



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**



**DANIEL CAMPOS MORO**

**AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS PARA DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO**  
**ORIUNDO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS SÃO**  
**JOÃO/NAVEGANTES DO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE:**  
**UM ESTUDO DE CASO**

**Porto Alegre - RS**

**2024**

**DANIEL CAMPOS MORO**

**AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS PARA DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO  
ORIUNDO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS SÃO  
JOÃO/NAVEGANTES DO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE:  
UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel.

**Orientadora:** Profa. Dra. Maria Cristina de Almeida Silva

**Porto Alegre - RS**

**2024**

#### CIP - Catalogação na Publicação

Moro, Daniel Campos  
AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS PARA DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO  
ORIUNDO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS SÃO  
JOÃO/NAVEGANTES DO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE: UM  
ESTUDO DE CASO / Daniel Campos Moro. -- 2024.  
119 f.  
Orientadora: Maria Cristina de Almeida Silva.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto  
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia  
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. Lodo de Esgoto. 2. Disposição Final. 3. Matriz  
de Avaliação. 4. Compostagem. 5. Tratamento de  
Esgotos. I. Silva, Maria Cristina de Almeida, orient.  
II. Título.

**DANIEL CAMPOS MORO**

**AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS PARA DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO  
ORIUNDO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS SÃO  
JOÃO/NAVEGANTES DO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE:  
UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel.

**Aprovado em: Porto Alegre, 09 de fevereiro de 2024.**

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Maria Cristina de Almeida Silva – IPH - UFRGS  
Orientadora

---

Prof. Dr Ian Rocha de Almeida – IFPA  
Examinador

---

B.el. Charles Coser de Matos – DMAE-POA  
Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, por todo o apoio, carinho, compreensão e ensinamentos. Sem vocês não poderia estar realizando esse sonho que, após muitas batalhas vencidas e perdidas, finalmente se conclui. Se estou aqui hoje é por conta da confiança que vocês depositaram em mim.

Às minhas tias, Selma e Zenóbia, pelo carinho incondicional que sempre me foi dado, ajudando a enfrentar os momentos mais difíceis.

À minha namorada, Júlia Heller, por toda a parceria e carinho que compartilhamos nestes anos, me apoiando nos momentos difíceis e sendo fundamental para minhas principais conquistas.

À minha orientadora Profa. Dra. Maria Cristina de Almeida Silva, pela mentoria, auxílio e ensinamentos passados ao longo das cadeiras, da iniciação científica, da empresa júnior, dos estágios e, por fim, neste trabalho.

A todos os meus amigos que pude me aproximar durante a universidade, pelas alegrias, festas e conquistas que guardarei para sempre. Em especial para os grupos Atletismo UFRGS, Biofut Magia e Desespero do Silêncio, e, nominalmente, para André, Douglas, Gabriel, Gabriela, Heitor e Isabel.

À Empresa Júnior CATALISA – Soluções em Engenharia Química, por promover meu desenvolvimento pessoal e como engenheiro, seja a partir de projetos na indústria em diferentes áreas de atuação ou pela amizade criada dentro do grupo de trabalho.

Aos meus gestores e colegas da Maltaria Navegantes - Ambev e da BAT Brazil Labs, pela oportunidade, confiança e aprendizados gerados no chão de fábrica e nas reuniões de planejamento.

E, por fim, a todos que auxiliaram no trabalho, pelas conversas e discussões que me proporcionaram momentos de reflexão sobre a Engenharia Ambiental na indústria.

Obrigado.

## RESUMO

O Brasil se encontra em processo de universalização do saneamento básico, expandindo os sistemas de coleta e tratamento de esgotos para atingir a meta de 90% da população coberta pelos serviços, estipulada para 2033. Neste cenário, o gerenciamento adequado dos resíduos produzidos nas Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) evolui para uma problemática, em que a produção do principal resíduo orgânico, o lodo de ETE, também aumentará, o que tende a impactar nos custos operacionais do sistema de tratamento. Geralmente dispostos em aterros sanitários, a atual gestão do lodo contradiz a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que afirma que apenas rejeitos, que não apresentam possibilidade de reciclagem ou reaproveitamento, devem ser destinados para aterros sanitários. Visando atender tais demandas, inúmeras alternativas sustentáveis têm sido desenvolvidas para promover a reutilização do lodo de ETE e a garantir sua disposição ambientalmente correta, incluindo: secagem térmica, incineração, condicionamento de solos e reuso agrícola ou industrial. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar diferentes cenários de disposição final do lodo digerido e desaguado da ETE São João/Navegantes, localizada no município de Porto Alegre (RS), considerando seus aspectos técnicos, econômicos, socioambientais e legais relacionados e identificando àquelas com maior potencial de sustentabilidade. Para tal, fez-se uso da Ponderação Aditiva Simples (PAS) como metodologia multicritério de auxílio a decisão, hierarquizando as alternativas em uma matriz de avaliação e identificando seus pontos fortes e fracos. Os resultados obtidos indicam que as alternativas de disposição final em centrais de compostagem e para reuso de indústrias cerâmicas se mostram viáveis para substituir à atual disposição no Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio, considerando suas limitações legais e técnicas. Por fim, conclui-se que o reaproveitamento do lodo de ETE em diferentes esferas industriais é viável na Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA), apresentando potenciais benefícios socioeconômicos para a sociedade e garantindo a disposição ambientalmente adequada do resíduo gerado na ETE estudada.

**Palavras-Chave:** Biossólido. Compostagem. Disposição Final. Estação de Tratamento de Esgoto. ETE. Lodo de Esgoto. Reuso de Lodo. Sustentabilidade.

## ABSTRACT

Brazil is in the process of universalizing basic sanitation, expanding sewage collection and treatment systems to reach the target of 90% of the population covered by services, set for 2033. In this scenario, adequate management of subproducts produced at all Sewage Treatment Plants (STP) is evolving into a problem, in which the production of the main organic subproduct, STP sludge, will also increase, tending to impact the operational costs of the treatment system. Generally disposed of in landfills, the current sludge management contradicts the National Solid Waste Policy (PNRS), which states that only waste, which does not present the possibility of recycling or reuse, should be sent to landfills. Aiming to meet such demands, numerous sustainable alternatives have been developed to promote the reuse of STP sludge and ensure its eco-friendly disposal, including thermal drying, incineration, soil conditioning and agricultural or industrial reuse. Therefore, the present work aims to evaluate different scenarios for the disposal of digested and dewatered sludge from the São João/Navegantes STP, located in the city of Porto Alegre (RS), considering its related technical, economical, socio-environmental and legal aspects, and identifying those with the overall greater sustainability potential. To this end, Simple Additive Weighting (SAW) was used as a multi-criteria decision aid methodology, ranking the alternatives in an evaluation matrix and identifying their respective strengths and weaknesses. The results indicate that the disposal in composting facilities and the reuse in ceramic industries are viable alternatives to replace the current disposal in the Central de Resíduos do Recreio Sanitary Landfill, considering its legal and technical limitations. Finally, it is concluded that the reuse of STP sludge in different industrial spheres is viable in the Metropolitan Region of Porto Alegre (RMPA), presenting potential socioeconomic benefits for our society and ensuring the most eco-friendly and adequate disposal of the waste generated in the studied STP.

