à segurança e à saúde no trabalho.....	125
7.8.3.3 – Eliminação de organismos patogênicos.....	126
7.8.3.4 – Emissão de gases e outros subprodutos tóxicos	127
7.8.4 – DIMENSÃO TÉCNICA	128
7.8.4.1 – Complexidade de construção e instalação	128
7.8.4.2 – Complexidade operacional	129

7.8.4.3 – Dificuldade de remoção do lodo do processo.....	130
7.8.4.4– Sensibilidade do processo à qualidade do lodo a desaguar	131
7.8.4.5 – Confiabilidade do processo	132
7.8.4.6 – Instabilidade na eficiência do processo	134
7.8.4.7 – Demanda por energia elétrica	134
7.8.4.8 – Demanda por área.....	135
7.8.4.9 – Consumo de produtos químicos	136
7.8.4.10– Susceptibilidade ao clima	137
7.8.4.11 – Tempo necessário para o desaguamento	139
7.8.4.12 – Eficiência no desaguamento do lodo.....	139
7.8.4.13 – Eficiência de captura de sólidos ou recuperação de sólidos.....	141
7.9 – OBSERVAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE TECNOLÓGICA (PLANILHAS PONTUADAS)	141
8 – CASO DA ETE BRASÍLIA SUL: APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE TECNOLÓGICA DAS ALTERNATIVAS DE DESAGUAMENTO DE LODO DE ESGOTO	142
8.1 – DESCRIÇÃO GERAL DA COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO DISTRITO FEDERAL - CAESB	142
8.2 – ETE BRASÍLIA SUL.....	144
8.2.1 – Fase 1: Definição do Problema Local	147
8.2.2 – Fase 2: Identificação dos Agentes Decisores e Objetivos.....	147
8.2.3 – Fase 3: Levantamento e Triagem Inicial das Alternativas	148
8.2.4 – Fase 4: Definição dos Critérios e Pesos	148
8.2.5 – Fase 5: Construção da Matriz <i>payoff</i> e Avaliação das Alternativas.....	149
8.2.5.1 – Avaliação das alternativas	152
8.2.6 – Fase 6: Apresentação dos Resultados a Agentes Decisores.....	155
8.2.7 – Fase 7: Modificações na Metodologia de Análise Tecnológica	156
9 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	157
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	160
APÊNDICES	170
APÊNDICE A - QUESTIONÁRIO I - PARA OBTENÇÃO DE DADOS E OPINIÃO .	171

APÊNDICE B - RELAÇÃO DE ESPECIALISTAS CONSULTADOS PARA O QUESTIONÁRIO I.....	176
APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO II - DETERMINAÇÃO DE PESOS PARA OS CRITÉRIOS SELECIONADOS	178
APÊNDICE D - RELAÇÃO DE ESPECIALISTAS CONSULTADOS PARA O QUESTIONÁRIO II.....	179
APÊNDICE E – LISTA DE EMPRESAS E EQUIPAMENTOS	181
APÊNDICE F – QUESTIONÁRIO GERAL	182

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Origem e descrição dos principais subprodutos gerados no tratamento de esgotos (Metcalf e Eddy 1991; von Sperling 2001, modificado).....	8
Tabela 3.2 – Quantidade de lodo gerado nos diferentes sistemas de tratamento de esgoto, comumente utilizados no Brasil (Alem Sobrinho, 2000, modificado).....	9
Tabela 3.3 – Características e quantidade do lodo produzido em vários sistemas de tratamento de esgotos (Qasim, 1985; USEPA, 1979, 1987; Metcalf e Eddy, 1991; Jordão e Pessôa, 1995; Franci, 1996, 1999; Aisse <i>et al.</i> , 1999; Chernicharo, 1997 <i>apud</i> von Sperling e Gonçalves, 2001).	11
Tabela 3.4 – Composição química e algumas propriedades típicas do lodo de esgotos (Metcalf e Eddy, 1991, adaptada).....	12
Tabela 3.5 – Teor de umidade e consistência do lodo (van Haandel e Lettinga 1994, modificado).....	13
Tabela 3.6 – Sistema de tratamento de lodo dividido por categorias (Aisse <i>et al.</i> , 1999, modificado).....	15
Tabela 3.7 – Adensamento do lodo e teor de sólidos (Metcalf e Eddy 2003; Jordão e Pessôa 2005, adaptada).....	17
Tabela 3.8 – Principais mecanismos de higienização de lodo de esgoto.	21
Tabela 3.9 – Principais alternativas de tratamento e disposição final de lodo (Lara <i>et al.</i> , 2001, modificado).....	23
Tabela 3.10 – Vantagens e desvantagens dos leitos de secagem convencionais.....	28
(Metcalf e Eddy, 1991).	28
Tabela 3.11 – Vantagens e desvantagens dos leitos de secagem pavimentados.	29
Tabela 3.12 – Vantagens e desvantagens do leito de secagem a vácuo.	31
Tabela 3.13 – Vantagens e desvantagens do leito de secagem rápida (USEPA, 2006).	33
Tabela 3.14 – Vantagens e desvantagens do leito de secagem de junco.	34
Tabela 3.15 – Vantagens e desvantagens do leito de secagem com meio artificial.	36
Tabela 3.16 – Vantagens e desvantagens das lagoas de secagem.	37
Tabela 3.17 – Vantagens e desvantagens dos tubos de geotêxtil	39
Tabela 3.18 – Vantagens e desvantagens das centrífugas.	41
Tabela 3.19 – Vantagens e desvantagens dos filtros a vácuo.	43
Tabela 3.20 – Vantagens e desvantagens do filtro prensa de esteira.....	44

Tabela 3.21 – Vantagens e desvantagens do filtro prensa de placas.	46
Tabela 3.22 – Vantagens e desvantagens da prensa parafuso.	47
Tabela 3.23 - Versões do ELECTRE e algumas características (Souza, 2007).	56
Tabela 3.24 – Escala de preferências no método AHP (Saaty, 1991, adaptada).	62
Tabela 5.1 – Dimensões econômica, ambiental, social e técnica, e respectivos critérios ...	84
Tabela 6.1 – Compilação das respostas da Questão nº 1.	96
Tabela 6.2 – Compilação das respostas da Questão nº 2.	97
Tabela 6.3 – Compilação das respostas da Questão nº 3.	97
Tabela 6.4 – Resultados das dimensões (econômica, ambiental, social e técnica) obtidos com os objetivos referenciados na Tabela 5.3.	97
Tabela 6.5 – Compilação das respostas da Questão nº 4.	98
Tabela 6.6 – Compilação das respostas da Questão nº 5.	98
Tabela 6.7 – Compilação das respostas da Questão nº 6.	99
Tabela 6.8 – Grau de importância das dimensões obtidas com os critérios da Tabela 6.7.	100
Tabela 6.9 – Compilação dos pesos (escala de 0 a 1) atribuídos aos critérios de avaliação.	101
Tabela 7.1 – Sugestão de dados para a definição do problema (Cordeiro, 2010, adaptada).	104
Tabela 7.2 – Macro-objetivos e agentes decisores para a gestão de lodos.	105
Tabela 7.3 – Objetivos do desaguamento, segundo os agentes decisores envolvidos.	106
Tabela 7.4 – Alternativas para o desaguamento de lodo de ETE.	108
Tabela 7.5 – Critérios e pesos para a avaliação das alternativas de desaguamento de lodo.	112
Tabela 7.6 – Planilha pontuada para avaliação dos custos de implantação.	114
Tabela 7.7 – Valores de equipamentos de desaguamento em empresas instaladas no Brasil.	115
Tabela 7.8 – Magnitude dos custos de implantação.	115
Tabela 7.9 – Planilha pontuada para avaliação dos custos de operação.	116
Tabela 7.10 – Magnitude dos custos de operação e manutenção.	117
Tabela 7.11 – Demanda de manutenção.	117
Tabela 7.12 – Planilha pontuada para avaliação dos impactos negativos na implantação.	118
Tabela 7.13 – Planilha pontuada para avaliação dos impactos negativos na operação.	119
Tabela 7.14 – Produção de odor.	120

Tabela 7.15 – Produção de ruídos e vibrações.	120
Tabela 7.16 – Proliferação de vetores.	121
Tabela 7.17 – Planilha pontuada para avaliação do potencial poluidor do lodo.	121
Tabela 7.18 – Planilha pontuada para avaliação da contaminação do lençol freático.....	122
Tabela 7.19 – Magnitude da contaminação do lençol freático.	123
Tabela 7.20 – Planilha pontuada para avaliação da aceitabilidade do processo.....	124
Tabela 7.21 – Planilha pontuada para avaliação da proteção à segurança e à saúde no trabalho.	125
Tabela 7.22 – Planilha pontuada para avaliação da eliminação dos organismos patogênicos.	126
Tabela 7.23 – Planilha pontuada para avaliação do critério emanção de gases e outros subprodutos tóxicos.	127
Tabela 7.24 – Planilha pontuada para avaliação do critério complexidade de construção e instalação.	128
Tabela 7.25 – Magnitude da complexidade de construção e instalação.	129
Tabela 7.26 – Planilha pontuada para avaliação do critério complexidade operacional. ..	129
Tabela 7.27 – Magnitude da complexidade operacional das alternativas de desaguamento.	130
Tabela 7.28 – Planilha pontuada para avaliação do critério dificuldade de remoção do lodo do processo.	130
Tabela 7.29 – Magnitude da dificuldade de remoção do lodo do processo.....	131
Tabela 7.30 – Planilha pontuada para avaliação do critério sensibilidade do processo à qualidade do lodo a desaguar.	131
Tabela 7.31 – Magnitude da sensibilidade do processo à qualidade do lodo a desaguar de algumas alternativas de desaguamento.	132
Tabela 7.32 – Planilha pontuada para avaliação do critério confiabilidade do processo. .	133
Tabela 7.33 – Fatores que influenciam no desaguamento de lodo de esgoto.....	133
Tabela 7.34 – Planilha pontuada para avaliação do critério instabilidade na eficiência do processo.	134
Tabela 7.35 – Planilha pontuada para avaliação do critério demanda por energia elétrica.	134
Tabela 7.36 – Magnitude da demanda por energia das alternativas de desaguamento.	135
Tabela 7.37 – Planilha pontuada para avaliação do critério demanda por área.....	135
Tabela 7.38 – Magnitude da demanda por área das alternativas de desaguamento.	136

Tabela 7.39 – Planilha pontuada para avaliação do critério Consumo de produtos químicos.	136
Tabela 7.40 – Magnitude do Consumo de produtos químicos.	137
Tabela 7.41 – Planilha pontuada para avaliação do critério susceptibilidade ao clima.....	138
Tabela 7.42 – Magnitude da susceptibilidade ao clima.	138
Tabela 7.43 – Planilha pontuada para avaliação do critério tempo necessário para o desaguamento.	139
Tabela 7.44 – Magnitude do tempo necessário para o desaguamento.....	139
Tabela 7.45 – Planilha pontuada para avaliação do critério eficiência no desaguamento do lodo.	140
Tabela 7.46 – Magnitude da eficiência no desaguamento do lodo das alternativas de desaguamento.	140
Tabela 7.47 – Planilha pontuada para avaliação do critério eficiência de captura de sólidos.	141
Tabela 8.1 – Sistemas de Esgotamento Sanitário do DF (Caesb, 2011, adaptada).	143
Tabela 8.2 – Macro indicadores do SES da Caesb (Caesb, 2011).....	143
Tabela 8.3 – Desempenho operacional da ETE Brasília Sul (Caesb, 2011).	145
Tabela 8.4 – Matriz de avaliação (<i>payoff</i>) das alternativas segundo cada critério	150
Tabela 8.5 – Valores sugeridos para os limiares de indiferença (<i>q</i>) e de preferência (<i>p</i>)..	151
Tabela 8.6 – Resultados da aplicação dos métodos multiobjetivo e multicritério utilizando os pesos atribuídos aos critérios pelos especialistas.....	152
Tabela 8.7 – Resultados da aplicação dos métodos multiobjetivo e multicritério utilizando pesos iguais para todos os critérios.	153
Tabela 8.8 – Resultados da aplicação dos métodos multiobjetivo e multicritério utilizando pesos que priorizam os critérios econômicos e técnicos.	154

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Fluxograma das etapas de gerenciamento do lodo e principais processos utilizados (von Sperling e Gonçalves 2001, adaptada).....	14
Figura 3.2 – Corte longitudinal de leito de secagem convencional (Franci, 1999).....	26
Figura 3.3 – Esquema de um leito de secagem a vácuo (WEF 1998, modificado).....	30
Figura 3.4 – Leito de secagem rápida (a) e equipamento usado para remover o lodo desaguado (b) (USEPA 2006).	33
Figura 3.5 – Leito de junco (Metcalf e Eddy 2003, modificado).....	33
Figura 3.6 – Leito de secagem com meio artificial (Wang <i>et al.</i> , 2006a, modificado).	35
Figura 3.7 – Lagoa de lodo (EPA, 1987).....	36
Figura 3.8 – Operação do sistema de desaguamento de lodos em bags de geotêxtil (Watersolve, LLC, 2006, apud USEPA 2006, modificado).....	38
Figura 3.9 – Centrífuga horizontal para desaguamento de lodos (<i>Economic and Social Commission for Western Asia</i> , 2003).	40
Figura 3.10 – Filtro rotativo a vácuo.	42
Figura 3.11 – Filtro prensa de esteira em operação (Catálogo EnvironQuip, 2010).....	43
Figura 3.12 – Filtro prensa de placas (Metcalf e Eddy, 2003).	45
Figura 3.13 – Esquema (a) e foto (b) de uma prensa parafuso inclinada (USEPA, 2006)..	48
Figura 4.1 – Estrutura (etapas) da metodologia de pesquisa.	76
Figura 8.1 – Etapas de tratamento líquido e sólido da ETEB Sul (Caesb, 2008).....	145

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

°C	Graus Celsius
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHP	Analytic Hierarchy Process
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
d	Dia
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ELECTRE	Elimination and (et) Choice Translating Reality
ETAR	Estação de Tratamento de Água Residuária
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
g	Gramas
h	Hora
hab	Habitantes
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
kg	Quilograma
kPa	Quilopascal
L	Litro
m	Metro
mg	Miligramas
mm	Milímetro
NBR	Norma Brasileira
NIS	Negative Ideal Solution
PIS	Positive Ideal Solution
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
ppm	Partes por Milhão
PTARH	Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos
s	Segundo
SS	Sólidos Suspensos
SSD	Sistema de Suporte à Decisão
SST	Sólidos Suspensos Totais

ST	Sólidos Totais
t	Tonelada
TA	Tecnologia Apropriada
TNG	Técnica Nominal de Grupo
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity Ideal Solution
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UnB	Universidade de Brasília
USEPA	United States Environmental Protection Agency
WEF	Water Environment Federation

1 - INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e a demanda cada vez maior por recursos naturais vêm resultando em um aumento gradativo da poluição ambiental. Em decorrência disso, surge a necessidade do tratamento dos resíduos gerados, incluindo-se as águas residuárias em geral e, mais especificamente, os esgotos sanitários.

Com o aumento do percentual de esgotos sanitários tratados e do grau com que eles são tratados, há uma maior geração de um resíduo rico em matéria orgânica e nutrientes, denominado lodo de esgoto, cujas características dependem de diversos fatores, tais como o tipo de esgoto, o processo de tratamento de esgoto, o tipo de lodo (primário, secundário, terciário) e o processo de tratamento do lodo (Tsutiya, 2001).

Ocorre também a geração de outros subprodutos, como material gradeado, areia, espuma, dentre outros resíduos. Entretanto, o lodo é o que se apresenta em maior quantidade. Segundo von Sperling e Andreoli (2001), embora o lodo represente apenas de 1 a 2% do volume do esgoto tratado, o seu gerenciamento é bastante complexo e tem um custo geralmente entre 20 a 60% do total gasto com a operação de uma estação de tratamento de esgoto.

A problemática do gerenciamento do lodo motivou que fosse incluído na Agenda 21, principal instrumento aprovado pela Conferência Mundial de Meio Ambiente/Rio 92, o Capítulo 21 intitulado “Manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos e questões relacionadas com esgotos”, estruturando seus objetivos em quatro áreas para a sua gestão, que são: redução ao mínimo dos resíduos; aumento ao máximo da reutilização e reciclagem ambientalmente saudáveis dos resíduos; promoção do depósito e tratamento ambientalmente saudáveis dos resíduos; e ampliação do alcance dos serviços que se ocupam dos resíduos (ONU, 1995).

De acordo com van Haandel e Alem Sobrinho (2006), o termo “lodo” tem sido utilizado para designar os sólidos gerados durante o processo de tratamento de águas residuárias. Distinguem-se lodo primário, gerado nos processos de tratamento primários, e lodo secundário, produzido nos sistemas de tratamento biológico. Mas, devido às suas

características em relação às quantidades de matéria orgânica e nutrientes, o que viabiliza o seu uso agrícola como condicionante de solo, a Water Environment Federation - WEF recomenda a utilização de um novo termo, “biossólidos”, que designa o lodo tratado ou beneficiado das Estações de Tratamento de Esgotos - ETEs, podendo ser empregado de forma útil.

O termo “biossólido” é uma forma de ressaltar os seus aspectos benéficos, valorizando a utilização produtiva em comparação com a mera disposição final improdutiva, por meio de aterros, disposição superficial no solo ou incineração (von Sperling e Andreoli, 2001). No entanto, neste trabalho, será adotado o termo lodo para designar o resíduo gerado nos diversos processos de tratamento de esgotos.

Para ser utilizado, o lodo deve ser submetido a etapas de tratamento que tem por objetivo reduzir o teor de matéria orgânica biodegradável, organismos patogênicos e a quantidade de água. Alem Sobrinho (2000) complementa que a maior preocupação com esse lodo restringe-se a sua estabilização e desaguamento para se atingir um teor de sólidos na faixa de 15 a 40%. Nesse sentido, sempre é bom ressaltar que um lodo com 2% de sólidos secos possui 98% de umidade (von Sperling e Gonçalves, 2001).

Os termos desaguamento, desidratação e secagem são empregados para designar uma operação unitária física que busca, por meio de distintas tecnologias, reduzir o teor de água do lodo. Para facilitar o entendimento do leitor, neste trabalho, foi empregado o termo desaguamento para essa operação.

Na etapa de desaguamento, a umidade do lodo diminui consideravelmente. Dentre as vantagens de se realizar o desaguamento estão a redução do custo operacional das unidades subsequentes de tratamento, a facilidade e o menor custo de transporte, o menor risco de acidentes e a viabilização da disposição final.

Tendo em vista as distintas tecnologias para o desaguamento dos lodos, a análise tecnológica dessas alternativas tem o objetivo de prognosticar, para uma dada situação real, quais das alternativas têm um melhor desempenho segundo diferentes aspectos, ou mesmo diagnosticar, quando o sistema de desaguamento existe, quais são os seus eventuais pontos favoráveis e desfavoráveis em relação a outras possíveis opções. A vantagem da análise da

tecnologia fica, assim, evidente, uma vez que ela pode favorecer um processo de decisão consciente em que são explicitados benefícios e possíveis inconvenientes provocados pela implantação ou pela operação de uma unidade de tratamento.

Sendo assim, em outras palavras, quando se usar a análise tecnológica para seleção de tecnologia, a alternativa escolhida proporcionará, em comparação às outras, um maior grau de “satisfação” relacionado a todos os objetivos identificados para cada caso. Ou, no caso de diagnóstico, é possível compreender as “susceptibilidades” operacionais da alternativa existente e tomar os cuidados necessários, que podem chegar ao limite de substituição de equipamentos, por exemplo.

Nesse sentido, nesta dissertação, busca-se desenvolver um procedimento de análise tecnológica que permita avaliar diferentes alternativas de desaguamento de lodo de esgoto, objetivando a melhoria do processo decisório e o levantamento das peculiaridades de cada processo.

A dissertação está estruturada em nove capítulos, sendo o primeiro a presente Introdução, que apresenta o contexto geral e a motivação da pesquisa. O segundo Capítulo, apresenta os Objetivos, Gerais e Específicos, necessários para o delineamento do problema e para estabelecer a metodologia usada para a análise tecnológica. No terceiro, intitulado de Revisão e Fundamentação Teórica, discute-se os principais temas abordados nesta dissertação. No quarto Capítulo, descreve-se a metodologia utilizada na pesquisa, apontando as etapas para a realização das atividades desenvolvidas nesta dissertação. No quinto, apresentam-se as considerações para o desenvolvimento da Metodologia de Análise Tecnológica de Desaguamento de Lodo de Esgoto. No sexto, é apresentada a consulta realizada aos especialistas por meio de dois questionários. No sétimo Capítulo, é apresentada a Metodologia de Análise Tecnológica das Alternativas de Desaguamento de Lodos de Esgoto. No oitavo Capítulo, descreve-se a aplicação da metodologia elaborada ao Caso da ETE Brasília Sul. No nono Capítulo, apresentam-se as Conclusões e Recomendações.

2 – OBJETIVOS

2.1 – OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa teve o objetivo de desenvolver uma metodologia para realizar a análise tecnológica das alternativas de desaguamento de lodos produzidos em Estações de Tratamento de Esgotos - ETEs, tendo como base uma abordagem multiobjetivo e multicritério, e desenvolvida a partir de dados e informações levantados na literatura ou adquiridos diretamente por consulta a técnicos operadores de ETEs.

2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Constituem-se em objetivos específicos da presente pesquisa:

1. Estudar as principais alternativas tecnológicas de desaguamento de lodos de ETEs, com ênfase no desempenho e nas condicionantes inerentes a cada alternativa;
2. Levantar de forma sistêmica, por meio de consultas a técnicos operadores de ETEs, utilizando questionários, os procedimentos e problemas ocorrentes nos diferentes tipos de tecnologias de desaguamento de lodos;
3. Levantar, descrever e estudar modos de quantificar os principais critérios de avaliação de alternativas de desaguamento de lodo de esgoto;
4. Aplicar a metodologia desenvolvida a um estudo de caso real que utiliza diferentes processos de desaguamento de lodos.

3 – REVISÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No presente capítulo, são revistos alguns termos conceituais referentes à temática da pesquisa proposta. Primeiramente, faz-se a apresentação dos principais termos utilizados no trabalho. Em seguida, apresenta-se a visão de alguns autores acerca da produção de lodo nos diversos sistemas de tratamento de esgotos, mostrando, a seguir, as características do lodo e as principais etapas do processamento do lodo nas estações. Por fim, discute-se a aplicação dos métodos multiobjetivo e multicritério utilizados no apoio à decisão, levando-se em consideração os principais métodos citados na literatura especializada.

3.1 – CONCEITOS

Como na literatura não há total consenso sobre os conceitos inerentes a esta dissertação e, ainda, com o objetivo de favorecer o entendimento, será feita uma breve definição sobre os principais temas relacionados a lodo, desaguamento e métodos multiobjetivo e multicritério, sobretudo os termos que muitas vezes são usados como sinônimos.

- Desaguamento, desidratação ou secagem: É uma operação unitária física que reduz o volume do lodo por meio da redução do seu teor de água (Miki *et al.*, 2001).
- Adensadores, espessadores ou tanque de sedimentação em massa: São unidades que também têm o objetivo de reduzir a água dos resíduos por meio de meios físicos.
- Lodo: É o termo utilizado para os sólidos durante o processo de tratamento de esgotos antes do tratamento adequado para a disposição e uso final (Miki *et al.*, 2001).
- Biossólido: São os produtos orgânicos gerados nos processos de tratamento de esgotos primário e secundário que podem ser reutilizados de modo benéfico, após tratamento adequado (Miki *et al.*, 2001).
- Torta: Material sólido retirado de alguns processos de desaguamento.
- Destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos (Brasil, 2010);

- Disposição final ambientalmente adequada: distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos (Brasil, 2010);
- Impacto ambiental: é qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas (CONAMA, 1986).
- Objetivo: Representa um ideal da sociedade sobre o qual existe um consenso em um certo momento histórico. Exemplo: Eficiência econômica e técnica (Barbosa, 1997).
- Critérios ou atributos: Constituem a tradução dos objetivos em características, qualidades ou medidas de desempenho diante das alternativas de desaguamento. Exemplo: custo de implantação (Barbosa, 1997, adaptada).
- Atores: São os decisores, facilitadores e analistas, ou seja, todos os envolvidos direta ou indiretamente com o problema.
- Analista: É o que faz a análise, auxilia o facilitador e o decisor na estruturação do problema e na identificação dos fatores do meio ambiente que influenciam na evolução, solução e configuração do problema. A maior parte do trabalho do analista consiste na formulação do problema e em ajudar as pessoas a visualizá-lo (Gomes *et al.*, 2002).
- Agentes Decisores: São pessoas, grupos e instituições que, direta ou indiretamente, estabelecem os limites do problema, especificam os objetivos a serem alcançados e emitem julgamentos que, se não definem uma alternativa específica, acarretam ao menos na eliminação de uma ou mais alternativas (Barbosa, 1997).

3.2 – PRODUÇÃO DE LODO NOS SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

A Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) é fator primordial para a preservação do meio ambiente e para a melhoria da qualidade de vida nas áreas urbanas, pois é por meio do correto tratamento dos efluentes sanitários gerados que o aspecto estético, a saúde pública e a vida aquática nos corpos de água serão garantidas (Jordão e Pessôa, 2005).

A prestação dos serviços de saneamento no Brasil ainda é bastante deficitária. Conforme dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, PNSB (2008), publicada pelo IBGE, em relação aos serviços de esgotamento sanitário por rede coletora, 55,2% dos municípios têm seus esgotos coletados. Os melhores desempenhos foram encontrados nos estados de

São Paulo e Espírito Santo. E em grandes geradores como são os municípios com mais de 1 milhão de habitantes, o percentual de esgoto tratado é superior a 90%. A principal alternativa adotada pelos municípios que não possuíam rede de coleta foi a construção de fossas sépticas. No entanto, conforme a pesquisa, menos de 1/3 dos municípios tratam o esgoto, representando 68,8% do total coletado no país.

O tratamento das águas servidas, residuárias ou esgotos, coloca o homem frente a um novo problema: o lodo. De acordo com Metcalf e Eddy (1991), entre os subprodutos resultantes do tratamento de esgotos, o lodo tem maior volume e requer difícil tratamento e disposição final e, por isso, constitui-se em um problema complexo, pois: (1) o lodo é formado, principalmente, pelas substâncias responsáveis pelo caráter desagradável das águas residuárias não tratadas; (2) a fração do lodo a ser disposta, gerada no tratamento biológico do esgoto, está composta, principalmente, e pela matéria orgânica nela presente, mesmo que em forma diferente da original, a qual também está sujeita a processos de decomposição que podem ser indesejáveis; e (3) só uma pequena parte do lodo é composta por matéria sólida, pois sua maior parte é líquida.

A disposição final adequada desse resíduo efetiva os benefícios do processo de tratamento das águas residuárias, evitando problemas sanitários e ambientais e possibilitando menores custos de captação e tratamento de água bruta (Pegorini *et al.*, 2003).

No Brasil, não se dispõe de dados consistentes sobre a produção e disposição final de lodo de esgoto. Desse modo, os dados existentes são obtidos por meio de estimativas sobre a população beneficiada com os serviços de coleta e tratamento de esgoto. Se todo esgoto produzido pelos habitantes, no ano de 2001, beneficiados por sistemas de esgotamento sanitário no Brasil recebessem tratamento, a produção de lodo aproximada seria de 90.000 a 350.000 t/dia (toneladas por dia) de lodo líquido a ser tratado e 9.000 a 13.000 t/dia de lodo desaguado a ser disposto (von Sperling e Andreoli, 2001).

O lodo é composto por todos os poluentes provenientes dos esgotos da comunidade, estando normalmente presentes, além da matéria orgânica, agentes patogênicos, metais tóxicos e contaminantes orgânicos variados. As quantidades presentes desses componentes podem variar conforme as características do esgoto, do processo de tratamento empregado, da época do ano e da qualidade das redes coletoras.

Segundo von Sperling e Gonçalves (2001), nem todos os sistemas de tratamento de esgotos necessitam do descarte contínuo de lodo. Alguns sistemas de tratamento conseguem armazenar o lodo por todo horizonte de operação da estação (ex.: lagoas facultativas), outros permitem um descarte apenas eventual (ex.: reatores anaeróbios) e outros requerem uma retirada contínua ou bastante frequente (ex.: lodos ativados).

As diversas etapas de tratamento de esgoto dão origem a subprodutos sólidos, sendo que todos os processos têm início no tratamento preliminar, dando origem necessariamente a material gradeado. Na Tabela 3.1, são mostradas as características peculiares de cada tratamento e os subprodutos gerados.

Tabela 3.1 – Origem e descrição dos principais subprodutos gerados no tratamento de esgotos (Metcalf e Eddy 1991; von Sperling 2001, modificado).

Subproduto sólido	Origem	Descrição
Sólidos grosseiros	Grade	Sólidos orgânicos e inorgânicos, com dimensões superiores ao espaço livre entre as grades.
Areia	Desarenador	Compreende os sólidos inorgânicos mais pesados, que sedimentam com velocidades relativamente elevadas.
Escuma	Desarenador; Decantador primário e secundário; Lagoa de estabilização; Reator anaeróbio.	Materiais flutuantes raspados da superfície, contendo graxa, óleos vegetais e minerais, sabões, cascas de vegetais, cabelo, papel, etc.
Lodo primário	Tanque séptico; Decantador primário.	São os sólidos removidos por sedimentação. Normalmente é cinza e tem odor ofensivo.
Lodo biológico aeróbio (não estabilizado)	Lodos ativados convencional; Reatores aeróbios com biofilmes - alta carga.	Compreende a biomassa de micro-organismos aeróbios gerada às custas da remoção da matéria orgânica dos esgotos.
Lodo biológico aeróbio (estabilizado)	Lodos ativados - aeração prolongada; Reatores aeróbios com biofilmes - baixa carga.	Constituído por micro-organismos aeróbios que crescem e se multiplicam às custas da matéria orgânica dos esgotos brutos. No entanto, nos sistemas de baixa carga, a disponibilidade de alimento é menor, e a biomassa fica retida mais tempo no sistema, por essa razão o lodo não requer a etapa de digestão.
Lodo biológico anaeróbio (estabilizado)	Lagoas de estabilização; Reatores anaeróbios.	A biomassa anaeróbia também cresce e se multiplica às custas de matéria orgânica. O lodo não requer uma etapa de digestão posterior por ficar retido um longo tempo.
Lodo químico	Decantador primário com precipitação química; Lodos ativados com precipitação química de fósforo.	Resultante da precipitação química com sais metálicos ou com cal. A taxa de decomposição do lodo químico nos tanques é menor que a do lodo primário.

Para se estudar o desaguamento dos lodos em ETEs, é necessário conhecer as quantidades e características dos lodos produzidos em função do sistema de tratamento de esgoto utilizado. Na Tabela 3.2, Alem Sobrinho (2000) compara a geração de lodo, em gramas de sólidos suspensos totais por habitante, em diferentes sistemas de tratamento de esgotos do Brasil.

Tabela 3.2 – Quantidade de lodo gerado nos diferentes sistemas de tratamento de esgoto, comumente utilizados no Brasil (Alem Sobrinho, 2000, modificado).

Tipo de tratamento	Característica do lodo	Produção de lodo (gSST/hab)
Reator UASB (sem tratamento complementar)	Estabilizado	15 a 20
Lodos ativados convencional - Alta Taxa (com adensador e digestor anaeróbio de lodo)	Estabilizado	35 a 40
Lodos ativados convencional - Taxa convencional (com adensador e digestor anaeróbio de lodo)	Estabilizado	30 a 35
Filtro biológico - Alta taxa (com adensador e digestor anaeróbio de lodo)	Digerido	35 a 40
Lodos ativados por aeração prolongada (sem decantador primário)	Estabilizado (difícil desidratação)	40 a 45
Lodos ativados de alta taxa com O ₂ puro (sem decantador primário e sem digestor de lodo)	Não digerido	65 a 70
Lagoas aeradas seguidas de lagoas de decantação	Digerido (remoção a cada 4 a 5 anos)	15 a 25
Reator UASB seguido de lodos ativados	Digerido	25 a 30

De acordo com a Tabela 3.2, observa-se que, dos sistemas de tratamento aeróbios listados, as lagoas aeradas seguidas das lagoas de decantação são as que geram a menor quantidade de lodo. Isso ocorre, principalmente, porque o acúmulo de lodo nas lagoas de decantação é baixo e a sua remoção é feita com intervalos de 4 a 5 anos. O motivo é que o lodo produzido nas lagoas sofre digestão e adensamento, diminuindo sobremaneira seu volume. Com relação ao sistema de lodos ativados, a permanência do lodo é baixa, havendo pouca digestão no próprio tanque e gerando maior volume de lodo a ser tratado.

3.2.1 – Características do lodo

Conforme Aisse *et al.* (1999), os lodos podem exibir três características indesejáveis, cuja alteração é o objetivo do tratamento do lodo: instabilidade biológica, qualidade higiênica péssima e grande volume. A primeira característica está relacionada a uma grande fração de material orgânico biodegradável presente, principalmente, em lodo primário e no lodo aeróbio. Nesse caso, o método mais comum para reduzir o teor de material biodegradável é por meio da digestão anaeróbia. A segunda relaciona-se, especialmente, ao caso de esgotos sanitários possuírem grande variedade de vírus, bactérias e parasitas (protozoários, ovos de nematoides e helmintos) que constituem uma ameaça à saúde pública. E, por fim, a última característica está relacionada com seu volume, pois mesmo que a concentração de sólidos seja relativamente baixa, a de água é elevada, então há necessidade de se aplicar um processo de separação de fases para reduzir o teor de água.

Segundo von Sperling e Gonçalves (2001), a composição do lodo sanitário municipal é de aproximadamente 95% de água e apenas 5% de sólidos, mas ainda assim é designado por fase sólida. De acordo com Fernandes (2000), do total de sólidos, 70% são orgânicos (proteínas, carboidratos, gorduras, etc.) e 30% inorgânicos (areia, sais, metais).

Na década de 1960, Imhoff (1966) caracterizou o lodo fresco como acinzentado ou amarelado, contendo fragmentos facilmente reconhecíveis de excrementos, papel e restos de verduras, apresentando mau cheiro e dificuldade para secar. Já o lodo digerido foi definido como de cor preta devido ao seu teor de sulfureto de ferro e possui cheiro de piche.

A quantidade de lodo gerado no tratamento de esgotos pode ser expressa em termos de massa e de volume. Nessas condições, a Tabela 3.3 apresenta as características e quantidade do lodo produzido em vários sistemas de tratamento de esgotos.

A Tabela 3.4 apresenta a composição química e algumas propriedades típicas do lodo de esgotos. Segundo Metcalf e Eddy (1991), a composição química do lodo é importante para a seleção do tipo de destino final, dependendo diretamente da sua constituição.

Tabela 3.3 – Características e quantidade do lodo produzido em vários sistemas de tratamento de esgotos (Qasim, 1985; USEPA, 1979, 1987; Metcalf e Eddy, 1991; Jordão e Pessôa, 1995; Franci, 1996, 1999; Aisse *et al.*, 1999; Chernicharo, 1997 *apud* von Sperling e Gonçalves, 2001).

Sistema	Característica do lodo produzido e descartado da fase líquida (dirigido à etapa de tratamento do lodo)			
	kgSS/kgDQO aplicada	Teor de sólidos secos (%)	Massa de lodo (gSS/hab.d)	Volume de lodo (L/hab.d)
Tratamento primário (convencional)	0,35 - 0,45	2 - 6	35 - 45	0,6 - 2,2
Tratamento primário (tanque séptico)	0,20 - 0,30	3 - 6	20 - 30	0,3 - 1,0
Lagoa facultativa	0,12 - 0,32	5 - 15	12 - 32	0,1 - 0,25
Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa				
Lagoa anaeróbia	0,20 - 0,45	15 - 20	20 - 45	0,1 - 0,3
Lagoa facultativa	0,06 - 0,10	7 - 12	6 - 10	0,05 - 0,15
Total	0,26 - 0,55	-	26 - 55	0,15 - 0,45
Lagoa aerada facultativa	0,08 - 0,13	6 - 10	8 - 13	0,08 - 0,22
Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação	0,11 - 0,13	5 - 8	11 - 13	0,15 - 0,25
Tanque séptico + filtro anaeróbio				
Tanque séptico	0,20 - 0,30	3 - 6	20 - 30	0,3 - 1,0
Filtro anaeróbio	0,07 - 0,09	0,5 - 4,0	7 - 9	0,2 - 1,8
Total	0,27 - 0,39	1,4 - 5,4	27 - 39	0,5 - 2,8
Lodos ativados convencional				
Lodo primário	0,35 - 0,45	2 - 6	35 - 45	0,6 - 2,2
Lodo secundário	0,25 - 0,35	0,6 - 1	25 - 35	2,5 - 6,0
Total	0,60 - 0,80	1 - 2	60 - 80	3,1 - 8,2
Lodos ativados - aeração prolongada	0,50 - 0,55	0,8 - 1,2	40 - 45	3,3 - 5,6
Filtro biológico de alta carga				
Lodo primário	0,35 - 0,45	2 - 6	35 - 45	0,6 - 2,2
Lodo secundário	0,20 - 0,30	1 - 2,5	20 - 30	0,8 - 3,0
Total	0,55 - 0,75	1,5 - 4,0	55 - 75	1,4 - 5,2
Biofiltro aerado submerso				
Lodo primário	0,35 - 0,45	2 - 6	35 - 45	0,6 - 2,2
Lodo secundário	0,25 - 0,35	0,6 - 1	25 - 35	2,5 - 6,0
Total	0,60 - 0,80	1 - 2	60 - 80	3,1 - 8,2
Reator UASB	0,12 - 0,18	3 - 6	12 - 18	0,2 - 0,6
UASB + pós-tratamento aeróbio				
Lodo anaeróbio (UASB)	0,12 - 0,18	3 - 4	12 - 18	0,3 - 0,6
Lodo aeróbio (lodos ativados)	0,08 - 0,14	3 - 4	8 - 14	0,2 - 0,5
Total	0,20 - 0,32	3 - 4	20 - 32	0,5 - 1,1

A produção e a composição de lodo biológico em sistemas de tratamento de águas residuárias diferem segundo o tipo de tratamento, podendo ele ser anaeróbio ou aeróbio. Segundo van Haandel e Cavalcanti (2001), as considerações sobre produção e composição

de lodo são bem mais complicadas em sistemas de tratamento aeróbio devido a três fatores: (1) o decaimento de lodo é expressivo, de maneira que tem de ser levada em consideração a demanda de oxigênio para respiração endógena e a geração de resíduo endógeno no sistema de tratamento; (2) o lodo ativo é instável, tornando-se inativo pouco tempo depois de se interromper a aeração; e (3) são produzidos lodos de naturezas diferentes. A consequência da alta fração de material biodegradável em lodo aeróbio é que há a necessidade de aplicar um sistema de estabilização de lodo.

Quando se compara o tratamento anaeróbio com o aeróbio, no que concerne à produção de lodo, os sistemas anaeróbios tem importantes vantagens, como: (1) produção nitidamente inferior de sólidos voláteis e, por isso, as unidades de processamento do lodo de excesso podem ser menores; (2) no caso do reator UASB ou semelhante, a concentração do lodo é muito maior, já que os sistemas anaeróbios operam com uma concentração de lodo bem mais elevada do que os sistemas de tratamento aeróbio; e (3) a fração de material biodegradável no lodo aeróbio é muito maior, uma vez que o próprio lodo ativado é putrescível (van Haandel e Cavalcanti, 2001).

Tabela 3.4 – Composição química e algumas propriedades típicas do lodo de esgotos (Metcalf e Eddy, 1991, adaptada).

Item	Unidade	Lodo secundário		Lodo primário digerido	
		Faixa	Típico	Faixa	Típico
Sólidos totais	%	2,0 - 8,0	5,0	6,0 - 12	10
Sólidos voláteis	% de ST	60 - 80	65	30 - 60	4,0
Nitrogênio	% de ST	1,5 - 4,0	2,5	1,6 - 6,0	3,0
Fósforo	% de ST	0,8 - 2,8	1,6	1,5 - 4,0	2,5
Potássio	% de ST	0 - 1	0,4	0 - 3,0	1,0
pH	-	5,0 - 8,0	6,0	6,5 - 7,5	7,0
Alcalinidade	mg CaCO ₃ /L	500 - 1500	600	2500 - 3500	3000

3.2.2 – Umidade do lodo

Como o lodo de esgoto é um complexo de matéria orgânica e inorgânica ligadas por uma alta quantidade de água, parte dessa água é vista como água livre e pode ser separada do material sólido por sistemas de baixa energia, como a decantação. O restante da água está ligada ou presa à estrutura da fração sólida e requer energia térmica ou química para ser removida.

A umidade influi nas propriedades mecânicas do lodo. Essas, por sua vez, influenciam no tipo de manuseio e de disposição final. A Tabela 3.5 apresenta o teor de umidade e consistência do lodo.

A água do lodo pode ser dividida em quatro classes distintas, de acordo com a facilidade de separação de fases: (1) água livre – pode ser removida por gravidade; (2) água adsorvida – pode ser removida por força mecânica ou pelo uso de flocculante; (3) água capilar – mantém-se adsorvida à fase sólida por força capilar, distinguindo-se da água adsorvida pela necessidade de uma força maior para a sua separação; e (4) água celular – é parte da fase sólida e só pode ser removida por meio de uma mudança no estado de agregação da água, isto é, congelamento ou evaporação (van Haandel e Lettinga, 1994).

Tabela 3.5 – Teor de umidade e consistência do lodo (van Haandel e Lettinga 1994, modificado).

Umidade (%)	Fração de sólidos (%)	Consistência do lodo
75 a 100	0 a 25	Lodo fluido
65 a 75	25 a 35	Torta semi-sólida
40 a 65	35 a 60	Sólido duro
15 a 40	60 a 85	Lodo em grânulos
0 a 15	85 a 100	Lodo em pó fino

O sucesso do desaguamento depende da porcentagem de cada uma das águas supracitadas associados com partículas sólidas do lodo. Por exemplo, a água contida nos lodos pode estar presente com os seguintes valores: 40% água livre, 30% água adsorvida, 20% água capilar e 10% de água celular (Wang *et al.*, 2006).

Segundo Silva (2003), os sistemas gravimétricos de desaguamento, se dado tempo necessário para a sedimentação, podem atingir uma concentração de sólidos de 3 a 9% de sólidos secos. Uma maior concentração requer o uso de energia mecânica ou química, o que leva a valores de 25 a 35% aproximadamente. Para reduzir ainda mais a umidade, é necessário o uso de calor.

3.3 – PROCESSAMENTO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

As principais etapas do gerenciamento do lodo e os principais processos utilizados estão descritos na Figura 3.1. A incorporação de cada uma das etapas no fluxograma no processamento do lodo depende das características do lodo gerado ou do sistema de tratamento usado para a fase líquida, bem como da etapa de tratamento subsequente e da disposição final (von Sperling e Gonçalves, 2001).

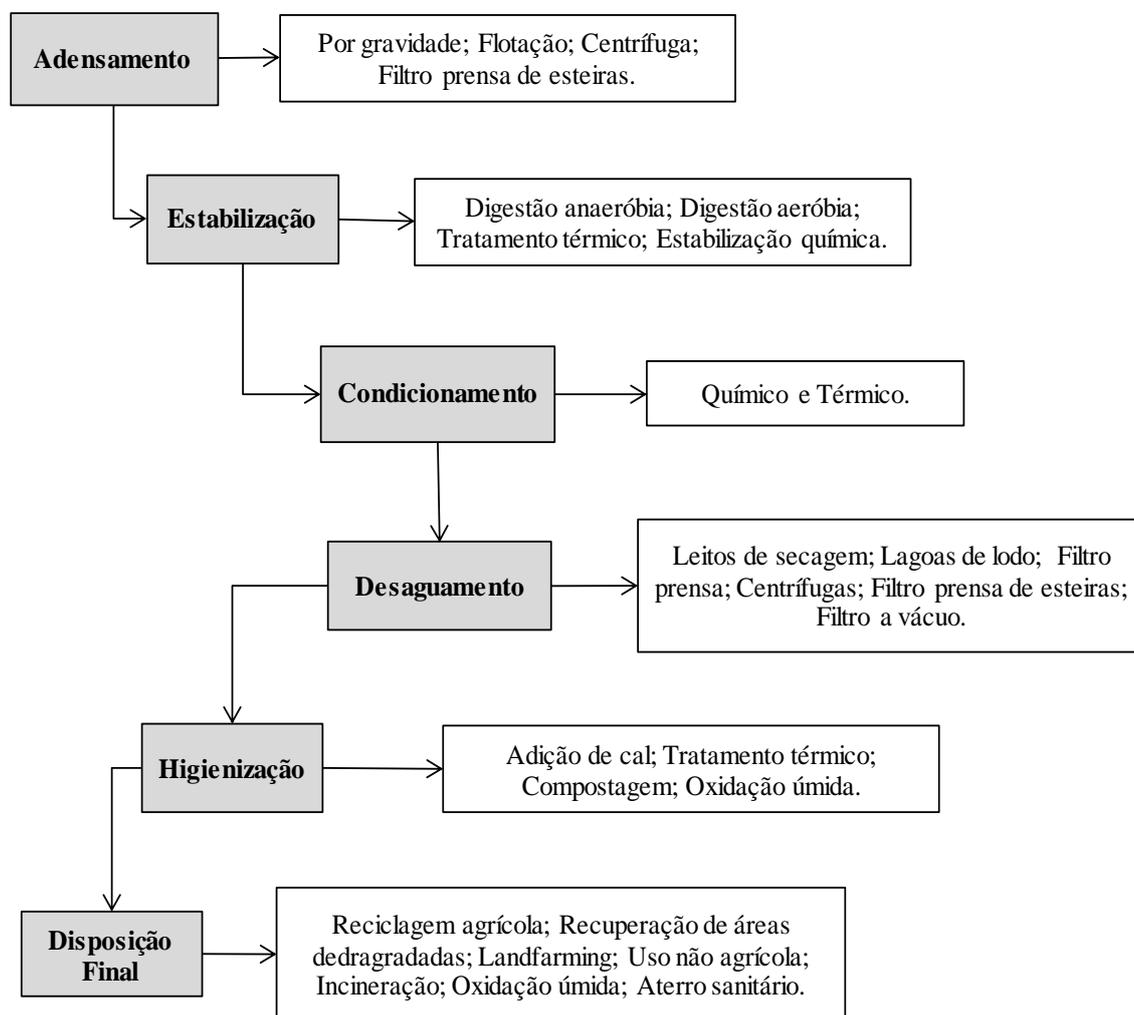


Figura 3.1 – Fluxograma das etapas de gerenciamento do lodo e principais processos utilizados (von Sperling e Gonçalves 2001, adaptada).

Segundo Aisse *et al.* (1999), os sistemas de tratamento de lodo podem ser divididos em cinco categorias, como pode ser observado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Sistema de tratamento de lodo dividido por categorias (Aisse *et al.*, 1999, modificado)

Categorias	Processos
Processos visando a melhorar a estabilidade biológica e mecânica do lodo.	Condicionamento e estabilização biológica
Processos mecânicos visando a reduzir o teor de água livre.	Adensamento ou espessamento e flotação
Processos visando a aumentar o teor de sólidos no lodo.	Desaguamento: secagem natural ou secagem por processos mecânicos
Processos térmicos visando ao condicionamento térmico do lodo ou dos sólidos separados.	Processos Porteous e Zimmermann e incineração
Processos complementares visando a aumentar a aplicabilidade do lodo como insumo agrícola.	(Co) Compostagem e desinfecção com cal

3.3.1 – Adensamento

No processo de tratamento de esgotos em uma estação de tratamento convencional de nível secundário, o lodo gerado ainda detém uma grande quantidade de água. Dessa forma, o adensamento do lodo proveniente das unidades de tratamento da fase líquida consiste no aumento da concentração de sólidos nele contidos, por meio da remoção parcial da quantidade de água que caracteriza o seu grau de umidade (Jordão e Pessôa, 2005). O comportamento do lodo nesse processo segue, normalmente, os princípios da sedimentação zonal, que ocorre quando existe uma elevada concentração de sólidos, formando um manto que sedimenta como uma massa única de partículas (Gonçalves *et al.*, 2001b).

O processo de adensamento consegue reduzir a capacidade volumétrica das unidades subsequentes de tratamento, como o volume dos digestores e o tamanho das bombas. Podem-se citar também, como outros benefícios, a mistura de diferentes tipos de lodo, equalização da vazão, clarificação do líquido removido, redução de Consumo de produtos químicos no desaguamento e redução do consumo de energia no aquecimento dos digestores (Miki *et al.*, 2001).

Adensadores por gravidade, flotadores por ar dissolvido e centrífugas são os tipos de equipamentos mais comumente utilizados para o adensamento de lodos. Porém, outros processos mecanizados, podem ser também adaptados para a realização do adensamento, como: adensador de esteira (*belt-press*) e tambor rotativo.

O tratamento da fase sólida inicia-se normalmente nos adensadores por gravidade. O processo mais comum nesse tipo de tratamento realiza-se em tanques de sedimentação circulares, equipados com braços raspadores de lodo, similares a decantadores. O lodo passa por processos de sedimentação e compactação e, após essa etapa, é retirado do fundo do tanque e encaminhado para outras unidades de tratamento, como a digestão anaeróbia ou desaguamento (Miki *et al.*, 2006).

Outro método de adensamento consiste no processo de separação líquido-sólido por meio de injeção de ar difuso. Esse processo tem boa aplicabilidade para a remoção de umidade de lodos ativados, o qual não ocorre de forma satisfatória em adensadores por gravidade. No processo de flotação por ar dissolvido, introduz-se ar em uma solução mantida sob elevada pressão fazendo com que as bolhas de gás adiram às partículas sólidas, diminuindo sua densidade, de modo a promover o arraste ou flutuação, devido a uma despressurização, até a superfície da massa líquida (Gonçalves *et al.*, 2001b; Jordão e Pessôa, 2005). O teor de sólidos do lodo flotado pode atingir valores entre 3 a 6% (Metcalf e Eddy, 1991).

No adensamento por centrifugação, a sedimentação das partículas de lodo sofre influência da força centrífuga. Os equipamentos modernos não exigem a aplicação de polímeros, embora melhorem a captura dos sólidos no centrado (Jordão e Pessôa, 2005; Miki *et al.*, 2006). As centrífugas são utilizadas tanto para o adensamento quanto para o desaguamento do lodo, facilitando a manutenção e sendo possível usar uma mesma unidade reserva para as duas etapas de tratamento.

O uso de adensadores de esteira teve início com a evolução do processo de tratamento de lodo em que se inseriu o processo de desaguamento. Adensadores e desaguadores são unidades instaladas normalmente em série. De acordo com Jordão e Pessôa (2005), os adensadores de esteira podem apresentar um lodo com até 7 e 8% de teor de sólidos e requerem a adição de polímeros.

Outro equipamento utilizado para adensamento é conhecido como tambor rotativo. Sua operação envolve o condicionamento do lodo com polímero, em seguida inicia a eliminação da água livre, que está relacionada à rotação do tambor, fazendo com que a água passe por peneira de arame que retém os sólidos na superfície do tambor. Os sólidos

são conduzidos em direção à extremidade de descarga pela rotação contínua, normalmente realizada por uma rosca parafuso, aumentando o adensamento do lodo.

A quantidade de lodo retida na operação de adensamento é representada pela capacidade de recuperação de sólidos, ou “captura de sólidos”, que nos adensadores por gravidade pode atingir de 85 a 90%, e nos adensadores por flotação pode ultrapassar 95%. A Tabela 3.7 relaciona o adensamento do lodo e o teor de sólidos. O líquido removido nos adensadores normalmente é retornado para o tratamento primário da ETE, em alguns casos pode ser lançado a montante do tratamento biológico, sendo necessário analisar a sua influência nas unidades subsequentes ao seu lançamento (Jordão e Pessôa, 2005).

Tabela 3.7 – Adensamento do lodo e teor de sólidos (Metcalf e Eddy 2003; Jordão e Pessôa 2005, adaptada)

Operação	Faixa Usual (%)	Valor Típico (%)
Adensamento por gravidade		
- lodo primário bruto	4 - 10	6
- lodo misto (primário e ativado)	2 - 6	4
- lodo misto (primário e filtro biológico)	4 - 8	5
Adensamento por flotação		
- lodo ativado	3 - 6	4
Adensamento por centrifugação		
- lodo ativado	3 - 8	5
Adensamento em filtros de esteira		
- lodo ativado	4 - 8	5

3.3.2 – Estabilização

Os processos de estabilização têm como objetivo principal a conversão parcial da matéria putrescível em líquidos, sólidos dissolvidos, subprodutos gasosos e alguma destruição de micro-organismos patogênicos, bem como redução dos sólidos secos do lodo (Luduvic, 2001; Jordão e Pessôa, 2005).

A estabilização pode ser realizada antes ou após o desaguamento do lodo de esgoto. Os principais processos de estabilização são divididos em estabilização biológica, podendo ocorrer por digestão anaeróbia ou aeróbia, e compostagem, na qual uma mistura inicial de resíduos é submetida à ação de vários grupos de micro-organismos, e estabilização química, realizada por meio da adição de produtos químicos. Existe também a estabilização térmica, realizada com a adição de calor.

De acordo com von Sperling (2005), a digestão anaeróbia é o principal processo de estabilização de lodos no Brasil. A digestão aeróbia, ainda pouco difundida no país, tem sua utilização limitada à estabilização do excesso de lodo ativado oriundo de ETEs com remoção biológica de nutrientes. Já os processos de compostagem são comuns em usinas de tratamento de resíduos sólidos urbanos, sendo encontrados em baixo número em ETEs de pequeno porte.

3.3.2.1 – Estabilização biológica

A norma norte americana EPA 40 CFR Part 503 (USEPA, 1994) apresenta a digestão anaeróbia como um processo de redução significativa de organismos patogênicos. Quanto aos sólidos voláteis, a digestão anaeróbia reduz entre 35 e 60%, dependendo da natureza do lodo de esgoto e das condições de operação do sistema de digestão.

O processo de digestão é desenvolvido por uma sequência de ações realizadas por vários grupos diferentes de micro-organismos, no qual é possível distinguir quatro partes diferentes no processo global de conversão: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (van Haandel e Lettinga, 1994).

A digestão anaeróbia do lodo processa-se em grandes estruturas de concreto, que dependem de um alto investimento inicial. Ela pode ser realizada em um único estágio ou em dois, que é o caso mais usual. Nos sistemas de dois estágios, a digestão anaeróbia processa-se no digester primário e, em seguida, o lodo vai para o digester secundário que opera como adensador do lodo digerido e nele se dá a separação da parte líquida (sobrenadante) (Miki *et al.*, 2006).

A digestão aeróbia também é um processo de oxidação bioquímica dos sólidos biodegradáveis contidos nos esgotos, com abundância de oxigênio dissolvido em toda a massa líquida, favorecendo a atividade de bactérias aeróbias e a formação de subprodutos, tais como matéria orgânica estabilizada (lodo digerido), gás carbônico e água (Jordão e Pessoa, 2005). Normalmente, ela é utilizada em estações de pequeno porte, tendo como desvantagem em relação à digestão anaeróbia o alto custo operacional de energia necessária para a aeração.

3.3.2.2 – Estabilização química

A estabilização química vem sendo bastante praticada, principalmente pela grande economia de investimentos inicial que proporciona em substituição aos digestores anaeróbios clássicos. As ETEs Lavapés (São José dos Campos – SP), Pavuna e Sarapuí (Rio de Janeiro – RJ) e Goiânia (Goiânia - GO) fazem uso desse processo.

O processo ocorre por meio da adição de produtos químicos ao lodo, como, por exemplo, a cal, produto de mais simples aplicação e mais econômico, de modo a elevar o pH a um valor acima ou igual a 12. Essa condição de pH alto cria um meio que não permite a sobrevivência de micro-organismos, não ocorrendo a putrefação do lodo e a geração de maus odores (Miki *et al.*, 2001).

Alguns autores consideram o termo “estabilização” incorreto quando se trata da adição de produtos químicos alcalinos, pois ao elevar o pH até 12 ou mais, por pelo menos 2 horas, impede-se ou retarda-se a ação dos micro-organismos que tipicamente gerariam odores ofensivos, gases, e atração de vetores, mas não se reduz o teor de matéria orgânica presente.

Segundo Metcalf e Eddy (1991), os métodos de estabilização por cal são usados antes e depois do processo de desaguamento, denominados, respectivamente, pré- e pós-tratamento.

3.3.3 – Condicionamento

O condicionamento de lodo é uma etapa prévia ao desaguamento e influencia diretamente a eficiência dos processos mecanizados. É um processo composto por uma etapa de coagulação seguida de outra de floculação. A coagulação tem a função de desestabilizar as partículas por meio da diminuição das forças eletrostáticas de repulsão entre elas. A floculação permite a aglomeração dos colóides e dos sólidos finos por meio de baixos valores de gradientes de agitação (Gonçalves *et al.*, 2001a).

Esse processo busca o aumento do tamanho das partículas no lodo, envolvendo as pequenas partículas em agregados de partículas maiores, sendo importante para a próxima

etapa de tratamento, o desaguamento, que tem como pré-requisito para a operação de alguns equipamentos um grau de umidade, o qual somente será obtido com o uso de polímeros. Aisse *et al.* (1999) listam como objetivos básicos do condicionamento a redução do potencial patogênico dos agentes presentes no material e o aumento do grau de estabilização, com finalidade de reduzir os problemas potenciais da geração de odor, da atração de vetores e os riscos de recontaminação.

Os principais coagulantes utilizados são os sais metálicos, a cal e os polímeros orgânicos (polieletrólitos). Os coagulantes inorgânicos mais comumente utilizados são: (1) cloreto férrico; (2) cal virgem/hidratada; (3) sulfato de alumínio; (4) sulfato ferroso; e (5) sulfato férrico (Gonçalves *et al.*, 2001b).

Conforme von Sperling e Andreoli (2001), o condicionamento químico seguido do desaguamento pode auxiliar a redução da umidade do lodo de 90 a 99% para 65 a 80%, dependendo da natureza dos sólidos tratados.

3.3.4 – Desaguamento

Alguns termos, como desaguamento, desidratação e secagem, são usados como sinônimos, variando em função da referência. Dessa forma, no presente texto, esses termos são também considerados equivalentes. Contudo será adotado o termo desaguamento, para facilitar o entendimento.

De acordo com Amuda *et al.* (2008), por desaguamento ou desidratação entende-se um processo físico empregado no tratamento de lodos de esgoto para eliminar ou reduzir uma quantidade significativa do teor de umidade para posterior processamento e utilização. Esse processo é capaz de transformar lodo líquido em sólido, com teores variando entre 10 e 40% do total de sólidos. Os métodos de desaguamento podem ser divididos em métodos naturais e mecânicos.

Com o desaguamento, consegue-se principalmente a redução de volume do lodo. Segundo Metcalf e Eddy (2003), os motivos que justificam a redução do volume são: (1) os custos de transporte do lodo para o local de disposição final tornam-se significativamente menores quando o volume do lodo reduz-se por meio do desaguamento; (2) o lodo

desaguado é normalmente mais fácil de ser manipulado que o lodo adensado ou líquido; (3) o desaguamento permite uma incineração mais eficiente; (4) caso a compostagem seja utilizada posteriormente como opção de uso, o lodo desaguado diminui a quantidade e, portanto, o custo dos agentes aditivos deste tipo de processo; (5) o desaguamento pode reduzir a geração de maus odores, ou torná-lo menos ofensivo; e (6) caso a disposição final seja o aterro sanitário, o desaguamento torna-se necessário para a diminuição da produção de chorume.

O desaguamento será detalhado no Capítulo 3.4 (Remoção de Umidade: Desaguamento), sendo descritos os principais processos de desaguamento natural e mecanizados existentes na literatura técnica nacional e internacional.

3.3.5 - Higienização

Os níveis de patogenicidade do lodo podem ser substancialmente reduzidos por meio dos processos de estabilização e tratamento. No entanto, muitos parasitas intestinais e, principalmente, seus ovos, são muito pouco afetados por processos de digestão convencional. A Tabela 3.8 mostra os principais mecanismos de higienização de lodo.

Segundo Pinto (2001), a higienização é uma etapa complementar ou conjugada aos processos convencionais, como, por exemplo, o processo de estabilização. No entanto, é importante salientar que o processo de higienização não é uma “desinfecção”, uma vez que não são desativados totalmente todos os micro-organismos patogênicos presentes no lodo.

Tabela 3.8 – Principais mecanismos de higienização de lodo de esgoto.

Mecanismos de higienização de lodos	
Mecanismos	Informações gerais
Via Térmica	Combina duas variáveis de controle, relacionadas ao tempo de permanência do lodo a uma dada temperatura.
Via Química	Utiliza um produto alcalinizante para elevar o pH do lodo e conseqüentemente alterar a natureza coloidal do protoplasma celular dos micro-organismos patogênicos de forma letal, e produzir ambiente inóspito para a sua sobrevivência.
Via Biológica	A rota biológica ainda carece de maiores experiências, mas uma das alternativas mais conhecida é a vermicultura.
Via Radiação	Por meio de raios beta e gama, e ainda por radiação solar, mais especificamente os raios ultravioletas.

Sendo assim, Pinto (2001) afirma que o objetivo de se introduzir um processo de higienização de lodos nas ETEs é garantir um nível de patogenicidade no lodo que, ao ser disposto no solo, não venha a causar riscos à saúde da população, aos trabalhadores que vão manuseá-lo e impactos negativos ao meio ambiente. Portanto, para se implantar um sistema de higienização, é necessário avaliar qual será a alternativa de disposição final que será utilizada.

3.3.6 - Tratamento no solo e destinação final

As ETEs geram inúmeros impactos positivos, entre eles o aumento da qualidade de vida da população. Porém, é relevante destacar que quaisquer benefícios sanitários e ambientais provenientes do tratamento do efluente podem ser comprometidos, caso não ocorra o tratamento e disposição adequada do lodo produzido na estação.

No entanto, para evitar tais consequências, a legislação está se tornando mais rígida, como a Lei nº 9.605 de 1998, conhecida como a “Lei de Crimes Ambientais”, que dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Nessa lei há previsão de pena de reclusão, de um a cinco anos, para quem causar poluição hídrica que torne necessária a interrupção do abastecimento público de água de uma comunidade.

Existem várias formas tecnicamente aceitáveis para a disposição final dos resíduos gerados na ETE. O tratamento mais comum nas ETEs envolve a digestão anaeróbia. Em seguida o lodo é encaminhado para o aproveitamento e/ou disposição final em diferentes alternativas. A Tabela 3.9 trata das principais alternativas de disposição e/ou uso do lodo.

Para definir quais estruturas, etapas, processos e equipamentos são necessários para promover a adequada estabilização, manuseio e gerenciamento desses resíduos é preciso identificar, primeiro, as alternativas mais adequadas para uso e/ou disposição final. Por exemplo, a reciclagem agrícola exige baixos níveis de metais pesados e de patogênicos, enquanto a disposição em aterros sanitários é menos exigente quanto a esses parâmetros. Por outro lado, a umidade é um fator crítico (Andreoli e Pinto, 2001).

Tabela 3.9 – Principais alternativas de tratamento e disposição final de lodo (Lara *et al.*, 2001, modificado).

Alternativa de disposição	Comentário
Descarga oceânica	Destinação de lodo de esgoto no mar, após pré-condicionamento, por meio de emissários oceânicos ou de navios lameiros.
Incineração	Processo de decomposição térmica via oxidação, onde os sólidos voláteis do lodo são queimados na presença de oxigênio, convertendo-os em dióxido de carbono e água, sendo que uma parcela dos sólidos fixos é transformada em cinzas.
Aterro sanitário	O lodo de esgoto pode ser disposto em aterro sanitário exclusivo ou codisposto com resíduos urbanos.
" <i>Landfarming</i> "	Tem como objetivo utilizar o solo como um sistema de tratamento, onde uma área recebe doses elevadas de lodo por vários anos. O solo passa a ser o suporte da atividade biológica, retenção de metais, local de bio-oxidação, o que provocará a degradação da matéria orgânica.
Recuperação de área degradada	Disposição de altas doses de lodo em locais drasticamente alterados, como áreas de mineração, onde o solo não oferece condições ao desenvolvimento e fixação da vegetação, em função da falta de matéria orgânica e de nutrientes no solo.
Uso agrícola	Disposição do lodo em solos agrícolas em associação ao plantio de culturas.
Uso industrial	Os lodos podem ser processados podendo ser utilizados como agregados leves para a construção civil, na fabricação de tijolos, cerâmicas e na produção de cimento.

É importante ressaltar que alguns dos destinos citados na Tabela 3.9 não são mais empregados, devido principalmente à preocupação com o meio ambiente e a legislação ambiental, como por exemplo, a descarga oceânica.

Mais de 90% do lodo produzido no mundo tem sua disposição final por meio de três processos: incineração, disposição em aterros e uso agrícola. O uso agrícola, chamado de uso benéfico do lodo, é a forma predominante de disposição nos Estados Unidos, onde estima-se que em 2010 se atingiria 61,5% do lodo empregado na agricultura.

No Brasil, a Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) Nº 375 de agosto de 2006 é a referência federal na definição de critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em ETEs e seus produtos derivados. A referida

Resolução, que não se aplica a lodos do tratamento de efluentes industriais, tem por objetivo alcançar benefícios à agricultura evitando riscos à saúde pública e ao meio ambiente.

A Resolução do Conselho do Meio Ambiente do Distrito Federal (CONAM) Nº 03 de julho de 2006 estabelece em escala distrital normas, padrões e procedimentos para distribuição e uso de lodo de esgoto na agricultura, reflorestamento, recuperação de áreas degradadas, processamento e pesquisa.

3.4 – REMOÇÃO DE UMIDADE: DESAGUAMENTO

Essa etapa de tratamento pode ser dividida em natural ou mecanizada. O princípio do desaguamento natural é baseado na evaporação e percolação. Em contrapartida, os processos mecanizados baseiam-se em mecanismos como centrifugação, filtração e compactação (Amuda *et al.*, 2008). Para aumentar a aptidão ao desaguamento e à captura de sólidos nesses processos, os lodos podem ser submetidos a uma etapa de condicionamento prévio, favorecendo a agregação das partículas de sólidos e a formação de flocos (Thapa *et al.*, 2009).

No desaguamento de um lodo com concentração de 4 a 20% de sólidos, ele é reduzido substancialmente para um quinto de seu volume inicial (Turovskiy e Mathai, 2006). Essa característica faz desse tratamento um importante processo, porém faz-se necessário analisar as alternativas existentes levando em consideração as vantagens e desvantagens de cada processo.

Os métodos de desaguamento mais comumente utilizados incluem processos naturais, tais como leitos de secagem e lagoas de lodo; e processos mecânicos, como centrífugas, filtros à vácuo, filtros prensa de placas, filtros prensa de esteiras e prensas parafuso. Recentemente, tem-se utilizado membranas geotêxteis (bags de geotêxtil) em diferentes conformações.

A seleção dos métodos de desaguamento é determinada pelo tipo de lodo a ser processado, suas características e espaço disponível para instalação. Em lugares onde existe disponibilidade de espaço, leitos de secagem ou lagoas são geralmente utilizados.

Entretanto, para as instalações situadas em locais restritos, ou em regiões muito úmidas, os dispositivos mecânicos são frequentemente escolhidos. (Murthy, 2001; Novak, 2001, *apud* Metcalf e Eddy, 2003).

É importante relatar que a secagem térmica, apesar de muitas vezes ser considerada uma alternativa de desaguamento na literatura, não será considerada neste trabalho devido as suas características não serem compatíveis com as do desaguamento natural ou mecânico. A secagem é uma operação realizada por meio da aplicação de calor (por convecção, condução ou radiação) diferente do desaguamento que é caracterizado por mecanismos de evaporação, percolação, centrifugação, filtração e compactação.

Alguns lodos, particularmente aqueles que são digeridos aerobiamente, não são facilmente passíveis de desaguamento mecânico, por se tratar de lodos com baixo teor de sólidos, cerca de 0,7% segundo Imhoff (1986 *apud* Aisse *et al.*, 1999), sendo possível o seu desaguamento em leitos de secagem convencional com bons resultados.

Desse modo, a seleção do dispositivo ideal de desaguamento depende da elaboração de estudos em escala de bancada ou estudos pilotos (Metcalf e Eddy, 2003). Gonçalves *et al.*, (2001b) complementam que a escolha do equipamento está diretamente relacionada com o tipo de sólido e com a forma com que a água está ligada às partículas do lodo.

3.4.1 – Leitos de secagem

Os leitos de secagem podem ser classificados como: (1) convencionais (areia), (2) pavimentados, (3) de secagem à vácuo, (4) rápidos ou de filtragem rápida, (5) com plantações de juncais, e (6) de meio artificial.

3.4.1.1 – Convencionais (*Sand drying beds*)

Os leitos de secagem são uma das técnicas mais antigas utilizadas na separação sólido-líquido (van Haandel e Lettinga, 1994). É um processo de desaguamento que apresenta simplicidade operacional e baixo custo de instalação, projetado e construído de modo a receber o lodo dos digestores aeróbio ou anaeróbio. Os projetos de leito de secagem no Brasil são regulamentados pela norma da ABNT NBR 12.209/1992.

Os leitos de secagem são unidades de tratamento, geralmente em forma de tanques retangulares, nas quais se processa a redução de umidade com a drenagem e evaporação da água liberada durante o período de secagem. O ciclo de operação (descarga, secagem e retirada do lodo do leito) poderá durar cerca de 18 a 25 dias, segundo as condições climáticas (Jordão e Pessôa, 2005).

No interior do tanque, são incluídos dispositivos para possibilitar a drenagem: como a soleira drenante, camada suporte e sistema de drenagem. A Figura 3.2 ilustra o corte longitudinal de um leito de secagem convencional.

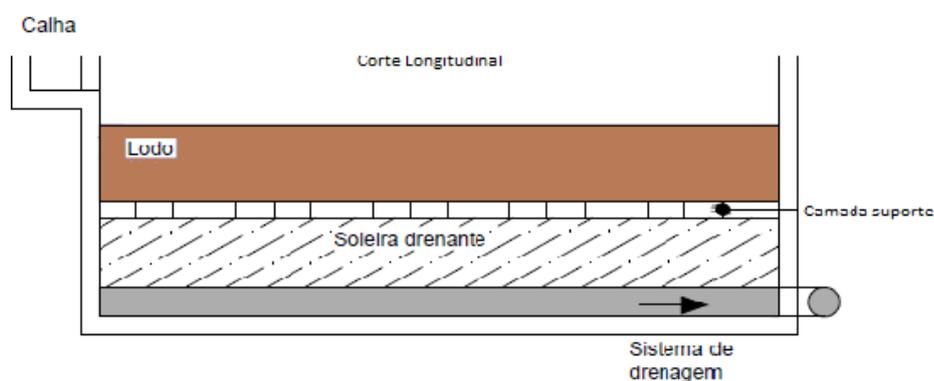


Figura 3.2 – Corte longitudinal de leito de secagem convencional (Franci, 1999).

Segundo Gonçalves *et al.* (2001b), a soleira drenante permite que o líquido presente no lodo percole por camadas sucessivas de areia e pedregulho com diferentes granulometrias. A camada suporte, composta de tijolos ou outros elementos de material resistente à operação do lodo seco, possibilita uma melhor distribuição do lodo, impede a colmatção e garante a retirada do lodo desaguado sem comprometer as camadas superficiais. Com relação ao sistema drenante, são tubos assentados com juntas abertas ou perfuradas, colocados no fundo do tanque para recolherem todo o líquido percolado na soleira drenante. O sistema pode ser instalado fora do tanque para facilitar a manutenção das canalizações, mas, nesse caso, o fundo do tanque deverá ser bastante inclinado para possibilitar o escoamento do líquido.

De acordo com Cheremisinoff (2002), esse método comum baseia-se na energia térmica e hidráulica, de tal modo que a secagem do lodo nos leitos se processa por meio da redução de umidade com a evaporação e a drenagem. A partir da secagem do lodo, surgem as rachaduras na superfície permitindo que as camadas mais baixas acelerem o processo de evaporação. Aisse *et al.* (1999) complementam que muito mais água é removida pela

percolação do que pela evaporação. No entanto, esse fato relaciona-se a vários fatores, como a taxa de evaporação que depende do clima, natureza do lodo e a carga de lodo aplicada no leito.

Para Pedroza *et al.* (2006), a principal razão para a taxa de evaporação ser relativamente baixa contradiz a informação de Cheremisinoff (2002), pois o aquecimento superficial da camada de lodo faz com que ocorra a formação de torrões, os quais se apresentam como um material que não conduz bem o calor, prejudicando o processo de difusão, responsável pelo transporte da massa de água das camadas mais baixas do lodo para a superfície, resultando em uma evaporação de baixa taxa, mantendo-se inclusive os organismos patogênicos, já que a umidade e a temperatura mantêm-se favoráveis para sua sobrevivência.

Quanto à influência do clima, a evaporação é mais rápida quando a temperatura é alta, a umidade do ar é baixa e há vento suficiente para assegurar uma renovação adequada do ar acima do leito. Com relação à estabilização, quanto mais estável for o lodo, mais fácil será secar o lodo a uma taxa elevada (van Haandel e Lettinga, 1994). Segundo Pedroza *et al.* (2006), para melhorar a eficiência dos leitos de secagem, pode-se eliminar a influência negativa das chuvas e aproveitar a energia solar cobrindo-se o leito. Nesse caso, há diferentes possibilidades de operação: (1) sem renovação do ar contido entre o lodo e a cobertura, efetivamente transformando a unidade em um destilador solar, (2) com renovação ilimitada do ar mediante paredes laterais vazadas e (3) com renovação limitada de ar.

Segundo Wang *et al.* (2006a), desde 1900 é conduzida a pesquisa para o desaguamento de lodos em leitos de secagem. No entanto, os parâmetros de projeto são ainda muito empíricos e só recentemente tem sido feito um esforço para desenvolver uma abordagem de projeto racional. As opiniões apresentadas por Wang *et al.* (2006a) são complementadas por Silva e Chernicharo (2007) pois, apesar de amplamente utilizados em todo país, ainda são escassas as informações disponibilizadas na literatura especializada acerca do rendimento de leitos de secagem e das características físico-químicas e microbiológicas do percolado. Ainda, são recorrentes entre os projetistas as dúvidas sobre a necessidade, ou não, da recirculação do percolado de volta para as unidades de tratamento biológico.

Sendo assim, Silva e Chernicharo (2007) realizaram um estudo com o objetivo de verificar a aptidão ao desaguamento, em leitos de secagem, de lodos anaeróbios provenientes de dois reatores UASB. Foi verificado que, quanto maior a taxa de sólidos aplicada aos leitos, maior é o tempo de secagem necessário para se atingir uma determinada concentração de sólidos. Para um tempo de secagem de 20 dias, os lodos provenientes de ambos os reatores atingiram concentrações de sólidos totais de, aproximadamente, 65% e 40%, para as cargas de 7,5 e 12,5 kgST/m², respectivamente.

O estudo de Silva e Chernicharo (2007) demonstrou ainda que a maior parte da umidade contida no lodo foi perdida por percolação, representando entre 55% e 65% do volume inicial de lodo disposto nos leitos. Já o volume de água perdido por evaporação variou de 20% a 30%. Vale ainda ressaltar que o volume decresce de forma exponencial, o que demonstra uma perda de água muito grande nos primeiros dias operacionais seguida de uma significativa redução dessa taxa ao longo do tempo. Ao final dos 20 dias de secagem, o lodo apresentava de 15% a 20% do seu volume inicial. As vantagens e desvantagens do leito convencional foram descritas na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Vantagens e desvantagens dos leitos de secagem convencionais (Metcalf e Eddy, 1991).

Leito de secagem convencional	
Vantagens	Método com capital de investimento mais baixo em locais onde não há restrição de área
	Requer pouca atenção do operador, bem como pouca qualificação
	Baixo consumo de energia
	Baixo ou nenhum Consumo de produtos químicos
	Pouco sensível à variações na qualidade do lodo
	Apresenta a maior concentração de sólidos comparada aos outros métodos
Desvantagens	Requer áreas extensas de implantação
	Requer lodo estabilizado
	Influência significativa do clima no desempenho operacional do processo
	Retirada da torta seca é um processo lento e requer muita mão de obra
	Risco elevado de liberação de odores desagradáveis e proliferação de moscas
Risco de contaminação do lençol freático caso o fundo dos leitos e o sistema de drenagem não sejam bem executados	

A remoção do lodo nos leitos de secagem pode ser realizada de forma manual, utilizando uma pá, ou mecânica, com raspadores elétricos. Para facilitar o transporte, deve haver uma área que deve circundar todo o comprimento do leito, destinada aos veículos que transportam o lodo para o destino final (Amuda *et al.*, 2008).

3.4.1.2 – Leitos de secagem pavimentados (*Paved drying beds*)

Segundo Amuda *et al.* (2008), os leitos de secagem pavimentados diferem dos leitos convencionais devido ao material de revestimento utilizado para formar a base do tanque, permitindo o uso de concreto ou concreto betuminoso. Esse leito assim como o leito convencional, deve ser projetado de tal modo que facilite o acesso de veículo para o transporte do lodo.

A experiência de campo indica que a utilização de leitos pavimentados apresenta resultados de desaguamento em curto prazo e sua operação é bem mais econômica quando comparado com os leitos de secagem convencionais. Isso está relacionado ao uso de equipamentos mecânicos para a limpeza do lodo, pois com a utilização desses aparelhos é possível remover o lodo com maior teor de umidade (Wang *et al.*, 2006a). A Tabela 3.11 apresenta as vantagens e desvantagens dos leitos de secagem pavimentados.

Tabela 3.11 – Vantagens e desvantagens dos leitos de secagem pavimentados.

Leito de secagem pavimentado	Autor
<p>Vantagens</p> <p>Admite remover o lodo com maior teor de umidade se comparado ao leito de secagem convencional</p> <p>Admite equipamentos mecânicos para a remoção do lodo</p> <p>Pouca manutenção</p> <p>Operação mais econômica comparada aos leitos de secagem</p>	<p>Amuda <i>et al.</i> (2008)</p> <p>Wang <i>et al.</i> (2006a)</p>
<p>Desvantagens</p> <p>Menos eficiente que os leitos de secagem convencionais para o desaguamento de lodos digeridos aerobiamente</p> <p>Requerem uma área maior do que os leitos de secagem convencionais para uma mesma quantidade de lodo</p>	<p>Turovskiy e Mathai (2006)</p>

De acordo com Turovskiy e Mathai (2006), os leitos pavimentados devem ter revestimento de no mínimo 1,5% de declividade dirigida para o centro da área de drenagem, onde não há

pavimentação. Eles são normalmente de forma retangular e têm cerca de 6 a 15 m de largura por 20 a 45 m de comprimento com paredes verticais.

3.4.1.3 – Leitos de secagem a vácuo (*Vacuum-assisted drying beds*)

Segundo Turovskiy e Mathai (2006), o leito de secagem a vácuo, mostrado na Figura 3.3, é geralmente retangular e possui uma laje de concreto na parte inferior. Uma camada de agregado contendo vários milímetros de espessura é colocada em cima da laje, que por sua vez suporta uma cobertura rígida de meios filtrantes de poros múltiplos. A camada de agregado está ligada à câmara a vácuo e também a uma bomba de vácuo.

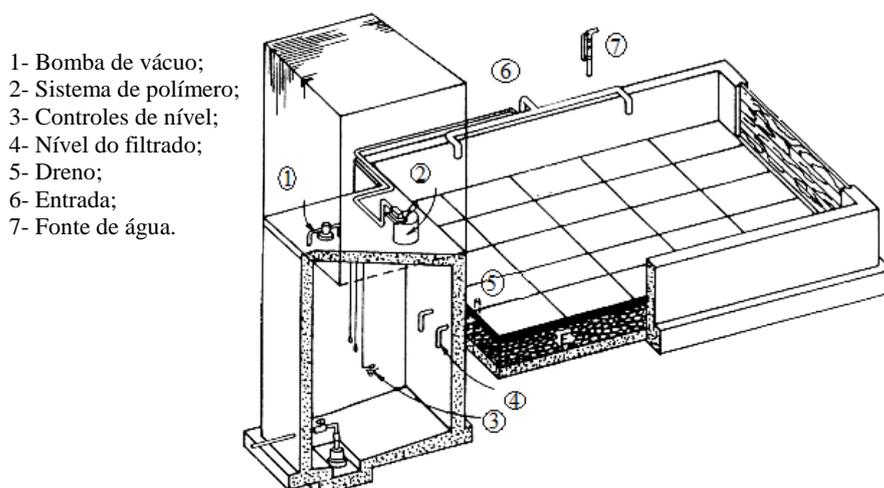


Figura 3.3 – Esquema de um leito de secagem a vácuo (WEF 1998, modificado).

O vácuo é empregado para acelerar o desaguamento do lodo. Ele é obtido por meio de um sistema a vácuo ligado na parte inferior do meio filtrante. O leito é frequentemente alimentado por lodo condicionado com um polímero, que é drenado por gravidade e imediatamente seguido pela aplicação de vácuo. Esse processo ajuda a reduzir o tempo de ciclo necessário para secagem de lodo. O lodo, depois de tratado, pode permanecer ao ar livre por até dois dias antes de ser retirado do leito (Kukenberger, 1996; Metcalf e Eddy, 2003).

Turovskiy e Mathai (2006) descrevem a seguinte sequência de operação: (1) o lodo é pré-condicionado com polímero; (2) o lodo é lançado no leito de secagem a uma taxa de 9,4 L/s e até completar uma profundidade de 30 a 75 mm; (3) após o lodo ser aplicado, ele permanece cerca de uma hora sendo drenando por ação da gravidade; (4) no final do

período de uma hora, o sistema de vácuo é ligado e se mantém um vácuo em torno de 34 a 84 kPa; (5) quando a torta de lodo apresentar rachaduras, a bomba de vácuo deve ser desligada; (6) o lodo permanece ao ar livre de um a dois dias; (7) o lodo é removido do leito; (8) e, por fim, as superfícies das chapas porosas são limpas com uma mangueira de alta pressão.

Em condições favoráveis, o sistema consegue desaguar um lodo digerido aerobiamente a uma concentração de 12% de sólidos em 24 horas sem adição de polímeros, e no mesmo nível, em 8 horas, se o polímero for adicionado. Um lodo com concentração de 20% de sólidos pode ser desaguado em 48 horas (Wang *et al.*, 2006a). A Tabela 3.12 mostra as vantagens e desvantagens do leito de secagem a vácuo.

Tabela 3.12 – Vantagens e desvantagens do leito de secagem a vácuo.

Leito de secagem a vácuo	Autor
O lodo pode ser removido de forma manual (ancinho) ou mecânico	Wang <i>et al.</i> (2006a)
Menor interferência do clima	Turovskiy e Mathai (2006)
Necessidade de uma área menor	
Torta de lodo facilmente removida do leito	
Pode ser empregada em clima frio	
Tempo reduzido de desaguamento comparado ao leito convencional e ao pavimentado	Kukenberger (1996) e Metcalf e Eddy (2003)
Dependência de condicionamento químico	Turovskiy e Mathai (2006)
Consumo de energia elétrica	
Maior custo de implantação que os outros leitos	
Somente para pequenas instalações	Spellman (1997)

3.4.1.4 – Leitos de secagem rápida ou leitos secos de filtração rápida (*Quick dry filter beds*)

O processo centra-se no conceito de drenagem rápida de água livre, com a ajuda de um polímero de desidratação. A água livre é rapidamente removida por gravidade e também por processos naturais de evaporação. Semelhante ao conceito mais antigo de desaguamento (leitos de areia), o leito de secagem rápida incorpora novas tecnologias apropriadas que aumentam seu desempenho.

O leito de secagem rápida consiste em uma série de tubos colocados na base de um leito para permitir o escoamento da água e a pré-saturação antes da aplicação do lodo. Os tubos situados na base são cobertos com pedras de 20 a 25mm. Após essa etapa, uma grade tipo colmeia é colocada, e, para concluir o leito, é adicionada uma camada de pedra de 10 a 15mm e uma camada de areia (USEPA, 2006).

O método inclui um sistema de preparação de polímero que é injetado diretamente no dispositivo de floculação. Esta técnica elimina a necessidade de tanques de tratamento, misturadores e bombas de transferência do polímero. O polímero atua o lodo para o máximo desempenho, acelerando a aglomeração das partículas, aumentando a quantidade total de água que pode ser drenada e reduzindo a quantidade de água que precisa ser evaporada.

Segundo a USEPA (2006), esse processo de desaguamento é baseado na drenagem por gravidade, com remoção adicional de água por evaporação. As forças de saturação nos leitos de secagem têm a finalidade de expulsar todo o ar que ficou preso no interior do meio filtrante, o que permite a uniformidade de fluxo em toda superfície do leito, promovendo melhor distribuição. O dispositivo de saturação previne a compactação do meio filtrante diferente do que ocorre nos leitos de secagem convencionais.

Quando o dreno inferior é aberto, um efeito de vácuo ou sifão é criado e, juntamente com a fissura ou abertura, ocorre a circulação de ar, aumentando ainda mais o desaguamento. Cerca de 90% da água escoará em 12 horas devido ao vácuo, mas continuará a escorrer com o sistema desligado, enquanto o lodo permanecer no leito. O método pode ser comparado favoravelmente com sistemas de desaguamento mecânicos, tais como filtros prensas ou centrífugas (USEPA, 2006).

A remoção do lodo do leito é realizada de forma mecânica, por meio de um equipamento que varre todo o leito com dentes de metal ajustável com praticamente nenhuma perda. As vantagens e desvantagens desse processo são apresentadas na Tabela 3.13. A Figura 3.4 ilustra o leito de secagem rápida e o equipamento usado para remover o lodo desaguado.

Tabela 3.13 – Vantagens e desvantagens do leito de secagem rápida (USEPA, 2006).

Leito de secagem rápida	Autor
Vantagens	Menor tempo de operação
	Maior eficiência no teor de sólidos
	Baixo custo se comparado aos processos mecânicos
Desvantagens	Remoção mecânica do lodo
	Consumo de polímeros
	Necessária aplicação uniforme do lodo

USEPA (2006)



(a)

(b)

Figura 3.4 – Leito de secagem rápida (a) e equipamento usado para remover o lodo desaguado (b) (USEPA 2006).

3.4.1.5 – Leitões de secagem de junco (*Reed beds*)

De acordo com Metcalf e Eddy (2003), os leitões de juncos podem ser usados para desaguamento de lodos em estações de tratamento com capacidade de até 0,2 m³/s. São de aparência semelhante às *wetlands*, que consistem em canais, ou trincheiras, cheias de areia ou rocha para suportar vegetação emergente. A Figura 3.5 mostra um esquema de um leito de junco.

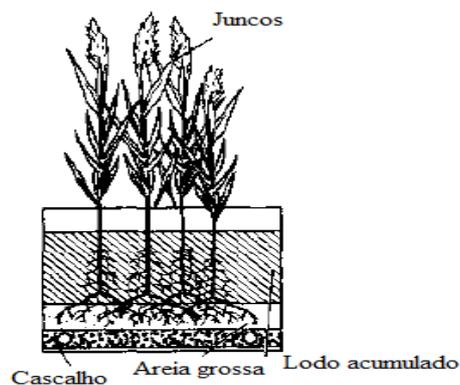


Figura 3.5 – Leito de junco (Metcalf e Eddy 2003, modificado).

Esse método de secagem permite retirar o lodo seco em períodos bastante dilatados, de 8 a 10 anos. A concentração do material pode alcançar até 50% de sólidos secos. A vegetação empregada é composta por gramíneas *Phragmites communis*, conhecidas popularmente pela denominação genérica de juncos. Essas são plantas compridas, de caules ocos e nós protuberantes, que crescem favoravelmente em meios úmidos (Crespo, 2003). A Tabela 3.14 expõe as principais vantagens e desvantagens que o leito de secagem de junco apresenta.

Tabela 3.14 – Vantagens e desvantagens do leito de secagem de junco.

Leito de secagem de junco	Autor
Vantagens	Alto teor de sólidos
	Aproveitamento da vegetação
Desvantagens	Promove uma importante degradação da matéria orgânica
	Permanece 6 meses parado para a remoção do lodo
	Após a remoção do lodo, Há necessidade de substituir a camada de areia e de cascalho
	Utilizados em pequenas ETES
	Tempo de operação longo

Os tocos de juncos são introduzidos logo após o lançamento da primeira camada de lodo. O crescimento das plantas poderá dificultar novos lançamentos, assim, quando elas alcançarem uma altura de aproximadamente 2m, deverão ser podadas, deixando emergente apenas 0,20m de caule, aproximadamente (Crespo, 2003). Para a remoção do lodo, o leito é retirado de operação por seis meses, o que permite que a camada superior torne-se mineralizada e desinfetada. Quando os sólidos são removidos, o cascalho superior e a camada de areia também são removidos e devem ser substituídos (Turovskiy e Mathai, 2006).

Conforme Crespo (2003), o caule, juntamente com as raízes, forma um caminho preferencial para a percolação e a drenagem do líquido presente no lodo em processo de desaguamento. No outro extremo, as folhas, abundantes como em toda vegetação de brejo, absorvem parte do líquido e o liberam para a atmosfera por meio da transpiração. Esses mecanismos, contínuos e permanentes, permitem, em pouco tempo, reduzir o nível de água

contido no lodo. Ainda, o oxigênio captado pela parte aérea da planta é introduzido no esgoto por meio das raízes. O suprimento de oxigênio provoca uma importante proliferação de micro-organismos que complementam a estabilização da matéria orgânica. Turovskiy e Mathai (2006) complementam que a degradação pela microflora é tão eficaz que até 97% do conteúdo orgânico é convertido em dióxido de carbono e água, com a correspondente redução no volume.

3.4.1.6 – Leitos de secagem com meio artificial (*Artificial media drying beds*)

Alguns autores classificam esses leitos como leitos de secagem *Wedgewire*, porém esse é um subtipo dos leitos de secagem com meios artificiais. Dessa forma, neste trabalho, o *Wedgewire* será considerado parte integrante do leito com meio artificial.

Segundo Turovskiy e Mathai (2006), dois tipos de meios artificiais podem ser usados para esses leitos de secagem. O primeiro é a tela de fios (*wedgewire*) que consiste em fios de arame perfilados utilizados para construir telas robustas e extremamente precisas, fabricadas em aço inoxidável. O segundo são painéis de poliuretano de alta densidade. A Figura 3.6 ilustra um leito de secagem com meio artificial.

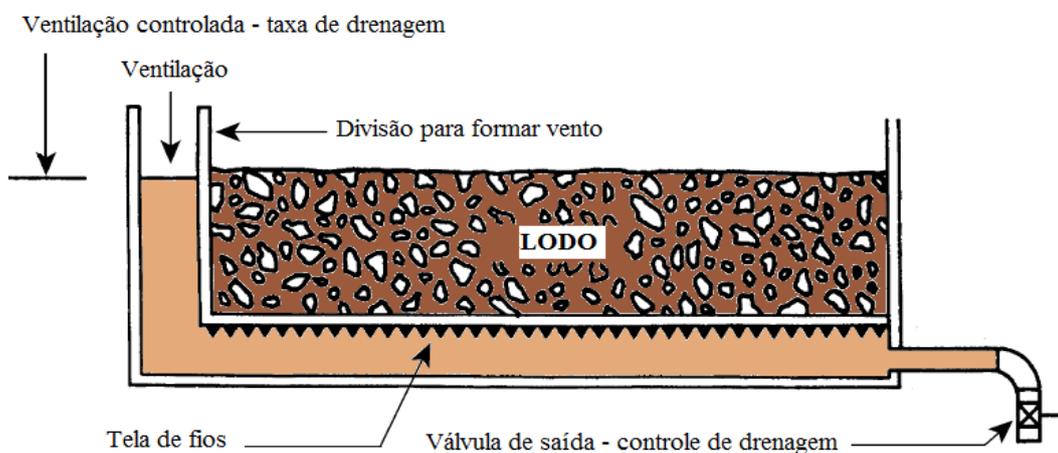


Figura 3.6 – Leito de secagem com meio artificial (Wang *et al.*, 2006a, modificado).

Esse leito de secagem se assemelha ao leito de secagem a vácuo e tem sido utilizado com sucesso nos Estados Unidos há mais de 20 anos para desaguar lodos de esgotos municipais e industriais, e na Inglaterra é utilizado desde a década de 1970.

De acordo com Amuda *et al.* (2008), esse tipo de leito de secagem emprega um meio poroso subjacente para drenar o conteúdo de umidade do lodo. As telas, formadas pelo entrelace de fios com 0,8m de abertura entre as barras e planas na parte superior, são organizadas em painéis para formar um fundo falso e eficaz para o controle da drenagem. As vantagens e desvantagens dos leitos de secagem com meio artificial foram listadas na Tabela 3.15.

Tabela 3.15 – Vantagens e desvantagens do leito de secagem com meio artificial.

Leito de secagem com meio artificial		Autor
Vantagens	Não obstrução do meio	Metcalf e Eddy (1991)
	Drenagem rápida e constante	
	Fácil manutenção	
Desvantagens	Deságua lodo digerido aerobicamente	Amuda <i>et al.</i> (2008)
	Necessita de condicionamento químico	Spelman (1997)
	Alto custo inicial se comparado aos leitos convencionais e pavimentado	Metcalf e Eddy (1991)

3.4.2 – Lagoas de secagem ou de lodo (*Sludge lagoons ou biosolids lagoons*)

Conforme Metcalf e Eddy (2003), as lagoas de secagem podem ser classificadas em facultativas, recebendo lodo cru ou parcialmente digerido, ou de secagem propriamente ditas, recebendo lodo digerido. Seu desempenho, como o dos leitos de secagem, é afetado pelo clima. Assim, a sua concepção requer a consideração de diversos fatores, tais como precipitação, evaporação, o volume e as características do lodo (Turovskiy e Mathai, 2006).

As lagoas de lodo são utilizadas para adensamento, digestão complementar, desaguamento e até mesmo para disposição final de lodos de esgotos. A Figura 3.7 ilustra o esquema de uma lagoa de lodo com dispositivo de remoção do sobrenadante.

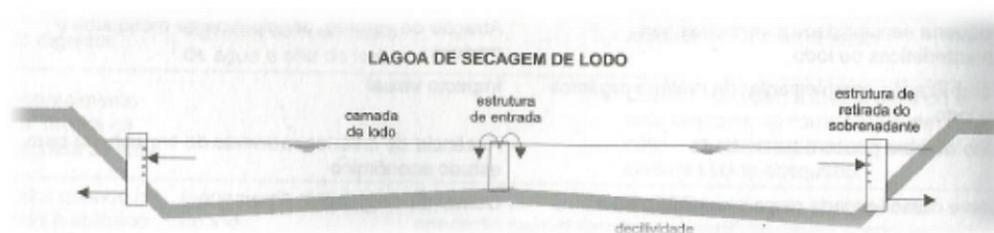


Figura 3.7 – Lagoa de lodo (EPA, 1987)

Segundo Jordão e Pessôa (2005), em função do procedimento operacional, as lagoas podem ser classificadas como temporárias e permanentes. A primeira recebe essa classificação por exigir remoções periódicas do lodo seco para, assim, permitir o recarregamento da unidade. As permanentes, ao contrário da anterior, não têm a obrigatoriedade de remover o lodo, no entanto, esse poderá ser removido após vários anos de sua aplicação para que a lagoa possa novamente receber outra quantidade de lodo. Observa-se que, mesmo com a remoção depois de vários anos, ela ainda é considerada permanente, pois não faz parte de um processo de tratamento. As vantagens e desvantagens dessa alternativa de desaguamento foram listadas na Tabela 3.16.