**Keywords:** Biosolids. Composting. Disposal. Sewage Treatment Plant. STP. Sewage sludge. Sludge reuse. Sustainability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma De Tratamento Biológico Convencional .....	30
Figura 2 - Fluxograma De Um Sistema De Tratamento Primário Convencional .....	35
Figura 3 - Fluxograma De Um Sistema Australiano De Lagoas De Estabilização.....	36
Figura 4 - Fluxograma De Um Reator De Manta De Lodo (UASB).....	38
Figura 5 - Operações Unitárias Principais Do Sistema De Lodos Ativados .....	39
Figura 6 - Fluxograma De Um Sistema De Lodos Ativados De Aeração Prolongada..	42
Figura 7 - Principais Etapas Do Gerenciamento De Lodos .....	45
Figura 8 - Etapas Do Processo De Compostagem.....	52
Figura 9 - Diagrama Esquemático De Centrífuga De Eixo Horizontal .....	54
Figura 10 - Diagrama Esquemático De Filtro Prensa .....	56
Figura 11 - Sistema De Esgotamento Sanitário Navegantes.....	67
Figura 12 - Fluxograma De Tratamento De Lodos Da ETE São João/Navegantes .....	68
Figura 13 - Digestor Anaeróbico Da ETE São João/Navegantes .....	70
Figura 14 - Lodo Desaguado Da ETE São João/Navegantes .....	71
Figura 15 - Localização Dos Empreendimentos Selecionados.....	75
Figura 16 - Rota De Transporte Do Lodo Até O ASCRR.....	76
Figura 17 - Resultado Do Contato Telefônico Com Centrais De Compostagem .....	77
Figura 18 - Rotas Até As Centrais De Compostagem .....	78
Figura 19 - Resultado Do Contato Telefônico Com Cerâmicas E Olarias.....	79
Figura 20 - Rotas Até As Indústrias Cerâmicas.....	80
Figura 21 - Resultado Do Contato Telefônico Com Cimenteiras E Concreteiras.....	80
Figura 22 - Rotas Até As Indústrias De Cimento.....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Porcentagem De Tratamento De Esgotos No Brasil .....	20
Tabela 2 - Composição Física E Química De Lodos Ativados Não Tratados .....	41
Tabela 3 - Principais Características Dos Sistemas De Lodos Ativados .....	43
Tabela 4 - Efeito Dos Processos De Condicionamento Em Lodos De ETES .....	48
Tabela 5 - Vantagens E Desvantagens Das Centrífugas De Eixo Horizontal .....	55
Tabela 6 - Fator De Demanda Volumétrica De Aterro Por Teor De Sólidos .....	66
Tabela 7 - Padrões De Emissão Estabelecidos Na Licença De Operação .....	69
Tabela 8 - Municípios Selecionados Para A Avaliação .....	72
Tabela 9 - Códigos De Consulta FEPAM E Total De Empreendimentos .....	74
Tabela 10 - Empresas De Compostagem Consideradas Para O Trabalho .....	77
Tabela 11 - Indústrias Cerâmicas Consideradas Para O Trabalho .....	79
Tabela 12 - Indústrias De Cimento E Concreto Consideradas Para O Trabalho .....	80
Tabela 13 - Pesos Atribuídos Aos Critérios De Avaliação .....	83
Tabela 14 - Graus De Classificação Do Critério 1 .....	85
Tabela 15 - Possíveis Impactos Socioambientais No Gerenciamento Do Lodo .....	86
Tabela 16 - Graus De Classificação Do Critério 2 .....	86
Tabela 17 - Graus De Classificação Do Critério 3 .....	88
Tabela 18 - Graus De Classificação Do Critério 4 .....	90
Tabela 19 - Resumo Da Classificação De Critérios: Aterro Sanitário .....	95
Tabela 20 - Parâmetros Base Para Avaliação Econômica: Compostagem .....	96
Tabela 21 - Avaliação De Viabilidade Econômica: Compostagem .....	97
Tabela 22 - Resumo Da Classificação De Critérios: Compostagem .....	100
Tabela 23 - Parâmetros Base Para Avaliação Econômica: Reuso Cerâmica .....	101
Tabela 24 - Avaliação De Viabilidade Econômica: Reuso Cerâmica .....	102
Tabela 25 - Resumo Da Classificação De Critérios: Reuso Cerâmica .....	105
Tabela 26 - Parâmetros Base Para Avaliação Econômica: Reuso Cimento .....	106
Tabela 27 - Avaliação De Viabilidade Econômica: Reuso Cimento .....	107
Tabela 28 - Resumo Da Classificação De Critérios: Reuso Cimento .....	110
Tabela 29 - Resultado Da Matriz De Alternativas De Disposição Do Lodo .....	111

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais Constituintes No Tratamento De Esgoto.....	23
Quadro 2 - Descrição Dos Processos De Estabilização De Lodos .....	47
Quadro 3 - Alternativas De Transformação E Destinação De Lodo .....	58
Quadro 4 - Classificação De Biossólidos Para Aplicação Em Solo .....	62
Quadro 5 - Grupos De Custos Avaliados Para Destinação De Lodo .....	87

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ASCRR	Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio
CNPJ	Cadastro Nacional da Pessoa Jurídica
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg/L)
DMAE	Departamento Municipal de Água e Esgotos
DMLU	Departamento Municipal de Limpeza Urbana
DQO	Demanda Química de Oxigênio (mg/L)
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental
ISO	Organização Internacional de Normalização
ITE	Indicador de Atendimento Total de Esgoto
ITR	Indicador de Tratamento Total de Esgoto
LO	Licença de Operação
MLSB	Marco Legal do Saneamento Básico
NBR	Norma técnica brasileira
PAS	Ponderação Aditiva Simples
PCS	Poder Calorífico Superior

pH	Potencial de Hidrogênio
PMGIRS	Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PMSB	Plano Municipal de Saneamento Básico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos do Brasil
RMPA	Região Metropolitana de Porto Alegre
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura
SES	Sistema de Esgotamento Sanitário
SINDICER	Sindicato das Indústrias de Olaria e de Cerâmica para Construção
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SOL	Sistema Online de Licenciamento Ambiental
SST	Sólidos Suspensos Totais (mg/L)
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis (mg/L)
ST	Sólidos Totais (mg/L)
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica
UASB	Reator Anaeróbio de Manta de Lodo