Tabela 3.16 – Vantagens e desvantagens das lagoas de secagem.

Lagoas de lodo	Autor
Vantagens	Baixo, ou nenhum, consumo de energia
	Não há Consumo de produtos químicos
	Matéria orgânica apresenta-se bem estabilizada
	Baixo capital de investimento onde não há restrição de aquisição de área
	Não requer mão de obra qualificada para operação
	Metcalf e Eddy (1991)
	Podem servir como reguladoras do fluxo de vazão no tratamento de lodo
	Wang <i>et al.</i> (2006b)
	Não são sensíveis às variações do lodo
Desvantagens	Potenciais problemas de geração de odores e atração de vetores
	Potencial para contaminação de águas subterrâneas e superficiais
	Utilizam mais áreas que os métodos mecânicos
	Requer a consideração de fatores climáticos (precipitação, evaporação)
	Causam poluição visual
	Metcalf e Eddy (1991)
	Turovskiy e Mathai (2006)
	Wang <i>et al.</i> (2006b)

Embora as lagoas sejam um processo de baixo custo, operacionalmente simples, lagoas de secagem são pouco utilizadas no Brasil. Segundo Jordão e Pessôa (2005), a maioria das lagoas tem sido inadequadamente usadas e são desprovidas de dispositivos ou recursos relacionados com os aspectos ambientais e estéticos. Esses fatores e suas consequências têm sido suficientes para a determinação de outros métodos de desaguamento de lodos.

Para Turovskiy e Mathai (2006), as lagoas são semelhantes aos leitos de secagem. No entanto, o lodo é colocado em profundidades três a quatro vezes maior do que seria em um leito. Possui normalmente uma forma retangular, cercada por diques de terra de 0,6 – 1,2 m de altura (profundidade da lagoa), sendo que o lodo será drenado para o interior da lagoa durante um período de meses até atingir a profundidade máxima dos diques. A sua operação pode envolver equipamentos, mecânicos ou não, para alimentação da lagoa e remoção do lodo após tratamento.

De acordo com Miki *et al.* (2001), o desaguamento ocorre por meio de três formas: drenagem, evaporação e transpiração. No entanto, o mais representativo é a evaporação. Para Metcalf e Eddy (2003), a drenagem subterrânea é limitada cada vez mais por rigorosas regulamentações ambientais. Wang *et al.* (2006b) complementam que o impacto potencial para as águas subterrâneas e, particularmente, ao abastecimento de água local, causado pela infiltração da água proveniente dos lodos, deve ser avaliada e, se necessário, deve ser providenciada uma impermeabilização do fundo e dos taludes.

3.4.3 – Bag, tubo ou membrana de geotêxtil (*Geotube*)

Para Miki *et al.* (2006), o tubo de geotêxtil, outra nova tecnologia no campo do desaguamento de lodos de ETEs, teve origem nos materiais utilizados na construção de diques de contenção na Holanda. Os tubos são compostos de tecido de polipropileno de alta resistência e suportam altas pressões na fase de enchimento. A superfície do tubo permite a drenagem da água contida no lodo condicionado e são fabricados segundo as necessidades do projeto. A Figura 3.8 ilustra os tubos e as etapas de operação, e a Tabela 3.17 lista as principais vantagens e desvantagens do uso de tubos de geotêxtil.



Figura 3.8 – Operação do sistema de desaguamento de lodos em bags de geotêxtil (Watersolve, LLC, 2006, apud USEPA 2006, modificado).

Tabela 3.17 – Vantagens e desvantagens dos tubos de geotêxtil

Leito de secagem com meio artificial		Autor
Vantagens	Redução de odores	USEPA (2006)
	Facilidade de manuseio	
	Diminuição do potencial para derramamentos	
	Para qualquer tipo de lodo	
	Pouca ou nenhuma manutenção	
Desvantagens	Ocupam espaços menores que os leitos de secagem convencionais	Miki <i>et al.</i> (2006)
	Pode receber lodo com areia e/ou pedra	
	A <i>bag</i> é usada apenas uma vez	
	Alto custo	

Esse sistema funciona em três fases, conforme descrito a seguir: (1) fase de confinamento: o lodo devidamente condicionado é bombeado para o interior do tubo; (2) fase de desaguamento: o lodo condicionado libera a água que passa por meio da membrana geotêxtil e (3) fase de consolidação: após o preenchimento total do tubo com o lodo condicionado, o tubo permanece em repouso por meses, para aumentar o teor de sólidos do lodo no interior do tubo.

O tubo é composto por um sistema de bombeamento de material e transporte de lodos. Devido às características do sistema, principalmente por se tratar de um ciclo fechado, um estudo recente sobre a instalação de geotêxteis em uma Estação de Tratamento de Água Residuárias – ETAR, antes operando com prensa desaguadora, mostrou que, em comparação com as operações do ano anterior, o sistema de desaguamento necessita de pouco ou nenhuma operação e manutenção. Já a prensa ou centrífuga exige um acompanhamento em tempo integral e adaptação constante devido à variação nas condições do afluente (USEPA, 2006).

3.4.4 – Centrífuga (*Centrifuge*)

De acordo com Wang *et al.* (2006c), a taxa de sedimentação dos sólidos em um líquido pode ser maximizada por meio da substituição da força gravitacional por uma força centrífuga. Essa separação é baseada na diferença de densidade entre líquidos e sólidos, ou entre dois líquidos. Miki *et al.* (2006) complementam que a força centrífuga assemelha-se com o que ocorre em um decantador por gravidade. No entanto, utiliza uma força de 500 a 3.000 vezes maior que a força de gravidade.

É comum a instalação de centrífugas em série, a primeira para o adensamento do lodo e a segunda para o desaguamento. Estão disponíveis no mercado centrífugas com capacidade variando entre 2,5m³/h a 180m³/h. A Tabela 3.18 apresenta as vantagens e desvantagens da utilização de centrífugas no desaguamento de lodo.

Com relação ao seu funcionamento, os sólidos são expulsos do eixo de rotação e o líquido é levado em direção ao centro da máquina. Para aumentar a eficiência do equipamento, como em outros processos de desaguamento, os polímeros podem ser usados, assim como os produtos inorgânicos (Kukenberger, 1996).

Conforme Gonçalves *et al.* (2001b), a centrifugação ocorre em três etapas, sendo que a primeira etapa é conhecida como clarificação, na qual as partículas sólidas que compõem o lodo sedimentam. Na segunda etapa ocorre a compactação, quando o lodo perde parte da água capilar sob ação prolongada da centrifugação. A última etapa do desaguamento consiste na remoção da torta do processo de tratamento. A Figura 3.9 ilustra, por meio de um esquema, uma centrífuga para desaguamento de lodos.

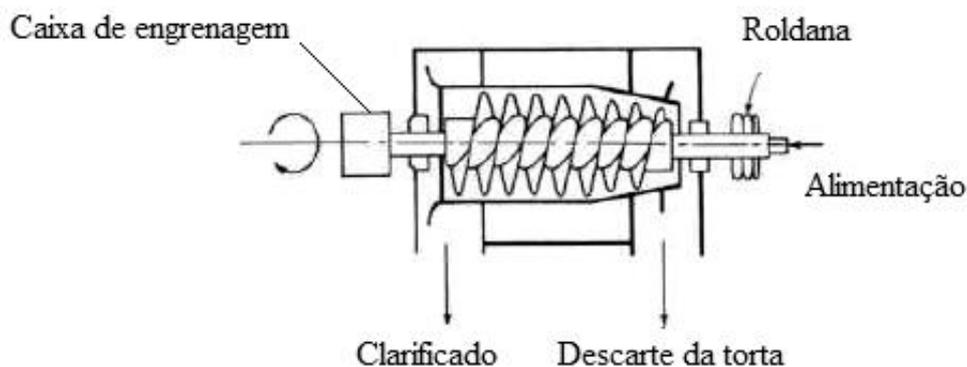


Figura 3.9 – Centrífuga horizontal para desaguamento de lodos (*Economic and Social Commission for Western Asia, 2003*).

Os principais tipos de centrífugas utilizadas para o desaguamento de lodos são as centrífugas de eixo vertical e de eixo horizontal. Suas principais diferenças situam-se no tipo de alimentação do lodo, na intensidade da força centrífuga e na maneira com que a torta e o líquido são descarregados do equipamento. Atualmente, a maioria das estações de tratamento que deságuam lodos por centrifugação utiliza centrífugas de eixo horizontal, devido à alimentação contínua e teores de sólidos superiores na torta (Gonçalves *et al.*,

2001b). Entre os tipos de centrífugas, a mais aplicável para o desaguamento de lodos de ETEs é a centrífuga do tipo “decanter”.

Tabela 3.18 – Vantagens e desvantagens das centrífugas.

Centrífugas	Autor
Operação contínua	Jordão e Pessoa (2009)
Ocupa pequena área	
Utilizam polieletrólitos (não aumentam a massa de lodo)	
Aparência com melhor acabamento	Metcalf e Eddy (1991)
Mínima geração de odores	
Capacidade de acionamento rápido de partida e desligamento	
Fácil de instalar	
Produz tortas relativamente secas	
Baixa relação de capital de investimento/capacidade	Spellman (1997)
Único equipamento utilizado indistintamente para adensamento e desaguamento	
Não emitem aerossol	
Pode ser instalada em galpões abertos	Metcalf e Eddy (1991)
Desgaste da rosca representa um problema potencial de manutenção	
Necessita de remoção de areia e possivelmente um triturador de lodo no sistema de alimentação	
Necessita de pessoal de manutenção qualificado	
Centrado possui alta concentração de sólidos suspensos	
Consumo relativamente alto de energia	Spellman (1997)

Andreoli *et al.* (2001) realizaram procedimento com centrífuga “decanter” para desaguar lodo aeróbio e séptico, utilizando polieletrólito ou não. O resultado obtido não foi satisfatório sem o polímero, devido à perda de matéria orgânica e sólidos no clarificado, além de a torta apresentar um baixo teor de sólidos, em torno de 19,03%. Com o uso de polieletrólito, o clarificado apresentou melhor resultado, no entanto a torta não apresentou diferença significativa, alcançando um teor de 16,31%. No caso do lodo séptico, observou-se uma melhora no clarificado, enquanto na torta a diferença do lodo com e sem polieletrólito foi bastante discreta, obtendo um teor de 31,31% e 37,2%, respectivamente.

3.4.5 – Filtro a vácuo (*Vacuum filter*)

A filtração a vácuo existe desde os anos de 1800 e tem sido utilizada nos Estados Unidos para o desaguamento de lodos de águas residuárias municipais desde o ano de 1920 (Kukenberger, 1996). No entanto, o seu emprego entrou em declínio na área do saneamento devido ao elevado consumo de energia e à menor eficiência, quando comparado com processos de desaguamento mais modernos (Gonçalves *et al.*, 2001b).

Segundo Amuda *et al.* (2008), a filtração a vácuo é um processo de desaguamento de lodos realizado por um filtro rotativo a vácuo, visando a produzir uma torta com um teor de umidade que facilita o manuseio e o processamento posterior. A Figura 3.10 mostra um filtro rotativo a vácuo. A unidade consiste de um cilindro horizontal que gira parcialmente submerso em um tanque de lodo condicionado. A superfície do tambor é dividida em seções em torno de sua circunferência (Turovskiy e Mathai, 2006).

Gonçalves *et al.* (2001b) complementam que cerca de 10 a 40% da superfície do tambor fica submersa no tanque, fração essa que se constitui na zona de filtração ou de formação da torta. A torta se forma na parte exterior do cilindro, enquanto o líquido filtrado migra para o seu interior onde predomina o vácuo. Em seguida, no sentido da rotação, surge a região de desaguamento, que ocupa entre 40 a 60% da superfície do cilindro. Na região final do cilindro, que está quase completando o ciclo de rotação, encontra-se a região de descarga. Uma válvula permite que a superfície do cilindro atinja a pressão atmosférica nessa região, enquanto a torta de lodo é separada do meio filtrante.

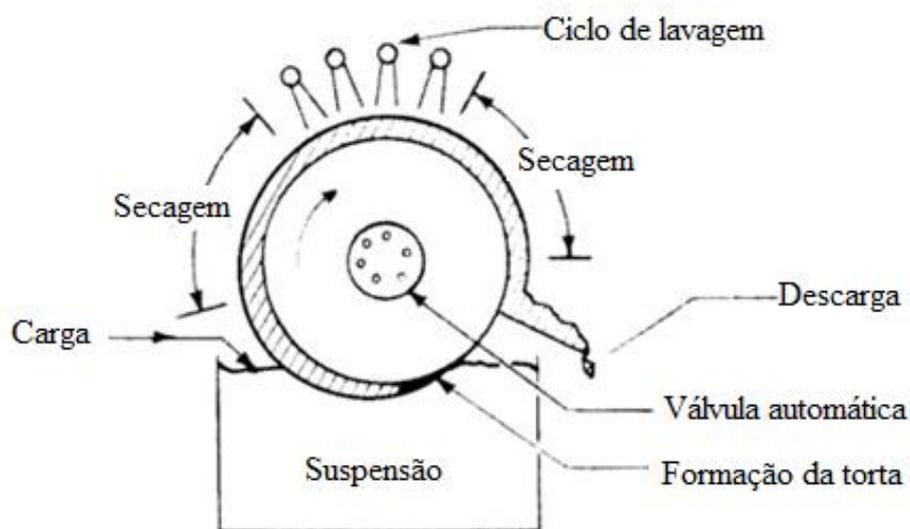


Figura 3.10 – Filtro rotativo a vácuo.

O desempenho do processo está relacionado ao tipo de lodo, à concentração de sólidos, ao tipo e qualidade do ar e, ainda, como o filtro é operado (Turovskiy e Mathai, 2006). Na Tabela 3.19 são apresentadas as principais vantagens e desvantagens do filtro a vácuo. Esse equipamento é usado para diversos fins, e, além da sua utilização em ETEs, é comum o seu uso em usinas de açúcar e álcool (sucroalcooleira) no Brasil.

Tabela 3.19 – Vantagens e desvantagens dos filtros a vácuo.

Filtro a vácuo	Autor
Vantagens	Spellman (1997)
Tecnologia consolidada	
Nenhuma interferência do clima	
Pequena área para implantação	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Elevado consumo de energia	
Menor eficiência que os equipamentos mais modernos	
Desvantagens	
Seu desempenho varia segundo as características do lodo	Metcalf e Eddy (1991)
Operação complexa	

3.4.6 – Filtro prensa de esteira ou prensa desaguadora (*Belt filter press*)

O filtro prensa é largamente utilizado na Europa e foi introduzido na América do Norte em meados dos anos 1970. É atualmente o equipamento mais utilizado no desaguamento de lodo do mundo (Turovskiy e Mathai, 2006). No Brasil, algumas estações, como a ETE Franca em São Paulo e a ETE Brasília Norte no Distrito Federal, adotaram a prensa desaguadora para o desaguamento do lodo. A Figura 3.11 mostra um filtro prensa de esteira em operação.



Figura 3.11 – Filtro prensa de esteira em operação (Catálogo EnvironQuip, 2010).

Os filtros prensa de esteira são usados para remover a água de resíduos de efluentes líquidos e produzir um material não-líquido denominado torta (USEPA, 2000a). Após o condicionamento do lodo, a operação do filtro envolve basicamente três estágios, sendo eles: drenagem por gravidade, zona de baixa pressão (compressão) e zona de alta pressão (Kukenberger, 1996). A Agência de Proteção Ambiental dos EUA (USEPA, 2000a) classifica os processos em quatro estágios por considerar que o condicionamento com polímero faz parte do processo de tratamento. A Tabela 3.20 apresenta as vantagens e desvantagens do uso da prensa desaguadora no desaguamento de lodos de esgoto.

Tabela 3.20 – Vantagens e desvantagens do filtro prensa de esteira.

Filtro prensa de esteira	Autor
Desagua lodos com concentrações variadas de sólidos, sendo possível com concentração de 1% de sólidos	Turovskiy e Mathai (2006)
Eficiente captura de sólidos de 95 a 99%	
Baixo investimento de capital	
Baixo custo operacional	
Baixo consumo de energia	
Facilidade de manutenção	
Operação contínua	Jordão e Pessoa (2009)
Utilizam polieletrólitos, mas não aumentam a massa de lodo	
Emissão de aerossol	Jordão e Pessoa (2009)
Elevado nível de ruído	
Equipamento aberto	
Elevado número de rolamentos que exigem constante acompanhamento	
Baixa eficiência na remoção de umidade	Turovskiy e Mathai (2006)
Dependentes de condicionamento	
Sensibilidade de alimentação	
Maior potencial de odor. No entanto, as máquinas modernas possuem tampas e ventilação	

Segundo Gonçalves *et al.* (2001b), na zona de drenagem por gravidade, a maior parte da água livre é drenada por meio dos poros da tela. Em seguida, o fluxo de lodo é encaminhado para a zona de baixa pressão, removendo-se ainda mais a água e conferindo ao lodo certa estrutura. Na zona de alta pressão o lodo é compactado entre as correias superior e inferior por meio dos roletes. Este sistema de roletes tem a finalidade de aumentar progressivamente a pressão, retirando cada vez mais água do lodo. Kukenberger

(1996) complementa que a drenagem por gravidade é uma etapa importante para permitir que a zona de compressão funcione sem que o lodo caia nas bordas das correias.

3.4.7 - Filtro prensa de placas (*Pressure filter press*)

O filtro prensa de placas surgiu inicialmente para atender a indústria de açúcar na separação dos sucos por meio das telas de filtração. A primeira unidade para desaguamento de lodo municipal em larga escala surgiu nos Estados Unidos no começo da década de 1920 (Miki *et al.*, 2006). A Figura 3.12 mostra um esquema de um filtro prensa de placas.

Em um filtro desse tipo, o desaguamento é realizado, principalmente, por uma bomba de alimentação que provoca uma alta pressão para retirar a água e obter maior concentração de sólidos. Vários tipos de filtros prensa de placas têm sido utilizados, no entanto os dois mais comumente usados são o de volume fixo e de volume variável.

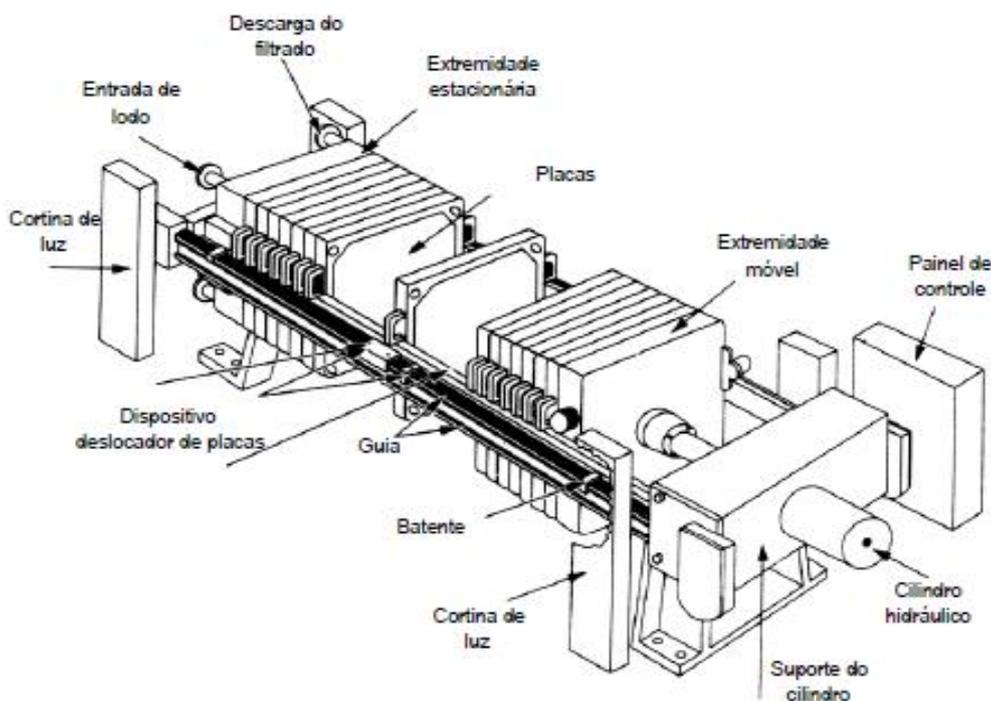


Figura 3.12 – Filtro prensa de placas (Metcalf e Eddy, 2003).

O filtro convencional possui um volume fixo de lodo para a remoção de umidade, mas novos avanços têm sido propostos para o aperfeiçoamento dessa unidade como a utilização da membrana diafragma para filtração em volume variável. A referida membrana é posicionada atrás de cada placa do filtro com a função de obter um filtrado com menores

concentrações de sólidos. No entanto, devem ser realizados testes de bancada em uma amostra representativa de sólidos em cada estação de tratamento de águas residuárias para determinar se um filtro de membrana oferece vantagens em relação a um convencional de volume fixo. Além disso, também deve ser conduzida uma análise econômica para determinar se o custo adicional irá resultar em economia em longo prazo (USEPA, 2000b). As vantagens e desvantagens do desaguamento em filtro prensa de placas estão listadas na Tabela 3.21.

Um dos aspectos mais importantes do filtro prensa de membrana diafragma está relacionado à sua construção e operação, pois permite o uso de polímeros orgânicos, sais férricos e cal como técnicas de condicionamento. Embora o desaguamento ocorra na própria tela, a tendência é reduzir o excesso de água antes do início da etapa de compressão (Shammas e Wang, 2006).

Tabela 3.21 – Vantagens e desvantagens do filtro prensa de placas.

Filtro prensa de placas	Autor
Vantagens	
Torta com alta concentração de sólidos (36 a 45%), superior a outros equipamentos mecânicos	Metcalf e Eddy (1991), Gonçalves <i>et al.</i> (2001b) e Jordão e Pessôa (2009)
Pequeno ciclo de operação de 3 a 5 horas (batelada)	
Filtrado com baixas concentrações de sólidos	
Automatizados	
Desvantagens	
Aumentam a massa do lodo, pois ocorre a incorporação de cal e do floculante	Jordão e Pessôa (2009)
Operam em batelada, obrigando a presença do operador	
Alto investimento inicial	
Alto custo de mão de obra	Metcalf e Eddy (1991)
Necessidade de uma estrutura especial de suporte, pois o equipamento é muito pesado	
Necessita de pessoal de manutenção qualificado	
Complexidade mecânica	
Necessita de constante substituição das telas de filtração	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b), Metcalf e Eddy (2003)
Custo químico elevado	
Alto custo de mão de obra	

3.4.8 – Prensa parafuso (*Screw press*)

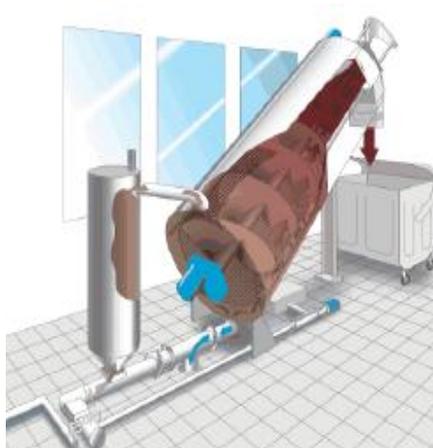
A prensa parafuso é um dispositivo de secagem que utiliza uma rosca transportadora, conhecida também como parafuso sem fim, que gira ao redor de uma tela de aço perfurada. À medida que a rosca gira, ocorre a deposição contínua de sólidos na tela perfurada e devido à geometria da rosca e da tela, ocorre um aumento progressivo da pressão até o fim do equipamento (Miki *et al.*, 2001). A Tabela 3.22 apresenta as principais vantagens e desvantagens da prensa parafuso.

Tabela 3.22 – Vantagens e desvantagens da prensa parafuso.

Prensa parafuso	Autor
Unidade fechada impedindo a emissão de odores Construída de aço inoxidável reduzindo o potencial de corrosão	USEPA (2006)
Operação mecanizada proporcionando melhores condições de trabalho	
Custos operacionais menores em comparação a outras tecnologias tradicionais	
Evita problemas de ruídos e vibrações São equipamentos de baixo custo	Kukenberger (1996)
Desvantagem: Torta com baixo teor de sólidos (18 a 25%)	

Na literatura, costuma-se encontrar dois tipos de prensas de parafuso, um parafuso com arranjo inclinado e outro com uma instalação horizontal com a capacidade adicional de alimentação de vapor para a secagem adicional da torta (Turovskiy e Mathai, 2006). Esses equipamentos permitem um desaguamento eficaz para diferentes tipos de lodos. A Figura 3.13 mostra um esquema e uma foto de uma prensa parafuso inclinada.

A operação da prensa parafuso inicia com o lodo líquido sendo bombeado para uma câmara de floculação, onde é introduzido um polímero por meio de um anel na linha de alimentação. Após a adição do polímero, o lodo é misturado e transportado pelo parafuso que gira dentro de um tanque de reação. Conforme a rotação do parafuso, o lodo é transportado ao longo da prensa fazendo com que o filtrado flua para fora e o lodo, por meio da forma de atrito na interface lodo/tela, produz a torta com cerca de 20 a 25% de sólido, a qual será descartada em uma esteira ou diretamente em um recipiente na extremidade da prensa (USEPA, 2006). Esse equipamento também possui um sistema de lavagem da tela metálica de filtração, com jatos de água a alta pressão (Miki *et al.*, 2006).



(a)



(b)

Figura 3.13 – Esquema (a) e foto (b) de uma prensa parafuso inclinada (USEPA, 2006).

3.5 – MÉTODOS MULTIOBJETIVO MULTICRITÉRIO

Neste item do Capítulo 3, faz-se uma apresentação dos aspectos considerados importantes na análise multiobjetivo e multicritério. Em seguida, são apresentados modos de classificação dos métodos. Posteriormente, são discutidos de maneira sucinta cinco métodos (PROMETHEE, Programação de Compromisso, TOPSIS, Família ELECTRE e AHP) amplamente conhecidos. Por fim, são apresentadas algumas aplicações desses métodos, sobretudo na área ambiental.

A tomada de decisão faz parte do nosso cotidiano, seja no âmbito pessoal ou profissional, mas os problemas possuem magnitudes distintas e precisam ser analisados conforme a sua complexidade. Na medida em que se aumenta a complexidade, também se aumenta a quantidade de alternativas e critérios e, por consequência, o número de agentes decisores. Portanto, fazem-se necessários métodos de análise que consigam abranger o problema levando em consideração todos os aspectos envolvidos, como econômicos, sociais, ambientais e técnicos.

De acordo com Cordeiro Netto *et al.* (2000), a análise tecnológica tem como objetivo prognosticar, para uma dada situação real, qual ou quais das alternativas teriam um melhor desempenho, podendo condicionar o sucesso do projeto, da operação e da manutenção de uma ETE, por exemplo.

As técnicas de análise multiobjetivo têm se revelado como recurso significativo de apoio à decisão, especialmente em problemas de interesse público. Com grande suporte em modelagem matemática, a abordagem multiobjetivo justifica-se por permitir: (1) organizar melhor as informações e o papel de cada participante nas etapas decisórias; (2) evidenciar os conflitos entre os objetivos e quantificar o grau de compromisso existente entre eles; e (3) tratar cada objetivo na unidade de mensuração mais adequada, sem distorção introduzida pela simples conversão em unidades monetárias, como é feito na análise benefício-custo (Brites, 2008).

Os métodos multiobjetivo e multicritério possibilitam a incorporação de preferências e aspirações das diversas partes envolvidas no problema e, por isso, se mostraram como uma importante ferramenta para aplicação ao caso de desaguamento de lodo de esgoto.

Segundo Souza *et al.* (2001), as teorias multicritério de auxílio à decisão propõem abordagens que permitem tratar de problemas decisórios que apresentam mais de um objetivo. O planejamento em domínios, como a engenharia sanitária e ambiental, constitui área em que técnicas de auxílio à decisão podem ser eficientemente aplicadas. Isso se deve ao fato de que boa parte dos problemas ligados à área é caracterizada por: (1) vários tipos e níveis de incerteza; (2) um quadro complexo de objetivos, geralmente com objetivos elementares de caráter multidimensional; (3) dificuldade na identificação do decisor (único, vários ou nenhum) e (4) uma estrutura sofisticada de alternativas que frequentemente combina várias ações elementares com vários horizontes de planejamento (nos curto, médio e longo prazos).

Atualmente, vários autores defendem o uso dos métodos de análise de decisão com múltiplos objetivos a fim de se alcançar um “ponto de satisfação” para um conjunto de objetivos delineados. Esses métodos substituem os métodos econômicos e de otimização tão criticados pela excessiva monetarização e materialização das variáveis de decisão envolvidas (Souza, 1992; Souza e Forster, 1996).

3.5.1 – Classificação dos Métodos Multiobjetivo e Multicritério

De acordo com Cohon e Marks (1975), as técnicas de análise multiobjetivo podem ser classificadas, dependendo da forma em que são utilizadas as preferências do decisor, em:

- Técnicas que geram o conjunto das soluções não dominadas: Essas técnicas consideram um vetor de funções objetivo e, mediante tal vetor, geram o conjunto das soluções não dominadas. Não são considerados no processo as preferências do decisor, tratando-se somente com as restrições físicas do problema. Exemplos: (1) Método das Ponderações; (2) Método das Restrições; (3) Método Multiobjetivo Linear.
- Técnicas que utilizam uma articulação antecipada das preferências: O decisor estabelece suas preferências sobre as trocas possíveis entre os objetivos e sobre pesos relativos destes. Exemplos: (1) Método da Função Utilidade Multidimensional; (2) Programação por Metas; (3) ELECTRE I, II, III; (4) PROMETHEE; (5) AHP (*Analytic Hierarchy Process*).
- Técnicas de articulação progressiva de preferências: Nessa técnica, as preferências são estabelecidas interativamente com o decisor se o nível atingido de atendimento aos objetivos é satisfatório. Exemplos: (1) Método dos Passos; (2) Método da Programação de Compromisso (*Compromise Programming*).

Os métodos selecionados para aplicação neste trabalho fazem parte da técnica de antecipação e articulação progressiva de preferências, por se adequarem à realidade do problema discutido e pelo fato das preferências serem estabelecidas com o decisor.

Souza (2007) apresenta uma classificação alternativa, sugere a divisão dos métodos em aspectos diferentes, mais específicos. Essa classificação permite que um método se enquadre em mais de uma classe simultaneamente:

- Quanto às variáveis de decisão:
 - Métodos contínuos;
 - Métodos discretos.
- Quanto ao modo de atuar frente ao agente decisor:
 - Articulação prévia de preferências;
 - Articulação progressiva de preferências.
- Quanto à maneira de enfrentar o problema (Tipo de Funções Objetivo):
 - Determinísticos;
 - Estocásticos;
 - Conjuntos Difusos (*Fuzzy Analysis*).

- Quanto ao tipo de aplicação:
 - Métodos de classificação (hierarquização);
 - Métodos de alocação (qualificação de alternativas).
- Quanto ao modo de solução:
 - Teoria da Utilidade;
 - Deslocamento Ideal;
 - Compensações (*trade-offs*);
 - Funções de Valor;
 - Relações de Dominância.
- Quanto ao número de agentes de decisão:
 - Com um único Agente Decisor;
 - Com multigestores (Decisão em Grupo).

Estão relacionados a seguir alguns dos principais métodos de análise de decisão com múltiplos objetivos, bem como sua estrutura lógica de funcionamento. Os métodos abordados permitem a análise de alternativas de solução discretas, com a possibilidade de se levar em consideração avaliações subjetivas representadas por meio de critérios, pesos e pontuações numéricas.

3.5.2 – Método PROMETHEE

O método PROMETHEE (do inglês *Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations*), do mesmo modo que o ELECTRE, estabelece uma estrutura de preferências entre alternativas discretas, definida por meio de comparações par a par.

Atualmente existem seis versões principais do método, conhecidas como PROMETHEE I, II, III, IV, V, VI. Aqui são discutidas apenas as versões I e II, tradicionalmente usadas em estudos de recursos hídricos e meio ambiente.

Souza *et al.* (2001) complementam que para cada critério existe uma função preferência entre alternativas que deve ser maximizada. Essa função indica a intensidade da preferência de uma alternativa a outra, com o valor variando entre 0 (indiferença) e 1 (preferência).

Braga e Gobetti (2002) mostram que essa função pode ser expressa de acordo com a Equação 3.1, onde P é uma função de preferência de uma alternativa a em relação a uma b , e f é um critério a ser maximizado.

Tipo I: Não existe preferência entre a e b , somente se $f(a) = f(b)$. Quando esses valores são diferentes, a preferência é toda para a alternativa com o maior valor. A estrutura de preferência é definida por:

$$\begin{aligned} aPb & \text{ se } f(a) > f(b) \\ aIb & \text{ se } f(a) = f(b) \end{aligned} \quad \text{Equação (3.1)}$$

Sendo que: f = critério particular de avaliação a ser maximizado

a e b = alternativas possíveis

P = preferência

I = indiferença

Tipo II: Considera-se uma área de diferença constituída de todos os desvios entre $f(a)$ e $f(b)$ menores de q ; para desvios maiores a preferência é total.

Tipo III: A intensidade das preferências aumenta linearmente até que o desvio entre $f(a)$ e $f(b)$ alcançar r . Além desse valor, a preferência é total.

Tipo IV: Não existe preferências entre a e b quando o desvio entre $f(a)$ e $f(b)$ não excede q ; entre q e r é considerado um valor de preferência médio (0.5); depois de r a preferência é total.

Tipo V: Entre q e r a intensidade das preferências aumenta linearmente. Fora desse intervalo as preferências são iguais ao caso anterior.

Tipo VI: A intensidade das preferências aumenta continuamente e sem descontinuidade ao longo de x . O parâmetro s é a distância entre a origem e o ponto de inflexão da curva.

No método PROMETHEE a classificação das alternativas é tratado definindo-se o índice de preferência global de a sobre b , $\pi(a,b)$, para cada $a, b \in X$ (sendo X o conjunto total das alternativas), esta classificação é dada pela Equação (3.2).

$$\pi(a,b) = \sum_{i=1}^n w_i.P_i(a,b) \quad \text{Equação (3.2)}$$

Sendo:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad \text{Equação (3.3)}$$

Onde “w” corresponde aos pesos associados a cada critério. Esse índice possibilita a avaliação de cada alternativa mediante a consideração de duas grandezas:

- O fluxo de importância positivo estima o quanto uma alternativa “a” é preferível em relação a todas as outras, sendo representado pela Equação (3.4).

$$\phi^+(a) = \sum_{j=1}^n \pi(a_i, x_j) \quad \text{Equação (3.4)}$$

- O fluxo de importância negativo é uma estimativa de quanto cada alternativa domina as outras, sendo representado pela Equação (3.5).

$$\phi^-(a) = \sum_{j=1}^n \pi(x_j, a_i) \quad \text{Equação (3.5)}$$

A classificação das alternativas é realizada com base nos valores encontrados por meio das equações (3.4) e (3.5). O método PROMETHEE I ordena as alternativas parcialmente e no PROMETHEE II é alcançada uma ordenação total das alternativas.

3.5.3 – Método da Programação de Compromisso - CP

A Programação de Compromisso (*Compromise Programming*) é um método iterativo com articulação progressiva de preferências (Souza *et al.*, 2009). Segundo Goicoechea *et al.* (1982), é uma técnica de “proximidade espacial”, ou seja, identifica as alternativas que estão mais próximas de uma condição ideal do sistema, que não é necessariamente factível. Esse conjunto de alternativas pode ser chamado de soluções de compromisso.

De acordo com Braga e Gobetti (2002), a programação de compromisso baseia-se em uma noção geométrica do melhor. No método são identificadas as soluções que estão mais perto

da solução ideal, mediante o uso de uma medida de proximidade. Considera-se esta medida como sendo a distância que separa uma dada solução da solução ideal.

A solução ideal é definida como o vetor $f^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_n^*)$, onde as f_i^* são definidos como os melhores valores no conjunto finito dos $f_i(x)$, isto é, a solução ideal será formada pelo vetor dos melhores valores alcançados em cada critério da matriz de avaliação.

Segundo Goicoechea *et al.* (1982), uma das mais comuns formulações usadas para definir um conjunto de soluções não dominadas é a apresentada na Equação (3.6).

$$L_s = \left(\sum_{i=1}^n w_i^s (f_i^* - f_i(x)^s) \right)^{1/s} \quad \text{Equação (3.6)}$$

Onde: f_i^* = solução ideal para o critério avaliado;

$f^i(x)$ = valor obtido pela alternativa para o critério avaliado;

S = parâmetro para verificação da sensibilidade, sendo que $1 \leq S \leq \infty$;

w_i = peso atribuído ao i -ésimo critério;

n = número de critérios.

Quando da aplicação da Equação (3.6) a todas as alternativas, o conjunto das soluções de compromisso é encontrado nas alternativas que apresentam a mínima distância L_s para o conjunto de pesos w_i dados. Geralmente, os valores devem ser normalizados antes da análise, em virtude das diferenças dimensionais e de magnitude entre os critérios (Souza *et al.*, 2009).

3.5.4 – Método TOPSIS

O método TOPSIS (*Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution*) possui similaridade com a programação de compromisso (Vergara *et al.*, 2004).

Esse método calcula uma distância com relação a uma Solução Ideal Negativa (NIS), e gera um coeficiente de similaridade de cada alternativa, mostrando o quanto cada uma

representa da Solução Ideal Positiva (chamada de PIS, *Positive Ideal Solution*). Dessa forma, o agente decisor possui mais uma informação, tendo condição para buscar uma decisão que não somente é a mais aceitável, mas também, pode-se “quantificar” essa aceitabilidade.

Vergara *et al.* (2004) enumeram cinco passos para a aplicação do TOPSIS. O primeiro passo é separar os critérios em que o aumento é desejável daqueles em que a diminuição do valor gera maior benefício. O segundo passo é calcular os vetores das soluções negativa ideal e positiva ideal. Então, no terceiro passo, calculam-se as distâncias normalizadas em relação à solução ideal positiva e à solução ideal negativa, conforme a Equação (3.7) e (3.8).

$$d_p^{PIS} = \left\{ \sum_{j=1}^J W_j^p \left[\frac{f_j^* - f_j(x)}{f_j^* - f_j^-} \right]^p + \sum_{i=1}^I W_i^p \left[\frac{f_i(x) - f_i^*}{f_i^- - f_i^*} \right]^p \right\}^{1/p} \quad \text{Equação (3.7)}$$

$$d_p^{NIS} = \left\{ \sum_{j=1}^J W_j^p \left[\frac{f_j(x) - f_j^-}{f_j^* - f_j^-} \right]^p + \sum_{i=1}^I W_i^p \left[\frac{f_i^- - f_i(x)}{f_i^- - f_i^*} \right]^p \right\}^{1/p} \quad \text{Equação (3.8)}$$

Onde: f_i^* = solução ideal para o critério crescente avaliado;

f_j^* = solução ideal para o critério decrescente avaliado;

$f_i(x)$ = valor obtido pela alternativa para o critério crescente avaliado;

$f_j(x)$ = valor obtido pela alternativa para o critério decrescente avaliado;

P = parâmetro para verificação da sensibilidade, sendo que $1 \leq P \leq \infty$;

W_i = peso atribuído ao i -ésimo critério;

W_j = peso atribuído ao j -ésimo critério;

J = número total de critérios com comportamento crescente;

I = número total de critérios com comportamento decrescente.

O quarto passo é o cálculo do chamado Coeficiente de Similaridade, que representa o quanto a alternativa em questão se aproxima da Solução Positiva Ideal. O coeficiente varia entre 0 e 1 e é calculado conforme a Equação (3.9).

$$C^* = \frac{d_p^{NIS}}{d_p^{PIS} + d_p^{NIS}} \quad \text{Equação (3.9)}$$

O quinto e último passo é o ordenamento das alternativas, feito a partir do Coeficiente de Similaridade. A alternativa com valor mais próximo de 1 é considerada a mais apropriada, ou seja, mais próxima da Solução Positiva Ideal e, simultaneamente, mais afastada da Solução Ideal Negativa.

3.5.5 – Métodos da família ELECTRE

A família de métodos ELECTRE será detalhada da forma com que Souza *et al.* (2009) descreveram em um trabalho que buscou avaliar por meio de métodos multiobjetivo e multicritério alternativas de gestão de lodo de fossa/tanque séptico.

O método ELECTRE, do francês *Elimination Et Choix Traduisant la Réalité* (Tradução: Eliminação e Escolha Traduzindo a Realidade), é uma das principais e mais utilizadas séries de métodos da escola europeia (francesa) de análise de decisão. Algumas das versões do método são ELECTRE I até IV, ELECTRE IS e ELECTRE TRI. A Tabela 3.23 mostra algumas características desses métodos.

Tabela 3.23 - Versões do ELECTRE e algumas características (Souza, 2007).

Versão do ELECTRE	Primeira referência	Tipo de critério	Uso de pesos	Tipo de problema
I	1968	Simple	Sim	Seleção
II	1973	Simple	Sim	Ordenação
III	1978	Pseudo	Sim	Ordenação
IV	1982	Pseudo	Não	Ordenação
IS	1985	Pseudo	Sim	Classificação
TRI	1992	Pseudo	Sim	Alocação

Segundo estudos realizados para a gestão de lodos de fossa séptica/tanques sépticos, todos os métodos da tabela, podem ser aplicados a esse problema decisório, sendo que o ELECTRE III tem sido considerado o mais eficiente para essas condições.

O ELECTRE I tem como objetivo gerar um subconjunto de alternativas preferidas (não dominadas), com certo grau tolerável de rejeição em relação a alguns critérios. Esse subconjunto é conhecido como *kernel* (cerne). Para se determinar o *kernel*, deve-se primeiramente definir os pesos associados a cada critério, sendo que os pesos são estabelecidos pelos decisores e, com eles, calculam-se as Equações (3.10) (Souza *et al.*, 2009).

$$\begin{aligned}
 W^+ &= \sum_{i \in I^+} \alpha_i \\
 W^= &= \sum_{i \in I^=} \alpha_i \\
 W^- &= \sum_{i \in I^-} \alpha_i
 \end{aligned}
 \tag{Equação (3.10)}$$

Onde: α_i = peso atribuído a um critério i ;

W^+ = soma dos pesos dos critérios em que i é superior a j ;

$W^=$ = soma dos pesos dos critérios em que i é equivalente a j ;

W^- = soma dos pesos dos critérios em que i é inferior a j .

O próximo passo para a execução do ELECTRE I é o cálculo da concordância e discordância. A concordância entre duas alternativas i e j é a tendência do decisor em escolher a alternativa i em detrimento à j . O índice de concordância representa essa grandeza matematicamente (Equação 3.11) e varia de 0 a 1. É conveniente construir uma matriz de concordância onde um elemento $C(i, j)$ está localizado na linha i coluna j . O índice de discordância significa o desconforto ou rejeição que o decisor tem em escolher uma alternativa i em lugar de uma j . É definido conforme a Equação (3.12) e, de maneira semelhante ao índice de concordância, deve-se montar também uma matriz de discordância.

$$C(i, j) = \frac{W^+ + 1/2W^=}{W^+ + W^= + W^-}
 \tag{Equação (3.11)}$$

$$D(i, j) = \max_{k \in I^-} \frac{[z(j, k) - z(i, k)]}{R^*}
 \tag{Equação (3.12)}$$

Onde: $z(j, k)$ = avaliação de cada alternativa i e j para o critério k em uma escala pré-definida pelos decisores;

R^* = maior valor da escala numérica adotada.

Por fim, podem-se definir os índices ou valores limites p e q , que variam entre 0 e 1. O valor de p representa o índice de concordância mínima aceitável pelo decisor, e o q representa a discordância máxima permitida. Uma alternativa é preferida em relação à outra apenas se $C(i, j) \geq p$ e $D(i, j) \leq q$. Caso contrário, o método não permite compará-las. A partir disso, é possível se construir um gráfico de preferências relativas entre todas as alternativas, que auxiliará na definição do *kernel*. O *kernel* é encontrado levando em conta as seguintes afirmativas (Braga e Gobetti, 2002):

- Nenhuma alternativa no *kernel* domina alternativa que também está no *kernel*.
- Toda alternativa fora do *kernel* é dominada por pelo menos uma alternativa do *kernel*.

Com isso, encontra-se as alternativas preferidas para os limites específicos p e q . As alternativas fora do *kernel* são desconsideradas nas etapas seguintes do processo decisório.

De acordo com Braga e Gobetti (2002), o método ELECTRE II é uma extensão do I, e produz um ordenamento completo das alternativas. Para tanto, executa-se o ELETRE I com duas estruturas de preferência: uma forte e uma fraca. Na estrutura forte, usam-se valores exigentes para os limites de preferência, sendo um valor relativamente alto de p (mais próximo de um) e um valor baixo de q (mais próximo de zero). Na preferência fraca, utilizam-se valores de p e q com certo nível de relaxamento. Então, realizam-se as chamadas classificações regressivas e progressivas, e o ordenamento entre as alternativas é feito a partir da média aritmética dessas duas classificações encontradas.

A classificação progressiva pode ser realizada por processo iterativo. Ele se inicia selecionando-se os *kernels* nos gráficos de preferência forte e fraca, respectivamente chamados de C e A . Então, na primeira iteração $t=0$ selecionam-se as alternativas de C que também não são dominadas em A , e para cada uma atribui-se o valor $v'(x)=t + 1$ (número t

da iteração mais 1). Então, essas alternativas selecionadas são retiradas da análise e repetem-se esses procedimentos novamente até não haver mais alternativas. Os valores de $v'(x)$ constituem a classificação progressiva de cada alternativa (Braga e Gobetti, 2002).

A classificação regressiva é feita revertendo-se as relações de preferência entre todos os elementos dos gráficos de preferências forte e fraca. Então, é obtida para cada elemento uma classificação igual à $v'(x)$ feita na classificação progressiva, porém aqui é chamada de $a(x)$. A classificação regressiva é realizada calculando-se os valores com a expressão $v''(x) = I + a_{max} - a(x)$, sendo que a_{max} é o valor máximo de $a(x)$. O ordenamento final das alternativas é feito pelo cálculo de um $m(x)$, que é a média aritmética dos v' e v'' de cada alternativa. A alternativa com menor valor de $m(x)$ é a preferida, e a ordem de prioridade entre todas elas é estabelecida de forma crescente com o $m(x)$ (Souza *et al.*, 2009).

Para os autores Cordeiro Netto *et al.* (2000), o método ELECTRE III é considerado o mais aceitável para os casos de incerteza e imprecisão na avaliação das alternativas e permite analisar situações onde nem todas as alternativas são comparáveis entre si devido a consideráveis diferenças de pontos de vista. O método elabora comparações sobre suas preferências intercritérios e intracritérios a partir de informações fornecidas pelo agente decisor. Para isso, o método se vale dos conceitos de “indiferença”, “preferência fraca”, “preferência estrita” e utiliza limiares que definem essas relações.

O método adota o conceito de pseudocritério e, baseado em relações de comparações difusas, permite que o agente decisor expresse suas preferências fixando os limiares de indiferença, de preferência e de veto, e escolhendo os pesos que deverão medir o grau de importância dos vários critérios utilizados.