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C_D$	Custo Diário com Disposição (R\$/dia)
$C_F$	Custo de Transporte por Frete (R\$)
$C_{Tr}$	Custo Diário de Transporte do Lodo (R\$/dia)
$C_{Tu}$	Custo de Transporte Unitário (R\$/m <sup>3</sup> )
$I_{IF}$	Indicador Impacto Financeiro
$M_E$	Massa Específica do Lodo (t/m <sup>3</sup> )
$P_D$	Produção Diária de Lodo (t/dia)
$P_i$	Pontuação Final da Alternativa $i$
$V_{ij}$	Grau de Classificação da Alternativa $i$ , no Critério $j$
$V_T$	Volume Transportado por Frete (m <sup>3</sup> )
$W_j$	Peso Atribuído ao Critério $j$

## SUMÁRIO

1. Introdução .....	16
2. Objetivos .....	19
2.1. Objetivo Geral .....	19
2.2. Objetivos Específicos.....	19
3. Revisão Bibliográfica .....	20
3.1. Saneamento Básico: Coleta e Tratamento de Esgotos.....	20
3.1.1. Esgotos Sanitários: Características e Dados.....	21
3.1.2. O Novo Marco Legal do Saneamento Básico .....	24
3.2. Tratamento de Esgotos.....	25
3.2.1. Estação de Tratamento de Esgotos.....	26
3.3. Lodos de Tratamento de Esgotos .....	31
3.3.1. Definições e Aspectos Gerais.....	31
3.3.2. Geração de Lodo em Diferentes Sistemas de Tratamento.....	34
3.3.3. Gestão de Lodos de ETE.....	43
4. Materiais e Métodos .....	67
4.1. Estudo de Caso: ETE São João/Navegantes .....	67
4.1.1. Projeto e Licença de Operação .....	68
4.1.2. Geração de Lodo .....	70
4.2. Cenários de Destinação Final .....	71
4.2.1. Aterros Sanitários .....	75
4.2.2. Compostagem.....	76
4.2.3. Reuso Industrial .....	78
4.3. Definição de Critérios para Avaliação .....	81
4.3.1. Critério 1: Atendimento à Legislação Vigente .....	84
4.3.2. Critério 2: Impactos Socioambientais.....	85
4.3.3. Critério 3: Impacto Financeiro.....	87

4.3.4. Critério 4: Características Técnicas .....	88
4.4. Avaliação de Viabilidade Econômica .....	90
4.4.1. Custo de Transporte .....	91
4.4.2. Custo com Disposição .....	92
5. Resultados e Discussão .....	93
5.1. Disposição em Aterro Sanitário.....	93
5.1.1. Classificação conforme Critérios de Avaliação .....	93
5.2. Disposição para Compostagem .....	96
5.2.1. Avaliação de Viabilidade Econômica .....	96
5.2.2. Classificação Conforme Critérios de Avaliação .....	97
5.3. Disposição com Reuso Industrial: Cerâmicas .....	101
5.3.1. Avaliação de Viabilidade Econômica .....	101
5.3.2. Classificação Conforme Critérios de Avaliação .....	102
5.4. Disposição com Reuso Industrial: Cimenteiras .....	106
5.4.1. Avaliação de Viabilidade Econômica .....	106
5.4.2. Classificação Conforme Critérios de Avaliação .....	107
5.5. Matriz de Alternativas de Disposição do Lodo .....	111
6. Conclusão .....	113
7. Referências Bibliográficas .....	115

## 1. INTRODUÇÃO

Com a sanção do novo Marco Legal do Saneamento Básico (MLSB), o Brasil ruma em busca da universalização dos serviços de coleta e tratamento de esgotos até 2033. Para tal, a atualização de estruturas existentes e o desenvolvimento de novas estações de tratamento de esgotos (ETEs) devem ser realizados com enfoque no atingimento da meta que, no presente momento, compreende apenas 55,8% da população brasileira (SNIS, 2023).

Nos últimos anos, o tratamento de esgotos, imprescindível para a manutenção da qualidade dos corpos hídricos do país, tem se desenvolvido com enfoque na sustentabilidade operacional e no consumo consciente de recursos. Portanto, a expansão dos serviços de saneamento básico deve ter como uma de suas premissas a valorização dos resíduos sólidos oriundos do processo de tratamento de esgotos.

Assim, a gestão do principal resíduo sólido originado nas ETEs, denominado lodo de esgoto, surge como uma problemática para a garantia do desenvolvimento sustentável do saneamento básico brasileiro. Composto predominante por matéria orgânica, o lodo de esgoto não gerido corretamente pode resultar em impactos ao meio ambiente tão severos quanto a disposição de esgoto bruto na natureza (ANDREOLI et al, 2014).

O tratamento e disposição de lodos oriundos do tratamento de esgotos, embora represente uma pequena fração, quando comparado ao volume total de esgoto tratado, está relacionado com até 60% dos custos totais de operação de uma estação de tratamento (ANDREOLI et al, 2014). Essa característica é decorrente da dificuldade em correlacionar os custos de disposição em locais adequados e seguros, geralmente distantes do local de geração, com as características operacionais e da composição do resíduo gerado nas estações de tratamento, altamente variáveis (JORDÃO & PESSÔA, 2017).

A disposição inadequada dos lodos gerados no tratamento de esgotos tem potencial de geração de graves impactos socioambientais, estando relacionada com a transmissão de zoonoses, contaminação de solos e de recursos hídricos

e tendo impacto direto na qualidade da água usada para consumo humano (ANDREOLI et al, 2014). Dessa forma, alternativas para a disposição final têm sido desenvolvidas ao longo das últimas décadas para mitigar os riscos ocasionados pela má gestão deste resíduo.

Em 2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos do Brasil (PNRS) foi promulgada, reconhecendo o lodo como um resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania. A partir dessa definição, a PNRS restringe a disposição em aterros sanitários apenas para rejeitos, contrapondo um dos cenários mais comuns para a destinação final dos lodos gerados pelas ETEs.

A cidade de Porto Alegre, capital do Rio Grande do Sul, embora apresente uma porcentagem da população atendida por rede coletora de esgotos superior a 90%, realiza o tratamento de apenas 53% do volume gerado (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2023). Assim, visando atingir as metas estabelecidas pelo MLSB, o desenvolvimento das redes cloacais e consequente aumento da vazão de esgoto afluyente implicarão no aumento da geração do lodo gerado nas diversas ETEs da capital.

O município de Porto Alegre é subdividido em 10 Sistemas de Esgotamento Sanitário (SES), elaborados a partir dos limites das 28 bacias hidrográficas presentes na área da cidade que são devidamente agrupadas por apresentarem características semelhantes em relação às exigências de tratamento e à inserção regional no município (DMAE, 2015). Com exceção do SES Ilhas, os esgotos coletados são bombeados para diferentes estações de tratamentos espalhadas pelo município, tendo a ETE São João/Navegantes como uma de suas principais.

A ETE São João/Navegantes possui capacidade para realizar o tratamento 444 L/s de esgotos sanitários da população residente na zona norte da capital. O processo de tratamento se utiliza de um sistema altamente eficiente de lodos ativados em configuração de aeração prolongada. Porém, segundo Andreoli et al. (2014), esses sistemas são enquadrados como um dos maiores geradores de volume de lodo por habitante.

Visando atender a demanda de geração de 8 toneladas diárias de lodo excedente, a ETE São João/Navegantes possui contrato com uma empresa terceirizada, que realiza a coleta e transporte do material para a Estação de Transbordo de Resíduos do Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DMLU), no bairro Lomba do Pinheiro, onde o lodo é misturado com os resíduos sólidos urbanos da capital e é posteriormente transportado sob responsabilidade do DMLU, para o Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio (ASCRR), localizado no município de Minas do Leão, a 100 km do local de tratamento.

Em vista disso, há uma oportunidade de evolução do cenário de disposição final do lodo gerado na ETE São João/Navegantes que contemple as premissas do PNRS, valorizando o resíduo e reduzindo custos. Portanto, estudos e análises de viabilidade que avaliem os benefícios ambientais e econômicos de novos cenários de disposição final tornam-se importantes.

Dessa forma, a compreensão das aplicabilidades do lodo de ETE e do estado da arte das diferentes alternativas de disposição na Região Metropolitana de Porto Alegre passa a representar um passo importante para alterar a maneira na qual o lodo das ETEs de Porto Alegre são dispostos. Dentre as alternativas, a compostagem de resíduos orgânicos e o reuso industrial se destacam dentro da PNRS, por agregarem valor e permitirem a sua utilização como matéria prima para geração de novos produtos. Assim, podem contribuir para a promoção de avanços socioeconômicos, mitigando impactos ambientais relacionados aos aterros sanitários.

Com base nesse contexto, o presente trabalho busca avaliar as diferentes alternativas para disposição final de lodos de ETEs disponíveis na Região Metropolitana de Porto Alegre, apontando seus benefícios e malefícios para identificar qual apresenta maior sustentabilidade nas esferas técnica, econômica, social, ambiental e legal. Para tal, o trabalho realiza a revisão bibliográfica dos diferentes cenários de tratamento e disposição desenvolvidos no mundo, estabelece a metodologia para caracterização dos critérios avaliativos e discute os resultados obtidos a partir do estado da arte das principais opções avaliadas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

O presente trabalho tem como objetivo avaliar e determinar a alternativa para disposição final, a partir de cenários propostos, que apresenta o maior caráter sustentável ambiental, social e econômico para valorização do lodo gerado na ETE São João/Navegantes do município de Porto Alegre, no estado do Rio Grande do Sul, compreendendo as suas limitações técnicas e os seus impactos ambientais associados.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Além do objetivo geral, são objetivos específicos do trabalho:

- Avaliar o estado da arte dos cenários de disposição final na Região Metropolitana de Porto Alegre;
- Identificar os pontos de melhoria associados às limitações apresentadas pelos cenários de disposição;
- Estabelecer uma metodologia de avaliação de cenários que possa ser aplicada em diferentes ETEs do Brasil.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. SANEAMENTO BÁSICO: COLETA E TRATAMENTO DE ESGOTOS

O Saneamento Básico é um direito assegurado para a população desde a implementação da Lei Federal nº 11.445/2007, representado por um conjunto de medidas realizadas com o objetivo de preservação das condições ambientais, de modo a melhorar a qualidade de vida da população e facilitar a atividade econômica (SNIS, 2021).

Porém, de acordo com o Panorama do Saneamento Básico no Brasil (SNIS, 2021), apenas 55,0% da população total brasileira é atendida com rede coletora de esgotos e, com relação ao tratamento de esgotos, apenas 50,8% do volume gerado recebe tratamento. Portanto, aproximadamente metade do esgoto bruto brasileiro é lançado sem tratamento nos corpos hídricos.

Observando os resultados apresentados no Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos (SNIS, 2021), elaborado em dezembro de 2022 pelo Ministério do Desenvolvimento Regional, apenas 32,3% dos habitantes do Rio Grande do Sul são atendidos pela coleta de esgotamento sanitário e apenas 31,9% do esgoto total gerado foi coletado, indicando uma grande carência estadual no quesito. Em contrapartida, os dados consolidados no SNIS (2023) indicam que 82,2% do esgoto coletado no estado passa por uma forma de tratamento antes do seu lançamento em corpos hídricos.

*Tabela 1 - Porcentagem de Tratamento de Esgotos no Brasil*

	<b>População Atendida por Rede Coletora de Esgotos (%)</b>	<b>Volume de Esgoto Sanitário Tratado (%)</b>
Brasil	55,8	51,2
Rio Grande do Sul	32,3	26,2

*Fonte: SNIS (2023).*

Com base nas informações consolidadas pelo SNIS, é notável como a porcentagem de coleta de esgotos no estado é apenas metade da média nacional, mas com uma maior porcentagem de tratamento do esgoto coletado.

Os níveis baixos de atendimento indicam o caráter urgente de melhorias nos sistemas de coleta e tratamento de esgotos no Rio Grande do Sul.

É possível avaliar o status do saneamento em Porto Alegre, a partir do 'Ranking de Saneamento', elaborado pelo Instituto Trata Brasil. Na versão mais recente, de 2023, a cidade se encontra no 49º lugar dentre as 100 cidades mais populosas do país em termos de desempenho nos serviços de saneamento.

Dentre os indicadores do 'Ranking de Saneamento', Porto Alegre se destaca no Indicador de Atendimento Total de Esgoto (ITE), que representa a porcentagem da população atendida por rede coletora de esgotos, obtendo 91,62%. Valor que inclui redes pluviais e é muito superior comparado com o restante do estado do Rio Grande do Sul e do Brasil.