O método ELECTRE III é um método multiobjetivo amplamente difundido e usado em situação de incerteza. É considerado um aperfeiçoamento das versões anteriores. Nele, além das noções de preferência p e de indiferença q , introduz-se o conceito de veto. O veto representa a possibilidade de o decisor, por algum motivo, ignorar a comparação entre duas alternativas. Define-se $i_m(a)$ como o valor do critério m atribuído para a alternativa a , q ($i_m(a)$), p ($i_p(a)$) e v ($i_v(a)$) como, respectivamente, as funções de indiferença, preferência e veto. Sabendo que as alternativas são avaliadas duas a duas, há quatro situações possíveis: indiferença, preferência fraca, preferência forte e incomparabilidade. Matematicamente, essas situações

são definidas conforme as inequações (3.13) para um critério decrescente (Cordeiro Netto *et al.*, 1993).

$$\begin{aligned}
 \text{Indiferença:} & \quad i_m(b) < i_m(a) + q(i_m(a)) \\
 \text{Preferência fraca:} & \quad i_m(a) + q(i_m(a)) < i_m(b) < i_m(a) + p(i_m(a)) \\
 \text{Preferência forte:} & \quad i_m(a) + p(i_m(a)) < i_m(b) \\
 \text{Incomparabilidade:} & \quad i_m(a) + v(i_m(a)) < i_m(b)
 \end{aligned}
 \tag{Equação (3.13)}$$

No método ELECTRE III também são calculados, para cada critério, índices de concordância entre as alternativas, conforme as Equações 3.14. Segundo Cordeiro Netto *et al.* (1993), esse índice indica o grau de confiança com que se afirma que a alternativa a é tão boa quanto a alternativa b . Então, é construída uma matriz de concordâncias para o critério m , semelhante ao que é feito para o ELECTRE I.

$$\begin{aligned}
 C_m(a,b) = 0 & \quad \text{se} \quad i_m(a) + p(i_m(a)) \geq i_m(b) \\
 C_m(a,b) = 1 & \quad \text{se} \quad i_m(a) + q(i_m(a)) \leq i_m(b) \\
 C_m(a,b) \text{ é linear} & \quad \text{se} \quad i_m(a) + q(i_m(a)) < i_m(b) < i_m(a) + p(i_m(a))
 \end{aligned}
 \tag{Equação (3.14)}$$

Também é criada nesse método uma matriz de discordância. Os índices de discordância, que compõem essa matriz variam entre 0 e 1 e medem, para cada critério, o grau de desconfiança ou refutação em se afirmar que uma alternativa a é tão boa quanto uma b . Os elementos dessa matriz são calculados conforme as inequações 3.15.

$$\begin{aligned}
 D_m(a,b) = 0 & \quad \text{se} \quad i_m(a) + p(i_m(a)) \leq i_m(b) \\
 D_m(a,b) = 1 & \quad \text{se} \quad i_m(a) + v(i_m(a)) \geq i_m(b) \\
 D_m(a,b) \text{ é linear} & \quad \text{se} \quad i_m(a) + p(i_m(a)) < i_m(b) < i_m(a) + v(i_m(a))
 \end{aligned}
 \tag{Equação (3.15)}$$

No ELECTRE III há, adicionalmente, o cálculo de um índice de credibilidade, que permite a construção de uma matriz de credibilidade. Isso é feito utilizando os valores das matrizes de concordância e discordância para um determinado critério m . Segundo Cordeiro Netto *et al.* (1993), o índice de credibilidade mostra com que medida uma “alternativa a desclassifica a alternativa b ”, ou a verossimilhança com a qual o decisor escolhe a alternativa a em detrimento à b .

O primeiro passo na construção da matriz de credibilidade é o cálculo de uma matriz de concordância global, que calcula um índice geral da concordância entre duas alternativas levando em conta todos os critérios simultaneamente. Esse cálculo é feito conforme a Equação 3.16.

$$C(a,b) = \sum_{m=1}^I C_m(a,b) \cdot w_m \quad \text{Equação (3.16)}$$

Onde: w_m é o peso atribuído ao critério m , sendo que $\sum_{m=1}^I w_i = 1$.

O próximo passo é definir $L(a,b)$, que é o conjunto dos critérios em que o índice de discordância é maior que o de concordância global, ou seja, $D_m(a,b) \geq C(a,b)$. Se esse conjunto é vazio, o valor do índice de credibilidade é igual ao do índice concordância, $Cr(a,b) = C(a,b)$. Caso contrário, o índice de credibilidade é dado pela Equação 3.17.

$$Cr(a,b) = C(a,b) \cdot \prod_{i \in L(a,b)} \frac{[1 - D_m(a,b)]}{[1 - C(a,b)]} \quad \text{Equação (3.17)}$$

A partir do índice de credibilidade, o ordenamento das alternativas é realizado com apoio de um algoritmo de “destilação” apresentado por Skalka *et al.* (1992, *apud* Cordeiro Netto *et al.*, 1993), que não será apresentado neste trabalho.

3.5.6 – Método Analítico Hierárquico – AHP

Do inglês *Analytic Hierarchy Process* ou Método Analítico Hierárquico, é um método multiobjetivo e multicritério apresentado por Saaty (1991). De acordo com Gomes *et al.* (2004), é talvez o método multiobjetivo e multicritério mais difundido e usado no mundo. É um método que se baseia na construção de hierarquias, no estabelecimento de prioridades entre alternativas e na consistência lógica.

O AHP é um dos representantes da família baseada na Teoria Multiatributo. O método seleciona, ordena e pode ser utilizado para avaliação subjetiva de várias alternativas em termos de um ou mais objetivos. Essa técnica pode ser utilizada para resolver comparações

em vários níveis e integrar essas soluções dentro de um resultado final. O método apresenta uma estrutura semelhante a uma função aditiva (Zuffo *et al.*, 2002).

O primeiro passo do método é o estabelecimento de uma hierarquia entre os objetivos, subobjetivos e critérios, de modo que possam ser visualizadas facilmente as relações hierárquicas existentes, de preferência na forma de um diagrama (Gomes *et al.*, 2004).

De acordo com Saaty (1991), o próximo passo é estabelecer a estrutura de julgamentos ou preferências relativa a um dado critério a_{ij} , considerando as alternativas duas a duas. Isso é feito comparando todas as alternativas i e j , conforme a escala mostrada na Tabela 3.24.

Tabela 3.24 – Escala de preferências no método AHP (Saaty, 1991, adaptada).

Intensidade de importância	Significado	Descrição
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o juízo favorecem uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência ou juízo favorece fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra. Pode ser demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra, com o mais alto grau de segurança.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

Segundo Saaty (1991), para os elementos a_{ji} dominados o valor de preferência atribuído é o inverso, ou seja, $a_{ji} = 1 / a_{ij}$. Com esses valores, pode-se construir uma matriz onde cada elemento é o valor a_{ij} correspondente ao grau de preferência em se escolher uma alternativa i no lugar de uma j , como mostrado na Equação 3.18. O decisor deverá realizar $n(n-1)/2$ comparações para cada critério, sendo que n é o número total de alternativas.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{n1} & 1/a_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Equação (3.18)}$$

Essa matriz pode ser normalizada de acordo com a Equação 3.19,

$$\bar{v}_i(A_j) = a_{ij} / \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad \text{Equação (3.19)}$$

Onde: $\bar{v}_i(A)$ = elemento a_{ij} normalizado.

A partir da matriz normalizada, o vetor de prioridades de uma determinada alternativa para o critério em avaliação pode ser determinado com a Equação 3.20. Esse vetor expressa a preferência que uma alternativa tem frente a todas outras em um determinado critério. Quanto maior seu valor, melhor é considerada a alternativa, e a soma dos vetores de cada uma delas é igual a 1.

$$\bar{v}_k(A_i) = \sum_{j=1}^n \bar{v}_i(A_j) / n \quad \text{Equação (3.20)}$$

Onde: n é o número de alternativas avaliadas.

O passo seguinte é o estabelecimento de uma estrutura de preferências entre os itens de cada nível hierárquico, de maneira semelhante ao que foi feito para as alternativas. Deve-se compará-los dois a dois levando em conta a opinião do decisor e também a escala da Tabela 3.24 e calcular, então, os vetores de prioridade entre critérios.

Após esses passos, o ordenamento das alternativas é feito utilizando a Equação 3.21 para calcular o índice \bar{f} de todas alternativas. As alternativas com maior \bar{f} são consideradas melhores.

$$\bar{f}(A_j) = \sum_{i=1}^m \bar{w}_i(C_i) \cdot \bar{v}_i(A_j) \quad \text{Equação (3.21)}$$

Onde: A_j = j -ésima alternativa avaliada;

$\bar{w}_i(C_i)$ = vetor de prioridades entre critérios.

Segundo Gomes *et al.* (2004), após a aplicação do método AHP, pode-se realizar um teste para se verificar a consistência da solução encontrada. Considerando n o número de

alternativas comparadas e w o vetor de prioridade entre os critérios, λ_{\max} é definido como o autovetor da matriz de decisão A e é calculado conforme a Equação 3.22.

$$\lambda_{\max} = \left(\frac{1}{n} \right) \sum \frac{v_i (A \times w)_i}{w_i} \quad \text{Equação (3.22)}$$

O Índice de Consistência (IC) é então calculado com a Equação 3.23 e, se o seu valor encontrado for menor que 0,1, a solução encontrada é consistente.

$$IC = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n-1)} \quad \text{Equação (3.23)}$$

3.6 – APLICAÇÕES DE ANÁLISE MULTIOBJETIVO E MULTICRITÉRIO

Os métodos de Análise Multiobjetivo e Multicritério são bastante usados em soluções de problemas ambientais, saneamento e utilização em recursos hídricos.

Souza (1992) desenvolveu o modelo PROSEL-I (*Process Selection Version I*) usando princípios de tecnologia apropriada e análise de decisão com múltiplos objetivos e múltiplos critérios com o objetivo de eleger processos de tratamento de águas residuárias. No modelo em questão foram aplicados os métodos da Ponderação Aditiva Simples, Programação de Compromisso e ELECTRE-I.

Anand Raj (1995) realizou um estudo para demonstrar o uso do ELECTRE-I e do ELECTRE-II para o planejamento de recursos hídricos em uma das principais bacias hidrográficas do sul da Índia, composta de 8 reservatórios. Foi formulada uma matriz de 27 sistemas alternativos com seis critérios relacionados, são eles: (1) irrigação, (2) produção de energia, (3) água potável (4) qualidade ambiental, (5) inundações e (6) o custo do projeto. O autor concluiu que é recomendável a aplicação do ELECTRE-I para a seleção de alternativas em estudo e ELECTRE II para a ordenação completa do conjunto reduzido.

Karagiannidis e Moussiopoulos (1997) aplicaram o método ELECTRE-III para auxiliar nas decisões referentes à gestão integrada de resíduos sólidos urbanos na Área Metropolitana de Atenas, no âmbito de um estudo de caso para resíduos domésticos.

Harada e Cordeiro Netto (1997) elaboraram um suporte metodológico de auxílio à decisão, com uma abordagem multicritério, voltado para a seleção de alternativas em sistemas de coleta e tratamento de esgotos em condomínios do Distrito Federal (DF), onde aplicaram os métodos Programação de Compromisso, PROMETHEE-II e ELECTRE-III.

Generino (1999) propôs o desenvolvimento de metodologias multicritério para procedimentos de avaliação em auditorias aplicados a estações de tratamento de esgotos em Brasília-DF. Dois métodos foram escolhidos para a análise, um deles foi o ELECTRE-III, no entanto, mais tarde, foi substituído pelo ELECTRE TRI devido a adaptações no uso da metodologia. Os critérios foram selecionados pela autora e os pesos que variavam de 1 (um) a 7 (sete) deveriam ser definidos pelo auditor responsável pela avaliação das ETEs. Para obter os valores de cada critério a autora utilizava questionário pontuado. De posse desses valores e dos pesos a estação poderia ser avaliada.

Cordeiro Netto *et al.* (2000) realizaram avaliação tecnológica de sistemas com reatores biológicos anaeróbios para o tratamento de águas residuárias municipais, por meio dos métodos ELECTRE, Programação de Compromisso e PROMETHEE.

Harada (2001) propôs uma metodologia simplificada de ordenamento de empreendimentos, voltados para a abordagem em saneamento. O autor utilizou um processo de seleção multicritério, onde aplicou o método PROMETHEE-II.

Souza *et al.* (2001) aplicaram os métodos de Ponderação Aditiva, Programação de Compromisso e ELECTRE-III para obter resultados consistentes sobre as alternativas de pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios.

Brostel (2002) desenvolveu um modelo de avaliação de desempenho global de estações de tratamento de esgotos sanitários. A avaliação contempla critérios de desempenho associados às dimensões técnica, administrativa, financeira, ambiental e socioeconômica. A pesquisa contou com uma etapa de consulta a especialistas para definição dos diferentes critérios sob cada uma das dimensões de avaliação e definição dos pesos dos critérios. A autora utilizou o método ELECTRE TRI na aplicação da metodologia. A pesquisa foi aplicada a quatro estudos de caso, obtendo-se resultados pertinentes e que permitiram,

além de avaliar globalmente o desempenho, identificar os aspectos mais vulneráveis da ETE.

Ribeiro (2003) fez uso do método ELECTRE TRI para avaliar o desempenho ambiental de Estações de Tratamento de Água (ETAs). Os resultados obtidos pelo suporte metodológico foram considerados pertinentes e interessantes pelos especialistas. A autora concluiu também que a utilização de um método de apoio à decisão foi fundamental para compilação e compreensão adequada das informações produzidas.

Norese (2006) aplicou o método ELECTRE-III como apoio para a tomada de decisão sobre a localização das Estações de Tratamento de Resíduos, mais especificamente um incinerador e uma instalação para armazenamento de cinzas e outros resíduos. Um grupo de 45 decisores (locais e representantes das diferentes comunidades que estavam envolvidos) trabalharam em conjunto com um grupo facilitador para identificar os critérios julgados relevantes para analisar as consequências da localização da estação.

Castro (2007) propôs uma metodologia para avaliação dos efeitos da urbanização nos corpos de água. O autor concentrou a atividade de avaliação de impactos no desenvolvimento de indicadores de desempenho. Todos os indicadores propostos foram obtidos por meio de expressões de cálculos matemáticos o que, segundo ele, objetivou reduzir o caráter de subjetividade em sua avaliação. Para aplicação da metodologia foram utilizados os métodos ELECTRE TRI e TOPSIS.

Geneletti e van Duren (2008) aplicaram técnicas multiobjetivo e multicritério em um contexto espacial para apoiar o zoneamento de um parque na Itália. Em primeiro lugar foram identificados os elementos de zoneamento espacial, em seguida foram atribuídos níveis de proteção para cada unidade. Então, diferentes métodos foram testados e a estabilidade dos resultados foi avaliada por meio de análise de sensibilidade.

Cordeiro (2010) desenvolveu, utilizando os preceitos de avaliação multiobjetivo e multicritério, uma metodologia de apoio à decisão para a escolha de um sistema de gestão de lodo de fossa/tanque séptico. Essa tem como objetivo dar instruções e orientações aos decisores sobre como agir para chegar à escolha de alternativas coerentes com os objetivos

propostos. Para aplicação da metodologia foram utilizados os métodos Programação de Compromisso, TOPSIS, AHP, PROMETHEE II e ELECTRE III.

3.7 – OBTENÇÃO DE INFORMAÇÕES COM GRUPOS DE PESSOAS (MULTIGESTORES)

Conforme exposto em capítulos anteriores, a existência de diversos decisores em um problema é algo que introduz grande complexidade à análise de decisão, não se tratando de escolher apenas a alternativa mais vantajosa ou viável, mas também de levar em conta, de alguma maneira, as opiniões e preferências desses decisores.

De acordo com Goicoechea *et al.* (1982), a determinação dos pesos em problemas que envolvem decisão pode ser feita por meio de duas abordagens: quando se simula o julgamento do decisor ou quando se obtêm os valores dos pesos diretamente do agente decisor. O objetivo dessa última linha de abordagem é medir que avaliações de alternativas estão consistentes e racionais.

Segundo Harsanyi (1977 *apud* Goicoechea *et al.*, 1982), os métodos de tomada de decisão em grupos de pessoas podem ser divididos em dois grupos: baseados na Teoria dos Jogos e baseados na Ética. A Teoria dos Jogos considera que os indivíduos do grupo estão empenhados em alcançar os seus próprios interesses e valores pessoais e a solução do problema é obtida pela maximização da utilidade individual. A abordagem da Ética considera que o grupo tem como objetivo o interesse coletivo, e a solução é obtida pela maximização da utilidade esperada do grupo.

Para este trabalho é interessante que um grande número de interesses difusos sejam satisfeitos, assim, os métodos baseados na Ética são os que se adéquam à realidade do desaguamento.

3.7.1 – Técnicas de Decisão em Grupo

Dos diversos métodos baseados na Ética existentes, pode-se destacar o método da Comparação Interpessoal Explícita de Preferências, os métodos de Utilidade do Grupo, o

Processo de Planejamento Aberto Iterativo, a Técnica Nominal de Grupo e a Técnica *Delphi*.

Segundo Brostel (2002), os dois primeiros caracterizam-se por um maior rigor teórico, e exigem a determinação de uma função de utilidade do grupo, geralmente proveniente da utilidade de cada indivíduo. O Processo de Planejamento Aberto Iterativo exige uma forte interação dos decisores em todos os estágios de planejamento, o que dificulta sua aplicação na prática. Por outro lado, a Técnica Nominal de Grupo e a Técnica *Delphi* possuem a vantagem da praticidade operacional: são de aplicação rápida e fácil. Mas, não possuem o rigor teórico das duas primeiras.

Por esse motivo, essas duas técnicas, sobretudo a *Delphi*, são amplamente usadas em problemas de todos os campos de engenharia e serão descritas brevemente a seguir.

3.7.1.1 - Técnica Nominal de Grupo (TNG)

A TNG é recomendada para grupos pequenos, de 5 a 9 pessoas, foi desenvolvida no século XX (vinte) para uso em situações onde a tomada de decisão é complexa e onde se pretende que a decisão do grupo seja decorrente da agregação das preferências individuais dos participantes.

Uma das vantagens dessa técnica é o tempo esperado para se desenvolver esse processo, que é entre 60 a 90 minutos. No entanto, para que ele ocorra nesse curto período de tempo, é necessária a presença de todos os participantes do grupo, o que acaba se tornando uma desvantagem devido à dificuldade de se conseguir reunir todos os envolvidos.

A implementação da TNG pode ser caracterizada nas seguintes fases:

1. Geração de ideias silenciosamente por cada participante;
2. Registro de ideias comuns e apresentação ao grupo;
3. Discussão em série para esclarecimento;
4. Votação preliminar para definição da importância de cada item;
5. Discussão do resultado da votação preliminar;
6. Votação final.

Segundo Goicoechea *et al.* (1982), esses passos são organizados por um “diretor” do grupo, que conduz todo o processo de votação e estabelecimento das preferências.

3.7.1.2 - Técnica *Delphi*

A técnica *Delphi* passou a ser disseminada no começo dos anos 1960 e seu objetivo original era desenvolver uma técnica para aprimorar o uso da opinião de especialistas na previsão tecnológica. Na metodologia desenvolvida, isso era feito estabelecendo-se três condições básicas: o anonimato dos respondentes, a representação estatística da distribuição dos resultados e o *feedback* de respostas do grupo para reavaliação nas rodadas subsequentes (Martino, 1993).

A técnica baseia-se no uso estruturado do conhecimento, da experiência e da criatividade de um painel de especialistas, pressupondo-se que o julgamento coletivo, quando organizado adequadamente, é melhor que a opinião de um só indivíduo (Wright e Giovinazzo, 2000).

O método é bastante simples, pois trata-se de um questionário interativo, que circula repetidas vezes por um grupo de especialistas, preservando o anonimato das respostas individuais (Wright e Giovinazzo, 2000). Com apoio de ferramentas estatísticas, os resultados parciais são usados para compor os questionários subsequentes. O objetivo final da pesquisa é a composição de cenários que possam auxiliar a tomada de decisão e o estabelecimento de estratégias para atuação em grupo (Kayo e Securato, 1997).

A técnica *Delphi* é recomendável para situações semelhantes às recomendadas para a Técnica Nominal de Grupo, no entanto, possibilita a participação de grupos grandes e pequenos. Por se basear em respostas escritas, a Técnica *Delphi* está prevista de ocorrer em um prazo de seis semanas ou mais, o que representa uma desvantagem do método. Na implementação da técnica *Delphi* são previstas as seguintes etapas:

- Desenvolvimento de questionário *Delphi*;
- Selecionar e contatar os participantes;
- Selecionar o tamanho da amostra;

- Desenvolver o questionário, testá-lo e analisar as respostas. Essa fase é repetida por três vezes, para que se chegue à concordância;
- Elaboração do relatório final.

Segundo Linstone e Turoff (2002), o enquadramento dos problemas em pelo menos uma das seguintes situações pode indicar a viabilidade do uso do *Delphi*:

- Não é possível solucionar o problema com base em técnicas analíticas, mas julgamentos ou opiniões coletivas podem auxiliar o processo;
- Faltam a alguns membros do grupo experiências de comunicação em grupo ou de trabalho em equipe, e há diferenças significativas em termos de experiência profissional entre eles;
- Não é possível a interação face a face entre todos os membros do grupo;
- Encontros frequentes entre os membros do grupo são inviáveis, seja por motivos financeiros ou por limitações de tempo;
- Podem-se melhorar os resultados e a eficiência dos encontros por intermédio de processo de comunicação sistematizado;
- Por motivos diversos (ideológicos, políticos, etc.), é desejável certo grau de anonimato no processo de comunicação e interação entre os membros da equipe;
- Deseja-se preservar as particularidades de cada indivíduo, de modo que não sofra influência de outros membros do grupo.

Essa técnica pode ser aplicada de maneira presencial, por correspondência ou por correio eletrônico para diversas áreas do conhecimento. Segundo Kayo e Securato (1997), o maior inconveniente desse processo é o tempo que geralmente é necessário para se obter a resposta de todos os entrevistados. Essa técnica foi usada para a obtenção de dados para este trabalho, no entanto com algumas adaptações e simplificações para torná-la exequível.

3.7.2 - Método para a Definição dos Pesos

3.7.2.1 - Método baseado na distância (*Distance-based*)

Cook e Seiford (1978 *apud* Kruger e Kearney, 2008) desenvolveram uma teoria de distância entre fatores de prioridade de Kendall e propuseram um consenso de classificação

com base na distância de cada peso atribuído por especialistas. A teoria apresenta uma boa descrição dos axiomas, representação matemática e prova de existência de uma função de distância original. Uma descrição das equações utilizadas no método é apresentada a seguir.

Considere que n é o número de indivíduos e m o número de objetivos, r_{ij} é o peso dado por indivíduo i para o objetivo j , c_j é o consenso sobre o objetivo j , a distância absoluta de r_{ij} até c_j é representada pela Equação (3.24):

$$d_i = \sum_{j=1}^m |r_{ij} - c_j| \quad (i = 1, \dots, n) \quad \text{Equação (3.24)}$$

A distância total de todos os indivíduos pode, então, ser expressa pela Equação (3.25):

$$\sum_{i=1}^n d_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |r_{ij} - c_j| \quad \text{Equação (3.25)}$$

Se c_j é definido como um índice numérico igual a k ($k = 1, \dots, m$) a distância total pode ser reescrita como a Equação (3.26):

$$\sum_{j=1}^m d_{jk} \quad \text{Equação (3.26)}$$

Onde:

$$d_{jk} = \sum_{i=1}^n |r_{ij} - k|$$

Isso representa a soma das distâncias entre um consenso de posição k e n classifica todos os indivíduos n sobre o objetivo j . A melhor classificação de consenso torna-se então aquela para a qual a distância total é mínima.

O problema agora pode ser representado pela Equação (3.27):

$$\text{Min} \sum_{k=1}^m d_{jk} x_{jk} \quad \text{Equação (3.27)}$$

Sujeito à:

$$\sum_{j=1}^m x_{jk} = 1 \quad (k = 1, \dots, m)$$

$$\sum_{k=1}^m x_{jk} = 1 \quad (j = 1, \dots, m)$$

$$x_{jk} \geq 0$$

Com:

$x_{jk} = 1$, se $c_j = k$

$x_{jk} = 0$, caso contrário.

3.8 – AVALIAÇÃO TECNOLÓGICA

Em conformidade com o objetivo definido no Capítulo 2, optou-se por fazer uma breve descrição dos seguintes termos: técnica, tecnologia e tecnologia apropriada.

As palavras tecnologia e técnica muitas vezes são mal aplicadas ou confundidas, razão pela qual convém distingui-las. Assim, conforme afirma Ennes (1989), a tecnologia é compreendida como um conjunto de princípios configurado por conhecimentos científicos que se aplicam a determinado ramo de atividade. Por sua vez, segundo o mesmo autor, a técnica é o conjunto de processos que possibilita materializar a tecnologia.

Segundo Garcia (1987), os nomes dados à tecnologia apropriada são muitos: tecnologia adequada, tecnologia intermediária, tecnologia de baixo custo, tecnologia alternativa, tecnologia socialmente apropriada, tecnologia popular, tecnologia comunitária, tecnologia radical, tecnologia emancipadora, tecnologia não-violenta e muitos outros. O autor afirma que esses diferentes nomes não significam, entretanto, que não exista um relativo consenso sobre o que vem a ser uma tecnologia apropriada, mas que os estudiosos de tecnologia, apropriada ou não, concordam entre si que essa envolve múltiplas dimensões, não podendo ser plenamente compreendida se considerarmos apenas a sua dimensão econômica.

Nas últimas décadas tem havido um interesse crescente no sentido de adotar tecnologias apropriadas para o esgotamento sanitário. Esse interesse é justificado tanto pelo menor custo de implantação dessa alternativa tecnológica, quanto pelos questionamentos relativos à adequação técnica da tecnologia convencional, frente às diferentes realidades dos contextos urbanos e rurais brasileiros (Oliveira e Moraes, 2005).

No mundo contemporâneo, as tecnologias e inovações tecnológicas chamam a atenção por sua criatividade, por seu ritmo acelerado e, principalmente, pelas questões que suscitam acerca de suas implicações. Embora a origem conceitual das tecnologias apropriadas seja mais recente, essas tecnologias são antigas e surgem como uma reação às estratégias de desenvolvimento baseadas na introdução indiscriminada, em países em desenvolvimento, de tecnologias procedentes de países desenvolvidos (Motta, 1996 *apud* Oliveira e Moraes, 2005).

O movimento pela utilização de tecnologias apropriadas inicia-se a partir da década de 1970, num contexto no qual é manifestado um interesse maior pelos países em desenvolvimento. Esse interesse, em parte, resultou dos crescentes desequilíbrios e contradições do próprio desenvolvimento presente nesses países e expressos, dentre outros, pelo crescimento populacional acelerado, sem a correspondente oferta em infraestrutura, pelas diferentes formas de poluição e pela diminuição das reservas naturais, com destaque para as da água, vital para o ser humano e para o próprio desenvolvimento (Oliveira e Moraes, 2005).

O termo Tecnologia Apropriada (TA) sugere a possibilidade de adaptação da tecnologia ao meio no qual se adota, em termos físico ambientais, culturais e sociais, e que proporcione o desenvolvimento da autodeterminação das populações. Sugere ainda uma busca do respeito e confiança dos membros da comunidade na qual se instala, no seu potencial e capacidade de ação e participação, que são pré-condições para uma melhoria de sua qualidade de vida (Kligerman, 1995).

Com o objetivo de dar uma conceituação definitiva ao termo TA, Willoughby (1990) definiu Tecnologia Apropriada (com letras maiúsculas) como “uma estratégica inovadora ou modo de prática tecnológica, voltada para garantir se os meios tecnológicos são compatíveis com seus contextos, os quais incluem os fatores sociais e políticos e as metas

normativas associadas”. Por outro lado, o termo tecnologia apropriada (com letras minúsculas) é definido como “artefatos talhados para funcionar como meios relativamente eficientes e para se adaptar ao contexto psicossocial e biofísico existente em um determinado local e período particular”, enquanto o termo “tecnologia apropriada” (com aspas) refere-se a “uma categoria particular de artefato ou sistema de artefatos”.

Dentro dessa temática, surge o processo de seleção ou escolha tecnológica, o qual, segundo Sachs (1993), introduzindo o conceito de eco desenvolvimento, deve se desenvolver segundo cada contexto ecológico, econômico e social, em um determinado período de tempo e utilizando critérios de adequação para análise das alternativas tecnológicas. Sugere ainda que uma avaliação tecnológica deve considerar cinco categorias: a econômica, a ecológica, a sociocultural, a política e a técnica.

Jéquier e Blanc (1983) enfatizam que uma avaliação baseada apenas nos aspectos financeiros e econômicos, e que não considera os impactos sobre o desenvolvimento das capacidades tecnológicas locais ou a adequação tecnológica, impossibilita o aprendizado de qualquer lição tecnológica para os futuros projetos.

Um processo de avaliação tecnológica envolve dois aspectos importantes: a metodologia e os critérios de avaliação. É necessário usar uma metodologia com uma abordagem mais completa, que possibilite tanto uma avaliação quantitativa quanto qualitativa das alternativas, além de possibilitar a participação e envolvimento de pessoas da comunidade local. A seleção dos critérios também exige uma cuidadosa reflexão, devendo ser utilizada uma ampla faixa de critérios que possam incluir aspectos como: eficiência técnica, situação econômica, tendências socioeconômicas, compatibilidade cultural, impacto ambiental, potencial próprio, *input* científico, aspectos estéticos, durabilidade, valor social, custo capital, tendências políticas, origem, geração de empregos, sofisticação técnica, padrão de desenvolvimento e escala (Willoughby, 1990).

4 - METODOLOGIA DE PESQUISA

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia utilizada no desenvolvimento da pesquisa para atingir os objetivos delineados. A estrutura dessa metodologia segue etapas clássicas utilizadas em trabalhos correlatos para o desenvolvimento de ferramentas de análise de decisão baseadas em métodos multiobjetivo e multicritério, que incluem a consulta a especialistas e o uso de variáveis de decisão discretas.

De acordo como foi concebida, a metodologia adotada na pesquisa envolveu dez etapas: (I) Pesquisa bibliográfica; (II) Seleção dos métodos de auxílio à decisão; (III) Definição dos objetivos e agentes decisores; (IV) Geração de alternativas; (V) Definição dos critérios de decisão; (VI) Consulta a especialistas; (VII) Desenvolvimento da metodologia de análise tecnológica de desaguamento de lodo de esgoto; (VIII) Aplicação da metodologia desenvolvida a um caso real e construção da Matriz de Avaliação; (IX) Aplicação dos métodos multiobjetivos e multicritério; e (X) Análise dos resultados obtidos, conclusões e recomendações.

A Figura 4.1 apresenta um fluxograma das etapas adotadas na metodologia da presente pesquisa. O fluxograma revela que o objetivo das atividades é obter uma metodologia para analisar as alternativas de desaguamento dos lodos de esgoto com caráter geral, ou seja, que pode ser aplicada a situações diversas, com fácil adaptação a contextos ou realidades diferentes, desde que os lodos sejam provenientes de esgotos domésticos e oriundos de tratamentos biológicos, aeróbios ou anaeróbios.

A metodologia de pesquisa adotada foi obtida por adaptação das metodologias empregadas por Carneiro *et al.* (2001), Mendonça (2009) e Cordeiro (2010). A seguir são apresentadas as etapas constituintes da metodologia, indicando os tópicos de cada etapa, com uma breve descrição explicativa.

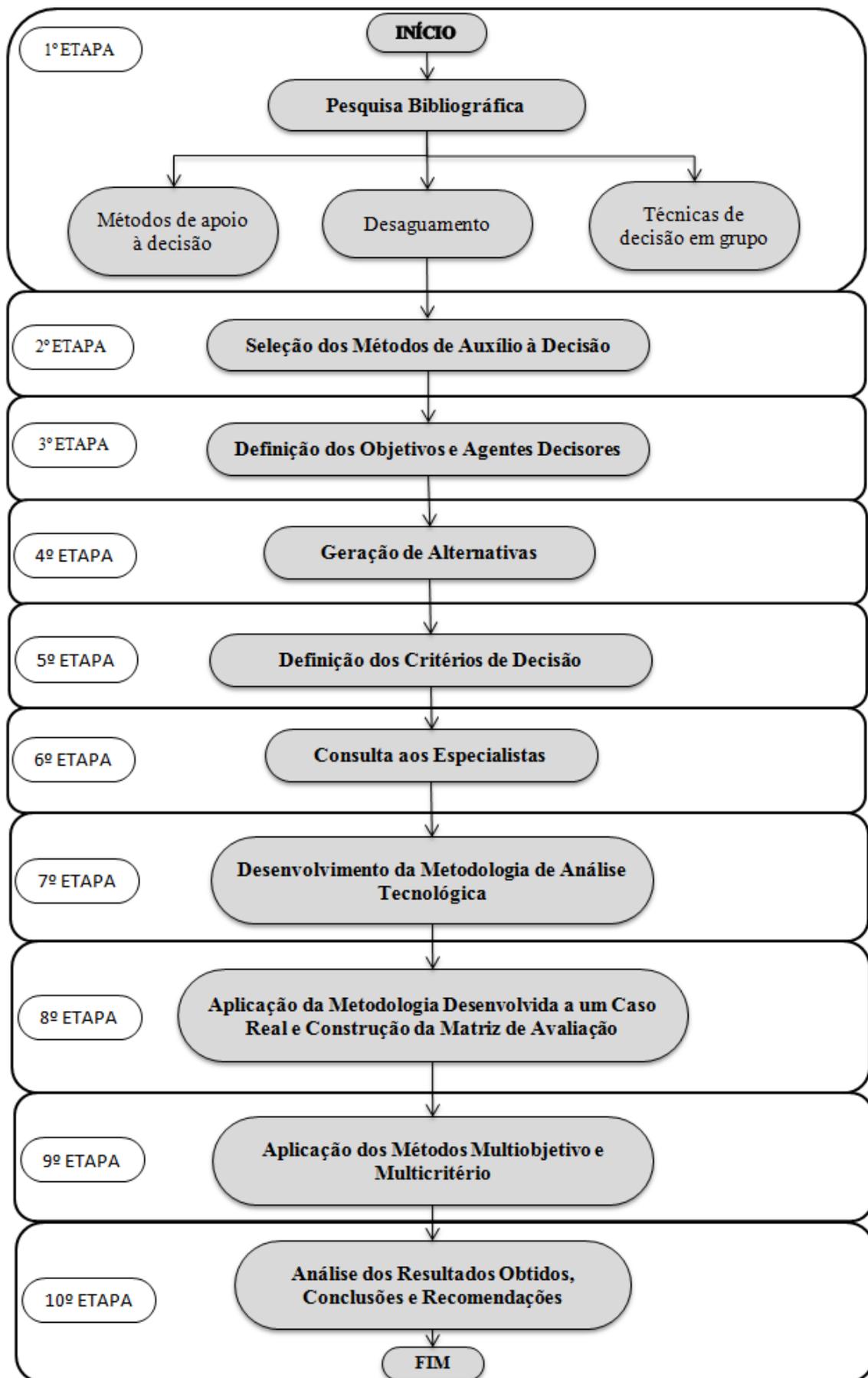


Figura 4.1 – Estrutura (etapas) da metodologia de pesquisa.

4.1 – PESQUISA BIBLIOGRÁFICA (1ª ETAPA)

Como primeira etapa da metodologia de pesquisa, realizou-se a pesquisa bibliográfica, apresentada no Capítulo 3 (Revisão e Fundamentação Teórica) para embasar as demais etapas do trabalho. A pesquisa contemplou os seguintes temas: a produção de lodo nos diversos sistemas de tratamento de esgotos, características do lodo, as principais etapas do processamento do lodo, o desaguamento do lodo, os métodos multiobjetivo e multicritério utilizados no apoio à decisão (família ELECTRE, PROMETHEE, Programação de Compromisso, TOPSIS e AHP) e técnicas de decisão em grupo.

No que se refere ao desaguamento, são apresentados os principais processos de desaguamento de lodo de esgoto listados na literatura. Essa pesquisa foi fundamental para o levantamento das alternativas e compreender suas peculiaridades. Também foi possível levantar possíveis critérios que pudessem avaliá-las e modos de quantificá-los.

Além disso, realizou-se um levantamento de trabalhos técnicos, experimentais ou não, relacionados a lodo de esgoto, desaguamento e métodos de apoio à decisão utilizados para analisar temas ambientais. O levantamento desses trabalhos teve como objetivo realizar um apanhado das pesquisas científicas nacionais e internacionais aplicadas ao tema da dissertação, auxiliar na abordagem do problema, na obtenção de dados, na escolha dos critérios e dos métodos de apoio à decisão.

4.2 – SELEÇÃO DOS MÉTODOS DE AUXÍLIO À DECISÃO (2ª ETAPA)

As técnicas de análise de decisão com múltiplos objetivos e múltiplos critérios baseiam-se no conceito de que é impossível encontrar uma única solução ótima para um problema do mundo real, já que eles são suficientemente complexos, admitindo mais do que um objetivo a ser atingido (Souza e Cordeiro Netto, 2000).

É importante destacar as motivações que levaram à proposta de utilizar especificamente métodos multiobjetivo e multicritério, dentre as outras técnicas existentes, para a análise tecnológica de alternativas. Um dos principais motivos para a utilização desses métodos neste trabalho advém da complexidade da problemática envolvida no tema, a qual deve incluir diversos atores (por exemplo, órgãos licenciadores e reguladores), diversos

objetivos (por exemplo, econômico, ambiental e técnico), muitas vezes conflitantes, e um número razoável de alternativas (por exemplo, leitos de secagem e centrífugas) e combinações entre elas, e vários critérios de análise (por exemplo, minimizar o custo de implantação e maximizar o teor de sólidos totais).

Desse modo, são encontradas algumas dificuldades na tomada de decisão para o processamento do lodo, sobretudo para o desaguamento, no que diz respeito à escolha ou priorização das alternativas disponíveis para redução de umidade do lodo, quando se trata de avaliações de aspectos subjetivos, tais como: impactos sociais, ambientais e aspectos técnicos. Assim, percebe-se claramente que esse é um problema multiobjetivo e multicritério e deve ser tratado como tal.

A crescente aplicação desses métodos na análise ambiental (meio ambiente, saneamento e recursos hídricos) demonstrou que esses métodos poderiam ser uma ferramenta útil também na análise de alternativas de desaguamento de lodo de esgoto. Como exemplos de pesquisas nacionais que se enquadram nesse tipo de aplicação destacam-se: Generino (1999); Braga e Gobetti (2002); Brostel (2002); Brito (2006); Castro (2007); Mendonça (2009) e Cordeiro (2010).

4.3 – DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS E AGENTES DECISORES (3ª ETAPA)

O processo de escolha de uma alternativa de desaguamento de lodo deve basear-se nos principais objetivos determinados para o caso estudado, por exemplo, a instalação de uma nova alternativa de desaguamento ou a avaliação da alternativa existente. Desse modo, a definição dos objetivos torna-se uma etapa fundamental no processo de análise e seleção.

Em cada aplicação, a definição dos Agentes Decisores, é uma etapa importante e que deve ser realizada com muita responsabilidade, juntamente com o levantamento de seus objetivos em relação ao desaguamento de lodo de esgoto para o caso analisado.

Os agentes decisores a serem considerados são, em muitos trabalhos, ponto de discussão. Alguns trabalhos afirmam que é importante ouvir todos os envolvidos, sejam eles capacitados ou não tecnicamente; outros defendem somente a consulta a especialistas, com conhecimento comprovado na área. Neste trabalho, buscou-se a opinião de grupos

heterogêneos, sendo eles professores universitários, alunos de pós-graduação relacionados ao tema, consultores, projetistas, servidores de órgãos ambientais e de agências reguladoras.

Os objetivos utilizados para a análise tecnológica do desaguamento de lodos de esgoto foram levantados a partir da consulta à literatura e a outras pesquisas. Esse levantamento preliminar de objetivos fundamentou a etapa caracterizada pela consulta a especialistas.

4.4 – GERAÇÃO DE ALTERNATIVAS (4ª ETAPA)

Esta etapa constitui-se na proposição de um conjunto de alternativas viáveis e apropriadas ao caso estudado, a serem avaliadas segundo os critérios pré-determinados na próxima etapa (5ª ETAPA).

São muitas as possibilidades de alternativas. As alternativas pré-selecionadas para este trabalho foram levantadas a partir da revisão de literatura e de experiências da literatura técnico-científica. Procurou-se obter o maior número de processos de desaguamento de lodo para otimizar a análise tecnológica. Esse levantamento possibilitou chegar a um total de treze alternativas. É importante relatar que é possível realizar a análise combinatória com essas alternativas, produzindo um número muito maior de alternativas combinadas, mas neste trabalho não foi realizado esse tipo de geração de alternativas.

4.5 – DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS DE DECISÃO (5ª ETAPA)

Após o levantamento dos objetivos e das alternativas, foi realizada a consulta à literatura e aos trabalhos técnicos para obter o maior número de critérios, os quais também foram submetidos à análise dos especialistas. Ao todo foram identificados vinte e nove critérios para a avaliação das alternativas e atendimento dos objetivos. Esses critérios estão descritos no Capítulo 5 (Considerações a Respeito do Desenvolvimento da Metodologia para Análise Tecnológica de Desaguamento de Lodo de Esgoto).

Para a consulta aos especialistas, foram citados os vinte e nove critérios, afim de que eles avaliassem a sua pertinência na análise tecnológica das alternativas de desaguamento. No entanto, para o desenvolvimento da metodologia de análise tecnológica foram utilizados

vinte e três dos vinte e nove critérios avaliados. Os critérios não utilizados no desenvolvimento da metodologia, além de apresentarem aspectos semelhantes a outros adotados, tiveram menor aceitação pelos especialistas.

4.6 – CONSULTA AOS ESPECIALISTAS (6ª ETAPA)

A consulta foi realizada por meio de dois questionários, disponíveis nos Apêndices A e C respectivamente, enviados por e-mail aos especialistas selecionados para participar da pesquisa. O primeiro questionário continha o tema da pesquisa, os possíveis objetivos do desaguamento de lodo e mais seis questões que tinham como finalidade classificar o contexto que o desaguamento de lodo está inserido, quais as consequências de não ser realizado o desaguamento, quais os agentes decisores envolvidos com o tema e quais critérios poderiam mensurar o alcance dos objetivos.

Após a análise dos comentários e recomendações dos especialistas, os critérios foram agrupados em dimensões que permitissem exprimir diferentes pontos de vista acerca dos processos de desaguamento de lodo. Essas dimensões derivaram dos seis objetivos apresentados aos especialistas, todos considerados pertinentes.

A segunda rodada de questionário, que já continha as sugestões dadas pelos especialistas no primeiro questionário, teve como objetivo a definição dos pesos intercritérios. Esse segundo questionário foi enviado para o e-mail apenas dos respondentes do primeiro. No entanto, nem todos os agentes respondentes do primeiro enviaram a resposta do segundo.

O segundo questionário foi elaborado em Excel, a planilha tinha a função de calcular automaticamente as respostas dos agentes decisores. A soma automática de cada dimensão (econômica, ambiental, social e técnica) evitava que os decisores ultrapassassem o valor total permitido de um.

Após a obtenção dos pesos informados pelos especialistas, foi utilizado o Método baseado na distância descrito no Capítulo 3 (Item 3.7.2.1) para se chegar ao dado usado na metodologia de análise tecnológica das alternativas de desaguamento de lodo de esgoto.

4.7 – DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE TECNOLÓGICA PARA DESAGUAMENTO DE LODO DE ESGOTO (7ª ETAPA)

O desenvolvimento da metodologia de análise tecnológica envolveu o levantamento de dados na literatura e consultas a especialistas. Assim, foi possível a definição dos objetivos, alternativas, critérios e pesos.

A definição do escopo de avaliação dos critérios selecionados para a análise foi o ponto mais crítico do trabalho, em virtude da dificuldade de obter dados para quantificá-los, pois cada um tem seu procedimento próprio de avaliação.

Assim, para o cálculo dos critérios, foi realizada uma busca na literatura com o objetivo de obter dados concretos sobre as alternativas de desaguamento enumeradas. No entanto, esses dados são escassos e quando são encontrados não são traduzidos em valores e sim em escalas como pequeno, médio e grande, o que dificultou ainda mais a elaboração da metodologia de análise tecnológica.

Por isso, a metodologia de análise foi baseada na construção de planilhas pontuadas que buscam por meio de perguntas, levantar numericamente, a resposta para cada critério. O sistema de pontos das planilhas pontuadas segue uma escala de pontuação de 0 a 100, sendo que quanto maior a pontuação, melhor o desempenho do critério avaliado. E, para auxiliar o preenchimento dessas planilhas, foram construídas tabelas de apoio com dados não numéricos (pequeno, médio e grande) obtidos na literatura e por analogia.

4.8 – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA A UM CASO REAL E CONSTRUÇÃO DA MATRIZ DE AVALIAÇÃO (8ª ETAPA)

Com a metodologia de análise tecnológica desenvolvida, foi possível aplicá-la a um estudo de caso. Para isso optou-se pela ETE Brasília Sul operada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal - Caesb. A apresentação da Caesb e a descrição da ETEB Sul podem ser encontradas juntamente com os resultados do estudo de caso no Capítulo 7 (Caso da ETE Brasília Sul: Aplicação da Metodologia de Análise Tecnológica de Alternativas de Desaguamento de Lodo de Esgoto).

A aplicação da metodologia consistiu em visitas a ETEB – Sul para obter dados gerais como processo de tratamento do esgoto (aeróbio, anaeróbio), do lodo, vazão de projeto, vazão tratada diariamente, quantidade de lodo gerada, destino desse lodo, entre outros dados. Mas, o mais importante foi a aplicação das planilhas pontuadas para verificar seu desempenho diante de uma situação real, avaliação dessas pelos técnicos da Caesb e obtenção de dados para a construção da Matriz de Avaliação (*payoff*).

4.9 - APLICAÇÃO DOS MÉTODOS MULTIOBJETIVO E MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO (9ª ETAPA)

Para a aplicação dos dados aos métodos multiobjetivo e multicritérios selecionados (Programação de Compromisso, TOPSIS, ELECTRE III, e AHP), foi necessária a definição de parâmetros e variáveis em conformidade a outros trabalhos semelhantes, para garantir a veracidade dos dados levantados.

Para a aplicação dos métodos, foram desenvolvidas planilhas em Excel para os métodos Programação de Compromisso e TOPSIS. Para o AHP foi utilizado o Sistema de Auxílio à Decisão – SAD PTARH, elaborado pelo Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da UnB. Para o ELECTRE III utilizou-se o *software* original em francês do Centro *Lamsade* da Universidade *Dauphine* em Paris.

No Capítulo 7, são apresentados os resultados obtidos por meio da aplicação da matriz *payoff* aos métodos multiobjetivo e multicritério e uma discussão desses resultados segundo a teoria do desaguamento e da realidade da ETEB Sul.

4.10 – ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES (10ª ETAPA)

Nessa etapa foram discutidos os resultados, descritas as conclusões obtidas, as recomendações para novas pesquisas e algumas dificuldades encontradas para a realização deste trabalho. Ressalto que a verificação da metodologia de análise tecnológica proposta foi realizada pela própria autora, pois foi considerada uma etapa demandante de tempo e, muitas vezes, de recursos financeiros.

5 – CONSIDERAÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE TECNOLÓGICA DE DESAGUAMENTO DE LODO DE ESGOTO

O desaguamento é uma etapa do tratamento do lodo considerada pequena em relação a todas as etapas de tratamento a que o esgoto e o lodo são submetidos. No entanto, o desaguamento representa um processo importante na garantia dos benefícios sanitários e ambientais. Esses benefícios ultrapassam a redução dos custos com transporte, possibilitando que o lodo receba outros tratamentos e seja empregado como condicionador de solo. Dessa forma, o que era resíduo pode tornar-se uma fonte de renda, um bem econômico.

O processo de análise tecnológica de alternativas de desaguamento de lodo de esgoto baseia-se na consideração dos vários critérios utilizados na avaliação para mensurar o desempenho dessas alternativas. O desafio é identificar, entre esses critérios, quais são relevantes para o problema de decisão. Esses critérios podem ser considerados de forma isolada, caracterizando uma análise unicritério, ou análise conjunta, análise multicritério. No caso desta dissertação, a proposta se baseia em uma análise multicriterial, com o objetivo de fornecer ao processo de tomada de decisão, subsídios necessários para se obter uma solução que melhor se ajuste ao problema.

A Tabela 5.1 apresenta o levantamento de critérios que, de maneira genérica/global, são de possível aplicação em diversas estações de tratamento de esgoto para analisar, por exemplo, alternativas de desaguamento de lodo. Esse levantamento foi realizado de forma ampla e primária, ou seja, caso as particularidades de um determinado local exijam, critérios podem ser acrescentados ou retirados.

Nos próximos itens, segue a descrição dos critérios econômicos, ambientais, sociais e técnicos, os quais podem ser usados para a análise tecnológica de desaguamento de lodos de ETE. A exposição tem por objetivo informar o que significa cada critério e qual a relação entre eles.

Tabela 5.1 – Dimensões econômica, ambiental, social e técnica, e respectivos critérios

Dimensão	Crítérios
Econômica	Custo de implantação Custo de operação e manutenção Custo de desmobilização
Ambiental	Impactos negativos na implantação Impactos negativos na operação Produção de odor Produção de ruídos e vibrações Proliferação de vetores Potencial poluidor do lodo Contaminação do lençol freático
Social	Geração de renda/emprego Aceitabilidade Proteção à segurança e à saúde no trabalho Eliminação de organismos patogênicos Emanação de gases e outros subprodutos tóxicos
Técnica	Complexidade de construção e instalação Complexidade operacional Complexidade de remoção do lodo Sensibilidade à qualidade do lodo a desaguar Confiabilidade no processo Confiabilidade na eficiência do processo Demanda por energia Demanda por área Consumo de produtos químicos Susceptibilidade ao clima Tempo necessário para o desaguamento Eficiência no desaguamento do lodo Adequação do processo ao destino e uso final do lodo desaguado Eficiência na captura de sólidos

5.1 – CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO

O custo aqui relacionado está intimamente ligado ao custo do projeto da alternativa de desaguamento, da construção ou instalação e de outros custos relacionados ao processo. Nesse custo, devem ser incluídos os custos relacionados à demanda por área e de mão de obra para implantação.

Para a análise tecnológica de alternativas de desaguamento, deve-se considerar que, na maioria das vezes, os recursos financeiros disponíveis são limitados, principalmente em algumas regiões brasileiras. Assim, quanto mais baixo o custo, mais adequada deve ser essa alternativa. O custo varia de acordo com a tecnologia escolhida, o grau de automação desejado, o teor de sólidos na torta e a eficiência desejada para o desaguamento.

Como exemplo da utilização desse critério, tem-se que o leito de secagem possui um custo de implantação bastante reduzido, se comparado com as opções mecânicas de desaguamento.

5.2 – CUSTOS DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO

Este critério é mensurado por meio da comparação dos custos necessários para o normal funcionamento de cada processo de desaguamento em estudo. Isso se deve ao fato de que alguns processos consomem mais energia elétrica, produtos químicos e necessitam de maior número de pessoal para sua operação e manutenção do que outros.

Como exemplo da aplicação desse critério em uma comparação entre duas alternativas de desaguamento, pode-se citar a centrífuga, que exige manutenção cuidadosa, apresenta desgastes das lâminas e exige ajustes complexos, enquanto as lagoas de secagem praticamente não necessitam de nenhum ajuste.

5.3 – CUSTO DE DESMOBILIZAÇÃO

Esse critério está relacionado à quantidade de recursos financeiros necessários para cessar a atividade da alternativa de desaguamento. A alternativa de menor custo de desmobilização será considerada a melhor nesse âmbito.

É claro que esse critério receberia um peso muito maior se a desmobilização fosse da ETE como um todo, no entanto, como se trata apenas de uma etapa do tratamento do lodo ele é relevante, porém não é imprescindível.

5.4 – IMPACTOS NEGATIVOS NA IMPLANTAÇÃO

Caso a alternativa seja implantada em uma área nova, será necessária uma série de atividades preliminares que consiste no conjunto de serviços que antecedem às obras propriamente ditas. Dentre esses serviços, destacam-se o preparo dos terrenos, desmatamento e limpeza do local. Em seguida, iniciam-se as atividades referentes à terraplanagem e regularização das cotas para a implantação das unidades. Essas atividades causam impactos por gerarem barulho e vibrações, além de compactação do solo.

Em locais onde já existe uma área apropriada para receber a alternativa de desaguamento, o impacto será notadamente menor, ou seja, se o local já possui uma alternativa de desaguamento implantada, mas ela não está adequada ao processo, a implantação da nova alternativa não produzirá impactos tão relevantes quanto em um local novo, sem nenhuma preparação. No entanto, se a alternativa a ser implantada for um leito de secagem no lugar de uma alternativa mecânica, o impacto será maior devido à área ocupada ter proporções bem superiores aos equipamentos mecânicos.

5.5 – IMPACTOS NEGATIVOS NA OPERAÇÃO

O impacto produzido por um processo de desaguamento é avaliado por meio de vários fatores ambientais, sociais e econômicos, como direção dos ventos em relação a habitações urbanas, produção de odores, ruídos, tráfego (veículos para a remoção do lodo), a proliferação de insetos e roedores, a percolação de efluente no solo, a disposição inadequada do lodo, dentre outros. Assim, cada um desses fatores é capaz de restringir o uso de certos processos de desaguamento.

5.6 – PRODUÇÃO DE ODOR

A emissão de gases odorantes no desaguamento do lodo se dá, principalmente, em lodos não estabilizados ou mal digeridos e, sendo o lodo rico em matéria orgânica, isso o torna facilmente putrescível. Esse é um problema de grande importância, não só por questões estéticas e ambientais, mas por causar problemas à saúde da população, além de causar a depreciação dos imóveis vizinhos às ETEs.

5.7 – PRODUÇÃO DE RUÍDOS E VIBRAÇÕES

Alguns processos de desaguamento geram ruídos e vibrações. Esse é o caso dos processos mecanizados como centrífugas, filtros prensa e prensas desaguadoras, os quais geram níveis médios a elevados de ruídos. Em contrapartida, na operação dos processos naturais não há ocorrência de ruídos e/ou vibrações.

5.8 – PROLIFERAÇÃO DE VETORES

A propagação de vetores como insetos e roedores está relacionada ao tipo de processo de desaguamento e sua operação. Algumas alternativas possuem maior tendência ao aparecimento de vetores do que outras, porém, se for realizada uma operação eficiente, isso pode não ocorrer.

Como exemplo de aplicação desse critério, podem-se citar as lagoas de lodo que possuem elevados índices de propagação de vetores. Em contrapartida, é considerada baixa a propagação no caso dos equipamentos mecanizados.

5.9 – POTENCIAL POLUIDOR DO LODO

Esse critério está relacionado ao tipo de tratamento do lodo e sua possível destinação final. Algumas alternativas possuem maior risco de causar poluição como a lagoa de lodo. As características do lodo também influenciam nesse potencial, por exemplo, quando retirado do desaguamento com alta umidade, aumenta a chances de causar algum tipo de poluição.

5.10 – CONTAMINAÇÃO DO LENÇOL FREÁTICO

Algumas alternativas de desaguamento são mais propícias a causar contaminação do solo, e, em alguns casos, do lençol freático, do que outras, mas isso não significa que, se a alternativa for devidamente implantada e operada, isso não possa ser evitado.

Para exemplificar o uso desse critério, os métodos naturais como leito de secagem, lagoas de lodo e bags de geotêxtil são mais propícios à contaminação do lençol freático do que os métodos mecanizados.

5.11 – GERAÇÃO DE RENDA/EMPREGO

Esse critério é avaliado sob dois ângulos distintos: o do prestador de serviço e o da unidade beneficiada. Desse modo, a melhor alternativa para a companhia de saneamento é a que exige menor número de pessoas para a operação do processo. No entanto, para a

comunidade a ser beneficiada, quanto maior a quantidade de pessoas a serem contratadas melhor será a alternativa.

Para esse critério também é relevante o nível de capacitação dos operadores exigido pelo processo de desaguamento, pois há locais com carência de mão de obra especializada para operar determinados equipamentos.

Um sistema de leito de secagem ou lagoa de secagem, por exemplo, exige um pequeno número de pessoas para sua operação, e essas pessoas necessitam de uma capacitação mínima. Já a operação de filtro prensa de placas necessita de operadores durante todo o tempo de operação e ainda exige maior capacitação.

5.12 – ACEITABILIDADE DO PROCESSO DE DESAGUAMENTO

A aceitabilidade do processo pode ser avaliada sob dois aspectos: um deles é a população do local e o outro são os empregados da ETE, que direta ou indiretamente estão relacionados com o processo de desaguamento. Assim, esse critério pode ser medido pelo nível de rejeição que tanto a população como os empregados sentem em relação à alternativa de desaguamento.

É importante observar que a comunidade na vizinhança da ETE não poderá distinguir de que parte do tratamento está sendo emanado o odor, visto que tanto do tratamento do esgoto quanto do lodo há geração de odor. Mas a seleção do equipamento de desaguamento adequado pode auxiliar na redução desse incômodo nas adjacências da ETE.

Este critério apresenta relação com os critérios de dimensão ambiental, como a emissão de odor, ruídos e vibrações. Portanto, o processo será bem ou mal aceito de acordo principalmente com suas características higiênicas.

Com relação aos empregados da ETE, ainda pode-se levantar mais fatores que vão influenciar na aceitabilidade do processo, como o contato direto com o lodo, pois alguns processos exigem maior ou menor grau de manuseio que outros, o que pode aumentar ou reduzir a satisfação do operador.

5.13 – PROTEÇÃO À SEGURANÇA E À SAÚDE NO TRABALHO

Este critério está relacionado à segurança da operação de determinado processo de desaguamento e ao grau de operação manual que esse processo exige, ou seja, quanto maior o grau de manuseio exigido por esse processo, maior a susceptibilidade do operador em adquirir uma doença ou sofrer um acidente. Por isso é importante seguir as normas de operação e o uso de equipamentos de proteção individual.

5.14 – ELIMINAÇÃO DE ORGANISMOS PATOGÊNICOS

Este critério se confunde em meio às dimensões ambiental e social, por isso torna a sua avaliação complexa. Os patógenos podem impactar negativamente o meio ambiente e a comunidade. Dessa forma, a melhor alternativa de desaguamento será aquela que, além de desenvolver a função principal (remover umidade), ainda remova o maior número de patógenos do lodo.

A remoção de patógenos também pode ser considerada um dos fatores que influenciam a disposição ou uso final do lodo, pois, para usos específicos, o lodo não pode apresentar patogenicidade alta. Por exemplo, como condicionador de solo a exigência de ausência de patógenos é grande, já para disposição em aterros sanitários, a exigência recorre apenas ao teor de sólidos totais no lodo.

No Brasil, poucos são os dados disponíveis sobre a carga de organismos patogênicos no lodo, além de ser variável de uma região para outra e do processo de tratamento a que o esgoto tenha sido submetido.

5.15 – EMANAÇÃO DE GASES E OUTROS SUBPRODUTOS TÓXICOS

A emissão de gases e subprodutos tóxicos é um critério que trata do tipo de gás que é emitido e quais são os subprodutos tóxicos advindos do tratamento do lodo. Ele se distingue do critério “produção de odor” por considerar quais são esses gases e subprodutos e qual a sua problemática diante da saúde pública e do meio ambiente.

5.16 – COMPLEXIDADE DE CONSTRUÇÃO E INSTALAÇÃO

A complexidade de construção e instalação de um processo de desaguamento é um critério de avaliação utilizado para classificar as alternativas. Esse critério pode ser estimado por meio de vários fatores, como necessidade de escavações e quantidade de material de construção e hidráulicos (tubos, conexões).

5.17 – COMPLEXIDADE OPERACIONAL

A complexidade operacional depende fundamentalmente da tecnologia empregada no tratamento e nos equipamentos incorporados ao sistema. Deve-se ressaltar que o grau de automação do processo está diretamente relacionado aos recursos financeiros disponíveis para a sua construção e instalação.

Quanto maior a automação do processo de desaguamento, mais simples é sua operação. No entanto, a automação exige acompanhamento técnico especializado.

5.18 – DIFICULDADE DE REMOÇÃO DO LODO DO PROCESSO

O grau de dificuldade em remover o lodo do processo de desaguamento influencia diretamente o tempo de operação do processo, pois quanto maior a complexidade da remoção, maior será o ciclo de operação.

As diferentes alternativas de desaguamento apresentam diferentes complexidades para a remoção do lodo. Como exemplos de alguns processos de desaguamento que apresentam maior complicação na remoção do lodo estão os leitos de secagem e as lagoas de secagem. No entanto, os processos mecanizados são pouco complexos em relação aos processos naturais.

5.19 – SENSIBILIDADE DO PROCESSO À QUALIDADE DO LODO A DESAGUAR

Alguns processos de desaguamento de lodo exigem um lodo afluyente com maior teor de sólidos do que outros processos. Então, o lodo para ser aplicado a esses processos deverá

ser condicionado com polímero antes de sua aplicação no equipamento, o que influencia no tempo de operação e no seu custo.

Outro fator importante são os tipos de tratamentos usados nas ETEs, ou seja, cada tipo de tratamento de esgoto (aeróbio ou anaeróbio) gera um lodo com características distintas e para a escolha e adaptação de um processo de desaguamento de lodo é necessário conhecer o tipo de lodo gerado na ETE para que o processo seja eficiente. Também existem sistemas de tratamento que misturam os lodos gerados em diversas etapas do tratamento, formando um lodo misto com características distintas.

5.20 – CONFIABILIDADE DO PROCESSO

A confiabilidade em um processo de desaguamento se refere a vários fatores, como por exemplo, a frequência com que o processo apresenta falhas. Assim, por exemplo, quanto menor a frequência com que um processo apresenta problemas, mais confiável é o processo.

5.21 – INSTABILIDADE NA EFICIÊNCIA DO PROCESSO

Este critério mede a eficiência do processo de desaguamento em comparação ao critério de “confiabilidade do processo”. Isso pode ser explicado por meio da diferença que existe entre as alternativas. Por exemplo, algumas alternativas são extremamente eficientes, no entanto, apresentam falhas com frequência, já outras não são tão eficientes, porém dificilmente precisam de manutenção, ou seja, sua operação é contínua.

5.22 – DEMANDA POR ENERGIA ELÉTRICA

A energia elétrica é um fator importante na análise tecnológica, constituindo-se em um critério que deveria constar tanto como critério de eliminação de alternativas, como critério de avaliação das alternativas viáveis. Além disso, depende da potência instalada e do período de funcionamento dos equipamentos. Esse critério também influencia no custo operacional do sistema.

As alternativas de desaguamento podem ser classificadas em demandantes ou não de energia. Assim, o critério de demanda por energia pode ser avaliado sob dois aspectos, o primeiro é se o processo demanda ou não energia, que é utilizado também como critério de exclusão de alternativas, no caso em que não haja abastecimento seguro de energia. O outro aspecto que deve ser levado em consideração é a quantidade de energia que pode ser oferecida no local, que deve ser superior à quantidade de energia demandada pelo processo de tratamento a ser implantado.

Por exemplo, no Modelo PROSEL – I (Souza, 1992), usado para avaliação de processos de tratamento de águas residuárias, esse critério aparece como um fator de eliminação de alternativas. As alternativas classificadas como demandantes de energia são excluídas da análise se o local onde será implantada a estação de tratamento possuir uma forte tendência em não haver suprimento de energia, ou seja, nesses locais, a melhor solução é adotar alternativas com baixa demanda por energia.

Como exemplo de alternativas que utilizam energia elétrica para o seu funcionamento está o filtro a vácuo e a prensa desaguadora, enquanto os leitos de secagem convencional não necessitam de energia elétrica, desde que não haja necessidade de bombeamento.

5.23 – DEMANDA POR ÁREA

Como critério de avaliação, esse é uma função do custo do terreno, sendo que quanto maior o custo do terreno na região em que será implantado o processo de desaguamento, maior a importância dada a esse critério em uma avaliação. Outro aspecto a ser observado é que quanto maior a área necessária para a implantação da alternativa, maior será o impacto ambiental provocado por ela, visto que podem ser necessárias ações como desmatar a área, compactar o solo, afugentar a fauna, dentre outros.

Esse critério também é um fator de exclusão, pois se a ETE não possuir área disponível para a alternativa, esta não deve ser considerada na análise tecnológica. Como exemplo de alternativas com diferentes requisitos de área, pode-se citar os leitos de secagem que, por mais que o valor de investimento para a sua construção seja baixo, a área requerida é considerada elevada. Já as centrífugas ocupam áreas reduzidas e apresentam facilidade de instalação.

5.24 – CONSUMO DE PRODUTOS QUÍMICOS

É avaliado por meio do custo da quantidade de produtos químicos necessários para a satisfatória operação do processo de desaguamento por um determinado período de tempo.

Esse critério pode ser relacionado aos critérios “tempo necessário para o desaguamento” e “eficiência no desaguamento do lodo”, ou seja, com a aplicação dos produtos químicos, menor será o tempo necessário para o desaguamento e mais eficiente será o processo com relação ao teor de sólidos no lodo desaguado.

Como exemplos de alguns processos de desaguamento que necessitam de produtos químicos para um melhor desempenho, podem ser citados a centrífuga, o filtro prensa e as prensas desaguadoras.

5.25 – SUSCEPTIBILIDADE AO CLIMA

Os aspectos climáticos podem influenciar na eficiência dos processos de desaguamento, sobretudo os leitos de secagem, lagoas de secagem, *bags* de geotêxteis, leitos de juncos, devido principalmente ao declínio da evaporação e da percolação. Então, em regiões de clima úmido e chuvoso, os processos de desaguamento mecânicos são considerados mais adequados em comparação aos processos naturais, devido principalmente, a sua operação, que é baseada em filtração, compactação ou centrifugação, que independem da umidade do ar e da pluviosidade.

5.26 – TEMPO NECESSÁRIO PARA O DESAGUAMENTO

Os processos de desaguamento possuem diferentes tempos de operação (carregamento, desaguamento) e, por consequência, distintos tempos de remoção (retirada do lodo da instalação/equipamento) do lodo. Esse critério sofre influência do clima, da taxa de aplicação e da quantidade de sólidos totais que se deseja obter no final da operação.

5.27 – EFICIÊNCIA DO DESAGUAMENTO DO LODO

A eficiência do desaguamento pode ser medida pelo teor de sólidos no lodo desaguado, ou seja, quanto maior o teor de sólidos presentes no lodo desaguado mais eficiente é o processo. É claro que esse critério também está relacionado à exigência desse lodo para algum uso ou destino final. Dessa forma, quanto mais “nobre” for o destino maior será a exigência com relação ao teor de sólidos.

As diferentes variantes de um mesmo processo podem apresentar eficiências distintas de desaguamento. Em geral, os processos antigos são menos eficientes do que os mais modernos (Gonçalves *et al.*, 2001). Essa regra serve para modelos e fabricantes também.

5.28 – EFICIÊNCIA DE CAPTURA DE SÓLIDOS

A eficiência quanto à captura de sólidos diz respeito à quantidade de sólidos que é encontrada no líquido drenado do lodo no ato do desaguamento, ou seja, quanto menor a quantidade de sólidos nesse líquido mais eficiente é o tratamento do lodo.

6 – CONSULTA AOS ESPECIALISTAS E SEUS RESULTADOS

A consulta foi realizada por meio de dois questionários (I e II) encaminhados por e-mail. O primeiro questionário foi enviado a oitenta pessoas, sendo que vinte e quatro responderam. O segundo foi enviado aos vinte e quatro respondentes, e dezoito deles contribuíram com as suas respostas ao segundo questionário. O prazo de envio das respostas do primeiro questionário foi de 20 dias, e, para o segundo, foi dado um prazo de 5 dias.

A definição dos especialistas deu-se a partir de sugestões de professores e pesquisadores do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos - PTARH da UnB. Os questionários submetidos, bem como a relação e perfil dos especialistas que os responderam, encontram-se nos Apêndices A, B, C e D. Com relação aos respondentes, 58% são professores de universidades federais, 17% são servidores da Companhia de Saneamento do Distrito Federal – Caesb, 8% são servidores da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento – Casan e por fim 17% são da Agência Nacional de Águas – ANA, Ministério da Integração Nacional – MI, Mestre em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos e mestrando do PTARH.

Dentre todas as técnicas disponíveis na literatura, optou-se por adotar uma simplificação inspirada na técnica Delphi para a aplicação dos questionários, a qual foi detalhada no Capítulo 3 (Revisão e Fundamentação Teórica). Essa técnica, embora seja mais demorada que a Técnica de Grupo Nominal - TGN, não implica em um deslocamento físico dos especialistas. Além disso, a técnica Delphi propicia uma decisão progressiva, resultando em uma decisão acordada entre os especialistas. No entanto, para dar celeridade à obtenção dos dados, essa técnica foi aplicada de forma simplificada neste trabalho, pois houve apenas duas rodadas de questionários.

Nos itens seguintes, são descritos os resultados da consulta aos especialistas por meio da aplicação do questionário I e II.

6.1 – RESULTADOS DO QUESTIONÁRIO I

Conforme pode ser observado na Tabela 6.1, na qual é apresentada a compilação das respostas da Questão nº 1 sobre a qual os agentes decisores precisavam opinar com relação a qual contexto estão inseridos os problemas do desaguamento, o contexto técnico foi o que atingiu 100% de aceitação. Ou seja, todos os agentes decisores concordam que o contexto técnico é o ponto mais frágil. No entanto, os contextos ambientais e econômicos também receberam uma porcentagem alta. Com relação ao sanitário, esperava-se que esse contexto ficaria com uma porcentagem mais próxima do contexto ambiental, porém ele ficou 13% abaixo. O contexto social teve uma aceitação menor e não tão significativa quanto aos demais. Não houve sugestão de outros contextos.

Tabela 6.1 – Compilação das respostas da Questão nº 1.

De maneira geral, de acordo com a sua opinião, em que contextos estão inseridos os problemas relacionados ao desaguamento de lodo de esgoto?	
Contextos	Respostas
Econômico	91%
Ambiental	96%
Sanitário (saúde pública)	83%
Social	41%
Técnico	100%

Na Questão nº 2 do questionário, os agentes decisores apontaram quais são as principais consequências da ausência do desaguamento de lodo de esgoto. Os resultados foram apresentados na Tabela 6.2. Uma fração relativamente baixa acrescentou consequências diferentes das mencionadas no questionário. As sugestões foram: custo operacional de manejo do lodo de esgoto, aumento de área de disposição (lagoas), odores, contaminação do solo, aumento do custo para disposição final e aumento do custo de preparação da área de armazenamento. É importante observar que alguns dos itens sugeridos já estavam inseridos nas consequências listadas no questionário.

A Questão nº 3, descrita na Tabela 6.3, solicitava a opinião dos especialistas quanto aos objetivos desejados para um processo de desaguamento de lodo de esgoto. Os objetivos com maior aceitação foram: reduzir os custos, melhorar a eficiência no desaguamento do lodo, reduzir os problemas técnicos e reduzir os impactos ao meio ambiente. Uma fração menor, mas ainda assim representativa, votou na redução dos riscos à segurança e a saúde

e em aumentar os benefícios à comunidade e aos operadores. Nenhum dos especialistas sugeriu objetivos diferentes dos listados no questionário.

Tabela 6.2 – Compilação das respostas da Questão nº 2.

Quais são as principais consequências, na sua opinião, da ausência do desaguamento no tratamento do lodo de ETE?	
Consequências	Respostas
Aumento do custo de transporte do lodo	91%
Poluição de mananciais	76%
Propagação de doenças	67%
Propagação de vetores	68%
Problemas estéticos	63%
Eutrofização de corpos d'água	72%
Aumento do volume para disposição	96%
Aumento na produção de lixiviado (em aterros sanitários)	90%

Tabela 6.3 – Compilação das respostas da Questão nº 3.

Objetivos	Respostas
Reduzir os custos	96%
Reduzir os impactos ao meio ambiente	90%
Aumentar os benefícios a comunidade e aos operadores	74%
Reduzir os riscos à segurança e saúde	76%
Reduzir os problemas técnicos	92%
Melhorar eficiência no desaguamento	95%

A Tabela 6.4 apresenta os resultados da comparação entre as dimensões (econômica, ambiental, social e técnica) e os objetivos calculados por meio da média ponderada das respostas dadas aos objetivos. De acordo com os especialistas as dimensões mais importantes são a econômica, com 96%, e a técnica, com 93,5% dos votos. A dimensão ambiental, mesmo considerada em terceiro lugar, ainda assim recebeu uma votação expressiva com 90% dos votos. A dimensão social, em quarto lugar, com 75% dos votos já não se mostrou muito importante diante da problemática do tema.

Tabela 6.4 – Resultados das dimensões (econômica, ambiental, social e técnica) obtidos com os objetivos referenciados na Tabela 5.3.

Dimensões	Resultado
Econômica	96%
Ambiental	90%
Social	75%
Técnica	93,5%

De acordo com a Questão nº 4, a totalidade dos especialistas concordou que os principais interessados no desaguamento do lodo de esgoto são as prestadoras de serviço de saneamento. Entretanto, as pessoas que realizam o aproveitamento do lodo, os órgãos ambientais e as agências reguladoras também obtiveram uma alta aceitação. Uma fração pequena de especialistas acrescentou outros grupos interessados no desaguamento, as sugestões foram: equipe de operação e fabricantes de equipamentos. A equipe de operação já está incluída quando se refere aos prestadores de serviços de saneamento, porém os fabricantes de equipamentos não haviam sido considerados, mas devem ser incluídos em uma análise futura, pois foram considerados importantes na análise tecnológica do desaguamento. A Tabela 6.5 apresenta os resultados obtidos na consulta.

Tabela 6.5 – Compilação das respostas da Questão nº 4.

Quais são, na sua opinião, os principais interessados (grupo de pessoas ou instituições) no desaguamento do lodo de esgoto?	
Interessados	Fração que concorda
Prestadores de serviço de saneamento	100%
Órgãos ambientais	90%
Agências reguladoras	80%
Comunidade de modo geral	47%
Pessoas que realizam o aproveitamento do lodo	91%

A Questão nº 5 pedia aos especialistas que atribuíssem pesos aos principais interessados no desaguamento de lodo já escolhidos na Questão nº 4, para verificar a relevância desses atores na escolha de alternativas de desaguamento de lodo. Os resultados seguiram a mesma tendência dos resultados apresentados para a questão nº 4 e podem ser observados na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Compilação das respostas da Questão nº 5.

Em sua opinião, com qual relevância as expectativas de cada um desses envolvidos devem ser consideradas na escolha de alternativas de desaguamento de lodo de esgoto?		
Interessados	Pesos Atribuídos	
	Média	Desvio Padrão
Prestadores de serviço de saneamento	9,2	1,6
Órgãos ambientais	8,7	1,5
Agências reguladoras	7,3	3,3
Comunidade de modo geral	5,4	3,1
Pessoas que realizam o aproveitamento do lodo	7,9	2,6

Na Questão nº 6, os especialistas opinaram a respeito de quais critérios devem ser considerados como relevantes na comparação de alternativas de desaguamento de lodo para um caso geral. As respostas são apresentadas na Tabela 6.7. Os critérios que apresentaram menor número de votos foram o “custo de desmobilização” (dimensão econômica), “geração de renda/emprego” (dimensão social) e “impactos negativos na implantação” (dimensão ambiental), ainda assim são considerados importantes segundo a seguinte escala: 0 a 20% - dispensável; 20 a 40% - pouco importante; 40 a 60% - importante; 60 a 80% - muito importante e 80 a 100% - indispensável.

Tabela 6.7 – Compilação das respostas da Questão nº 6.

Crítérios	Fração que concorda
Custo de implantação	100%
Custo de operação e manutenção	100%
Custo de desmobilização	47%
Impactos negativos na implantação	60%
Impactos negativos na operação	90%
Produção de odor	82%
Produção de ruídos e vibrações	61%
Proliferação de vetores	82%
Potencial poluidor do lodo	81%
Contaminação do lençol freático	78%
Geração de renda/emprego	58%
Aceitabilidade do processo de desaguamento	81%
Proteção à segurança e à saúde no trabalho	91%
Eliminação de organismos patogênicos	85%
Emanação de gases e outros subprodutos tóxicos	95%
Complexidade de construção e instalação	74%
Complexidade operacional	90%
Dificuldade de remoção do lodo do processo	95%
Sensibilidade do processo à qualidade do lodo a desaguar	96%
Confiabilidade do processo	100%
Instabilidade na eficiência do processo	86%
Demanda por energia	96%
Demanda por área	96%
Consumo de produtos químicos	100%
Susceptibilidade ao clima	87%
Tempo necessário para o desaguamento	82%
Eficiência no desaguamento do lodo	95%

Os critérios, quando agrupados por dimensões, apresentam os graus de importância mostrados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Grau de importância das dimensões obtidas com os critérios da Tabela 6.7.

Dimensões	Resultado
Econômica	82,3%
Ambiental	76,3%
Social	82%
Técnica	91,4%

6.2 – RESULTADOS DO QUESTIONÁRIO II

Como já explanado, esse segundo questionário continha apenas uma tabela em Excel para que os especialistas pudessem dar pesos aos critérios já selecionados por eles no questionário anterior. Os pesos eram calculados automaticamente para se evitar que os mesmos ultrapassassem 1 (um). A escala de importância para os critérios variava de 0 (zero) a 1 (um). A Tabela 6.9 apresenta os resultados dos pesos atribuídos aos critérios por meio da consulta aos especialistas.

O critério em destaque na Tabela 6.9 foi sugerido pelos especialistas no primeiro questionário e por ser considerado importante foi adicionado para também obter o seu peso.

Na avaliação dos critérios, surgiu um número maior de divergências em comparação com a análise dos objetivos e das dimensões e, conseqüentemente, uma dificuldade maior de se delimitarem tendências. Segundo os especialistas, os critérios mais importantes foram o “custo de operação e manutenção” (dimensão econômica), os “impactos negativos na operação” (dimensão ambiental), a “proteção à segurança e à saúde no trabalho” (dimensão social) e a “eficiência no desaguamento do lodo” (dimensão técnica).

Tabela 6.9 – Compilação dos pesos (escala de 0 a 1) atribuídos aos critérios de avaliação.

Crítérios	Pesos
Custo de implantação	0,10
Custo de operação e manutenção	0,12
Custo de desmobilização	0,03
Impactos negativos na implantação	0,03
Impactos negativos na operação	0,06
Produção de odor	0,04
Produção de ruídos e vibrações	0,02
Proliferação de vetores	0,03
Potencial poluidor do lodo	0,04
Contaminação do lençol freático	0,04
Geração de renda/emprego	0,05
Aceitabilidade do processo de desaguamento	0,05
Proteção à segurança e à saúde no trabalho	0,06
Eliminação de organismos patogênicos	0,05
Emanação de gases e outros subprodutos tóxicos	0,05
Complexidade de construção e instalação	0,02
Complexidade operacional	0,03
Dificuldade de remoção do lodo do processo	0,02
Sensibilidade do processo à qualidade do lodo a desaguar	0,02
Confiabilidade do processo	0,02
Instabilidade na eficiência do processo	0,01
Demanda por energia elétrica	0,03
Demanda por área	0,02
Consumo de produtos químicos	0,02
Susceptibilidade ao clima	0,01
Tempo necessário para o desaguamento	0,02
Eficiência no desaguamento do lodo	0,03
Eficiência de captura de sólidos	0,01

6.3 – COMENTÁRIOS SOBRE A APLICAÇÃO DOS QUESTIONÁRIOS

Alguns dados coletados, tais como aqueles relativos ao contexto, os problemas e os objetivos do desaguamento, revelaram resultados que já eram, de certa forma, esperados entre os profissionais com experiência na área do saneamento. No entanto, a importância desses dados está diretamente relacionada à forma com que os mesmos foram obtidos, ou seja, por meio de uma consulta estruturada e direcionada a profissionais relacionados ao tema. Essa forma de obter dados pode ser usada quando o analista necessita de uma decisão e está impossibilitado de obter dados mais precisos ou quando esses dados são escassos.

Dessa forma, os dados expostos neste Capítulo podem ser usados como norteadores no estudo do desaguamento de lodos de esgoto, já que não há registro de dados consolidados na literatura especializada.

A forma de aplicação dos questionários se mostrou eficaz pela objetividade, praticidade e rapidez da aplicação. A extensa revisão de literatura realizada para confeccionar os questionários também se mostrou vantajosa, dando aos entrevistados uma grande quantidade de opções e possibilidades de respostas.

O campo em branco deixado abaixo de cada questão foi pouco utilizado, havendo duas explicações possíveis: ou os itens listados nos questionários contemplaram uma descrição razoável das situações possíveis; ou os respondentes não tiveram disposição, ou mesmo segurança, para opinar sobre o tema.

Um último comentário a respeito da elaboração dos questionários é quanto à descrição das instruções das questões, pois além de serem concisas e claras, é também necessário que o questionário seja submetido a testes antes de encaminhar para os especialistas. Mesmo com esses cuidados, ainda houve erros, por exemplo, alguns entrevistados deixaram em branco o campo onde deveria constar um valor, mesmo que zero, para os pesos dos critérios no segundo questionário.

Alguns especialistas fizeram comentários sobre a relevância dos critérios e sua ligação ao tipo de lodo, no entanto isso não foi especificado no questionário, devido à necessidade de obter dados gerais, independentemente da região, do tratamento do esgoto e do tipo de lodo.

No segundo questionário, houve comentários a respeito de critérios que deveriam ser incorporados devido ao seu conteúdo. Para os especialistas, os critérios “produção de odor”, “produção de ruídos e vibrações” e “proliferação de vetores” já estão inseridos no critério “impactos negativos na operação”. Isso foi levado em consideração no desenvolvimento da Metodologia de Análise Tecnológica das Alternativas de Desaguamento de Lodo de Esgoto (Capítulo 7).

7 – METODOLOGIA DE ANÁLISE TECNOLÓGICA DAS ALTERNATIVAS DE DESAGUAMENTO DE LODO DE ESGOTO

Neste Capítulo, é descrita a metodologia proposta para realizar a análise tecnológica das diversas alternativas de desaguamento de lodo de esgoto. Essa metodologia foi sistematizada em “fases” para facilitar a compreensão e a reprodução de estudos como esse. Por meio dela, busca-se orientar e instruir decisores e analistas no que diz respeito à obtenção de uma nova tecnologia ou mesmo para avaliar um processo existente em uma dada ETE. É importante destacar que o procedimento proposto deve ser válido de forma geral para ser aplicado em qualquer região ou localidade de interesse, podendo fazer as adaptações necessárias.

Nesse sentido, elaborou-se o fluxograma da Figura 7.1, que é a expressão gráfica da metodologia proposta, construído com base nas estruturas sequenciais de raciocínio de Goicoechea *et al.* (1982) e Chankong e Haimes (1983), que são abordagens clássicas na análise de problemas com multiobjetivos e multicritérios.

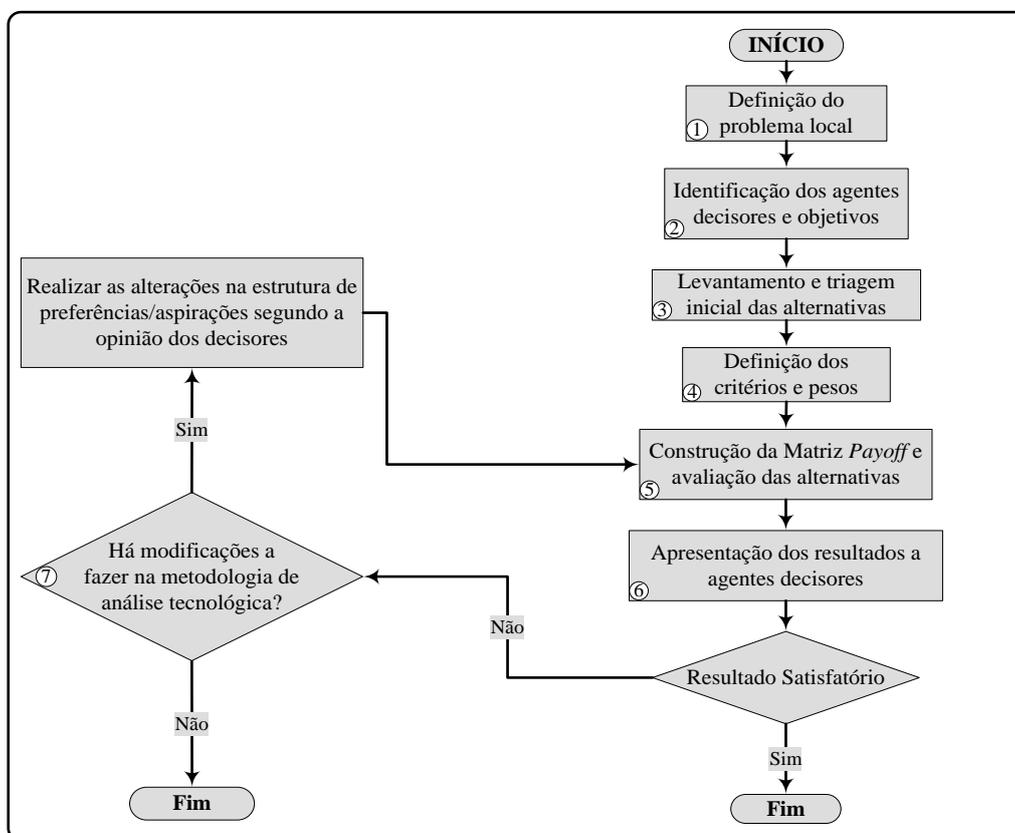


Figura 7.1 – Fluxograma da Metodologia de Análise Tecnológica.

7.1 – DEFINIÇÃO DO PROBLEMA LOCAL (FASE 1)

O problema local pode ser definido pelo próprio analista, levando em consideração as deficiências da ETE. Para embasar a decisão, é importante que seja realizada uma análise das condições locais. A Tabela 7.1 apresenta sugestões de dados importantes que podem auxiliar na definição do problema.

Tabela 7.1 – Sugestão de dados para a definição do problema (Cordeiro, 2010, adaptada).

Categoria de dados	Informações relevantes
Sanitários	<ul style="list-style-type: none">• Quantidade de lodo produzida;• Característica do lodo;• Destinação final dada ao lodo;• Poluição ambiental causada por destinações incorretas.
Geográficos	<ul style="list-style-type: none">• Levantamentos climáticos;• Levantamentos geológicos e topográficos.
Legais	<ul style="list-style-type: none">• Legislação, resoluções e normas ambientais.
Infraestrutura urbana	<ul style="list-style-type: none">• Infraestrutura de saneamento existente (tratamento de esgoto e processamento do lodo).
Políticos	<ul style="list-style-type: none">• Distinção dos responsáveis pelo planejamento, operação e manutenção da infraestrutura de saneamento, especialmente em relação ao processamento do lodo.

Assim, em primeiro lugar, devem-se conhecer as características locais, como, por exemplo, o clima, custo de terreno, custo e disponibilidade de energia e água. Em seguida, inicia-se uma parte importante e indispensável para a análise tecnológica, que é o levantamento dos dados que caracterizam o tipo de estação de tratamento e o lodo gerado. Essas informações podem ser obtidas por meio de entrevista direcionada por questionário, contendo como sugestão, as seguintes informações:

- Para todas as ETEs: descrição do tipo de tratamento de esgoto, croqui das etapas de tratamento, quais tipos de lodo e suas origens, quantidade de lodo, se o lodo é misturado ou segregado no tratamento, quais parâmetros são usados para caracterizá-lo e qual a destinação dada ele.

- ETE que possui algum processo de tratamento de lodo: qual o tipo de processo (natural/mecanizado, manual/mecânico, fechado/aberto) instalado e qual a opinião dos operadores sobre esse processo.
 - Se o processo for mecânico, qual a marca e/ou fabricante, qual a potência do equipamento, seu ano de fabricação, tempo em operação, taxa de aplicação e tipo de limpeza.
- ETE que não possui nenhum processo de tratamento: qual a área disponível, qual a quantidade de sólidos suspensos deseja-se obter, qual a destinação prevista para o lodo, se há previsão de consumo de energia, água, produtos químicos e qual quantidade e qualificação de técnicos.

7.2 – IDENTIFICAÇÃO DOS AGENTES DECISORES E OBJETIVOS (FASE 2)

O processo de análise deve basear-se nos principais objetivos determinados para o caso estudado. Desse modo, a definição de tais objetivos torna-se uma etapa fundamental no processo de seleção.

Para cada caso em estudo, deve-se, então, definir quem são os agentes decisores. A Tabela 7.2 apresenta alguns exemplos de macro-objetivos e os possíveis agentes decisores para a gestão de lodos.

Tabela 7.2 – Macro-objetivos e agentes decisores para a gestão de lodos.

Macro-objetivos	Agentes decisores
Econômico	<ul style="list-style-type: none"> • Prestadores de serviço de saneamento • Decisores financeiros
Ambiental/Sanitário	<ul style="list-style-type: none"> • Órgãos ambientais • Decisores políticos • Agências reguladoras
Social	<ul style="list-style-type: none"> • Comunidade de modo geral • Pessoas que realizam o aproveitamento do lodo
Técnico	<ul style="list-style-type: none"> • Órgãos ambientais • Prestadores de serviço de saneamento
Político	<ul style="list-style-type: none"> • Decisores políticos

Uma vez definidos os principais grupos de decisores envolvidos no problema e os dados relevantes para o contexto estudado, devem ser identificados os interesses isolados de cada grupo em relação às alternativas tecnológicas de desaguamento de lodo de ETE.

Chega-se, então, a um conjunto de objetivos determinado pelos diversos agentes decisores. Os objetivos, por sua vez, deverão ser transformados em metas a serem alcançadas pela alternativa-solução. Essa transformação é um passo delicado do processo, devido à heterogeneidade de objetivos identificados.

A Tabela 7.3 apresenta diversos objetivos do desaguamento que servem de fundamento para definição de critérios. Os operadores e técnicos da ETE foram incluídos como agentes decisores, pois eles são elementos importantes no desempenho operacional desse processo e, portanto, também mantêm expectativas em relação a essas unidades.

Tabela 7.3 – Objetivos do desaguamento, segundo os agentes decisores envolvidos.

Agentes decisores integrantes do contexto do desaguamento	Objetivos/expectativas a serem alcançados
Prestador de serviço de saneamento	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar os custos de implantação/instalação, operação e manutenção • Cumprir as exigências legais • Garantir responsabilidade técnica e financeira
Órgãos ambientais	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar impactos ao meio ambiente • Cumprir as exigências legais ambientais • Garantir condições ambientais adequadas
Decisores financeiros	<ul style="list-style-type: none"> • Garantir a aplicação eficiente dos recursos financeiros
Decisores políticos	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar riscos à saúde pública • Manter uma gestão competente
Comunidade, pessoas que realizam o aproveitamento do lodo e associações não governamentais (ONGs)	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar impactos ao meio ambiente • Maximizar a prática de sustentabilidade ambiental • Minimizar riscos à saúde pública
Operadores e empregados em geral	<ul style="list-style-type: none"> • Maximizar a eficiência no desaguamento do lodo • Minimizar os problemas técnicos • Maximizar os benefícios aos empregados e aos operadores • Maximizar a facilidade operacional • Minimizar a necessidade de manutenção

7.3 – LEVANTAMENTO E TRIAGEM INICIAL DAS ALTERNATIVAS (FASE 3)

São muitas as possibilidades de alternativas que podem ser empregadas no desaguamento de lodos ou, ainda, várias combinações dessas, tanto em série como em paralelo. Por isso deve-se fazer um apanhado global dos principais processos de desaguamento de lodos, conhecidos e estudados na literatura. É importante que tais processos já tenham sido pesquisados, utilizados e testados em ETEs, a fim de que existam dados suficientes para as futuras avaliações.

Paralelamente, a tecnologia de processamento do lodo deve ser escolhida em função do tipo, tamanho e localização da ETE, assim como do destino final pretendido para o lodo desaguado. Outro aspecto a ser analisado é o grau de desenvolvimento econômico e social da região, pois ele pode fornecer uma ideia clara da capacidade da comunidade em absorver, operar e manter uma tecnologia com menor ou maior grau de complexidade.

De acordo com o problema identificado na Fase 1, o analista deve fazer um levantamento de alternativas de desaguamento com o objetivo de solucionar e/ou avaliar o problema encontrado na ETE.

A Tabela 7.4 apresenta algumas das alternativas disponíveis na literatura nacional e internacional para o desaguamento de lodo de esgoto. No entanto, é importante destacar que esses métodos e equipamentos passam por constantes adaptações e modificações e, por isso, o número de alternativas disponíveis para desaguamento de lodo tende a sofrer variações. Note-se que nessa Tabela 7.4 são apresentadas as principais alternativas de desaguamento de lodo encontradas no Brasil e no exterior, com uma breve descrição. A exposição completa dessas alternativas foi apresentada no Capítulo 3 (Revisão e Fundamentação Teórica) no subitem 3.4 (Remoção de Umidade: Desaguamento).

A decisão sobre qual alternativa adotar deve resultar de um balanço entre critérios técnicos, econômicos, ambientais e sociais, levando-se em consideração os aspectos quantitativos e qualitativos de cada alternativa.

Tabela 7.4 – Alternativas para o desaguamento de lodo de ETE

Alternativas	Informações Gerais
Leitos	
Leito de secagem convencional	São estruturas prismáticas (quadradas ou retangulares), geralmente construídas de alvenaria e que são preenchidas por materiais que retêm os sólidos, mas permitem a drenagem da água.
Leito de secagem pavimentado	Esses diferem dos convencionais devido ao material de revestimento utilizado para formar a base do tanque, permitindo o uso de concreto ou asfalto. Permite o uso de equipamentos mecânicos para a limpeza.
Leito de secagem a vácuo	Esse processo é empregado para acelerar o desaguamento do lodo. Ele é obtido por meio de um sistema a vácuo ligado na parte inferior do meio filtrante. O lodo é condicionado com um polímero, esse procedimento ajuda reduzir o tempo para o desaguamento do lodo.
Leito de secagem rápida	Consiste em uma série de procedimentos realizados na base de um leito pra proporcionar a drenagem da água com auxílio de polímeros para aumentar ainda mais o desempenho.
Leitos de secagem de junco	Para estações com capacidade de até 0,2 m ³ /s, são de aparência semelhante às <i>wetlands</i> . Esse método permite a retirada do lodo em períodos bastante dilatados, de 8 a 10 anos.
Leito de secagem com meio artificial	Semelhante ao leito convencional, sua maior diferença é que a sua construção permite o uso de meios artificiais como uma tela (fios de arame) e painéis de poliuretano de alta densidade.
Bags de geotêxtil	Trata-se de uma nova tecnologia para desaguamento constituída de uma membrana geotêxtil de alta resistência para suportar altas pressões na fase de enchimento e cuja superfície permite a drenagem da água contida no lodo.
Lagoa de secagem	São utilizadas para adensar, digerir, desaguar e dispor o lodo. Podem ser temporárias ou permanentes. São normalmente escavadas no solo ou posicionadas em depressões naturais do terreno. O lodo é acumulado por tempo prolongado, de 3 a 5 anos.
Centrífuga	Processo de separação sólido/líquido forçado pela ação de uma força centrífuga. As partículas sólidas que compõem o lodo sedimentam a uma velocidade muito superior ao que ocorreria sob a ação da gravidade. Em seguida ocorre a compactação, onde o lodo perde água capilar sob a ação prolongada da centrifugação.
Filtro a vácuo	Consiste em um tambor cilíndrico rotatório, instalado com submersão parcial em um tanque com lodo condicionado. 10 a 40% da superfície do tambor ficam submersas no tanque, fração essa que constitui a zona de filtração ou formação da torta. Seu emprego entrou em declínio devido ao elevado consumo de energia e a menor eficiência.
Prensa desaguadora	É o equipamento mais utilizado no mundo. O lodo após o condicionamento passa por três estágios, sendo eles: drenagem por gravidade, zona de baixa pressão (compressão) e zona de alta pressão. Esse equipamento pode ser usado para desaguar lodos de concentrações variadas de sólidos.
Filtro prensa de placas	O processo é realizado, principalmente, por uma bomba de alimentação que provoca uma alta pressão para retirar a água e obter maior concentração de sólidos.
Prensa parafuso	Utiliza uma rosca transportadora, também chamada de parafuso sem fim. Após a adição do polímero o lodo é misturado e transportado pelo parafuso que gira dentro de um tanque de reação. O transporte do lodo ao longo da prensa faz com que o filtrado flua para fora e a interface lodo/tela, produz a torta de 20 a 25% de sólido.