Porém, quando considerado o Indicador de Tratamento Total de Esgoto (ITR), que representa a porcentagem do volume de esgoto gerado que é efetivamente tratado, a cidade de Porto Alegre apresenta o resultado de 52,72%. Ou seja, embora exista uma rede coletora de grande abrangência, o sistema de transporte do esgoto porto-alegrense para suas ETEs carece de melhorias, visto que, conforme informado pelo corpo técnico do DMAE a capacidade atual de tratamento das estações de Porto Alegre é de 86% do esgoto cloacal gerado.

### 3.1.1. ESGOTOS SANITÁRIOS: CARACTERÍSTICAS E DADOS

Esgoto é, essencialmente, a água de abastecimento de uma comunidade após o seu uso em uma variedade de aplicações, contendo constituintes que, sem tratamento, a tornam imprópria para a maioria dos usos (METCALF & EDDY, 2016). De acordo com a NBR 9.648/1986, que trata do 'Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário', o esgoto sanitário é o despejo líquido constituído de esgotos domésticos e industriais, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária.

Em geral, os esgotos são classificados em dois grupos principais: os esgotos industriais, compostos essencialmente por efluentes originados em diversos processos produtivos e que possuem características próprias bem definidas; e os esgotos domésticos, referentes aos despejos residenciais, à uma

parcela de águas pluviais, às águas de infiltração (JORDÃO & PESSÔA, 2017) e aos despejos oriundos de instalações comerciais, institucionais e públicas (METCALF & EDDY, 2016).

Metcalf & Eddy (2016) consideram essencial compreender a natureza do esgoto para a operação de projetos de coleta, tratamento e reuso, assim como para a engenharia de gestão da qualidade ambiental. Essas características dos esgotos estão relacionadas aos diferentes usos da água exercidos pela população, variando com o clima, a situação socioeconômica e os hábitos locais (VON SPERLING, 2014).

Conforme destacado por Von Sperling (2014), a composição dos esgotos é de aproximadamente 99,9% de água. A demanda por tratamento desses efluentes surge em razão da fração residual composta por sólidos orgânicos e inorgânicos, tanto em suspensão quanto dissolvidos, além da presença de microrganismos potencialmente patógenos.

Os parâmetros do esgoto podem ser divididos em três categorias: parâmetros físicos, químicos e biológicos. Visando otimizar os elementos de projeto e operação no contexto de uma estação de tratamento, normalmente não há o interesse de se determinar a totalidade dos diversos compostos que constituem a água residuária. Portanto, é mais vantajoso optar pelo uso de parâmetros indiretos que possam expressar o caráter ou o potencial poluidor da descarga em questão (VON SPERLING, 2014).

Embora os parâmetros de interesse no tratamento de esgotos sejam guiados pela legislação vigente, Metcalf & Eddy (2016) reforçam que muitas das propriedades e características do esgoto são inter-relacionadas. Os autores descrevem os principais constituintes e o motivo da necessidade de seu tratamento, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Principais constituintes no tratamento de esgoto

Constituinte	Razão da importância
Sólidos suspensos	Sólidos suspensos podem provocar depósitos de lodo e condições anaeróbias quando esgoto bruto é lançado no ambiente aquático.
Orgânicos biodegradáveis	Contendo principalmente proteínas, carboidratos e gorduras, os orgânicos biodegradáveis são mais comumente medidos em termos de DBO (demanda bioquímica de oxigênio) e DQO (demanda química de oxigênio). Se lançado sem tratamento ao ambiente, suas estabilizações biológicas podem levar à depleção do oxigênio natural e ao desenvolvimento de condições sépticas.
Patogênicos	Doenças transmissíveis podem ser transmitidas por organismos patogênicos presentes no esgoto.
Nutrientes	Associados ao carbono, tanto nitrogênio como fósforo são elementos essenciais para o crescimento. Quando descarregados no meio aquático, esses nutrientes podem levar ao crescimento de espécies aquáticas indesejáveis. Quando descarregados no solo em grandes quantidades, podem, também, provocar a poluição de águas subterrâneas.
Poluentes prioritários	Compostos orgânicos e inorgânicos selecionados com base em suas conhecidas ou suspeitas carcinogenicidade, mutagenicidade, teratogenicidade ou elevada toxicidade aguda.
Orgânicos refratários	Esses orgânicos tendem a resistir aos métodos convencionais de tratamento de esgotos. Exemplos típicos incluem surfactantes, fenóis e pesticidas utilizados na agricultura.
Metais pesados	Metais pesados são, usualmente, adicionados ao esgoto por atividades comerciais e industriais e poderá haver a necessidade de removê-los se o esgoto for reutilizado.
Orgânicos dissolvidos	Constituintes inorgânicos, como cálcio, sódio e sulfato são adicionados à água distribuída por sistemas de abastecimento público e deverão ser removidos se o esgoto for reutilizado.

Fonte: Metcalf & Eddy (2016).

### 3.1.2. O NOVO MARCO LEGAL DO SANEAMENTO BÁSICO

Sancionada em julho de 2020, a Lei Federal nº 14.026/2020, conhecida como o novo Marco Legal do Saneamento Básico (MLSB), é uma atualização da Lei Federal nº 11.455/2007 que estabeleceu as diretrizes nacionais para o saneamento básico e o definiu como:

Conjunto de serviços públicos, infraestruturas e instalações operacionais de: abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e drenagem e manejo das águas pluviais urbanas (BRASIL, 2007).

O novo Marco permite a entrada do mercado privado para exercer a titularidade dos serviços públicos de saneamento básico por gestão associada, mediante consórcio público ou convênio de cooperação (BRASIL, 2020). Isso estabeleceu uma nova oportunidade de desenvolvimento do setor que, embora fosse de grande valia para cidades com alta densidade demográfica, instaurou preocupação em municípios de menor porte ou deficitários que não seriam capazes de atrair economicamente os novos *players* do mercado.

Visando incluir a totalidade das cidades brasileiras, o novo MLSB admitiu que a formalização da prestação de serviços via associações intermunicipais e regionalizadas (BRASIL, 2020). Porém, conforme apresentado por Milaré (2023), após três anos da implementação do novo MLSB, não se verificou evolução significativa nos serviços destes municípios.