7.4 – DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS E PESOS (FASE 4)

Após a consulta aos especialistas (Capítulo 6), foi possível realizar a triagem dos critérios com maior representatividade para esta metodologia. Mas é importante ressaltar que esses critérios não são os únicos para avaliar alternativas de desaguamento de lodo de esgoto, podendo o analista incluir ou excluir critérios em virtude das particularidades do seu caso de estudo.

Os critérios selecionados, a forma de calculá-los (planilhas pontuadas) e os seus respectivos pesos, atribuídos pelos especialistas (Capítulo 6), foram descritos no Capítulo 7.8, devido à importância e ao grande número de informações.

7.5 – CONSTRUÇÃO DA MATRIZ *PAYOFF* E AVALIAÇÃO DAS ALTERNATIVAS (FASE 5)

A construção da matriz *payoff* envolve as alternativas levantadas na Fase 3, a aplicação das planilhas pontuadas ao caso estudado e os pesos atribuídos pelos especialistas a todos os critérios. Dessa forma, o analista obtém todos os dados necessários para a avaliação por meio dos métodos multiobjetivo e multicritério selecionados.

Devido à grande diversidade de métodos, recomenda-se o uso de alguns que já possuem aplicação difundida na área ambiental e relativa simplicidade operacional, sendo eles: Programação de Compromisso, TOPSIS, ELECTRE III e AHP. Outro motivo para a adoção é que esses métodos são passíveis de programação em planilhas eletrônicas com relativa facilidade, constituindo uma ferramenta que não depende necessariamente de programas computacionais comerciais.

Com esses dados em mãos e definidos os métodos multiobjetivo e multicritério a serem usados, deve ser feita a avaliação e ordenamento das alternativas.

7.6 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS A AGENTES DECISORES (FASE 6)

Feita a ordenação das alternativas com os métodos multiobjetivo e multicritério, prossegue-se com uma consulta a agentes decisores, para uma confirmação da solução

(ordenamento das alternativas) e dos dados da matriz *payoff*. Caso a solução se mostre satisfatória segundo o julgamento dos agentes decisores, a equipe prossegue para a finalização da análise tecnológica das alternativas de desaguamento de lodo de esgoto. Caso contrário, será necessário executar a Fase 7.

7.7 – MODIFICAÇÕES NA METODOLOGIA DE ANÁLISE TECNOLÓGICA (FASE 7)

Essa fase é importante devido à possibilidade de o analista realimentar a matriz *payoff* com novos dados de entrada após a consulta aos agentes decisores. Para isso, é necessária uma investigação do motivo da insatisfação. Em seguida, deve-se verificar se há modificações a fazer no sistema de maneira que os resultados atinjam as expectativas estabelecidas inicialmente.

As modificações podem ser tecnológicas ou de recursos financeiros como, por exemplo, a nova alocação de uma maior quantidade de dinheiro por intermédio de um financiamento, que possibilite a execução de alternativas mais complexas ou onerosas. Essa possibilidade pode gerar uma mudança significativa na avaliação e satisfazer as expectativas dos especialistas e/ou agentes decisores. Se há modificações, elas são implementadas (Fase 8) e volta-se às etapas iniciais de descrição do sistema.

Se for constatado que não há modificações a serem feitas, deve-se verificar se os especialistas e/ou agentes decisores estão dispostos a modificar suas preferências. Se os decisores não concordarem em rever suas premissas adotadas e/ou reavaliar suas exigências, a análise tecnológica proposta não oferece soluções adequadas de acordo com a opinião dos especialistas consultados.

7.8 - AVALIAÇÃO DOS CRITÉRIOS PARA A ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS DE DESAGUAMENTO DE LODO

Na Tabela 7.5 são apresentadas as quatro dimensões de avaliação, os critérios que devem ser utilizados na avaliação das alternativas de desaguamento e os pesos atribuídos pelos especialistas.

Para o cálculo dos critérios escolhidos, optou-se pela construção de “planilhas pontuadas”. Essas planilhas foram selecionadas para a análise, pois foram utilizadas com êxito por Brostel (2002), Ribeiro (2003), Mendonça (2009) e Cordeiro (2010). O sistema de pontos segue uma escala de pontuação de 0 (zero) a 100 (cem). Foi estabelecido também que todos os critérios seguiriam o sentido de preferência “crescente”, para facilidade de visualização do desempenho e para correspondência entre os critérios. Significa dizer que, quanto maior a pontuação, melhor o desempenho do critério.

Para proporcionar maior objetividade à análise tecnológica, algumas planilhas pontuadas apresentam como referência tabelas de apoio com dados importantes e os autores. No entanto, essas tabelas de apoio muitas vezes não apresentam valores e sim uma escala do tipo “pequeno – médio – grande”, mas o preenchimento das planilhas pontuadas visa suprir essa deficiência, gerando resultados numéricos para viabilizar e facilitar a análise multiobjetivo e multicritério e a compreensão.

Devido à quantidade de alternativas a serem avaliadas e a escassez de dados na literatura, muitas vezes foi necessário o preenchimento das tabelas de apoio por meio de analogia entre dados presentes nas próprias tabelas, porém de alternativas semelhantes.

A elaboração de algumas das planilhas pontuadas foi realizada por meio de adaptação das planilhas empregadas por Cordeiro (2010) para a gestão de lodos de fossa séptica.

As planilhas pontuadas eventualmente podem apresentar problemas. A sua aplicação em várias e diferentes alternativas é uma vantagem para o processo que deve estar em constante aperfeiçoamento. A aplicação em locais com características climáticas e econômicas muito distintas, caso do nordeste e sul do país, também podem trazer benefícios.

É importante relatar que, neste capítulo, foram considerados apenas os critérios considerados pertinentes para a avaliação das alternativas de desaguamento de lodo. Dessa forma, não constam todos os critérios submetidos à avaliação dos especialistas. No entanto, para a exclusão de alguns critérios levou-se em consideração a pesquisa aos especialistas.

Todos os critérios submetidos a avaliação dos especialistas foram descritos no Capítulo 5 (Considerações para o Desenvolvimento da Metodologia de Análise Tecnológica de Desaguamento de Lodo de Esgoto).

Tabela 7.5 – Critérios e pesos para a avaliação das alternativas de desaguamento de lodo.

Nº	Dimensão	Critério	Pesos
1	Econômica	Custos de implantação	0,15
2		Custos de operação e manutenção	0,10
3	Ambiental	Impactos negativos na implantação	0,06
4		Impactos negativos na operação	0,06
5		Potencial poluidor do lodo	0,06
6		Contaminação do lençol freático	0,06
7		Aceitabilidade do processo de desaguamento	0,06
8		Proteção à segurança e à saúde no trabalho	0,06
9	Social	Eliminação de organismos patogênicos	0,06
10		Emanação de gases e outros subprodutos tóxicos	0,06
11		Complexidade de construção e instalação	0,03
12		Complexidade operacional	0,02
13	Técnica	Dificuldade de remoção do lodo do processo	0,02
14		Sensibilidade do processo à qualidade do lodo a desaguar	0,02
15		Confiabilidade do processo	0,01
16		Instabilidade na eficiência do processo	0,01
17		Demanda por energia elétrica	0,02
18		Demanda por área	0,02
19		Consumo de produtos químicos	0,02
20		Susceptibilidade ao clima	0,01
21		Tempo necessário para o desaguamento	0,01
22		Eficiência no desaguamento do lodo	0,01
23		Eficiência de captura de sólidos	0,01

Para a metodologia de análise tecnológica, foram excluídos os seguintes critérios: “custo de desmobilização”, “produção de odor”, “produção de ruídos e vibrações”, “proliferação de vetores” e “geração de renda/emprego”. Essa ação foi necessária para a objetividade da análise.

7.8.1 – DIMENSÃO ECONÔMICA

A dimensão econômica é, em muitos processos de decisão, considerada determinante, inclusive nos processos que envolvem o tratamento do lodo de esgoto. Atualmente, outros aspectos anteriormente desconsiderados vêm sendo utilizados, como os aspectos ambientais e sociais, no entanto eles foram agregados, mas não diminuíram a importância dos aspectos econômicos.

7.8.1.1 – Custos de implantação

Há diversas maneiras de obter os custos de implantação das alternativas de tratamento de lodo. Uma delas é a estimativa direta dos custos de itens que compõem essa alternativa. Para isso podem ser necessários levantamentos de preços dos processos de desaguamento, do custo do terreno, da mão de obra, dos materiais de construção, da energia elétrica, dentre outros, que podem variar de acordo com cada alternativa de desaguamento, como por exemplo, para o leito de secagem e a centrífuga, que são duas alternativas muito distintas, tanto para a implantação quanto operação. Obter todos esses valores é uma tarefa relativamente dispendiosa, demorada e ainda há as variações regionais de insumos e preços.

A forma proposta neste trabalho para mensurar esse critério é o preenchimento dos itens descritos na planilha da Tabela 7.6 para cada alternativa. Optou-se pela elaboração dessa planilha, ao invés de outro indicador, pela facilidade operacional e rapidez. No entanto, para tornar a avaliação mais completa, foi realizado, no ano de 2010, um levantamento dos preços dos processos, como leito, bag de geotêxtil e prensa desaguadora. Esse levantamento foi realizado por meio de e-mail e telefonemas a empresas instaladas no Brasil que fabricam ou revendem esses equipamentos, informações que constam na Tabela 7.7. Para complementar, além da Tabela 7.7, foi realizado um levantamento de empresas e respectivos equipamentos, local de atuação, site e telefone. A lista com essas informações encontra-se disponível no Apêndice E.

A Tabela 7.8 apresenta a magnitude dos custos de implantação para algumas alternativas de desaguamento de lodo de esgoto levantados na literatura.

Tabela 7.6 – Planilha pontuada para avaliação dos custos de implantação.

CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO		
Itens	Pontuação e Respostas	Pontos Atribuídos
1 - É necessária a destinação de terreno para a construção de instalações do processo de desaguamento?	0 - Sim 10 - Não (vá para o item 2)	
1.1 – Considerando a realidade local, a área necessária para implantação do processo de desaguamento é:	0 - Grande 5 - Média 10 - Pequena	
1.2 – O custo do m ² na região é:	0 - Alto 5 - Médio 10 - Baixo	
2 – É necessário desmatar a área para a implantação da alternativa?	0 - Sim 8 - Não	
3 – A alternativa pode ser construída pelo próprio prestador de serviço de saneamento (leito de secagem, lagoas de lodo)?	0 - Não 30 - Sim	
4 – Qual a necessidade de investimento na construção de novas instalações para implantar a alternativa?	0 - Alta 5 - Média 10 - Baixa	
5 – Será necessário terraplanar o terreno?	0 - Sim 10 - Não (vá para o item 6)	
5.1 – Qual é a necessidade de movimentação de terra?	0 - Alta 4 - Média 8 - Baixa	
6 – O consumo de energia elétrica para implantar a alternativa é:	0 - Alto 4 - Médio 8 - Baixo	
7 – O consumo de água para implantar a alternativa é:	0 - Alto 4 - Médio 8 - Baixo	
8 – Qual a demanda de funcionários para a implantação da alternativa?	0 - Alta 4 - Média 8 - Baixa	
9 – Qual a qualificação dos funcionários exigida para a implantação da alternativa?	0 - Alta 4 - Média 8 - Baixa	
TOTAL	100	

Tabela 7.7 – Valores de equipamentos de desaguamento em empresas instaladas no Brasil.

Alternativas	Valores (R\$)		Empresa/Autor	
Leito de secagem convencional	279,72 R\$/m ²		Schneider e Kirchheim (2001)	
Leito de secagem pavimentado				
Leito de secagem a vácuo				
Leito de secagem rápida	Dados não obtidos		-	
Leito de secagem de junco				
Leito de secagem com meio artificial				
	Altura máxima de enchimento(m)	Volume máximo(m)	Preço(un)	LCB
Bag de geotêxtil	1,98	78	19.500,00	Consultoria Ambiental
	1,98	142	23.500,00	
	2,13	289	28.900,00	
Lagoa de secagem				
Centrífuga	Dados não obtidos		-	
Filtro a vácuo			Feba	
Prensa desaguadora	500.000,00			
	Pequena (1m) – 200.000,00		Degrémont	
	Média – (2m) 280.000,00			
Grande (3m) – 350.000,00				
Filtro prensa de placas	Dados não obtidos		-	
Prensa parafuso				

Tabela 7.8 – Magnitude dos custos de implantação.

Alternativas	Custos de implantação	Fonte
Leito de secagem convencional	Pequeno	Jordão e Pessôa (2009)
		Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Leito de secagem pavimentado	Pequeno	Wang <i>et al.</i> (2006a)
Leito de secagem a vácuo	Pequeno (+)	Por analogia
Leito de secagem rápida	Pequeno	
Leito de secagem de junco	Pequeno	
Leito de secagem com meio artificial	Pequeno (++)	
Bag de geotêxtil	Grande	Miki <i>et al.</i> (2006)
Lagoa de secagem	Pequeno	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Centrífuga	Grande	
Filtro a vácuo	Médio	
Prensas desaguadora	Médio	
Filtro prensa de placas	Médio	
Prensa parafuso	Médio	Por analogia

(+) – Custo superior se comparado aos demais leitos, mas pequeno em relação aos processos mecânicos.

(++) – Custo superior se comparado ao leito convencional e o pavimentado.

7.8.1.2 – Custos de operação e manutenção

Os custos de operação e manutenção podem ditar a viabilidade de uma determinada alternativa, portanto a sua mensuração é de grande relevância. Dessa forma, devem-se levar em consideração diversos fatores na análise, como o consumo de energia elétrica, a demanda por mão de obra, a necessidade de produtos químicos e a instabilidade do processo. A Tabela 7.9 apresenta a planilha pontuada para o critério de custos de operação e manutenção. Na Tabela 7.10 é apresentada a magnitude dos custos de operação e manutenção obtidas por meio da literatura. E a Tabela 7.11 mostra o demanda de manutenção para algumas das alternativas.

Tabela 7.9 – Planilha pontuada para avaliação dos custos de operação.

CUSTOS DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO		
Itens	Pontuação e Respostas	Pontos Atribuídos
1 – Qual a magnitude do consumo de energia elétrica proveniente da operação da alternativa?	0 - Alta 5 - Média 10 - Baixa	
2 – A alternativa exige operação de equipamentos elétricos/mecânicos (bombas, esteiras)?	0 – Sim 15 - Não (vá para o item 3)	
2.1 – Qual é a quantidade de equipamentos exigida?	0 - Grande 4 - Média 8 - Baixa	
3 – A alternativa exige o uso de produtos químicos?	0 - Sim 15 - Não (vá para o item 4)	
3.1 – Qual a quantidade de produtos químicos exigida?	0 - Alta 5 - Média 10 - Baixa	
4 – Qual a demanda de funcionários para a operação da alternativa?	0 - Alta 7,5 - Média 15 - Baixa	
5 – Qual a qualificação dos funcionários exigida para a operação da alternativa?	0 - Alta 7,5 - Média 15 - Baixa	
6 – Qual a qualificação dos funcionários exigida para a manutenção da alternativa?	0 - Alta 7,5 - Média 15 - Baixa	
7 – A operação da alternativa ocorre em regime permanente?	0 - Não 15 - Sim	
TOTAL	100	

Tabela 7.10 – Magnitude dos custos de operação e manutenção.

Alternativas	Custo de operação e manutenção	Fonte	
Leito de secagem convencional	Pequeno	Por analogia	
Leito de secagem pavimentado	Pequeno		
Leito de secagem a vácuo	Médio		
Leito de secagem rápida	Pequeno		
Leito de secagem de junco	Pequeno		
Leito de secagem com meio artificial	Pequeno		
Bag de geotêxtil	Pequeno		
Lagoa de secagem	Pequeno		Jordão e Pessôa (2009)
Centrífuga	Médio		Por analogia
Filtro a vácuo	Médio		
Prensa desaguadora	Pequeno (+)		
Filtro prensa de placas	Grande	Jordão e Pessôa (2009)	
Prensa parafuso	Pequeno (+)	Por analogia	

(+) – Custo inferior se comparado aos demais processos mecânicos.

Tabela 7.11 – Demanda de manutenção.

Alternativas	Demanda de manutenção	Fonte
Leito de secagem convencional	Pequena	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Leito de secagem pavimentado	Pequena	Amuda <i>et al.</i> (2008)
Leito de secagem a vácuo	Pequena (+)	Por analogia
Leito de secagem rápida	Pequena	
Leito de secagem de junco	Pequena	
Leito de secagem com meio artificial	Pequena	Metcalf e Eddy (1991)
Bag de geotêxtil	Pequena	USEPA (2006)
Lagoa de secagem	Pequena	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Centrífuga	Média	
Filtro a vácuo	Média	
Prensa desaguadora	Grande	
Filtro prensa de placas	Grande	
Prensa parafuso	Média	Por analogia

(+) – Demanda superior se comparado aos demais leitos, mas pequena em relação aos processos mecânicos.

7.8.2 – DIMENSÃO AMBIENTAL

Nesta dimensão, serão analisados os critérios associados aos impactos ambientais produzidos pelos processos de desaguamento. A caracterização dos impactos é importante

para a classificação das alternativas e também para possibilitar a proposição de estudos que identifiquem medidas que favoreçam a qualidade ambiental e melhoria das condições de saneamento e saúde pública local. Os critérios selecionados buscam avaliar, de forma geral, os fenômenos diversos que podem perturbar o equilíbrio na ETE e nas áreas indiretamente afetadas.

7.8.2.1 – Impactos negativos na implantação

Este critério tem como objetivo mensurar os impactos ou alterações que podem ocorrer durante a fase de implantação da alternativa, o que é realizado por meio da Tabela 7.12.

Tabela 7.12 – Planilha pontuada para avaliação dos impactos negativos na implantação.

IMPACTOS NEGATIVOS NA IMPLANTAÇÃO		
Itens	Pontuação e Respostas	Pontos Atribuídos
1 – Para a implantação da alternativa será necessário desmatar uma determinada área?	0 - Sim 10 - Não	
2 – Será necessário terraplanar o terreno?	0 - Sim 10 - Não	
3 – A dissipação de partículas sólidas (poeira, aerossol de lodo) no local é considerada significativa?	0 - Sim 10 - Não	
4 – As vibrações e os ruídos causados pela “obra” são considerados prejudiciais aos operários e ao meio ambiente?	0 - Sim 10 - Não	
5 – Houve aumento do tráfego de veículos, sobretudo máquinas pesadas no perímetro da “obra”?	0 - Sim 10 - Não	
6 – Qual o grau de poluição visual a implantação da alternativa causa ao meio ambiente?	0 - Alta 5 - Média 10 - Baixa	
7 – Qual a quantidade de insumos (areia, cimento, bombas) exigida para a realização da “obra”?	0 - Alta 5 - Média 10 - Baixa	
8 – Qual a quantidade de energia elétrica necessária para implantação da alternativa?	0 - Alta 5 - Média 10 - Baixa	
9 – Qual a quantidade de água necessária para implantação da alternativa?	0 - Alta 5 - Média 10 - Baixa	
10 – A produção de resíduos sólidos é considerada significativa?	0 - Sim 10 - Não	
TOTAL	100	

7.8.2.2 – Impactos negativos na operação

A importância deste critério está no fato de ser uma preocupação no longo prazo, já que os possíveis problemas podem persistir por toda a vida útil do projeto. A Tabela 7.13 mostra a forma de realizar a sua avaliação.

Tabela 7.13 – Planilha pontuada para avaliação dos impactos negativos na operação.

IMPACTOS NEGATIVOS NA OPERAÇÃO		
Itens	Pontuação e Respostas	Pontos Atribuídos
1 – Qual a proximidade da ETE de residências?	0 - Muito próxima 4 - Intermediária 8 - Distante	
2 – Qual a intensidade do odor gerado pela alternativa?	0 - Alta (ofensivo) 4 - Médio 8 - Baixa	
3 – Qual a intensidade das vibrações e de ruídos emitidos pela alternativa?	0 - Alta 3 - Média 6 - Baixa 12 - Nenhuma	
4 – A alternativa ajuda a promover a proliferação de vetores na ETE?	0 - Sim 8 - Não (vá para o item 5)	
4.1 – Qual a intensidade de vetores relacionada à alternativa de desaguamento?	0 - Alta 3 - Média 6 - Baixa	
5 – Qual o grau de poluição visual a alternativa causa ao meio ambiente?	0 - Alta 4 - Média 8 - Baixa	
6 – A alternativa causa poluição do solo?	0 - Sim 8 - Não (vá para o item 7)	
6.1 – Qual a intensidade de poluição do solo causada pela alternativa?	0 - Alta 3 - Média 6 - Baixa	
7 – O tráfego de veículos para auxiliar na operação da alternativa é significativo?	0 - Sim 8 - Não	
8 – A dissipação de partículas sólidas no local de operação é considerada significativa?	0 - Sim 8 - Não	
9 – A produção de gases que contribuem para o efeito estufa é considerada significativa?	0 - Sim 8 - Não	
10 – Na operação da alternativa é necessário o consumo de energia elétrica?	0 - Sim 8 - Não	
11 – Na operação da alternativa é necessário o consumo de água?	0 - Sim 8 - Não	
12 – Na operação da alternativa é necessário o uso de produtos químicos?	0 - Sim 8 - Não	
TOTAL	100	

Para auxiliar na avaliação desse critério foram disponibilizadas as Tabelas 7.14, 7.15 e 7.16, que tratam respectivamente da produção de odor, ruídos e vibrações e proliferação de vetores nas alternativas de desaguamento.

Tabela 7.14 – Produção de odor.

Alternativas	Produção de odor	Fonte
Leito de secagem convencional	Média	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Leito de secagem pavimentado	Média	Por analogia
Leito de secagem a vácuo	Pequena	
Leito de secagem rápida	Pequena	
Leito de secagem de junco	Média	
Leito de secagem com meio artificial	Pequena	
Bag de geotêxtil	Pequena	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Lagoa de secagem	Grande	
Centrífuga	Pequena	
Filtro a vácuo	Pequena	
Prensa desaguadora	Pequena	
Filtro prensa de placas	Pequena	USEPA (2006)
Prensa parafuso	Pequena	

Tabela 7.15 – Produção de ruídos e vibrações.

Alternativas	Ruídos e vibrações	Fonte
Leito de secagem convencional	Nenhum	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Leito de secagem pavimentado	Nenhum	Por analogia
Leito de secagem a vácuo	Pequeno	
Leito de secagem rápida	Pequeno	
Leito de secagem de junco	Nenhum	
Leito de secagem com meio artificial	Nenhum	
Bag de geotêxtil	Nenhum	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Lagoa de secagem	Nenhum	
Centrífuga	Grande	
Filtro a vácuo	Médio	
Prensa desaguadora	Médio	
Filtro prensa de placas	Médio	Kukenberger (1996)
Prensa parafuso	Pequeno	

Tabela 7.16 – Proliferação de vetores.

Alternativas	Proliferação de vetores	Fonte
Leito de secagem convencional	Média	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Leito de secagem pavimentado	Média	Por analogia
Leito de secagem a vácuo	Média	
Leito de secagem rápida	Média	
Leito de secagem de junco	Média	
Leito de secagem com meio artificial	Média	
Bag de geotêxtil	Pequena	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Lagoa de secagem	Grande	
Centrífuga	Pequena	
Filtro a vácuo	Pequena	
Prensa desaguadora	Pequena	
Filtro prensa de placas	Pequena	
Prensa parafuso	Pequena	

7.8.2.3 – Potencial poluidor do lodo

Com este critério busca-se mensurar qual é a “probabilidade” que o lodo produzido por uma determinada ETE possui de causar poluição. Para isso, deve-se levar em consideração a quantidade, a qualidade, o tratamento e o tipo de uso ou disposição. A planilha pontuada que avalia esse critério se encontra na Tabela 7.17.

Tabela 7.17 – Planilha pontuada para avaliação do potencial poluidor do lodo.

POTENCIAL POLUIDOR DO LODO		
Itens	Pontuação e Respostas	Pontos Atribuídos
1 – Qual a quantidade de lodo gerada na ETE?	0 - Alta 8 - Média 16 - Baixa	
2 – A qualidade (com relação a umidade e sólidos) do lodo gerado é considerada:	0 - Baixa 7 - Média 14 - Alta	
3 – O lodo apresenta alguma característica (metais tóxicos, compostos orgânicos persistentes) extrema, ou seja, maior do que a considerada normal?	0 - Sim 14 - Não	
4 – O lodo recebe algum pré-tratamento (adensamento, estabilização, condicionamento)?	0 - Não (vá para o item 5) 14 - Sim	
4.1 – O pré-tratamento é considerado adequado segundo as leis ambientais?	0 - Não 10 - Sim	

CONTINUAÇÃO: POTENCIAL POLUIDOR DO LODO		
5 – Existem corpos hídricos próximos a ETE?	0 - Sim 14 - Não (vá para o item 6)	
5.1 – A alternativa em análise pode causar poluição do solo e de corpos hídricos?	0 - Sim 10 - Não	
6 – A umidade do lodo após o tratamento é considerada adequada para o tipo de uso ou disposição?	0 - Não 14 - Sim	
7 – A destinação ou uso dado ao lodo é considerado adequado?	0 - Não 14 - Sim	
TOTAL	100	

7.8.2.4 – Contaminação do lençol freático

Para a mensuração deste critério, levou-se em consideração que as alternativas de desaguamento em algum momento de sua implantação, operação e manutenção pudessem, por algum motivo, vir a causar contaminação do lençol freático. Para responder a planilha pontuada, Tabela 7.18, pode-se observar os dados da Tabela 7.19.

Tabela 7.18 – Planilha pontuada para avaliação da contaminação do lençol freático.

CONTAMINAÇÃO DO LENÇOL FREÁTICO		
Itens	Pontuação e Respostas	Pontos Atribuídos
1 – O lodo recebe algum pré-tratamento?	0 - Não (vá para o item 2) 12 - Sim	
1.2 – O pré-tratamento é considerado adequado segundo as leis ambientais?	0 - Não 6 - Sim	
2 – A alternativa de desaguamento escolhida oferece risco de contaminação do lençol freático?	0 - Sim 12 - Não	
3 – O solo e sua declividade são adequados para a implantação da alternativa?	0 - Não (vá para o item 4) 12 - Sim	
3.1 – Em caso de acidente, o solo será capaz de evitar que a poluição chegue ao lençol freático?	0 - Não 6 - Sim	
4 – A umidade do lodo após o desaguamento é considerada adequada para a sua remoção e transporte?	0 - Não 12 - Sim	
5 – Na remoção do lodo e na limpeza da alternativa de desaguamento, qual é o risco de ocorrer vazamentos que possam alcançar o solo e por consequência o lençol freático?	0 - Alto 7 - Médio 14 - Baixo	
6 – No ato da limpeza da alternativa de desaguamento, os resíduos dessa ação possuem um destino adequado?	0 - Não 12 - Sim	

CONTINUAÇÃO: CONTAMINAÇÃO DO LENÇOL FREÁTICO		
7 – Em caso de possíveis acidentes, qual a magnitude de poluição do solo que a alternativa pode causar?	0 - Alta 7 - Média 14 - Baixa	
8 – A alternativa trabalha ou trabalhará protegida das intempéries?	0 - Não (vá para o item 8.1) 12 - Sim	
8.1 – Em caso de chuva, pode ocorrer o transbordamento ou vazamento do lodo armazenado na alternativa?	0 - Sim 6 - Não	
TOTAL	100	

Tabela 7.19 – Magnitude da contaminação do lençol freático.

Alternativas	Contaminação do lençol freático	Fonte
Leito de secagem convencional	Médio (+)	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Leito de secagem pavimentado	Médio	
Leito de secagem a vácuo	Médio	
Leito de secagem rápida	Médio	
Leito de secagem de junco	Médio (+)	Por analogia
Leito de secagem com meio artificial	Médio	
Bag de geotêxtil	Médio	
Lagoa de secagem	Grande	
Centrífuga	Pequeno	
Filtro a vácuo	Pequeno	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Prensa desaguadora	Pequeno	
Filtro prensa de placas	Pequeno	
Prensa parafuso	Pequeno	Por analogia

(+) – O leito de junco, assim como o leito convencional, possui a mesma magnitude de contaminação do lençol freático. As chances de ocorrer contaminação são maiores para esses do que se comparado aos demais tipos de leitões e menores com relação aos processos mecânicos.

7.8.3 – DIMENSÃO SOCIAL

A utilização de critérios sociais propõe tratar assuntos relacionados ao bem-estar da população e dos operadores das ETEs, que direta ou indiretamente podem ser afetados pelos efeitos do desaguamento do lodo de esgoto. Atualmente, os aspectos sociais tem recebido maior importância diante da tomada de decisão. Esse fato está relacionado à reivindicação da população em optar por projetos que causem melhoria na saúde pública e menor impacto ao meio ambiente.

7.8.3.1 – Aceitabilidade do processo de desaguamento

Este critério leva em consideração a população do entorno da ETE e os funcionários que direta ou indiretamente entram em contato com a alternativa na sua operação. É um critério com alta intangibilidade e de difícil mensuração. A Tabela 7.20 apresenta a planilha pontuada proposta. Para a sua aplicação é necessário um conhecimento prévio do local.

Tabela 7.20 – Planilha pontuada para avaliação da aceitabilidade do processo.

ACEITABILIDADE DO PROCESSO DE DESAGUAMENTO		
Itens	Pontuação e Respostas	Pontos Atribuídos
1 – Qual a proximidade da ETE a residências?	0 - Alta 5 - Média 10 - Baixa	
2 – Qual a possibilidade de rejeição por parte da população local em geral a implantação da alternativa de desaguamento?	0 - Alta 5 - Média 10 - Baixa	
3 – A alternativa pode ser adaptada de acordo com as exigências da população?	0 - Não 10 - Sim	
4 – Qual a intensidade do odor gerado pela alternativa?	0 - Alta 4 - Média 8 - Baixa	
5 – Qual a intensidade das vibrações e de ruídos emitidos pela alternativa?	0 - Alta 2 - Média 4 - Baixa 8 - Nenhuma	
6 – A alternativa ajuda a promover a proliferação de vetores na ETE?	0 - Sim 10 - Não (vá para o item 7)	
6.1 – Qual a intensidade de vetores relacionada à alternativa de desaguamento?	0 - Alta 4 - Média 8 - Baixa	
7 – A dissipação de partículas sólidas (poeira) no local é considerada significativa?	0 - Sim 10 - Não	
8 – Qual o grau de poluição visual causado pela alternativa?	0 - Alto 4 - Médio 8 - Baixo	
9 – A equipe técnica da ETE promove orientações à população sobre os processos de tratamento do lodo?	0 - Não 10 - Sim	
10 – Qual o grau de participação da população no processo decisório ao longo do tempo?	0 - Nenhum 2 - Durante a implantação 4 - Desde o período de projeto 8 - Durante todo o processo	
11 – Qual o grau de participação dos operadores / técnicos no processo decisório ao longo do tempo?	0 - Nenhum 2 - Durante a implantação 4 - Desde o período de projeto 8 - Durante todo o processo	
TOTAL	100	

7.8.3.2 – Proteção à segurança e à saúde no trabalho

Neste critério, levaram-se em consideração os diversos fatores que norteiam a operação dos processos de desaguamento de lodo. Foi considerado que os operadores fazem uso de equipamentos de proteção individual. A planilha pontuada para avaliar esse critério encontra-se na Tabela 7.21.

Tabela 7.21 – Planilha pontuada para avaliação da proteção à segurança e à saúde no trabalho.

PROTEÇÃO À SEGURANÇA E À SAÚDE NO TRABALHO		
Itens	Pontuação e Respostas	Pontos Atribuídos
1 – Qual a frequência de contaminação de operadores no tratamento do lodo?	0 - Alta 6 - Média 12 - Baixa	
2 – Qual a dificuldade operacional da alternativa?	0 - Alta 4 - Média 10 - Baixa	
3 – Qual o grau de operação manual que essa alternativa exige?	0 - Alto 4 - Médio 8 - Baixo 12 - Nenhum	
4 – Qual o grau de acidentes e doenças relacionadas à operação de processos de tratamento de lodo?	0 - Alto 6 - Médio 12 - Baixo	
5 – Qual o grau de esforço físico exigido para operar a alternativa?	0 - Alto 6 - Médio 12 - Baixo	
6 – Os operadores trabalham em turnos e em grupo?	0 - Não 12 - Sim	
7 – Qual a intensidade das vibrações e de ruídos emitidos pela alternativa?	0 - Alta 2 - Média 4 - Baixa 10 - Nenhuma	
8 – A alternativa ajuda a promover a proliferação de vetores na ETE?	0 - Sim 10 - Não (vá para o item 7)	
8.1 – Qual a intensidade de vetores relacionada à alternativa de desaguamento?	0 - Alta 4 - Média 8 - Baixa	
9 – A dissipação de partículas sólidas no local é considerada significativa?	0 - Sim 10 - Não	
TOTAL	100	

7.8.3.3 – Eliminação de organismos patogênicos

A eliminação de organismos patogênicos é importante devido ao uso ou destinação posterior do lodo. No entanto, o processo de desaguamento não tem a função básica de eliminar os patógenos, mas determinadas características de algumas alternativas podem auxiliar na diminuição dos patógenos, sendo esse o intuito desse critério. A Tabela 7.22 apresenta a planilha pontuada para a avaliação desse critério.

Tabela 7.22 – Planilha pontuada para avaliação da eliminação dos organismos patogênicos.

ELIMINAÇÃO DOS ORGANISMOS PATOGÊNICOS		
Itens	Pontuação e Respostas	Pontos Atribuídos
1 – A saúde da população com relação a organismos patogênicos na região onde será implantada a alternativa é considerada:	0 - Muito ruim 2 - Ruim 4 - Regular 6 - Boa 8 - Muito boa 16 - Ótima	
2 – Qual o nível de tratamento do esgoto que gerou o lodo a ser tratado?	0 - Primário 3 - Secundário 6 - Terciário 12 - Avançado	
3 – O lodo recebe algum pré-tratamento?	0 – Não (vá para o item 4) 12 - Sim	
3.1 – O pré-tratamento dado ao lodo antes do desaguamento é considerado adequado?	0 - Não 12 - Sim	
4 – Qual a magnitude do tempo de operação considerado para a alternativa?	0 - Baixo 6 - Médio 12 - Alto	
5 – O lodo em tratamento na alternativa fica exposto ao sol?	0 - Não 12 - Sim	
6 – Ocorre crescimento de vegetação no lodo em tratamento na alternativa avaliada?	0 - Não 12 - Sim	
7 – Na operação da alternativa é aplicado algum produto químico que possa ocasionar a diminuição dos organismos patogênicos?	0 - Não 12 - Sim	
8 – A umidade do lodo ao fim do tratamento na alternativa é considerada:	0 - Alta 6 - Média 12 - Baixa	
TOTAL	100	

7.8.3.4 – Emissão de gases e outros subprodutos tóxicos

No questionário submetido para a avaliação dos especialistas existia o critério “produção de odor”, o qual foi retirado dessa etapa da pesquisa, pois foi considerado, junto com outros dois critérios (“produção de ruídos e vibrações” e “produção de vetores”), parte integrante do critério “Impactos negativos na operação”. Portanto, nos critérios “emissão de gases e outros subprodutos tóxicos” são considerados os gases emanados e os subprodutos gerados, pois o manejo adequado desses resíduos é parte fundamental para a saúde pública. A planilha pontuada da Tabela 7.23 traz as questões para a avaliação desse critério.

Tabela 7.23 – Planilha pontuada para avaliação do critério emissão de gases e outros subprodutos tóxicos.

EMANAÇÃO DE GASES E OUTROS SUBPRODUTOS TÓXICOS		
Itens	Pontuação e Respostas	Pontos Atribuídos
1 – Qual a proximidade da ETE a residências?	0 - Alta 7,5 - Média 15 - Baixa	
2 – Os terrenos próximos a ETE são prejudicados pela emissão de gases ou pela geração de subprodutos por causa da operação da alternativa de desaguamento?	0 - Sim 10 - Não	
3 – A operação da alternativa ocorre em ambiente aberto?	0 – Sim 10 - Não	
4 – Na operação da alternativa é usado algum produto químico que diminua a emissão de gases?	0 – Não (vá para o item 5) 10 – Sim	
4.1 – O produto químico utilizado para diminuir o odor ocasiona aumento do lodo?	0 - Sim 10 - Não	
5 – Os gases emanados na operação da alternativa são considerados tóxicos a saúde?	0 - Sim 10 - Não	
6 – Os gases liberados recebem algum tipo de tratamento?	0 - Não 10 - Sim	
7 – A ETE possui aproveitamento de gases (biogás), como por exemplo, para a geração de energia elétrica?	0 - Não 10 - Sim	
8 – O líquido drenado no processo de desaguamento recebe tratamento adequado?	0 - Não 10 - Sim	
9 – Qual o grau de elevação de partículas no ato da remoção do lodo desaguado da alternativa?	0 - Alto 7,5 - Médio 15 - Baixo	
TOTAL	100	

7.8.4 – DIMENSÃO TÉCNICA

Os critérios a serem considerados nesta dimensão dizem respeito às implicações hidráulicas, climáticas, operacionais, tempo de operação, manutenção e eficiência do desaguamento. Por meio desses critérios, pode ser avaliada a complexidade de cada processo, e, por isso, essa dimensão tem fundamental importância na análise tecnológica de alternativas de desaguamento de lodo de esgoto.

7.8.4.1 – Complexidade de construção e instalação

A construção e a instalação são peculiares para cada alternativa de desaguamento de lodo de esgoto. A Tabela 7.24 apresenta a planilha pontuada para a avaliação de diversos fatores que devem ser levados em consideração no momento da análise tecnológica dessas alternativas.

A Tabela 7.25 apresenta a avaliação da magnitude da complexidade de construção e instalação para as alternativas de desaguamento de lodo.

Tabela 7.24 – Planilha pontuada para avaliação do critério complexidade de construção e instalação.

COMPLEXIDADE DE CONSTRUÇÃO E INSTALAÇÃO		
Itens	Pontuação e Respostas	Pontos Atribuídos
1 – Existe a necessidade de escavações no momento da construção e instalação dessa alternativa?	0 - Sim 15 – Não	
2 – Qual a quantidade de material de construção (areia, tijolos, concreto) necessária?	0 - Alta 7,5 - Média 15 – Baixa 20 - Nenhuma	
3 – Qual a quantidade de material hidráulico (tubos, conexões, bombas) necessário?	0 - Alta 7,5 - Média 15 – Baixa 20 - Nenhuma	
4 – Qual a quantidade de mão de obra necessária para a construção ou instalação da alternativa?	0 - Alta 7 - Média 15 – Baixa	
5 – Qual o nível de especialização da mão de obra para a construção e instalação da alternativa?	0 – Alto 15- Médio 30 – Baixo	
TOTAL	100	

Tabela 7.25 – Magnitude da complexidade de construção e instalação.

Alternativas	Complexidade de construção e instalação	Fonte
Leito de secagem convencional	Pequena	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Leito de secagem pavimentado	Pequena (+)	
Leito de secagem a vácuo	Pequena (+)	
Leito de secagem rápida	Pequena	Por analogia
Leito de secagem de junco	Pequena	
Leito de secagem com meio artificial	Pequena (+)	
Bag de geotêxtil	Pequena (+)	
Lagoa de secagem	Pequena	
Centrífuga	Média	
Filtro a vácuo	Média	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Prensa desaguadora	Média	
Filtro prensa de placas	Média	
Prensa parafuso	Média	Por analogia

(+) – A complexidade de construção e instalação dos leitos de secagem em geral é pequena comparada aos processos mecânicos, no entanto, se comparados apenas entre os tipos de leitos existem alguns mais complexos do que outros.

7.8.4.2– Complexidade operacional

A complexidade operacional está relacionada a itens essenciais como tecnologia usada e grau de automação. A Tabela 7.26 apresenta a planilha pontuada para avaliar esse critério.

Tabela 7.26 – Planilha pontuada para avaliação do critério complexidade operacional.

COMPLEXIDADE OPERACIONAL		
Itens	Pontuação e Respostas	Pontos Atribuídos
1 – A alternativa possui uma tecnologia complexa?	0 - Sim 25 - Não	
2 – Para o funcionamento da alternativa é necessário a incorporação de outros equipamentos (esteira, raspadores, contêiner)?	0 - Sim 25 - Não	
3 – Qual o grau de automação (execução automática de tarefas)?	0 - Nenhum 5 - Baixo 10 - Médio 25 - Alto	
4 – É necessária mão de obra qualificada para a operação da alternativa?	0 - Sim (vá para o item 4.1) 25 - Não	
4.1 – Qual a magnitude dessa mão de obra?	0 - Alta 5 - Média 10 - Baixa	
TOTAL	100	

A Tabela 7.27 apresenta a magnitude da complexidade operacional.

Tabela 7.27 – Magnitude da complexidade operacional das alternativas de desaguamento.

Alternativas	Complexidade operacional	Fonte
Leito de secagem convencional	Pequena	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Leito de secagem pavimentado	Pequena	
Leito de secagem a vácuo	Pequena (+)	
Leito de secagem rápida	Pequena	Por analogia
Leito de secagem de junco	Pequena	
Leito de secagem com meio artificial	Pequena	
Bag de geotêxtil	Pequena	
Lagoa de secagem	Pequena	
Centrífuga	Média	
Filtro a vácuo	Média	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Prensa desaguadora	Média	
Filtro prensa de placas	Grande	
Prensa parafuso	Média	Por analogia

(+) – Alternativa considerada mais complexa do que os demais leitos, no entanto, menos complexa que os processos mecânicos.

7.8.4.3 – Dificuldade de remoção do lodo do processo

A remoção do lodo desaguado pode ser manual ou mecanizada e essa operação pode se tornar mais ou menos complexa de acordo com o tipo de alternativa. Para a verificação desse critério, foi proposta a planilha pontuada da Tabela 7.28 e para apoio a Tabela 7.29.

Tabela 7.28 – Planilha pontuada para avaliação do critério dificuldade de remoção do lodo do processo.

DIFICULDADE DE REMOÇÃO DO LODO DO PROCESSO		
Itens	Pontuação e Respostas	Pontos Atribuídos
1 – A remoção do lodo é:	0 - Manual 20 - Mecanizada	
2 – A alternativa possui esteiras que ao longo do desaguamento transportam o lodo removido do processo?	0 - Não 40 - Sim	
3 – A textura do lodo desaguado na alternativa facilita a sua remoção?	0 - Não 40 - Sim	
TOTAL	100	

Tabela 7.29 – Magnitude da dificuldade de remoção do lodo do processo.

Alternativas	Dificuldade de remoção do lodo do processo	Fonte
Leito de secagem convencional	Média	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Leito de secagem pavimentado	Pequena	Por analogia
Leito de secagem a vácuo	Pequena	
Leito de secagem rápida	Pequena	USEPA (2006)
Leito de secagem de junco	Grande	Por analogia
Leito de secagem com meio artificial	Pequena	
Bag de geotêxtil	Pequena	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Lagoa de secagem	Grande	
Centrífuga	Pequena	
Filtro a vácuo	Pequena	
Prensa desaguadora	Pequena	
Filtro prensa de placas	Pequena	Por analogia
Prensa parafuso	Pequena	

7.8.4.4– Sensibilidade do processo à qualidade do lodo a desaguar

Alguns dos processos de desaguamento de lodo exigem lodo com diferentes características, ou seja, alguns processos são mais exigentes quanto à qualidade do lodo, teor de sólidos, condicionamento e aplicação de polímeros. A Tabela 7.30 apresenta a planilha pontuada para avaliar essa sensibilidade.

Tabela 7.30 – Planilha pontuada para avaliação do critério sensibilidade do processo à qualidade do lodo a desaguar.

SENSIBILIDADE DO PROCESSO À QUALIDADE DO LODO A DESAGUAR		
Itens	Pontuação e Respostas	Pontos Atribuídos
1 – O tratamento de esgoto é anaeróbico?	0 - Não 25 - Sim	
2– O lodo recebe algum pré-tratamento?	0 - Não 25 - Sim	
3 – Qual é a exigência da alternativa em relação ao teor de sólidos do lodo a desaguar?	0 -Alta 7,5 - Média 15 - Baixa 25 - Nenhuma	
4 – O lodo precisa sofrer algum tipo de pré-condicionamento antes do desaguamento?	0 - Sim 25 - Não	
TOTAL	100	

A Tabela 7.31 apresenta a magnitude da dificuldade encontrada para remover o lodo das alternativas de desaguamento.

Tabela 7.31 – Magnitude da sensibilidade do processo à qualidade do lodo a desaguar de algumas alternativas de desaguamento.

Alternativas	Sensibilidade do processo à qualidade do lodo a desaguar	Fonte
Leito de secagem convencional	Pequena	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Leito de secagem pavimentado	Pequena	
Leito de secagem a vácuo	Pequena (+)	
Leito de secagem rápida	Pequena (+)	Por analogia
Leito de secagem de junco	Pequena	
Leito de secagem com meio artificial	Pequena (+)	
Bag de geotêxtil	Pequena	USEPA (2006)
Lagoa de secagem	Pequena	
Centrífuga	Grande	
Filtro a vácuo	Média	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Prensa desaguadora	Média	
Filtro prensa de placas	Média	
Prensa parafuso	Média	Por analogia

(+) – São pouco sensíveis como os demais leitos, no entanto exigem o uso de produtos químicos e os demais não.

7.8.4.5 – Confiabilidade do processo

Segundo Dhillon (1983, *apud* Brostel, 2002), o estudo da confiabilidade teve início no período da Segunda Guerra Mundial, e desde então, tem crescido e sido aplicado em diferentes áreas. A confiabilidade é dividida em duas categorias: a confiabilidade de projeto e a confiabilidade operacional. A primeira categoria inclui o estudo de alguns itens, como análise de confiabilidade, verificação de projetos e análise de testes de confiabilidade, enquanto que a segunda trata da análise de falhas, registros de operação e ações corretivas.

Para a verificação da confiabilidade do processo, será utilizada uma planilha pontuada, contida na Tabela 7.32, para que seja feita a verificação de alguns itens essenciais. A Tabela 7.33 apresenta fatores que podem influenciar no desaguamento do lodo. Os motivos apontados podem ajudar no preenchimento da planilha pontuada (Tabela 7.32).

Tabela 7.32 – Planilha pontuada para avaliação do critério confiabilidade do processo.

CONFIABILIDADE DO PROCESSO		
Itens	Pontuação e Respostas	Pontos Atribuídos
1 – Frequência com que o processo apresenta falhas?	0 - Alta 7,5 - Média 15 - Baixa	
2 – Qual o risco de o processo ser interrompido?	0 - Alto 5 - Médio 10 - Baixo	
3 – A alternativa é dependente da assistência técnica de terceiros?	0 – Sim 15 – Não (vá para o item 4)	
3.1 – Qual o grau de dependência?	0 - Alta 7,5 - Média 15 - Baixa	
4 – Em caso de falha, qual a possibilidade de contaminação do solo e de mananciais tanto superficiais quanto subterrâneos?	0 - Alta 5 - Média 10 - Baixa 15 - Nenhuma	
5 – Qual a dificuldade de monitorar o funcionamento do processo?	0 - Alta 7,5 - Média 15 - Baixa	
6 – Qual a possibilidade de realizar ações preventivas?	0 - Baixa 7,5 - Média 15 - Alta	
7 – Qual a possibilidade de realizar ações corretivas?	0 - Baixa 7,5 - Média 15 - Alta	
TOTAL	100	

Tabela 7.33 – Fatores que influenciam no desaguamento de lodo de esgoto.

Fatores que influenciam no desaguamento	Motivos
Lodo primário e lodo secundário no lodo a ser desaguado	O lodo secundário retém no desaguamento o dobro da quantidade de água retida no lodo primário (em kg de água/kg ST).
Tipo de lodo secundário	Lodos provenientes de processos com idade de lodo elevada retêm mais água do que lodos de processos com idade de lodo menor. Exemplo: Lodo com organismos filamentosos ou intumescidos.
Condicionamento do lodo	A utilização de produtos químicos pode aumentar significativamente o desempenho do processo de desaguamento.
Atualidade do processo de desaguamento	Os processos antigos, normalmente, são menos eficientes do que os mais modernos.
Projeto e operação	Equipamentos operados em condições próximas da sua capacidade limite produzem uma torta com menos sólidos (de 3 a 5% de ST a menos).
Descargas industriais	Descargas industriais podem afetar positiva ou negativamente o desempenho da etapa de desaguamento.

7.8.4.6 – Instabilidade na eficiência do processo

Este critério é importante para avaliar a eficiência do processo como um todo, pois há processos que produzem um lodo com alto teor de sólidos, porém constantemente se encontram fora de serviço para manutenção. A Tabela 7.34 apresenta a planilha pontuada para avaliação desse critério.

Tabela 7.34 – Planilha pontuada para avaliação do critério instabilidade na eficiência do processo.

INSTABILIDADE NA EFICIÊNCIA DO PROCESSO		
Itens	Pontuação e Respostas	Pontos Atribuídos
1 – Qual a frequência com que a alternativa necessita de manutenção?	0 - Alta 20 - Média 40 - Baixa	
2 – Enquanto a alternativa permanece em manutenção, é possível prosseguir no desaguamento?	0 - Não 40 - Sim	
3 – A alternativa opera em batelada?	0 - Não 20 - Sim	
TOTAL	100	

7.8.4.7 – Demanda por energia elétrica

A Tabela 7.35 apresenta a planilha pontuada com as questões para avaliação deste critério

Tabela 7.35 – Planilha pontuada para avaliação do critério demanda por energia elétrica.

DEMANDA POR ENERGIA ELÉTRICA		
Itens	Pontuação e Respostas	Pontos Atribuídos
1 – Qual a magnitude de energia elétrica (potência instalada) que a alternativa demanda?	0 - Alta 10 - Média 20 - Baixa 30 - Nenhuma	
2 – Qual o período de funcionamento de equipamentos (como bombas e esteiras)?	0 - Alta 10 - Média 20 - Baixa 30 - Nenhuma	
3 – A companhia de energia elétrica local garante o fornecimento de energia constante (com qualidade e quantidade)?	0 - Não 20 - Sim	
4 – Em caso de falta de energia, a ETE dispõe de gerador próprio para continuar o tratamento?	0 - Não 20 - Sim	
TOTAL	100	

A Tabela 7.36 apresenta dados sobre a demanda por energia elétrica das alternativas de desaguamento.

Tabela 7.36 – Magnitude da demanda por energia das alternativas de desaguamento.

Alternativas	Demanda por energia elétrica	Fonte
Leito de secagem convencional	Nenhuma	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Leito de secagem pavimentado	Nenhuma	Por analogia
Leito de secagem a vácuo	Média	
Leito de secagem rápida	Nenhuma	
Leito de secagem de junco	Nenhuma	
Leito de secagem com meio artificial	Nenhuma	
Bag de geotêxtil	Nenhuma	
Lagoa de secagem	Nenhuma	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Centrífuga	Média	
Filtro a vácuo	Grande	
Prensa desaguadora	Média	
Filtro prensa de placas	Grande	
Prensa parafuso	Média	

7.8.4.8 – Demanda por área

Da mesma forma que os outros critérios, a demanda por área varia de acordo com o tipo de alternativa, normalmente os processos mecanizados usam menos espaço físico que os naturais. Assim, a Tabela 7.37 apresenta a planilha pontuada para avaliação desse critério. Na Tabela 7.38 podem-se obter dados que auxiliam o preenchimento da planilha.

Tabela 7.37 – Planilha pontuada para avaliação do critério demanda por área.

DEMANDA POR ÁREA		
Itens	Pontuação e Respostas	Pontos Atribuídos
1 – Considerando a realidade local, a área necessária para implantação da alternativa de desaguamento é:	0 - Grande 13 - Média 26 - Pequena	
2 – Considerando a realidade local, o custo do m ² na região é:	0 - Alto 13 - Médio 26 - Baixo	
3 – Há a necessidade de área extra para instalação de outros equipamentos (como esteiras)?	0 - Sim 24 - Não	
4 – Há a necessidade de área para o acesso de veículos para o transporte do lodo desaguado?	0 - Sim 24 - Não	
TOTAL	100	

Tabela 7.38 – Magnitude da demanda por área das alternativas de desaguamento.

Alternativas	Demanda por área	Fonte
Leito de secagem convencional	Grande	Gonçalves <i>et al.</i> (2001)
Leito de secagem pavimentado	Grande	Turoskiy e Mathai (2006)
Leito de secagem a vácuo	Médio	
Leito de secagem rápida	Grande	
Leito de secagem de junco	Grande	Por analogia
Leito de secagem com meio artificial	Grande	
Bag de geotêxtil	Médio	
Lagoa de secagem	Grande	
Centrífuga	Pequena	
Filtro a vácuo	Pequena	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Prensa desaguadora	Média	
Filtro prensa de placas	Pequena	
Prensa parafuso	Pequena	Por analogia

7.8.4.9 – Consumo de produtos químicos

Algumas alternativas de desaguamento de lodo de esgoto exigem o uso de produtos químicos que auxiliam no desaguamento. Assim, a operação de algumas alternativas se torna mais onerosa do que outras. Na Tabela 7.39 é apresentada a planilha pontuada para avaliação desse critério e na Tabela 7.40 a magnitude do Consumo de produtos químicos.

Tabela 7.39 – Planilha pontuada para avaliação do critério Consumo de produtos químicos.

CONSUMO DE PRODUTOS QUÍMICOS		
Itens	Pontuação e Respostas	Pontos Atribuídos
1 – A alternativa exige a aplicação de produtos químicos (cal virgem, sulfato de alumínio, cloreto férrico)?	0 - Sim 100 – Não (acaba aqui)	
1.1 – A quantidade exigida é considerada:	0 - Alta 12,5 - Média 25 - Baixa	
1.2 – Considerando a realidade local, o custo do produto químico usado é considerado?	0 - Alto 12,5 - Médio 25 - Baixo	
1.3 – O lodo recebe algum pré-tratamento antes da aplicação do produto químico?	0 - Não 25 - Sim	
1.4 – A aplicação do produto é:	0 - Manual 25 - Mecanizada	
TOTAL	100	

Tabela 7.40 – Magnitude do Consumo de produtos químicos.

Alternativas	Consumo de produtos químicos	Fonte
Leito de secagem convencional	Pequeno	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Leito de secagem pavimentado	Nenhum	
Leito de secagem a vácuo	Médio	
Leito de secagem rápida	Médio	
Leito de secagem de junco	Nenhum	Por analogia
Leito de secagem com meio artificial	Médio	
Bag de geotêxtil	Nenhum	
Lagoa de secagem	Nenhum	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Centrífuga	Grande	
	3 kg/ton	Jordão e Pessôa (2009)
Filtro a vácuo	Grande	
Prensa desaguadora	Grande	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Filtro prensa de placas	Grande	
	4 a 6 kg/MS	Jordão e Pessôa (2009)
Prensa parafuso	Grande	Por analogia

7.8.4.10– Susceptibilidade ao clima

As alternativas de desaguamento de lodo possuem diferentes susceptibilidades quanto às ações do tempo. Normalmente as alternativas naturais são mais afetadas, pois dependem fundamentalmente da evaporação e percolação para realizar o desaguamento do lodo.

Tendo em vista as diversas alternativas de desaguamento, a Tabela 7.41 apresenta a planilha pontuada para o cálculo desse critério. A Tabela 7.42 apresenta dados sobre a susceptibilidade ao clima das alternativas de desaguamento, os dados podem ser usados para auxiliar no preenchimento da planilha pontuada da Tabela 7.41.

Tabela 7.41 – Planilha pontuada para avaliação do critério susceptibilidade ao clima.

SUSCEPTIBILIDADE AO CLIMA		
Itens	Pontuação e Respostas	Pontos Atribuídos
1 – A alternativa se encontra em local:	0 - Aberto 40 - Fechado (vá para o item 2)	
1.1 – Se a alternativa for localizada em local aberto, qual o clima predominante da região?	0 - Subtropical (região sul) 10 - Tropical de Altitudes (terras altas do sudeste) 20 - Tropical Continental (área central do país) 30 - Tropical Semiárido (sertão nordestino)	
2 – A região, local de instalação da alternativa, é considerada úmida?	0 - Sim 40 - Não (vá para o item 3)	
2.1 – Para a alternativa analisada, a umidade pode influenciar negativamente o desaguamento do lodo?	0 - Sim 10 - Não	
3 – O vento da região é considerado relevante para o tratamento na alternativa?	0 - Sim 20 - Não	
TOTAL	100	

Tabela 7.42 – Magnitude da susceptibilidade ao clima.

Alternativas	Susceptibilidade ao clima	Fonte
Leito de secagem convencional	Grande	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Leito de secagem pavimentado	Grande	Por analogia
Leito de secagem a vácuo	Grande	
Leito de secagem rápida	Grande	
Leito de secagem de junco	Grande	
Leito de secagem com meio artificial	Grande	
Bag de geotêxtil	Médio	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Lagoa de secagem	Grande	
Centrífuga	Pequeno	
Filtro a vácuo	Pequeno	
Prensa desaguadora	Pequeno	
Filtro prensa de placas	Pequeno	
Prensa parafuso	Pequena	

7.8.4.11 – Tempo necessário para o desaguamento

Como as alternativas de desaguamento apresentam diferentes características quanto às técnicas de operação, logo o tempo necessário para o desaguamento é diferente entre elas. Desse modo, a planilha pontuada da Tabela 7.43 pode ser usada para o cálculo desse critério. A Tabela 7.44 apresenta o tempo necessário para o desaguamento do lodo de algumas alternativas, para climas quente e frio.

Tabela 7.43 – Planilha pontuada para avaliação do critério tempo necessário para o desaguamento.

TEMPO NECESSÁRIO PARA O DESAGUAMENTO		
Itens	Pontuação e Respostas	Pontos Atribuídos
1 – A alternativa se encontra em local:	0 - Aberto 20 - Fechado	
2 – O lodo a ser desaguado é proveniente de sistemas de tratamento anaeróbio?	0 - Não 20 - Sim	
3 – O lodo afluente possui características adequadas (umidade e SS) para a alternativa analisada?	0 - Não 20 - Sim	
4 – A taxa de aplicação do lodo na alternativa é ou será adequada para o desaguamento?	0 - Não 20 - Sim	
5 – O uso ou destinação dada ao lodo exige um alto teor de sólidos?	0 - Sim 20 - Não	
TOTAL	100	

Tabela 7.44 – Magnitude do tempo necessário para o desaguamento.

Alternativas	Tempo necessário para o desaguamento		Fonte
	Clima quente	Clima frio	
Leito de secagem convencional	18 dias	25 dias	Jordão e Pessôa (2005)
Lagoa de secagem	3 anos	5 anos	
Filtro prensa de placas	2,5 horas		

7.8.4.12 – Eficiência no desaguamento do lodo

A eficiência no desaguamento está relacionada a vários fatores como característica do lodo, uso de produtos químicos, tecnologia empregada, teor de sólidos do lodo a desaguar,

fatores climáticos, dentre outros. A planilha pontuada apresentada na Tabela 7.45 deve ser utilizada para o cálculo desse critério.

A Tabela 7.46 apresenta a eficiência do desaguamento de algumas alternativas em virtude do teor de sólidos obtidos após o tratamento do lodo.

Tabela 7.45 – Planilha pontuada para avaliação do critério eficiência no desaguamento do lodo.

EFICIÊNCIA NO DESAGUAMENTO DO LODO		
Faixa de eficiência (%)	Pontuação	Pontos Atribuídos
0 – 14	5	
15 – 29	15	
30 – 44	20	
45 – 59	25	
60 – 100	35	
TOTAL	100	

Tabela 7.46 – Magnitude da eficiência no desaguamento do lodo das alternativas de desaguamento.

Alternativas	Eficiência no desaguamento do lodo	Fonte
Leito de secagem convencional	Grande	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
	30-45%	Spellman (1997)
Lagoa de secagem	Médio	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
	30%	Spellman (1997)
Centrífuga	Médio	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
	20-35%	Jordão e Pessoa (2009), Spellman (1997)
Filtro a vácuo	Baixo	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
	25%	Spellman (1997)
Prensa desaguadora	Médio	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
	20-40%	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
Filtro prensa de placas	Grande	Gonçalves <i>et al.</i> (2001b)
	30-50%	Jordão e Pessoa (2009)
Prensa parafuso	18-25%	Qasim (1999, <i>apud</i> Miki <i>et al.</i> , 2001) Kukenberger (1996)

7.8.4.13 – Eficiência de captura de sólidos ou recuperação de sólidos

A eficiência de captura de sólidos pode ser observada facilmente ao analisar-se a água drenada do lodo desaguado. Quanto mais turva a água, menor é a quantidade de sólidos capturada, logo também é menor a eficiência do processo em relação à captura de sólidos. A Tabela 7.47 apresenta a planilha pontuada para o cálculo desse critério.

Tabela 7.47 – Planilha pontuada para avaliação do critério eficiência de captura de sólidos.

EFICIÊNCIA DE CAPTURA DE SÓLIDOS OU RECUPERAÇÃO DE SÓLIDOS		
Itens	Pontuação	Pontos Atribuídos
0 – 14	5	
15 – 29	15	
30 – 44	20	
45 – 59	25	
60 – 100	35	
TOTAL	100	

7.9 – OBSERVAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE TECNOLÓGICA (PLANILHAS PONTUADAS)

Devem ser feitas algumas observações sobre a aplicação das planilhas pontuadas. Por exemplo, no dia e hora marcados, a autora da presente pesquisa, em visita à ETEB Sul, realizou a aplicação do questionário contendo as planilhas pontuadas, que foram respondidas diretamente pelo técnico de plantão. Durante essa aplicação das planilhas foram percebidas algumas inconsistências e houve inúmeras sugestões. Todas as contribuições já foram incorporadas quando da elaboração desse capítulo.

8 – CASO DA ETE BRASÍLIA SUL: APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE TECNOLÓGICA DAS ALTERNATIVAS DE DESAGUAMENTO DE LODO DE ESGOTO

Para que se pudesse aplicar a metodologia de apoio desenvolvida, deveria ser selecionado algum estudo de caso que permitisse a compreensão dos critérios e dos aspectos que pudessem afetar e modificar a análise. Assim, neste trabalho, foi escolhida a Estação de Tratamento de Esgotos Brasília Sul – ETEB Sul, operada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal – Caesb, que contém em seu processo de tratamento de lodo a etapa de desaguamento, antes com leitos de secagem e atualmente com centrífugas e prensa desaguadora. Essa seleção levou em consideração o tipo de tratamento dado ao esgoto, sendo que essa ETE utiliza tratamento aeróbio. Nos próximos itens, são descritos alguns aspectos sobre a Caesb além de ilustrar as etapas de tratamento da ETE Brasília Sul.

8.1 – DESCRIÇÃO GERAL DA COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO DISTRITO FEDERAL - CAESB

A CAESB foi criada com a denominação social de Companhia de Água e Esgotos de Brasília - Caesb, pelo Decreto-Lei nº 524 em 08 de abril de 1969, mas passou a ser denominada Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal por meio da Lei nº 2.416, em 06 de julho de 1999.

A Caesb atua nas 29 Regiões Administrativas do Distrito Federal, operando cinco sistemas de água com capacidade de produção de 9.148 L/s de água, atendendo a 99% da população, e 17 sistemas de esgotos, que coletam 3,3 m³/s de esgoto e tratam 100% do esgoto coletado.

Atualmente, a Caesb atende 2,17 milhões de pessoas com serviços de abastecimento de água e 2,03 milhões com serviços de esgotamento sanitário, o que corresponde, respectivamente, a 99% e 93% da população regularmente instalada no Distrito Federal.

As principais bacias de esgotamento do Distrito Federal são: Lago Paranoá, Rio São Bartolomeu, Rio Ponte Alta/Alagado e Rio Descoberto/Melchior. Os dados das Tabelas 8.1 e 8.2 são da Sinopse do Sistema de Esgotamento Sanitário do DF – SIESG (2011), sendo essa a última versão disponibilizada pela companhia. A Tabela 8.1 apresenta os sistemas que atendem as Regiões Administrativas – RAs de acordo com as bacias de esgotamento do Distrito Federal. A Tabela 8.2 apresenta os macro indicadores da CAESB em 2008 com relação ao Sistema de Esgotamento Sanitário - SES.

Tabela 8.1 – Sistemas de Esgotamento Sanitário do DF (Caesb, 2011, adaptada).

Bacias de Esgotamento Sanitário do DF	Sistemas de Tratamento e Desaguamento
Lago Paranoá	<ul style="list-style-type: none"> • ETE Brasília Sul – centrífuga e prensa desaguadora; • ETE Brasília Norte – prensa desaguadora • ETE Riacho Fundo – centrífuga • ETE Torto – encaminha para outra ETE.
Rio São Bartolomeu	<ul style="list-style-type: none"> • ETE Sobradinho – encaminha para outra ETE; • ETE Paranoá – leito de secagem; • ETE São Sebastião – lagoa de lodo; • ETE Planaltina – lagoa de lodo; • ETE Vale do Amanhecer – leito de secagem.
Rio Ponte Alta/Rio Alagado	<ul style="list-style-type: none"> • ETE Recanto das Emas – centrífuga; • ETE Santa Maria – encaminha para outra ETE; • ETE Alagado – centrífuga e leito de secagem; • ETE Gama – centrífuga.
Rio Descoberto/Rio Melchior	<ul style="list-style-type: none"> • ETE Samambaia – encaminha para outra ETE; • ETE Melchior – centrífuga; • ETE Brazlândia (efluente para o Rio Verde - GO) – não tem.

Tabela 8.2 – Macro indicadores do SES da Caesb (Caesb, 2011)

Macro Indicadores	
Índice de atendimento com coleta	93,71%
Índice de tratamento de esgoto coletado (média anual)	100%
Índice de produtividade (Emp. Totais/ 1000 ligações de esgoto)	5,83
Índice de Produtividade (Emp. Totais/Extensão de Rede de Esgoto (Km))	0,509
Extensão de redes de esgoto/ligação (m/Lig)	11,45
Dados	
População atendida com coleta de esgotos	2.333.053
População do DF	2.489.784
Volume mensal tratado (m ³)	9.239.641
Volume mensal coletado (m ³)	9.239.641
Extensão de rede (m)	5.112.659
Nº de ligações ativas de esgoto	446.336

8.2 – ETE BRASÍLIA SUL

A ETE Brasília Sul foi projetada com capacidade média de 1500 L/s, para atender uma população de cerca de 370.000 habitantes residentes na Asa Sul da cidade de Brasília, e das Regiões Administrativas do Núcleo Bandeirante, Candangolândia, Cruzeiro, Águas Claras, parte do Lago Sul, parte do Riacho Fundo I, Guará e Setor Sudoeste (Caesb, 2008). A estação despeja seu efluente no lago Paranoá e seu nível de tratamento é terciário, com remoção de fósforo e nitrogênio com a finalidade de proteger a qualidade da água do lago.

A Caesb (2011) divide o sistema de tratamento da ETE Brasília Sul nas seguintes etapas (Figura 8.1):

- Tratamento preliminar, onde são retirados os materiais grosseiros, por meio de grade manual, grade circular mecanizada e prensa de material gradeado.
- Após o tratamento preliminar, os esgotos são separados em duas fases nos decantadores primários.
- A fase sólida é bombeada para os adensadores de lodo e destes para os digestores anaeróbios.
- A fase líquida, ainda com certa quantidade de matéria orgânica, é encaminhada aos reatores, onde micro-organismos aeróbios, anaeróbios e facultativos assimilam a matéria orgânica e os nutrientes por meio do processo de nitrificação, desnitrificação (remove o nitrogênio) e “*luxury uptake*” (remove o fósforo). Os micro-organismos são separados do líquido já tratado nos decantadores secundários e retornam ao reator para continuação do processo. O excesso de lodo gerado é descartado, adensado, digerido aerobiamente e desidratado junto com o lodo anaeróbio.
- A fase líquida, por sua vez, segue para o polimento final, onde os sólidos e fósforo residuais do tratamento biológico são retidos por meio da floculação com produtos químicos (sulfato de alumínio ou cloreto férrico) e separação por flotação. Os sólidos separados e recolhidos por raspadores de superfície são bombeados para desaguamento junto com os outros lodos produzidos no processo, sendo o efluente líquido final lançado no lago Paranoá.
- A fase sólida é composta de digestor primário e secundário, adensador de lodo por gravidade, prensa e centrífuga para o desaguamento do lodo.

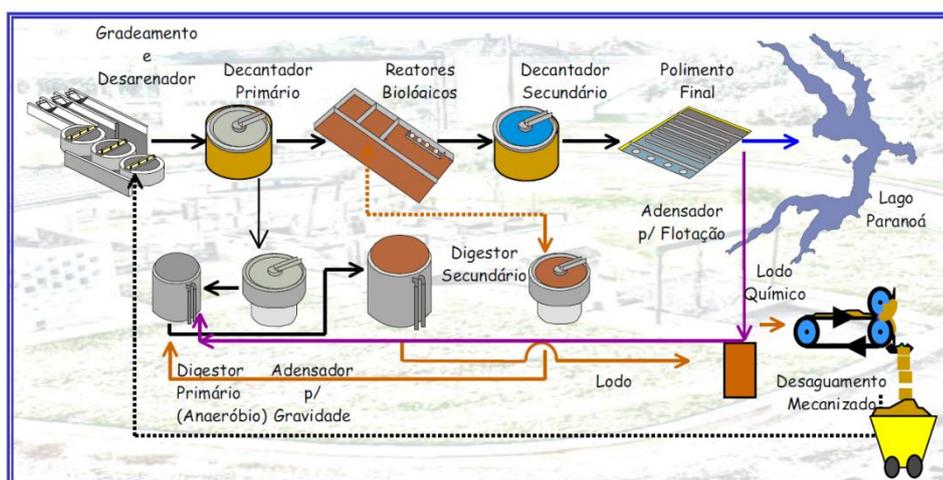


Figura 8.1 – Etapas de tratamento líquido e sólido da ETEB Sul (Caesb, 2008)

A Tabela 8.3 ilustra o desempenho operacional da ETE Brasília Sul. Com relação aos Sólidos Suspensos (SS), pode-se observar que a ETE Sul tem um desempenho consideravelmente alto, pois em média sua remoção chega a 94,8% de SS de seu efluente.

Tabela 8.3 – Desempenho operacional da ETE Brasília Sul (Caesb, 2011).

Tabela 2-6 - Desempenho Operacional - ETE Brasília Sul															
Dados		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Média	Remoções PRODES (*) Tipo H
Vazão (m³)	afluente	2.905.373	2.621.378	3.350.632	3.285.215	3.017.990	2.701.976	2.667.722	2.732.479	2.683.579	3.019.093	2.794.446	3.432.474	2.934.363	-
	efluente	2.905.373	2.621.378	3.350.632	3.285.215	3.017.990	2.701.976	2.667.722	2.732.479	2.683.579	3.019.093	2.794.446	3.432.474	2.934.363	
	trat./proj.	72,3%	72,2%	83,4%	84,5%	75,1%	69,5%	66,4%	68,0%	69,0%	75,1%	71,9%	85,4%	74,4%	
DBO (mg/L)	afluente	233	253	140	193	287	315	273	375	287	300	220	260	261	-
	efluente	19,0	29,0	18,0	12,5	13,3	11,8	21,0	33,3	45,7	42,0	19,0	25,0	24,1	
	Rem (%)	91,9%	88,6%	87,1%	93,5%	95,3%	96,3%	92,3%	91,1%	84,1%	86,0%	91,4%	90,4%	90,7%	
DQO (mg/L)	afluente	366	476	402	393	486	605	568	575	553	569	598	618	518	85%
	efluente	34,9	44,5	42,9	43,0	50,1	48,9	54,6	53,8	51,1	49,4	45,3	46,3	47,1	
	Rem (%)	90,4%	90,7%	89,3%	89,1%	89,7%	91,9%	90,4%	90,7%	90,8%	91,3%	92,4%	92,5%	90,8%	
TKN (mg/L)	afluente	44,1	49,0	47,4	46,0	53,6	54,5	56,8	57,9	54,7	47,0	46,3	42,8	50,0	-
	efluente	7,0	13,7	14,0	14,5	24,3	20,5	18,8	25,3	25,7	22,4	16,0	12,5	17,9	
	Rem (%)	84,2%	72,1%	70,5%	68,5%	54,7%	62,3%	66,8%	56,3%	52,9%	52,4%	65,5%	70,7%	64,8%	
PT (mg/L)	afluente	5,2	6,2	5,6	6,0	6,7	7,8	6,2	6,3	5,8	5,7	5,0	4,5	5,9	85%
	efluente	0,3	0,6	0,5	0,6	0,4	0,4	0,3	0,6	0,4	0,7	0,2	0,2	0,4	
	Rem (%)	94,8%	91,1%	91,5%	90,2%	94,5%	95,0%	94,4%	90,9%	93,3%	87,7%	95,8%	96,5%	93,0%	
SS (mg/L)	afluente	165	219	199	198	235	213	238	249	256	206	218	185	215	90%
	efluente	7,5	16,8	12,5	13,7	10,9	7,1	10,6	18,9	13,8	10,1	6,7	7,4	11,3	
	Rem (%)	95,4%	92,3%	93,7%	93,1%	95,4%	96,7%	95,5%	92,4%	94,6%	95,1%	96,9%	96,0%	94,8%	
CT (NMP/100 mL)	afluente	2,3E+07	2,3E+07	1,3E+07	7,9E+06	4,9E+06	2,2E+07	2,2E+07	7,0E+07	7,9E+06	3,3E+06	3,3E+06	1,3E+07	1,8E+07	-
	efluente	1,3E+05	1,1E+05	2,8E+05	1,7E+05	3,5E+05	5,4E+05	3,3E+03	1,1E+05	3,3E+04	2,4E+05	2,4E+05	7,0E+04	1,9E+05	
	Rem (%)	99,4348%	99,5217%	97,8462%	97,8481%	92,8571%	97,5455%	99,9850%	99,8429%	99,5823%	92,7273%	92,7273%	99,4615%	97,4483%	

Legenda:

DBO - demanda bioquímica de oxigênio

DQO - demanda química de oxigênio

TKN - nitrogênio total de Kjeldahl

PT - fósforo total

SS - sólidos suspensos

CT - coliformes termotolerantes

trat./proj. - vazão tratada/ vazão de projeto

(*) Limites estabelecidos pela classificação do Programa Despoluição de Bacias Hidrográficas (PRODES/ANA) para ETE do tipo H.

Vazão de projeto (l/s): 1500.

Em entrevista com a Coordenadora de Operação da Diretoria de Operação e Manutenção da ETE Brasília Sul, Karina Bassan Rodrigues, foram obtidos os seguintes dados:

- Atualmente, a estação trata uma vazão média de 1.157 L/s, tendo sido projetada com uma capacidade média de 1.500 L/s;
- Foi informado também que a Estação operava na mesma configuração desde 1993;
- Na ETE Brasília Sul é realizado o tratamento de três distintos lodos, o primeiro é o lodo primário, esse lodo é proveniente do tratamento primário e é digerido anaerobiamente. O segundo, lodo secundário, é digerido aerobiamente, e por fim, o lodo químico, esse é resultado do polimento dado ao efluente na etapa final de tratamento (floculação e flotação). Esses lodos são caracterizados na ETE por meio de seu volume e sólidos em suspensão (SS). No momento do tratamento esses lodos são misturados e recebem o mesmo tratamento. A quantidade de lodo gerada diariamente varia entre 160 a 180 t/d.
- O lodo gerado na ETE Brasília Sul é destinado à recuperação de cascalheira, cultivo de eucaliptos, disposição (acúmulo) nas ETEs Planaltina e Melchior.
- A estação de tratamento possui dois tipos de equipamentos para o desaguamento do lodo, duas centrífugas e uma prensa desaguadora.
 - As centrífugas são da marca *Pieralisi*, modelo *Jumbo III* (ano de fabricação 1997) e *Hercules* (ano 2007), com potência 40 cv e 30 cv respectivamente. A *Jumbo III* está em operação há 15 anos e a *Hercules* há 3 anos. A taxa de aplicação é de 20 – 30m³/h para a *Jumbo III* e 18 – 20 m³/h para a *Hercules*. A limpeza desses equipamentos é realizada automaticamente. Segundo a Coordenadora, as centrífugas são mais eficientes e estáveis, se comparadas à prensa.
 - A prensa instalada na ETE é da marca *Degrémont* do modelo *Press bag – 842*. Foi fabricada em 1988 e opera na estação desde esse ano, ou seja, há 24 anos está em operação na ETE Brasília Sul. Possui operação contínua e sua taxa de aplicação é de aproximadamente 6L/s. Sua limpeza é realizada por hidrojateamento de forma manual, oferecendo maior risco para a saúde dos operadores. Segundo a Coordenadora, a prensa apresenta constantes problemas operacionais, por ser muito antiga.

Nos próximos itens, segue a aplicação da metodologia de análise tecnológica de alternativas de desaguamento de lodo de esgoto, seguindo as fases descritas no Capítulo 7, ao caso da ETEB Sul.

8.2.1 – Fase 1: Definição do Problema Local

Conforme indicado no fluxograma da Figura 7.1, a primeira fase da análise inicia-se com a definição do problema local. Para isso, no caso específico da ETE Brasília Sul, foi realizada uma série de visitas ao local e entrevistas, aos técnicos e operadores da ETE, e pode-se notar que o problema encontrado no desaguamento da ETE consiste em se verificar se as alternativas atualmente em operação são as ideais e, se não forem, qual ou quais alternativas melhor se adequariam a realidade da ETE.

Para a definição do problema, levou-se em consideração as informações obtidas por meio do questionário que pode ser observado no Apêndice F. Com ele pode-se levantar que os processos instalados atualmente na ETEB Sul são equipamentos antigos, necessitam de constante manutenção, produzem ruídos e vibrações, dentre outros aspectos.

8.2.2 – Fase 2: Identificação dos Agentes Decisores e Objetivos

Para a ETE Brasília Sul, os principais agentes decisores para a análise tecnológica das alternativas de desaguamento de lodos de esgoto são a Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal – Caesb, responsável pela operação do sistema de tratamento, o órgão licenciador, no caso específico o Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Distrito Federal – IBRAM e agências reguladoras que têm interesse, principalmente, no controle de doenças de veiculação hídrica, nesse caso a Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal – Adasa.

Após as visitas e entrevistas com gestores e técnicos, conclui-se que, no caso da ETEB Sul, o principal objetivo da metodologia de análise tecnológica é de verificar se os processos de desaguamento atualmente instalados e/ou fora de operação são ou foram os métodos mais adequados para o desaguamento do lodo de esgoto dessa ETE.

É importante relatar que a metodologia de análise tecnológica desenvolvida tem também um interessante papel para ETEs que não possuem processos de desaguamento implantados.

8.2.3 – Fase 3: Levantamento e Triagem Inicial das Alternativas

A partir das alternativas levantadas no Capítulo 3.4, foram selecionadas as viáveis para a composição das alternativas para a ETE Brasília Sul, levando em consideração o perfil do desaguamento da Caesb que pode ser observado na Tabela 8.1. Das alternativas citadas nessa tabela foi excluída apenas a lagoa de lodo por se considerar que essa opção não seria viável em virtude da proximidade da ETE do Lago Paranoá. Além das alternativas já em uso pela companhia, optou-se por estudar outras como bag de geotêxtil, filtro a vácuo e prensa parafuso. Dessa composição, foi feita uma triagem qualitativa, levando em consideração critérios econômicos, ambientais, sociais e técnicos.

Para a aplicação da metodologia ao caso da ETEB Sul, foram selecionadas sete alternativas: leito de secagem (A1), bag de geotêxtil (A2), centrífuga (A3), prensa desaguadora (A4), filtro a vácuo (A5), filtro prensa de placas (A6) e prensa parafuso (A7). Essas alternativas foram consideradas aptas para a aplicação dos métodos multiobjetivo e multicritério.

8.2.4 – Fase 4: Definição dos Critérios e Pesos

Para a definição dos critérios, foi realizada uma consulta a especialistas por meio de questionário. Após essa etapa, foi encaminhado um novo questionário com os critérios escolhidos para que fossem determinados os pesos a serem empregados na análise multiobjetivo e multicritério. Para a agregação dos pesos, utilizou-se o método baseado na distância (*Distance-based*) citado no item 3.7.2.1.

Além dos pesos estabelecidos pelos especialistas, foram considerados os conjuntos de pesos em mais dois cenários. No primeiro cenário, atribui-se peso igual 1/23 (que é igual a 0,043) para todas as alternativas, possibilitando uma análise multiobjetivo em que nenhum objetivo ou critério é priorizado. No segundo cenário, buscou-se priorização das dimensões econômica e técnica. Assim, para os critérios da dimensão econômica, estabeleceu-se que

o seu peso seria de 0,07 e para a dimensão técnica 0,06 e para as demais dimensões 0,01, totalizando 1.

É importante relatar que esse procedimento não precisa ser repetido para casos que possuam as mesmas características que este. Portanto, para situações semelhantes, o analista pode utilizar critérios e pesos já definidos neste trabalho.

A quantificação dos critérios foi realizada por meio da elaboração de planilhas pontuadas (Capítulo 7.8) com auxílio de planilhas de apoio. Essas planilhas foram aplicadas aos técnicos da ETE Brasília Sul para a obtenção dos dados necessários para análise das alternativas e construção da Matriz de Avaliação da próxima fase.

8.2.5 – Fase 5: Construção da Matriz *payoff* e Avaliação das Alternativas

Os resultados do preenchimento das planilhas pontuadas são apresentados na Tabela 8.4 e constituem a Matriz *payoff*.

Como dito anteriormente, os métodos utilizados neste trabalho são: Programação de Compromisso, TOPSIS, ELECTRE III e AHP. Neste item, são descritos os parâmetros utilizados e no próximo item são apresentados os resultados encontrados na avaliação das alternativas de desaguamento de lodo de esgoto.

Os valores dos limiares de indiferença (q), preferência (p) e veto (v) do método ELECTRE III foram definidos segundo a teoria do método e a característica do problema. O limiar de veto foi desconsiderado na aplicação da metodologia, devido ao fato de que as comparações são feitas entre critérios que apresentam mesma escala (0 a 100), ou seja, os desempenhos dos critérios não são discrepantes ao ponto de se ter que atribuir o veto. A Tabela 8.5 apresenta os valores sugeridos para os limiares de indiferença (q) e de preferência (p) para cada critério. A definição dos parâmetros desse método nem sempre é tão simples, mas a concepção das planilhas pontuadas proporcionou essa facilidade, pois não possuem unidades de medidas distintas. Para a análise, utilizou-se o *software* original do *Lamsade*.

Tabela 8.4 – Matriz de avaliação (*payoff*) das alternativas segundo cada critério

Dimensões	Critérios	Alternativas						
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Econômica	C1	46,0	36,0	32,0	36,0	28,0	26,0	45,0
	C2	93,0	69,0	65,0	57,5	45,0	65,0	55,5
Ambiental	C3	5,0	40,0	30,0	40,0	30,0	35,0	45,0
	C4	36,0	71,0	46,0	32,0	28,0	35,0	32,0
	C5	68,0	56,0	68,0	66,0	74,0	76,0	69,0
	C6	79,0	82,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Social	C7	18,0	40,0	58,0	44,0	40,0	43,0	51,0
	C8	66,0	82,0	82,0	66,0	76,0	66,0	78,0
	C9	84,0	74,0	42,0	42,0	42,0	48,0	44,0
	C10	17,5	17,5	35,0	27,5	27,5	27,5	35,0
Técnica	C11	40,0	44,5	35,0	35,0	30,0	25,0	42,0
	C12	75,0	60,0	50,0	35,0	50,0	25,0	55,0
	C13	40,0	40,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	C14	65,0	75,0	50,0	50,0	50,0	57,5	50,0
	C15	92,5	62,5	77,5	70,0	47,5	67,5	70,0
	C16	20,0	80,0	60,0	60,0	40,0	40,0	80,0
	C17	60,0	40,0	30,0	40,0	20,0	30,0	40,0
	C18	24,0	24,0	74,0	50,0	50,0	50,0	74,0
	C19	100,0	100,0	62,5	50,0	50,0	50,0	75,0
	C20	60,0	60,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	C21	40,0	60,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0
	C22	35,0	25,0	15,0	25,0	20,0	25,0	15,0
C23	35,0	25,0	5,0	20,0	20,0	25,0	20,0	

Leito de secagem (A1), bag de geotêxtil (A2), centrífuga (A3), prensa desaguadora (A4), filtro a vácuo (A5), filtro prensa de placas (A6) e prensa parafuso (A7).

Para utilização do *TOPSIS*, foi preciso determinar o valor do parâmetro S , que faz menção ao tipo de distância avaliado. Os valores que podem ser assumidos são um, dois ou infinito. Especificamente, S reflete a importância que o decisor atribui aos desvios máximos. Se $S=1$, todos os desvios em relação ao ideal tem peso igual. Enquanto que $S=2$ implica em que os desvios possuem pesos proporcionais à sua magnitude. Por último, se $S=\infty$, o maior desvio recebe a máxima importância.

Na utilização da metodologia proposta, foram aplicados os três valores. No entanto, no resultado foi considerado apenas o valor de $S=1$ para que todos os desvios tivessem pesos iguais, embora não se esperem grandes variações em função do valor de S , visto que os pesos dos critérios são muito próximos. A modificação dos valores do parâmetro pode ser feita pelo analista de acordo com suas perspectivas. Essas relações apresentadas foram

utilizadas na presente pesquisa. Nesse método, é calculado o Coeficiente de Similaridade, que é um dado numérico que representa o quanto a alternativa está próxima da solução ideal. Esse método foi implementado em uma planilha Excel para aplicação ao caso deste trabalho.

Com as informações dos parágrafos anteriores, aplicaram-se os métodos multiobjetivo e multicritério à matriz de avaliação (Tabela 8.4) com os pesos atribuídos pelos especialistas na Tabela 7.5 e definidos na Fase 4.

Tabela 8.5 – Valores sugeridos para os limiares de indiferença (q) e de preferência (p).

Critério		Limiares	
		q	p
C1	Custos de implantação	0,5	1
C2	Custos de operação e manutenção	1	2
C3	Impactos negativos na implantação	2,5	5
C4	Impactos negativos na operação	0,5	1
C5	Potencial poluidor do lodo	0,5	1
C6	Contaminação do lençol freático	1,5	3
C7	Aceitabilidade do processo de desaguamento	0,5	1
C8	Proteção à segurança e à saúde no trabalho	1	2
C9	Eliminação de organismos patogênicos	1	2
C10	Emanação de gases e outros subprodutos tóxicos	3,75	7,5
C11	Complexidade de construção e instalação	1	2
C12	Complexidade operacional	2,5	5
C13	Dificuldade de remoção do lodo do processo	30	60
C14	Sensibilidade do processo à qualidade do lodo a desaguar	3,75	7,5
C15	Confiabilidade do processo	1,25	2,5
C16	Instabilidade na eficiência do processo	10	20
C17	Demanda por energia elétrica	5	10
C18	Demanda por área	12	24
C19	Consumo de produtos químicos	6,25	12,5
C20	Susceptibilidade ao clima	20	40
C21	Tempo necessário para o desaguamento	10	20
C22	Eficiência no desaguamento do lodo	2,5	5
C23	Eficiência de captura de sólidos	2,5	5

8.2.5.1 – Avaliação das alternativas

Os resultados podem ser observados nas Tabelas 8.6, 8.7 e 8.8, sendo que os resultados foram dispostos da ordem da melhor (1º) alternativa para a pior (7º). A discussão dos resultados foi realizada após a apresentação de cada uma dessas tabelas.

Tabela 8.6 – Resultados da aplicação dos métodos multiobjetivo e multicritério utilizando os pesos atribuídos aos critérios pelos especialistas.

Ordem	Programação de Compromisso		TOPSIS						ELECTRE III	AHP	
		L_s	$S=1$	C	$S=2$	C	$S=\infty$	C			f
1º	A7	0,536	A7	0,663	A7	0,628	A1	0,705	A7	A7	227,5
2º	A2	0,685	A3	0,569	A1	0,564	A7	0,652	A3	A2	223,0
3º	A3	0,689	A2	0,538	A2	0,518	A2	0,500	A1	A3	220,5
4º	A1	0,711	A1	0,508	A3	0,511	A4	0,500	A2	A1	217,0
5º	A4	0,786	A4	0,452	A4	0,458	A3	0,374	A4	A4	205,6
6º	A6	0,944	A6	0,408	A6	0,387	A5	0,314	A6	A6	202,6
7º	A5	0,963	A5	0,378	A5	0,369	A6	0,293	A5	A5	191,8

Leito de secagem (A1), bag de geotêxtil (A2), centrífuga (A3), prensa desaguadora (A4), filtro a vácuo (A5), filtro prensa de placas (A6) e prensa parafuso (A7).

Os resultados obtidos utilizando os pesos atribuídos pelos especialistas por meio do método Programação de Compromisso mostraram como alternativas preferenciais (1º) prensa parafuso, (2º) bag de geotêxtil, (3º) centrífuga, (4º) leito de secagem, (5º) prensa desaguadora, (6º) filtro prensa de placas e (7º) filtro a vácuo.

Os resultados obtidos utilizando o método TOPSIS ($S = 1$) mostraram como alternativas preferenciais (1º) prensa parafuso, (2º) centrífuga, (3º) bag de geotêxtil, (4º) leito de secagem, (5º) prensa desaguadora, (6º) filtro prensa de placas e (7º) filtro a vácuo.

Os resultados obtidos pelo ELECTRE III mostraram como alternativas melhores colocadas: (1º) prensa parafuso, (2º) centrífuga, (3º) leito de secagem, (4º) bag de geotêxtil, (5º) prensa desaguadora, (6º) filtro prensa de placas e (7º) filtro a vácuo. Pode-se observar que apenas a alternativa leito de secagem e bag de geotêxtil inverteram sua posição de preferência com relação ao método TOPSIS.

Já o método AHP mostrou como preferenciais (1º) prensa parafuso, (2º) bag de geotêxtil, (3º) centrífuga, (4º) leito de secagem, (5º) prensa desaguadora, (6º) filtro prensa de placas e (7º) filtro a vácuo.

Nesse cenário, destaca-se a preferência pela prensa parafuso, sendo classificada em primeiro lugar por todos os métodos. No entanto, o segundo lugar ficou com a centrífuga e o bag de geotêxtil. Outro aspecto importante é com relação aos 6º e 7º lugares representados pelas alternativas filtro prensa de placas e filtro a vácuo respectivamente.

Tabela 8.7 – Resultados da aplicação dos métodos multiobjetivo e multicritério utilizando pesos iguais para todos os critérios.

Ordem	Programação de Compromisso	TOPSIS							ELECTRE III	AHP	
		<i>Ls</i>	<i>S=1</i>	<i>C</i>	<i>S=2</i>	<i>C</i>	<i>S=∞</i>	<i>C</i>			<i>f</i>
1º	A7	0,490	A7	0,652	A7	0,603	A1	0,551	A7	A7	2.555,7
2º	A3	0,590	A3	0,574	A3	0,544	A7	0,542	A3	A3	2.440,1
3º	A2	0,621	A2	0,545	A2	0,528	A3	0,502	A2	A2	2.379,4
4º	A4	0,675	A4	0,493	A1	0,499	A2	0,500	A4	A4	2.309,3
5º	A1	0,695	A1	0,485	A4	0,496	A4	0,500	A1	A1	2.263,6
6º	A6	0,731	A6	0,464	A6	0,469	A5	0,473	A6	A6	2.249,3
7º	A5	0,773	A5	0,423	A5	0,445	A6	0,447	A5	A5	2.159,6

Leito de secagem (A1), bag de geotêxtil (A2), centrífuga (A3), prensa desaguadora (A4), filtro a vácuo (A5), filtro prensa de placas (A6) e prensa parafuso (A7).

Os resultados encontrados utilizando os pesos iguais para todos os critérios foram similares em quase todos os métodos, apenas no TOPSIS quando o $S=\infty$ foi diferente devido, principalmente, considerar que maiores desvios recebem a máxima importância. Essa similaridade demonstra que as planilhas pontuadas e os parâmetros dos métodos foram satisfatórios e seguem uma mesma tendência.

Comparando os resultados da Tabela 8.7 com o caso anterior em que se consideravam os pesos atribuídos pelos especialistas, ocorreram as seguintes modificações nas preferências: nos resultados encontrados com o método Programação de Compromisso, considerando os pesos iguais, ocorreu uma inversão de posição entre as alternativas (2º) centrífuga e (3º) bag de geotêxtil e (4º) prensa desaguadora e (5º) leito de secagem. No TOPSIS ($S = 1$) ocorreu uma inversão da posição das alternativas (4º) prensa desaguadora e (5º) leito de secagem. Com relação aos resultados obtidos pelo ELECTRE III, houve inversão das alternativas (3º) bag de geotêxtil, (4º) prensa desaguadora e (5º) leito de secagem. Já com o

método AHP houve inversão na posição da (2º) centrífuga, (3º) bag de geotêxtil, (4º) prensa desaguadora e (5º) leito de secagem.

Percebe-se a clara preferência pela prensa parafuso e centrífuga, por se tratarem de processos mecânicos, demandarem pequena área, não sofrerem influência do clima e serem de fácil operação. Com relação às alternativas bag de geotêxtil e leito de secagem, elas aparecem logo em seguida na preferência, por serem alternativas de baixo custo tanto na implantação, operação e manutenção, critérios esses em que os especialistas atribuíram maiores pesos. Outras alternativas que se repetiram independentemente do método aplicado foram o filtro prensa de placas e o filtro a vácuo, sempre em 6º e 7º lugares respectivamente.

Tabela 8.8 – Resultados da aplicação dos métodos multiobjetivo e multicritério utilizando pesos que priorizam os critérios econômicos e técnicos.