Foi estabelecido, na revisão do Artigo 10º da Lei Federal 11.445, disposições acerca do conteúdo indispensáveis dos contratos relativos à prestação dos serviços públicos de saneamento que, sob pena de nulidade, devem apresentar:

- I. metas de expansão dos serviços, de redução de perdas na distribuição de água tratada, de qualidade na prestação dos serviços, de eficiência e de uso racional da água, da energia e de outros recursos naturais, do reuso de efluentes sanitários e do aproveitamento de águas de chuva, em conformidade com os serviços a serem prestados;
- II. possíveis fontes de receitas alternativas, complementares ou acessórias, bem como as provenientes de projetos associados, incluindo, entre outras, a alienação e o uso de efluentes sanitários para a produção de água de reuso, com

- possibilidade de as receitas serem compartilhadas entre o contratante e o contratado, caso aplicável;
- III. metodologia de cálculo de eventual indenização relativa aos bens reversíveis não amortizados por ocasião da extinção do contrato; e
  - IV. repartição de riscos entre as partes, incluindo os referentes a caso fortuito, força maior, fato do príncipe e área econômica extraordinária (BRASIL, 2020).

Os contratos, dessa forma, devem também definir metas para a universalização prevista no Artigo 11-B. De acordo com o novo MLSB, deverá ser garantido até 31 de dezembro de 2033 o atendimento de 99% da população com água potável e de 90% com coleta e tratamento de esgotos (BRASIL 2020). Um objetivo ousado quando comparado com a situação atual de apenas 55,8% da população atendida (SNIS, 2023).

Por fim, o novo MLSB altera os princípios fundamentais da prestação de serviços públicos de saneamento básico no artigo 2º da Lei 11.445, adicionando:

- I - [...] a efetiva prestação do serviço;
- XIV - prestação regionalizada dos serviços, com vistas à geração de ganhos de escala e à garantia da universalização e da viabilidade técnica e econômico-financeira dos serviços.
- XV - seleção competitiva do prestador dos serviços (BRASIL, 2020).

Estes aspectos estão diretamente relacionados ao objetivo de universalização dos serviços de saneamento básico do país, realizando a identificação das alternativas sustentáveis que abordam tanto o âmbito ambiental como o econômico e o social. Assim, tecnologias de tratamento de efluentes ou resíduos que outrora eram desconsideradas devido aos seus custos operacionais imediatos, poderão ser avaliadas de acordo com seu caráter positivo de longo prazo em termos de geração de empregos, reaproveitamento de subprodutos, eficiência energética e redução de impactos ambientais.

### 3.2. TRATAMENTO DE ESGOTOS

A disposição de esgotos sanitários não tratados nos corpos hídricos se apresenta como uma prática prejudicial que afeta a qualidade da água do corpo receptor. Por consequência, pode potencialmente impactar na saúde da

população e até inviabilizar o atendimento de usos a jusante, especialmente o abastecimento humano (ATLAS ESGOTOS, 2017).

Durante a primeira parte do século XX, o foco do desenvolvimento de sistemas de tratamento de efluentes tinha como finalidade apenas efetuar a remoção de matéria orgânica, nutrientes, poluentes e patógenos. Desta forma, a disponibilidade hídrica, com níveis de qualidade adequados, era potencializada, enquanto os riscos relacionados à saúde pública eram mitigados (METCALF & EDDY, 2016).

Entretanto, a partir da segunda metade do século XXI, o foco do tratamento de esgoto está sendo voltado para o desenvolvimento sustentável com consumo consciente de recursos. Segundo Tchobanoglous (2011), esgoto é, agora, considerado uma fonte renovável e recuperável de energia, de recursos e de água e, enquanto novas tecnologias se tornam disponíveis no futuro, é esperado que a eficiência de remoção de contaminantes se aperfeiçoem concomitantemente com a redução de consumo de energia e recursos.

Metcalf & Eddy (2016) afirmam que é razoável assumir que, em um futuro não muito distante, as estações de tratamento de esgotos se tornarão exportadoras e não mais consumidoras de energia.

### 3.2.1. ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

Segundo Von Sperling (2014), antes de se iniciar a concepção e o dimensionamento do tratamento, deve-se definir com clareza qual o objetivo do tratamento dos esgotos e que nível o mesmo deve ser processado. Assim, diversas configurações de operações podem ser concebidas para atingir a qualidade final de efluente desejada.

Considerando as várias conformações de operações unitárias que podem ser elaboradas, a NBR 12.209, de 2011, define uma Estação de Tratamento de Esgoto Sanitário como:

Conjunto de unidades de tratamento, equipamentos, órgãos auxiliares, acessórios e sistemas de utilidades, cuja finalidade é a redução das cargas poluidoras do esgoto sanitário e condicionamento da matéria residual resultante do tratamento.

Dessa forma, a capacidade de tratamento das ETEs é representada por uma série de operações unitárias que são implementadas para remover ou transformar os componentes presentes no esgoto bruto (JORDÃO & PESSÔA, 2017). Essas operações são, portanto, empregadas para o tratamento da fase líquida do esgoto, que corresponde ao fluxo líquido na ETE, e para a fase sólida, que se refere aos subprodutos sólidos gerados no tratamento (VON SPERLING, 2014), sendo separadas de acordo com o método e o nível de tratamento.

### 3.2.1.1. MÉTODOS DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Para Von Sperling (2014), os métodos de tratamento dividem-se em operações e processos unitários e, dependendo do processo a ser utilizado, vários mecanismos podem atuar de forma separada ou simultânea na remoção de poluentes. Metcalf & Eddy (2016) classificam os métodos de acordo com a forma na qual os constituintes encontrados no esgoto são removidos, resultando em três classes principais.

A primeira classe de métodos de tratamento de esgotos é aquela que inclui as operações unitárias nas quais predominam as forças físicas. Os processos unitários físicos constituem a maior parte do sistema de tratamento de esgoto, incluindo operações como gradeamento, redução de sólidos grosseiros, mistura e floculação, separação por gravidade, remoção de areia, sedimentação e flotação.

Já as etapas de tratamento de esgoto regidas por reações químicas para remoção ou alteração de contaminantes são conhecidas como processos unitários químicos. As principais operações unitárias químicas incluem coagulação, precipitação, oxidação, fotólise e neutralização. Diferentemente das outras classes de processos unitários, os processos químicos possuem a peculiaridade de serem aditivos, ou seja, há aumento dos constituintes presentes no efluente durante a etapa.

Por fim, existe a classe de processos unitários que inclui os métodos governados pela atividade microbiana, onde as substâncias presentes no esgoto são convertidas em gases ou em tecido celular. O tratamento biológico é utilizado, primariamente, para remover substâncias orgânicas biodegradáveis,

coloidais ou dissolvidas. Devido à sensibilidade dos microrganismos para a presença de compostos tóxicos, a implementação anterior de processos unitários químicos pode ser necessária para garantir a operabilidade ótima do sistema biológico.

Metcalf & Eddy (2016) dividem os processos biológicos em duas categorias principais: 1) os processos com crescimento suspenso, onde os microrganismos são mantidos em suspensão líquida por métodos de mistura adequados, e 2) os processos com crescimento aderido, onde os microrganismos se desenvolvem em meio material inerte gerando o biofilme.

Outra subdivisão importante acerca dos processos unitários biológicos se deve ao tipo de processo metabólico realizado pelos microrganismos presentes no sistema. Processos de tratamento aeróbios ocorrem a partir de reações químicas que consomem o oxigênio dissolvido livre na fase líquida, ao passo que processos de tratamento anaeróbios realizam reações metabólicas na ausência de oxigênio (METCALF & EDDY, 2016).

### 3.2.1.2. NÍVEIS DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Para Von Sperling (2014), a remoção dos poluentes no tratamento, de forma a adequar o lançamento a uma qualidade desejada ou ao padrão de qualidade vigente, está associada aos conceitos de nível do tratamento e eficiência do tratamento. A determinação do nível e da eficiência do tratamento exigido é condicionada: 1) às especificidades do uso da água a jusante do ponto de lançamento, 2) às características do corpo receptor, 3) à capacidade de autodepuração e diluição do corpo d'água, 4) às condicionantes das legislações ambientais vigentes e 5) às implicações resultantes do lançamento do esgoto (JORDÃO & PESSÔA, 2014).

Von Sperling (2014

) afirma também que o tratamento de esgotos é usualmente classificado em quatro níveis distintos: Preliminar, Primário, Secundário e Terciário. Esta classificação resulta no agrupamento e ordenamento de diferentes processos unitários para a remoção dos constituintes do esgoto (METCALF & EDDY, 2016).

O tratamento preliminar é governado por processos físicos e tem por objetivo a remoção dos sólidos grosseiros presentes no efluente bruto que possam causar problemas operacionais ou de manutenção na estação de tratamento de esgotos (METCALF & EDDY, 2016). Esta etapa do tratamento é representada pelo uso de grades, trituradores, peneiras e desarenadores, tendo como alguns constituintes removidos areia, trapos, plásticos e qualquer material com dimensão superior a um centímetro (VON SPERLING, 2014).

O tratamento primário é também governado por processos físicos e está relacionado à remoção de parte de sólidos suspensos e matéria orgânica do esgoto (METCALF & EDDY, 2016). Assim, a remoção por operações simples implica na redução da carga de DBO suspensa que está presente no esgoto, reduzindo custos operacionais no tratamento secundário.

Essa fase está associada à utilização de decantadores primários, nos quais o esgoto flui de maneira gradual, possibilitando a separação com base na densidade da fase líquida e dos contaminantes sólidos em suspensão. Os sólidos de densidade elevada sedimentam progressivamente no leito dos decantadores, originando o lodo primário bruto, enquanto substâncias de menor densidade, como graxas e óleos, emergem e se acumulam na superfície, sendo subsequentemente coletadas e removidas (VON SPERLING, 2014).

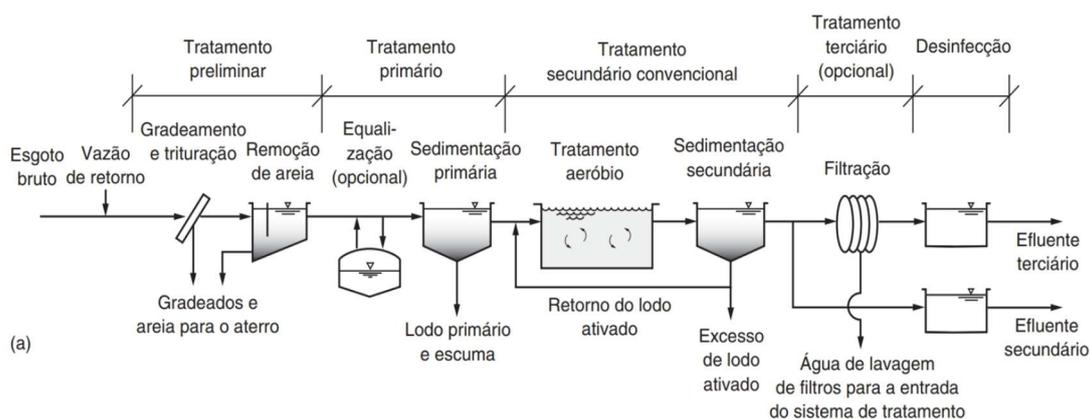
O tratamento secundário é concebido para a remoção de matéria orgânica biodegradável (em solução ou em suspensão) e sólidos suspensos. A parcela solúvel da DBO não pode ser removida por processos meramente físicos, necessitando a implementação de processos unitários químicos e biológicos (METCALF & EDDY, 2016).

Existe uma grande variedade de métodos de tratamento a nível secundário que realizam a decomposição dos poluentes orgânicos em condições controladas com maior velocidade do que os sistemas naturais. Alguns dos processos mais comuns são: Lagoas de estabilização, lodos ativados, filtros biológicos e tratamento anaeróbio (VON SPERLING, 2014).

Por fim, o tratamento terciário objetiva a remoção de poluentes residuais ou poluentes específicos persistentes a partir da combinação dos três tipos de

processos unitários e é requerido para diversas aplicações de reuso (METCALF & EDDY, 2016). Devido ao seu caráter complementar, este nível é implementado para a remoção de compostos não biodegradáveis ou tóxicos, metais pesados e patógenos (VON SPERLING, 2014).

Figura 1 - Fluxograma de tratamento biológico convencional



Fonte: Metcalf & Eddy et al. (2016).

### 3.2.1.3. SUBPRODUTOS DO TRATAMENTO DE ESGOTOS

Subprodutos sólidos são gerados ao longo das diferentes etapas do tratamento de esgotos, sendo consequências naturais da operação das estações e, dessa forma, seu tratamento é essencial. Embora distintas composições e quantidades de resíduos podem ser gerados em diferentes combinações de operações unitárias de tratamento de esgotos, os principais são: materiais gradeados, areia, espuma e lodos (VON SPERLING, 2014).

Os materiais gradeados são aqueles elementos que permanecem retidos no tratamento preliminar, tendo suas dimensões diretamente relacionadas com o tamanho de abertura das grades ou telas presentes na estação de tratamento. Devido à efemeridade de seu acúmulo, não existe uma definição precisa da composição do material que pode variar entre resíduos orgânicos, como galhos ou pequenos animais, e resíduos inorgânicos, como plásticos e trapos (METCALF & EDDY, 2016).