Ordem	Programação de Compromisso		TOPSIS						ELECTRE III	AHP	
		L_s	$S=1$	C	$S=2$	C	$S=\infty$	C			f
1º	A7	0,537	A7	0,645	A7	0,592	A1	0,532	A7	A7	2,593
2º	A1	0,599	A1	0,592	A1	0,572	A7	0,520	A3	A3	2,423
3º	A2	0,651	A2	0,546	A2	0,530	A4	0,501	A1	A1	2,376
4º	A3	0,690	A3	0,520	A4	0,503	A2	0,501	A4	A2	2,336
5º	A4	0,695	A4	0,507	A3	0,501	A3	0,501	A2	A4	2,331
6º	A6	0,800	A6	0,437	A6	0,447	A6	0,468	A5 / A6	A6	2,225
7º	A5	0,877	A5	0,378	A5	0,407	A5	0,468	-	A5	2,119

Leito de secagem (A1), bag de geotêxtil (A2), centrífuga (A3), prensa desaguadora (A4), filtro a vácuo (A5), filtro prensa de placas (A6) e prensa parafuso (A7).

Os resultados obtidos utilizando os pesos que priorizam os critérios econômicos e técnicos por meio do método Programação de Compromisso mostraram como alternativas preferenciais (1º) prensa parafuso, (2º) leito de secagem, (3º) bag de geotêxtil, (4º) centrífuga, (5º) prensa desaguadora, (6º) filtro prensa de placas e (7º) filtro a vácuo.

Os resultados obtidos pelo TOPSIS ($S = 1$) foram os mesmos dos obtidos pelo método Programação de Compromisso.

Os resultados obtidos pelo ELECTRE III mostraram como alternativas melhores colocadas: (1º) prensa parafuso, (2º) centrífuga, (3º) leito de secagem, (4º) prensa desaguadora, (5º) bag de geotêxtil, (6º) filtro prensa de placas e filtro a vácuo.

Já o método AHP mostrou como preferenciais (1º) prensa parafuso, (2º) centrífuga, (3º) leito de secagem, (4º) bag de geotêxtil, (5º) prensa desaguadora, (6º) filtro prensa de placas e (7º) filtro a vácuo. Ou seja, comparado aos resultados do método ELECTRE III, apenas duas alternativas inverteram suas posições, a (4º) bag de geotêxtil e a (5º) prensa desaguadora.

Mas uma vez as alternativas, filtro prensa de placas e filtro a vácuo, ficaram em todos os métodos, mesmo com o empate no ELECTRE III, em 6º e 7º lugares respectivamente.

8.2.6 – Fase 6: Apresentação dos Resultados a Agentes Decisores

Essa etapa foi realizada pela própria pesquisadora porque, conforme visto em capítulos anteriores, a aquisição de dados com pessoas é uma tarefa bastante dispendiosa de tempo, e muitas vezes, de recursos financeiros.

A metodologia de análise tecnológica mostrou relativa simplicidade operacional, sendo que a forma adotada em fases tornou sua aplicação mais racional e objetiva.

O uso de planilhas pontuadas para avaliação dos critérios pode ser considerado satisfatório, já que foi possível avaliar as alternativas com relativa rapidez e pouca subjetividade. Apesar das dificuldades e limitações encontradas no processo de construção dessas planilhas, considera-se que, com elas, foi possível abordar quantidade suficiente de aspectos relativos ao desaguamento de lodo de esgoto.

A utilização de métodos multiobjetivo e multicritério, apesar de sua complexidade matemática, mostrou certa facilidade e rapidez na aplicação.

Os resultados obtidos por meio da aplicação dos métodos foram coerentes com o que já é realizado pela companhia de saneamento, que utiliza processos mecânicos para o desaguamento de lodos na ETE Brasília Sul, alternativas essas que a metodologia desenvolvida também mostrou que deveriam ser aplicadas para esse caso, principalmente pela área disponível para o desaguamento do lodo. As alternativas naturais também ficaram bem colocadas, mas isso muitas vezes por causa dos critérios econômicos, mas

deve-se considerar que a ETE Brasília Sul já não possui mais área disponível para a implantação dessas alternativas.

8.2.7 – Fase 7: Modificações na Metodologia de Análise Tecnológica

Não foi realizada nenhuma modificação na metodologia por considerar que para o caso proposto ela se mostrou adequada.

9 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Como resultado principal deste trabalho, foi desenvolvida uma metodologia para realizar a análise tecnológica das alternativas de desaguamento de lodos produzidos em Estações de Tratamento de Esgotos – ETEs. Essa metodologia de análise, como proposta e resultado da pesquisa realizada, é composta por sete fases, que são: (Fase 1) Definição do Problema Local; (Fase 2) Identificação dos Agentes Decisores e Objetivos; (Fase 3) Levantamento e Triagem Inicial das Alternativas; (Fase 4) Definição dos Critérios e Pesos; (Fase 5) Construção da Matriz *payoff* e Avaliação das Alternativas; (Fase 6) Apresentação dos Resultados a Agentes Decisores; e (Fase 7) Modificações na Metodologia de Análise Tecnológica. Essas fases visam a orientar um potencial usuário da metodologia a realizar a análise das alternativas de desaguamento para uma determinada ETE qualquer, sendo ela capaz de indicar as alternativas de desaguamento que melhor atendem, concomitantemente, a todos os critérios estabelecidos de acordo com suas características e com as preferências dos atores envolvidos.

Quatro dimensões foram consideradas na metodologia proposta: econômica, ambiental, social e técnica. Essas dimensões foram desdobradas em vinte e três critérios de avaliação das alternativas de desaguamento de lodo. Essas diferentes dimensões proporcionaram uma visão multidisciplinar, que nortearam a solução do problema.

Para adquirir uma compreensão global da problemática, foram utilizadas duas abordagens. A primeira abordagem consistiu de uma revisão bibliográfica orientada para a estruturação da metodologia sendo construída, composta pela fundamentação de aspectos teóricos e pela pesquisa de experiências da literatura técnico-científica. Essa abordagem possibilitou o levantamento de treze alternativas de desaguamento de lodo.

A segunda abordagem adotada na pesquisa foi constituída pelo desenvolvimento e aplicação de dois questionários direcionados, que foram enviados via *e-mail* para especialistas, com o propósito de aquisição de opinião sobre, principalmente, os objetivos do desaguamento, os critérios para avaliar as alternativas e os pesos de cada critério.

Os prazos e forma de envio dos questionários aos especialistas se mostraram vantajosos pela objetividade, praticidade e rapidez da aplicação.

Os dados adquiridos por meio da consulta aos especialistas neste trabalho, além de terem contribuído para a proposição da metodologia, têm uma importância adicional, pois podem servir para futuros estudos na área de desaguamento de lodo de esgoto, tendo em vista a escassez de dados dessa área no Brasil. No entanto, deve-se lembrar que a pesquisa no local é um instrumento essencial para reconhecer as características da ETE e da companhia de saneamento.

Um ponto crítico no desenvolvimento da metodologia de análise tecnológica foi a definição do método a ser adotado para mensuração dos critérios. Dessa forma, optou-se por desenvolver planilhas pontuadas. A elaboração das planilhas pontuadas, que medem os desempenhos das alternativas de acordo com esses critérios, foi considerada de importância central neste trabalho, constituindo um dos maiores desafios apresentados. Isso também se deveu à reduzida quantidade de trabalhos científicos que tratam especificamente do desaguamento do lodo de esgoto. Os indicadores e parâmetros utilizados na proposta de avaliação dos critérios foram criados pela própria pesquisadora ou adaptados de outras áreas de saneamento, como gestão de lodos de fossa séptica, gestão de águas residuárias, drenagem urbana, resíduos sólidos, e outras.

Os métodos multiobjetivo e multicritério utilizados neste trabalho foram os seguintes: Programação de Compromisso, TOPSIS, ELECTRE III e AHP. Foi feita a opção por esses métodos por se tratarem de métodos consolidados e constantemente usados em análise de problemas na área de saneamento.

Para a aplicação da metodologia de análise tecnológica, foi escolhida a ETE Brasília Sul, operada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal – Caesb, por se tratar de uma ETE que utiliza diferentes processos de desaguamento de lodos. Essa ETE já operou leito de secagem e hoje está operando duas centrífugas e uma prensa.

A metodologia, como desenvolvida, mostrou-se eficiente e aplicável com relativa simplicidade operacional. Os resultados obtidos foram coerentes com o que já é realizado pela companhia de saneamento, que utiliza processos mecânicos para o desaguamento de

lodos na ETE Brasília Sul, alternativas essas que a aplicação da metodologia desenvolvida também mostrou que deveriam ser as preferidas para esse caso.

As quatro alternativas, no caso estudado da ETE Brasília Sul, que, independentemente do método ou dos pesos usados, apresentaram maior preferência foram, na ordem, a prensa parafuso, centrífuga, bag de geotêxtil e leito de secagem.

O emprego dos métodos multiobjetivo e multicritério selecionados permitiu acrescentar na análise do problema as perspectivas de diferentes objetivos, como econômicos, ambientais, sociais e técnicos. A metodologia proposta mostrou-se promissora para aplicações em outras ETEs, podendo ser aperfeiçoada a cada nova aplicação.

A seguir, são apresentadas recomendações para futuros trabalhos:

- Realizar consultas mais amplas a especialistas e agentes decisores utilizando outras formas e técnicas de aquisição de dados em grupos de pessoas;
- Levantar outras alternativas, além das que foram levantadas, de desaguamento de lodo de esgoto, para aumentar o número de opções para a aplicação da metodologia de análise tecnológica;
- Verificar a possibilidade de gerar alternativas por combinações de alternativas primárias;
- Verificar a possibilidade de incluir distintos critérios e formas de quantificá-los;
- Aplicar a metodologia de análise tecnológica a ETEs que não possuem processos de desaguamento de lodo implantado e ETEs com processos de tratamento de esgoto anaeróbio;
- Desenvolver programas computacionais que auxiliem a aplicação automatizada da metodologia;
- Testar a metodologia usando métodos que possibilitem a avaliação de uma única alternativa sendo avaliada, tal como o método ELECTRE TRI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aisse, M.M., Van Haandel, A.C., Von Sperling, M., Campos, J.R., Coraucci Filho, B. e Alem Sobrinho, O. (1999). “Tratamento e destino final do lodo gerado em reatores anaeróbios”. In: Campos, J. R. (coord.) *Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo*. ABES, Rio de Janeiro, 271-299.
- Alem Sobrinho, P. (2000). “Tratamento de esgoto e geração de lodo”. In: Bettioli, W. e Camargo, O.A. In: *Impacto Ambiental do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto*. EMBRAPA Meio Ambiente, Jaguariúna – SP, 11-24.
- Amuda, O.S., Deng, A., Alade, A.O. e Hung, Y-T. (2008). “Conversion of sewage sludge to biosolids”. In: Wang, L. K., Shammas, N. K., Hung, Y. T. *Biosolids Engineering and Management*. Humana Press, **7**, 65-115.
- Anand Raj, P. (1995). “Multicriteria methods in river basin planning – A case study”. *Water Science and Technology*, **31**(8), 261-272.
- Andreoli, C.V., Pinto, M. A. T. (2001). “Processamento de lodos de estações de tratamento de esgotos (ETEs)”. In: Andreoli C.V. (coord.) *Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final*. Rio de Janeiro: ABES, 1-2.
- Andreoli, C.V., Hoppen, C. e Mäder Netto, O.S. (2001). “Desidratação do lodo aeróbio e séptico através do uso de centrífuga tipo decanter, com e sem o uso de polieletrólitos”. *Anais do XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*. João Pessoa, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1992). *Projeto de estações de tratamento de esgotos*. NBR – 12.209.
- Barbosa, P.S.F. (1997). O emprego da análise multiobjetivo no gerenciamento dos recursos hídricos brasileiros. *A Água em Revista*, CPRM, Brasil, Ano V, 8 (2), 42-46.
- Binder, F.V. (1994). *Sistemas de Apoio à Decisão*. Érica, São Paulo, 98p.
- Braga, B. e Gobetti, L. (2002). “Análise Multiobjetivo”. In: Porto, R. L. (org.). *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Porto Alegre: UFGRS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 361-420.
- Brasil. (1986). Resolução n.º 01 de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Diário Oficial da União*. 17 fev 1986.

- Brasil. (1998). Lei n.º 9605 de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília. *Diário Oficial da União*. 13 fev 1998.
- Brasil. (2006). Resolução n.º 375 de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Diário Oficial da União*. 30 ago 2006.
- Brasil. (2008). “Uma Análise das Condições de Vida da População Brasileira”. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística– IBGE. *Síntese de Indicadores Sociais*. Rio de Janeiro.
- Brasil. (2010). Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*. 3 ago 2010.
- Brites, C.R.C. (2008). *Abordagem Multiobjetivo na Seleção de Sistemas de Reúso de Água em Irrigação Paisagística no Distrito Federal*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-112/08, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 262p.
- Brito, D.S. (2006). *Metodologia para seleção de alternativas de sistemas de drenagem*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 111p.
- Brostel, R.C. (2002). *Formulação de modelo de avaliação de desempenho global de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários (ETEs)*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-56/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 278 p.
- Caesb, (2008). SIESG – *Sistema de Informação em Esgoto*. CAESB – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal, Brasília, DF, Brasil.
- Caesb, (2011). SIESG – *Sistema de Informação em Esgoto*. CAESB – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal, Brasília, DF, Brasil.
- Carneiro, G.A., Barbosa, R.F.M. e Souza, M.A.A. (2001). *Tecnologia Adequada em Saneamento: Uma nova abordagem com o emprego de análise multiobjetivo e*

- multicritério. *Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, João Pessoa, Brasil.
- Castro, L.M.A. de (2007). *Proposição de metodologia para avaliação dos efeitos da urbanização nos corpos de água*. Tese de Doutorado da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 297p.
- Cheremisinoff, N.P. (2002). *Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies*. Boston – Oxford, Butterworth-Heinemann, 636 p.
- Chernicharo, C.A.L., Stuetz, R.M., Souza, C.L. e Melo, G.C.B. (2010). Alternativas para o Controle de Emissões Odorantes em Reatores Anaeróbios Tratando Esgoto Doméstico. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*. Rio de Janeiro, **15**(3), Jul-Set.
- Cohon, J.L. e Marks, D.H. (1975). “A review and evaluation of multiobjective programming techniques”. *Water Resources Research*, **11**(2), 208-220.
- Cordeiro, B. S. (2010). *A gestão de lodo de fossas sépticas: uma abordagem por meio da análise multiobjetivo e multicritério*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 139 p.
- Cordeiro Netto, O, M., Parent, E. e Duckstein, L. (1993). “Métodos Multicritério Aplicados ao Planejamento de Recursos Hídricos: o Caso da Escolha de um Sítio de Barragem de Regularização no Sudoeste da França – Parte 1- Discussão Teórica.” In: *Anais do X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Gramado, v. 1, 327-336.
- Cordeiro Netto, O.M., Souza, M.A.A., Carneiro, G.A., Neri, L.J.A.L. e Lopes Junior, R.P. (2000). “Uma metodologia para análise tecnológica de sistemas com reatores biológicos anaeróbios para tratamento de águas residuárias municipais”. *Anais do XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Porto Alegre, Brasil.
- Crespo, P.G. (2003). *Manual de Projeto de Estações de Tratamento de Esgotos*. Belo Horizonte, UFMG.vol. 1.
- Degrémont (2011). Contato via E-mail.
- Economic and Social Commission for Western Asia (2003). *Waste-Water Treatment Technologies: A general Review*. United Nations, New York, 122p.
- Ennes. Y.M. (1989). O saneamento no Brasil, repassado à luz da tecnologia apropriada. *Revista Mineira de Engenharia*, **3**(6), 13-16.
- EnvironQuip. (2010). Disponível em: <<http://www.environquip.com.br/prensa-desaguadora-de-lodo.htm>>. Acesso: 12 de maio de 2010.

- Feba (2011). Contato via E-mail.
- Fernandes, F. (2000). “Estabilização e higienização de biossólidos”. In: Bettiol, W. e Camargo, O.A. *Impacto Ambiental do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto*. EMBRAPA Meio Ambiente, Jaguariúna – SP, 45-68.
- Fernandes, F. (ed) (2000). *Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA – UFMG, Belo Horizonte, 299-317.
- Garcia, R.M. (1987). Tecnologia apropriada: amiga ou inimiga oculta? In: *Cadernos Fundap*, São Paulo, ano 7 (13), 66-78.
- Geneletti, D. e van Duren, I. (2008). “Protected area zoning for conservation and use: A combination of spatial multicriteria and multiobjective evaluation”. *Landscape and Urban Planning*, **85**(2), 97-110.
- Generino, R.C.M.(1999). *Desenvolvimentos em Metodologias Multicritério para Procedimentos de Avaliação em Auditorias Ambientais: Aplicação para Estações de Tratamento de Esgotos em Brasília/DF*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, PTARH.DM-20/99, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Brasília, DF. 167 p.
- Goicoechea, A., Hansen, D.R. e Duckstein, L. (1982). *Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Applications*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Xp.
- Gomes, L. F. A. M.; Gomes, C. F. S.; Almeida, A. T. (2002) *Tomada de Decisão Gerencial: Enfoque Multicritério*. São Paulo: Editora Atlas, 296 p.
- Gomes, L.F.A.M.; Araya, M.C.G. e Carignano, C. (2004). *Tomada de decisões em cenários complexos: introdução aos métodos discretos do apoio multicritério à decisão*. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, Xp.
- Gonçalves, R.F., Ludovice, M., Lima, M.R.P., Ramaldes, D.L. da C., Teles, C.R. e Andreoli, C.V. (2001a). “Desidratação de lodo de esgotos”. In: Andreoli C. (coord.) *Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final*. Rio de Janeiro: ABES, 57-86.
- Gonçalves, R.F., Ludovice, M. e Von Sperling, M. (2001b). “Remoção da umidade de lodos de esgotos”. In: Andreoli, C. V.; Von Sperling, M.; Fernandes, F. *Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA – UFMG, Belo Horizonte, 159-257.

- Harada, A.L. (2001). “Uso de análise multicritério na ordenação de prioridades em empreendimentos de saneamento”. *Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, João Pessoa, Brasil.
- Harada, A.L. e Cordeiro Netto, O.M. (1997). “Metodologia para a seleção de soluções coleta, tratamento e disposição de esgotos em condomínios no Distrito Federal. *Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Vitória – ES, Brasil, 69-76
- Imhoff, K. (1966). *Manual de Tratamento de Águas Residuárias*. Edgard Blücher LTDA, São Paulo, 235.
- Jéquier, N. e Blanc, G. (1983). “*The world of appropriate technology: a quantitative analysis*”. Development Center of the Organisation for Economic Co-operation and Development. Paris, França, Xp.
- Jordão, E.P. e Pessôa, C.A. (2005). *Tratamento de esgotos domésticos*. ABES. Rio de Janeiro, 4º ed. 932p.
- Jordão, E.P. e Pessôa, C.A. (2009). *Tratamento de esgotos domésticos*. ABES. Rio de Janeiro, 5º ed. 941p.
- Karagiannidis, A., Moussiopoulos, N. (1997). “Application of ELECTRE III for the integrated management of municipal solid wastes in the Greater Athens Area”. *European Journal of Operational Research*, **97**(1997) 439-449.
- Kayo, E.K., Securato, J.R. (1997). “Método *Delphi* - Fundamentos Críticas e Vieses”. In: *Caderno de Pesquisas em Administração*, **1**(4), 51-61.
- Kligerman, D. C. (1995). Esgotamento Sanitário: de Alternativa Tecnológica a Tecnologias Apropriadas – Uma Análise Técnica, Econômica e Social. Dissertação de mestrado do curso de Planejamento Urbano da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 154p.
- Kruger, H.A., Kearney, W.D. (2008). “Consensus ranking – Na ICT security awareness case study”. In: *Computers e Security*, **27**, 254-259.
- Kukenberger, R.J. (1996). “Conditioning and Dewatering”. In: Girovich, M. J. *Biosolids Treatment and Management: Processes for Beneficial Use*. Marcel Dekker, Inc., New York, 453p.
- Lara, A.I. de., Andreoli, C.V. e Pegorini, E.S. (2001). “Avaliação dos impactos ambientais e monitoramento da disposição final do lodo”. In: Andreoli, C.V.; Von Sperling, M.; Fernandes, F. *Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA – UFMG, Belo Horizonte, 465-482.
- LCB Consultoria Ambiental. (2011). Contato via E-mail.

- Linstone, H.A. e Turoff, M. (eds.) (2002). *The Delphi Method: Techniques and Application*, Versão eletrônica gratuita. Disponível em: <http://www.eawag.ch/organisation/abteilungen/sandec>. Acesso em: 10 de setembro de 2011.
- Luduvic, M. (2001). “Processos de estabilização de lodos”. In: Andreoli, C.V.; Von Sperling, M.; Fernandes, F. *Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA – UFMG, Belo Horizonte, 123-157.
- Martino, J.P. (1993). *Technological forecasting for decision making*. New York: McGraw-Hill Inc, Xp.
- Mendonça, E.C. (2009). *Metodologia para Aplicação de Desempenho de Sistemas de Drenagem Urbana*, Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, PTARH. DM, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Brasília, DF.176p.
- Metcalf e Eddy, (1991). *Wastewater Engineering – Treatment, Disposal and Reuse*. McGraw-Hill, Inc., 1334 p.
- Metcalf e Eddy, (2003). *Wastewater Engineering – Treatment and Reuse*. MCGraw-Hill, Inc., 1819p.
- Miki, M.K., Andrighetti, E.J. e Alem Sobrinho, P. (2001). “Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos”. In: Tsutiya, M.T., Comparini, J.B., Alem Sobrinho, P., Hespanhol, I., Carvalho, P.C.T.de., Melfi, A.J., Melo, W.J. e Marques, M.O. *Biossólidos na Agricultura*. SABESP, São Paulo, 41-86.
- Miki, M.K., Alem Sobrinho, P. e van Haandel, A.C. (2006). “Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos – condicionamento, desaguamento mecanizado e secagem térmica do lodo”. In: Andreoli, C.V., (coord.). *Usos Alternativos de Lodos de Estações de Tratamento de Água e Estações de Tratamento de Esgoto*. ABES, Rio de Janeiro, 49-108.
- Norese, M.F. (2006). “ELECTRE III as a support for participatory decision-making on the localisation of waste-treatment plants”. *Land Use Policy*, (23), 76-85.
- Oliveira, M.T.C.S. e Moraes, L.R.S. (2005). A tecnologia apropriada e o sistema condominial de esgoto sanitário: uma revisão conceitual. *23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 1-19, Campo Grande/MS.

- Organização das Nações Unidas. (1995). *Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento: Agenda 21*. Brasília: Câmara dos Deputados, Coordenação de Publicações. 472p.
- Pedroza, E. da C.L., Moreira, E.A., Cavalcanti, P.F.F., Alem Sobrinho, P., Andreoli, C.V. e van Haandel, A. (2006). “Aplicação de leitos para secagem de lodo gerado em estações de tratamento de esgotos”. In: Andreoli, C.V., (coord.). *Usos Alternativos de Lodos de Estações de Tratamento de Água e Estações de Tratamento de Esgoto*. ABES, Rio de Janeiro, 109-158.
- Pegorini, E.S., Andreoli, C.V., Souza, M.L.de P. e Ferreira, A. (2003). “Qualidade do Lodo de esgoto utilizado na Reciclagem Agrícola na Região Metropolitana de Curitiba – PR.” In: *I Simpósio Latino Americano de Biossólidos*. Vol. 1, São Paulo, Brasil.
- Pinto, M.T. (2001). “Higienização de lodos”. In: Andreoli, C.V.; Von Sperling, M.; Fernandes, F. *Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA – UFMG, Belo Horizonte, 261-296.
- Ribeiro, H.K.S. (2003). *Avaliação de desempenho ambiental em estações de tratamento de água*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, PTARH.DM-060/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Brasília – DF, 135p.
- Saaty, T.L. (1991). *Métodos de análise hierárquica*. São Paulo: McGraw Hill/Makron Books, Xp.
- Sachs, I. (1993). “Estratégias de transição para o século XXI: desenvolvimento e meio ambiente”. Studio Nobel: Fundação do Desenvolvimento Administrativo – São Paulo.
- Schneider, I.A.H. e Kirchheim, A.P. (2001). “Secagem de um resíduo galvânico em uma câmara solar”. *Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, João Pessoa, Brasil.
- Shammas, N.K. e Wang, L.K. (2006a). “Belt filter presses”. In: Wang, L.K.; Shammas, N.K. e Hung, Y-T. *Biosolids Treatment Processes*. Humana Press Inc. Totowa, New Jersey, 519-539.
- Shammas, N.K. e Wang, L.K. (2006b). “Process Selection of Biosolids Management Systems”, In: Wang, L.K., Shammas, N.K., Hung, Y.T.(eds.), *Biosolids Engineering and Management*, Humana Press, 691-743.

- Silva, D.P. (2003). *Estudo da Secagem de Lodo de Esgoto Através da Fritura de Imersão*. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP, 163p.
- Silva, C.M. e Chernicharo, C.A.L. (2007). “Desaguamento em leitos de secagem de lodo de reatores UASB tratando esgotos domésticos: rendimento do leito e características do percolado”. *Anais do 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Belo Horizonte, Brasil, v.1, 1-14.
- Souza, M.A.A. (1992) "Methodology for Selection of Wastewater Treatment Processes". PhD Thesis. The University of Birmingham, Birmingham, UK: School of Civil Engineering,
- Souza, M.A.A. (1997) "Metodología de Analisis de Decisiones para Seleccionar Alternativas de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales". *Hojas de Divulgación Técnica*. Lima, Peru. CEPIS - Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, (68), 1-6.
- Souza, M.A.A. (2007). *Notas de aula da disciplina análise de sistemas ambientais*, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília.
- Souza, M.A.A. e Forster, C.F., (1996). “Metodologias para Seleção de Processos de Tratamento de Águas Residuárias”. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, ano I, 2, 19-31.
- Souza, M.A.A., Cordeiro Netto, O.M., Carneiro, G.A. e Lopes Junior, R.P. (2001). “Análise tecnológica de alternativas para pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios: resultados da avaliação multiobjetivo”. *Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, João Pessoa, Brasil.
- Souza, M.A.A., Cordeiro, B.S. e Silva, C.L. da. (2009). “Avaliação multiobjetivo e multicritério de alternativas de gestão de lodo de fossa/tanque séptico”. In: Andreoli, C. V. (coord.) *Lodo de Fossa e Tanque Séptico: Caracterização, Tecnologias de Tratamento, Gerenciamento e Destino Final*. Rio de Janeiro: ABES, 327-374.
- Souza, M.A.A. e Cordeiro Netto, O.M. (2000). “Análise tecnológica multiobjetivo de alternativas para pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios”. In: Chernicharo, (coord.) *Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios – Coletânea de Trabalhos Técnicos*, FINEP, Belo Horizonte, v.1, 134p.
- Spellman, F.R. (1997). *Dewatering Biossolids*. Technomic Publishing CO, Lancaster/UAS. 276p.

- Thapa, K.B., Qi, Y. e Hoadley, A.F.A. (2009). “Interaction of polyelectrolyte with digested sewage sludge and lignite in sludge dewatering”. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, (334), 66-73.
- Tsutiya, M.T. (2001). “Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos”. In: Tsutiya, M.T., Comparini, J.B., Alem Sobrinho, P., Hespanhol, I., Carvalho, P.C.T., Melfi, A.J., Melo, W.J. e Marques, M.O. (Eds). *Biossólidos na Agricultura*. ABES, São Paulo, SP, 89-129.
- Turovskiy, I.S. e Mathai, P.K. (2006). *Wastewater Sludge Processing*. Jonh Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 354 p.
- United States Environmental Protection Agency-USEPA. (1994). *A plain English guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule*. Washington, DC,
- United States Environmental Protection Agency-USEPA. (2000a). *Emerging Technologies for Biosolids Management*. Washington, DC, EPA 832-F-00-057.
- United States Environmental Protection Agency-USEPA. (2000b). *Biosolids Technology Fact Sheet – Recessed-Plate Filter Press*. Washington, DC, EPA 832-F-00-058.
- United States Environmental Protection Agency-USEPA. (2006). *Emerging Technologies for Biosolids Management*. Washington, DC, EPA 832-R-06-005.
- Van Haandel, A.C e Alem Sobrinho, P. (2006). “Produção, composição e constituição de lodo de esgoto”. In: Andreoli, C. V., (coord.). *Usos Alternativos de Lodos de Estações de Tratamento de Água e Estações de Tratamento de Esgoto*. ABES, Rio de Janeiro, 7-28.
- Van Haandel, A., Cavalcanti, P.F.F. (2001). “Geração e composição de lodo em sistemas de tratamento de esgotos sanitários”. In: Andreoli, C. V., (coord.). *Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final*. Rio de Janeiro: ABES, 1-2.
- Van Haandel, A.C. e Lettinga, G. (1994). *Tratamento Anaeróbio de Esgotos: um manual para regiões de clima quente*. Epigraf, Campina Grande, 255 p.
- Vergara, F.E., Mol, J.M.D, Souza, M.A.A. e Cordeiro Netto, O.M. (2004). “Aplicabilidade do Método de Análise Multiobjetivo TOPSIS à Gestão dos Recursos Hídricos”. In: *Anais do III Simpósio de recursos Hídricos do Centro-Oeste*, Goiânia, Vol. 1, 1-13.
- Von Sperling, M. (2005). *Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA – UFMG, Belo Horizonte, MG, 452p.

- Von Sperling, M. e Andreoli, C.V. (2001). “Introdução”. In: Andreoli, C.V.; Von Sperling, M. e Fernandes, F. *Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA – UFMG, Belo Horizonte, 13-16.
- Von Sperling, M. e Gonçalves, R.F. (2001). “Lodo de esgoto: características e produção”. In: Andreoli, C.V.; Von Sperling, M. e Fernandes, F. *Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA – UFMG, Belo Horizonte, 17-67.
- Wang, L.K., Li, Y., Shammas, N.K., Sakellaropoulos, G.P. (2006a). “Drying beds”. In: Wang, L. K., Shammas, N. K.; Hung, Yung-Tse. *Biosolids Treatment Processes*. Humana Press Inc. Totowa, New Jersey, 403-428.
- Wang, L.K., Shammas, N.K., Williford, C., Chen, W-Y e Sakellaropoulos, G.P. (2006b). “Evaporation Processes”. In: Wang, L. K.; Shammas, N. K.; Hung, Yung-Tse. *Biosolids Treatment Processes*. Humana Press Inc. Totowa, New Jersey, 583-612.
- Wang, L.K., Chang, S-Y., Hung, Y-T, Muralidhara, H.S. e Chauhan, S.P. (2006c). “Centrifugation clarification and thickening”. In: Wang, L. K.; Shammas, N. K.; Hung, Yung-Tse. *Biosolids Treatment Processes*. Humana Press Inc. Totowa, New Jersey, 101-132.
- Water Environment Federation.(1998). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*. Manual of Practice 8 (ASCE 76), Alexandria, VA.
- Willoughby, K.W. (1990). *Technology Choice – a critique of the Appropriate Technology Movement*. Boulder, Colorado, USA. Westview Press London, UK, Xp.
- Wright, J.T.C. e Giovinazzo, R.A. (2000). “Delphi – Uma Ferramenta de Apoio ao Planejamento Prospectivo”. *Caderno de Pesquisas em Administração*, 1(12), 54-65.
- Zuffo, A.C., Reis, L.F. dos; Santos, R.F. dos e Chaudhry, F.H (2002). “Aplicação de Métodos Multicriteriais ao Planejamento de Recursos Hídricos”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 7(1), 81-102.

APÊNDICES

APÊNDICE A - QUESTIONÁRIO I - PARA OBTENÇÃO DE DADOS E OPINIÃO

Responda as questões a seguir marcando um “X” ao lado das alternativas que julgar corretas. Caso queira adicionar outras respostas não citadas, ou fazer comentários adicionais sobre a questão ou a temática envolvida, escreva livremente no espaço abaixo de cada questão.

Definições Importantes:

- Desaguamento – trata-se da remoção de umidade do lodo. É uma operação fundamental para a redução de massa e volume do lodo.
- Contexto – a qual assunto, ou situação, o desaguamento está relacionado ou inserido.

Questão 1 - De maneira geral, de acordo com a sua opinião, em que contextos estão inseridos os problemas relacionados ao desaguamento de lodo de esgoto?

Contexto	Sim <i>(marque um “X”)</i>	Não <i>(marque um “X”)</i>
Econômico		
Ambiental		
Sanitário (saúde pública)		
Social		
Técnico*		

*Construção, instalação, operação, manutenção, demanda por área e energia, Consumo de produtos químicos, etc..

Outros contextos não relacionados anteriormente:

Questão 2 – Quais são as principais consequências, na sua opinião, da ausência do desaguamento no tratamento do lodo de ETE?

Consequências	Sim <i>(marque um "X")</i>	Não <i>(marque um "X")</i>
Aumento do custo de transporte do lodo		
Poluição de mananciais (superficiais e subterrâneos)		
Propagação de doenças		
Propagação de vetores (roedores, insetos, etc.)		
Problemas estéticos		
Eutrofização de corpos d'água		
Aumento do volume para disposição		
Aumento na produção de lixiviado quando da sua disposição em aterros sanitários		
Outras consequências não citadas anteriormente:		

Questão 3 – Quais são, na sua opinião, os principais objetivos desejados para um equipamento/unidade de desaguamento de lodo de ETE?

Objetivos	Sim <i>(marque um "X")</i>	Não <i>(marque um "X")</i>
Reduzir os custos		
Reduzir os impactos ao meio ambiente		
Aumentar os benefícios à comunidade e aos operadores		
Reduzir os riscos à segurança e saúde		
Reduzir os problemas técnicos*		
Melhorar eficiência no desaguamento do lodo		
*Construção, instalação, operação, manutenção, demanda por área e energia, Consumo de produtos químicos, etc..		
Outros objetivos não citados anteriormente:		

Questão 4 – Quais são, na sua opinião, os principais interessados (grupo de pessoas ou instituições) no desaguamento do lodo de esgoto?

Interessados	Sim <i>(marque um "X")</i>	Sim <i>(marque um "X")</i>
Prestadores de serviço de saneamento		
Órgãos ambientais		
Agências reguladoras		
Comunidade de modo geral		
Pessoas que realizam o aproveitamento do lodo		
Outros interessados não citados:		

Questão 5 – Em sua opinião, com qual relevância as expectativas de cada um desses envolvidos devem ser consideradas na escolha de alternativas de desaguamento de lodo de esgoto? (Dê uma nota de 0 a 10 – sendo 10 a maior/melhor nota)

Interessados	Nota de 0 a 10
Prestadores de serviço de saneamento	
Órgãos ambientais	
Agências reguladoras	
Comunidade de modo geral	
Pessoas que realizam o aproveitamento do lodo	
Outros interessados:	

Questão 6 – Quais critérios você considera relevantes na escolha e/ou comparação de alternativas de desaguamento de lodos de esgoto para serem instaladas/implantadas em uma localidade ou ETE?

Cr�terios	Sim <i>(marque um "X")</i>	N�o <i>(marque um "X")</i>
Custo de implanta�o		
Custo de opera�o e manuten�o		
Custo de desmobiliza�o ¹		
Impactos negativos na implanta�o		
Impactos negativos na opera�o		
Produ�o de odor		
Produ�o de ru�dos e vibra�es		
Prolifera�o de vetores ²		
Potencial poluidor do lodo		
Contamina�o do len�ol fre�tico		
Gera�o de renda/emprego		
Aceitabilidade do processo de desaguamento		
Prote�o � seguran�a e � sa�de no trabalho		
Elimina�o de organismos patog�nicos		
Eman�o de gases e outros subprodutos t�xicos		
Complexidade de constru�o e instala�o		
Complexidade operacional		
Dificuldade de remo�o do lodo do processo		
Sensibilidade do processo � qualidade do lodo a desaguar		
Confiabilidade do processo		
Instabilidade na efici�ncia do processo		
Demanda por energia el�trica		
Demanda por �rea		
Consumo de produtos qu�micos		
Susceptibilidade ao clima ³		
Tempo necess�rio para o desaguamento		
Efici�ncia no desaguamento do lodo		
¹ Parar, cessar a opera�o do processo de desaguamento. ² Roedores, insetos, etc. ³ Sensibilidade que o processo de desaguamento possui em rela�o ao clima.		

Outros critérios não listados anteriormente:

Críticas, sugestões e observações gerais:

**APÊNDICE B - RELAÇÃO DE ESPECIALISTAS CONSULTADOS
PARA O QUESTIONÁRIO I**

ESPECIALISTAS	
Anaxsandra da Costa Lima Duarte	Professora assistente da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Mestre em Engenharia Sanitária pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
Annemarie Konig	Professora da Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia em Recursos Naturais, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil.
Aurélio Pessoa Picanço	Professor da Universidade Federal do Tocantins – UFT.
Camila Corrêa Máximo	Mestre em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos - UnB.
Carlos Augusto de Lemos Chernicharo	Professor da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental.
Carlos Daidi Nakazato	Analista da Companhia de Saneamento do Distrito Federal - Caesb, Superintendência de Operação Manutenção e Tratamento de Esgotos, Estação de Tratamento de Esgotos Brasília Norte.
Carlos Eduardo Pereira	Analista da Companhia de Saneamento do Distrito Federal – Caesb.
Cleverson Vitório Andreoli	Professor no curso de pós-graduação do Centro Universitário UNIFAE. Engenheiro Técnico da Companhia de Saneamento do Paraná – Sanepar.
Deize Dias Lopes	Professora da Universidade Estadual de Londrina - UEL, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Departamento de Construção Civil.
Eduardo Felipe Cavalcante de Correa	Analista da Agência Nacional de Águas – ANA. Doutorando do Programa de Pós Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília – UnB.
Fernando Fernandes	Professor da Universidade Estadual de Londrina - UEL, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Departamento de Construção Civil.
Genilda Maria de Oliveira	Professora do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro. Doutoranda do Programa de Pós Graduação em Tecnologia e Ambiental e Recursos

Hídricos da Universidade de Brasília – UnB.	
ESPECIALISTAS (continuação)	
Jair Sartorato	Engº Civil da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento - Casan, Responsável pela Divisão Operacional de Esgotos Sanitários da Grande Florianópolis.
Karina Bassan Rodrigues	Coordenadora de Gerência da Companhia de Águas e Esgotos de Brasília - Caesb, Estação de Tratamento de Esgotos Brasília Sul.
Leda Freitas Ribeiro	Bióloga da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento - Casan, Gerência Operacional, Divisão de Tratamento de Esgotos.
Liliana Pena Naval	Professora da Universidade Federal do Tocantins – UFT.
Lucas Matos Liporoni	Mestrando do Programa de Pós Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília – UnB.
Marcos Von Sperling	Professor da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Escola de Engenharia, Departamento de Eng. Sanitária e Ambiental.
Natália Resende	Analista do Ministério da Integração e mestranda do Programa de Pós Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília – UnB.
Pedro Alem Sobrinho	Professor da Universidade de São Paulo – USP.
Ricardo Augusto Ramos	Assessor Especial da Controladoria-Geral do Governo do Distrito Federal, Secretaria de Estado de Transparência e Controle – DF. Mestre em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos - UnB.
Roque Passos Piveli	Professor da Universidade de São Paulo - USP, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.
Welitom Ttatom Pereira da Silva	Professor da Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT e Doutor em Tecnologia e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília – UnB.
Yovanka Pérez Ginoris	Professora da Universidade de Brasília - UnB, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

Nota: Os especialistas estão organizados em ordem alfabética e, suas respostas são de interesse confidencial, não estando diretamente vinculadas a quaisquer resultados da pesquisa.

**APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO II - DETERMINAÇÃO DE PESOS
PARA OS CRITÉRIOS SELECIONADOS**

Dimensão	Critérios	Pesos (W)
Econômica	Custo de implantação	
	Custo de operação e manutenção	
	Custo de desmobilização	
TOTAL:		1,0
Ambiental	Impactos negativos na implantação	
	Impactos negativos na operação	
	Produção de odor	
	Produção de ruídos e vibrações	
	Proliferação de vetores	
	Potencial poluidor do lodo	
	Contaminação do lençol freático	
TOTAL:		1,0
Social	Geração de renda/emprego	
	Aceitabilidade do processo de desaguamento	
	Proteção à segurança e à saúde no trabalho	
	Eliminação de organismos patogênicos	
	Emanação de gases e outros subprodutos tóxicos	
TOTAL:		1,0
Técnica	Complexidade de construção e instalação	
	Complexidade operacional	
	Dificuldade de remoção do lodo do processo	
	Sensibilidade do processo à qualidade do lodo a desaguar	
	Confiabilidade do processo	
	Instabilidade na eficiência do processo	
	Demanda por energia elétrica	
	Demanda por área	
	Consumo de produtos químicos	
	Susceptibilidade ao clima	
	Tempo necessário para o desaguamento	
	Eficiência no desaguamento do lodo	
Eficiência de captura de sólidos		
TOTAL:		1,0
INSTRUÇÕES		
<p>Quanto maior a influência do fator no desaguamento do lodo maior deverá ser o valor do peso. Os valores dos pesos de cada fator deverão estar no intervalo de 0,00 até 1,00. O somatório dos pesos dos fatores deverá ser igual a 1,00. A planilha possui um campo que verifica a soma automaticamente para evitar que ultrapasse de um.</p>		

**APÊNDICE D - RELAÇÃO DE ESPECIALISTAS CONSULTADOS
PARA O QUESTIONÁRIO II**

ESPECIALISTAS	
Annemarie Konig	Professora da Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia em Recursos Naturais, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil.
Aurélio Pessoa Picanço	Professor da Universidade Federal do Tocantins – UFT.
Carlos Augusto de Lemos Chernicharo	Professor da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental.
Carlos Eduardo Pereira	Analista da Companhia de Saneamento do Distrito Federal – Caesb.
Cleverson Vitório Andreoli	Professor da Universidade Federal do Paraná – UFPR.
Deize Dias Lopes	Professora da Universidade Estadual de Londrina - UEL, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Departamento de Construção Civil.
Eduardo Felipe Cavalcante de Correa	Doutorando do Programa de Pós Graduação em Tecnologia e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília – UnB e Analista da Agência Nacional de Águas – ANA.
Genilda Maria de Oliveira	Professora do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro. Doutoranda do Programa de Pós Graduação em Tecnologia e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília – UnB.
Jair Sartorato	Engº Civil da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento - Casan, Responsável pela Divisão Operacional de Esgotos Sanitários da Grande Florianópolis.
Leda Freitas Ribeiro	Bióloga da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento, Gerência Operacional, Divisão de Tratamento de Esgotos.
Liliana Pena Naval	Professora da Universidade Federal do Tocantins – UFT.
Lucas Matos Liporoni	Mestrando do Programa de Pós Graduação em Tecnologia e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília – UnB.
Marcos Von Sperling	Professor da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental.
Pedro Alem Sobrinho	Prof. da Universidade de São Paulo – USP.

Ricardo Augusto Ramos	Assessor Especial da Controladoria-Geral do Governo do Distrito Federal, Secretaria de Estado de Transparência e Controle – DF. Mestre em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos - UnB.
Roque Passos Piveli	Professor da Universidade de São Paulo - USP, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.
Welitom Ttatom Pereira da Silva	Professor da Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT e Doutor em Tecnologia e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília – UnB.
Yovanka Pérez Ginoris	Professora da Universidade de Brasília - UnB, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

Nota: Os especialistas estão organizados em ordem alfabética e, suas respostas são de interesse confidencial, não estando diretamente vinculadas a quaisquer resultados da pesquisa.

APÊNDICE E – LISTA DE EMPRESAS E EQUIPAMENTOS

Empresa	Equipamento	Local	Site / E-mail	Telefone
Tecitec	Filtros prensa	Barueri - SP	www.tecitec.com.br	(11)7295-2183
Aquamec Equipamentos Ltda.	Filtro a vácuo e Filtro tipo esteira desaguadora	São Paulo - SP	aquamec@aquamec-filsan.com.br	(11)3872-1811
Degrémont Saneamento e Tratamento de Águas Ltda	Prensa desaguadora	São Paulo - SP	www.degremont.fr	(11)3061-3494
Feba Indústria Mecânica Ltda	Filtro prensa e Prensa desaguadora	Diadema - SP	www.feba.com.br	(11)3456-2422
Guarujá Indústria e Comércio de Máquinas Ltda	Prensa desaguadora	São Paulo - SP	guarujaeq@uol.com.br	(11)3246-7667
Lurgi CFA Sistemas Ltda	Filtro a vácuo e Prensa desaguadora	São Paulo - SP	cfalda@osite.com.br	(11)5641-9192
Mecfil Industrial Ltda	Filtro a vácuo, Filtro prensa e Prensa desaguadora	São Paulo - SP	mecfil@uol.com.br	(11)6952-8533
Metalsinter Indústria e Comércio de Filtros e Sinteriz. Ltda	Filtro prensa	São Paulo - SP	filtrosms@metalsinter.com.br	(11)3621-4333
Allonda	Tubos de Geotêxtil	São Paulo - SP	www.allonda.com.br	(11)5501-9201
Alfa-Laval	Centrífugas	São Paulo - SP	http://local.alfalaval.com	(11)5188-6000
Pieralisi	Centrífugas e secadores térmicos	São Paulo - SP	http://www.pieralisi.com.br	(19)3948-5250
Westfalia / GEA	Centrífugas	São Paulo - SP	http://www.gea-westfalia.com.br	0800 17-3505
Andritz	Centrífugas, Filtro prensa, Filtros esteira, filtros rotativos e secadores térmicos.	Santa Catarina, Minas Gerais e São Paulo	http://www.andritz.com	(47)3387-9100

Nota: Essas empresas vendem outros equipamentos além dos da lista, no entanto os outros não foram relacionados, pois não dizem respeito a este trabalho.

APÊNDICE F – QUESTIONÁRIO GERAL

Tema da Dissertação: Análise das Alternativas Tecnológicas de Desaguamento de Lodos Produzidos em Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)

Aluna: Aliny Stradiotti Vanzetto

Orientador: Prof. Marco Antonio Almeida de Souza

ESTUDO DE CASO (ETE BRASÍLIA SUL)

Respondente:-----

1– Dados sobre a Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal – Caesb:

- Histórico (site)
- Institucional (site)
- Caesb hoje (site)

- Outros:
-
-

2– Dados da ETE Brasília Sul:

- Localização da ETE:
-
-

- Há quantos anos está em funcionamento:
-
-

- Vazão de esgoto tratado:
-
-

- Descrição do sistema de tratamento de esgoto (aeróbio ou anaeróbio):
-
-
-

- Esquema do sistema de tratamento de esgoto (desenhar as etapas de tratamento ou obter um arquivo digital com as etapas)

3 – Dados sobre o tratamento de lodo:

- Descreva as etapas de tratamento:

- Quais são os tipos de lodo gerados e suas origens?

- Qual a quantidade de lodo gerada?

- É realizada a caracterização desse lodo, se sim, por meio de que parâmetros?

- Esquema dos processos de tratamento de lodo:

- Para o tratamento, os tipos de lodo são misturados ou segregados?

- Qual a destinação dada ao lodo tratado?

4– Dados do **Desaguamento** de lodo:

Já existe processo de desaguamento de lodo, se a resposta for positiva, qual é o processo?

- a. Qual a marca e/ou fabricante?

b. Qual a potência do equipamento?

c. Qual o ano de fabricação?

d. Quanto tempo o processo está em operação?

e. O processo é: Natural Mecanizado

f. O método é: Manual Mecânico

g. Está localizado em ambiente: Fechado Aberto

h. Qual a taxa de aplicação?

i. Como é feita a limpeza do equipamento?

j. O que você (operador ou técnico) acha do equipamento?