A separação de areia do esgoto é, usualmente, efetuada em caixas de areia independentes e projetadas para separar fisicamente as partículas de areia

das partículas orgânicas que são mais leves (METCALF & EDDY, 2016). Devido ao seu caráter abrasivo, a remoção de areia da composição do efluente é essencial para a proteção e confiabilidade dos equipamentos à jusante da ETE.

Metcalf & Eddy (2016) definem espuma como um material flotável (densidade inferior à da água) de composição variável, podendo conter graxas, óleos vegetais e minerais, gorduras, dentre outros. A espuma tende a se acumular na superfície dos tanques presentes na estação de tratamento. Sua retirada da fase líquida é realizada via tratamento primário com caixas de gorduras ou flotores.

Dos subprodutos sólidos originados durante o tratamento de esgotos, o lodo se destaca como a fração de maior volume. Seu processamento, a viabilidade de reuso e a disposição final do material constituem a questão mais complexa na área de tratamento de efluentes (METCALF & EDDY, 2016) e são abordados no próximo tópico deste trabalho.

### 3.3. LODOS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

#### 3.3.1. DEFINIÇÕES E ASPECTOS GERAIS

Segundo Metcalf & Eddy (2016), “lodo” é qualquer material sólido produzido nos diferentes processos de tratamento de efluentes que não tenha sido submetido a nenhum processo de redução de patógenos ou atração de vetores. Sua produção está ligada diretamente ao sistema de tratamento utilizado para a fase líquida e, em princípio, todos os processos de tratamento biológico geram lodo (ANDREOLI et al, 2014).

Embora apresente elevado teor de água em sua constituição ao longo de seu manuseio, lodos são designados como fase sólida para distingui-lo do fluxo líquido que está sendo tratado (VON SPERLING, 2014). As características do lodo variam de acordo com a sua origem, o tempo entre a sua geração e o processamento, bem como o tipo de processamento ao qual o lodo foi submetido (METCALF & EDDY, 2016).

A distinção principal entre os tipos de lodos se dá em função da etapa de tratamento que o gera, sendo subdivididos em lodo primário, lodo secundário, lodo misto e lodo químico. Em todos estes casos o descarte de lodo será necessário, podendo ser retirado de forma contínua ou armazenado por um período de tempo. Por definição, o lodo biológico descartado é denominado lodo excedente (ANDREOLI et al, 2014).

O lodo primário somente é gerado em estações de tratamento de esgotos que possuem uma etapa de tratamento primário, e é constituído pelos sólidos do esgoto bruto removidos via sedimentação. Como não há remoção da matéria orgânica presente, os lodos primários podem gerar odores desagradáveis, principalmente se mantidos em condições de elevada temperatura por um longo período (ANDREOLI et al, 2014).

O lodo secundário é originado em etapas de tratamento biológico, podendo, portanto, ser chamado de lodo biológico. Este lodo é composto pela biomassa gerada a partir do consumo da matéria orgânica presente no esgoto afluente e, caso não seja removida, haverá tendência de acúmulo dentro do sistema, que irá deteriorar a qualidade do efluente tratado (ANDREOLI et al, 2014).

Dois cenários distintos podem ocorrer em sistemas de tratamento biológico aeróbio, afetando diretamente a qualidade do lodo. Em condições ideais de disponibilidade de alimento e tempo de permanência no reator, o tratamento resultará no lodo digerido, que apresenta um baixo teor de matéria orgânica e maior teor de sólidos inorgânicos. Por sua vez, caso a disponibilidade de matéria orgânica seja elevada e o tempo de permanência seja baixo, a degradação dos sólidos não será completa, originando o lodo não estabilizado que necessitará de uma etapa posterior de digestão, para evitar a emissão de maus odores durante seu tratamento e disposição final (ANDREOLI et al, 2014).

Em sistemas de tratamento biológico anaeróbio, a biomassa é retida por um longo período de tempo, resultando na digestão anaeróbia do próprio material celular. Por apresentar condições controladas de digestão

metanogênica da matéria orgânica, o lodo final se enquadra como estabilizado, não apresentando maus odores (ANDREOLI et al, 2014).

Estações de tratamento de esgotos com maior complexidade de operações unitárias podem originar lodos resultantes da combinação de diferentes métodos de tratamento. O lodo misto é originado quando o lodo primário é removido dos decantadores primários e enviados para tratamento conjunto com os lodos secundários. Por sua vez, o lodo químico é resultante de operações de precipitação química, podendo apresentar em sua composição sais metálicos de difícil decomposição ou com características tóxicas (ANDREOLI et al, 2014).

A variedade de lodos que podem ser originados em sistemas de tratamento de esgotos exige, para fins de destinação final, atenção para a composição físico-química do resíduo. Conforme apresentado na NBR 10.004 (2004), os resíduos sólidos são classificados quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública e, para efeito da norma, os lodos podem ser caracterizados como: perigosos (Classe I) e não perigosos (Classe II), sendo a última subdividida em não inertes (II-A) e inertes (II-B). Geralmente, lodos de estações de tratamento de esgotos sanitários são caracterizados como Resíduos Sólidos de Classe II-A, devido ao potencial de biodegradabilidade apresentado na fase sólida.

A definição do lodo como um resíduo sólido o torna parte integral das diretrizes de gestão e gerenciamento aplicadas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos do Brasil (PNRS), promulgada na Lei Federal 12.305 de 2010. A PNRS reconhece o resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania, enquanto restringe a disposição em aterros sanitários apenas para rejeitos, onde não há mais possibilidade de reaproveitamento.

Em vista das disposições da PNRS, a escolha do processo de tratamento e da disposição final dos lodos devem considerar igualmente os aspectos ambientais, sociais e econômicos. Isto posto, o entendimento acerca da quantidade e composição do lodo gerado na estação de tratamento de esgotos

sanitários serve como base para determinar a viabilidade técnica e econômica das alternativas de estabilização e de destinação.

### 3.3.2. GERAÇÃO DE LODO EM DIFERENTES SISTEMAS DE TRATAMENTO

Como abordado anteriormente, as características do lodo estão relacionadas diretamente com as operações unitárias de tratamento de esgotos. Portanto, a geração de lodo é dependente da configuração da estação de tratamento, que também está sujeita a variações de vazão de entrada de efluente ao longo de um dia. Essas características podem alterar significativamente a taxa de geração de subprodutos, bem como sua eficiência de tratamento.

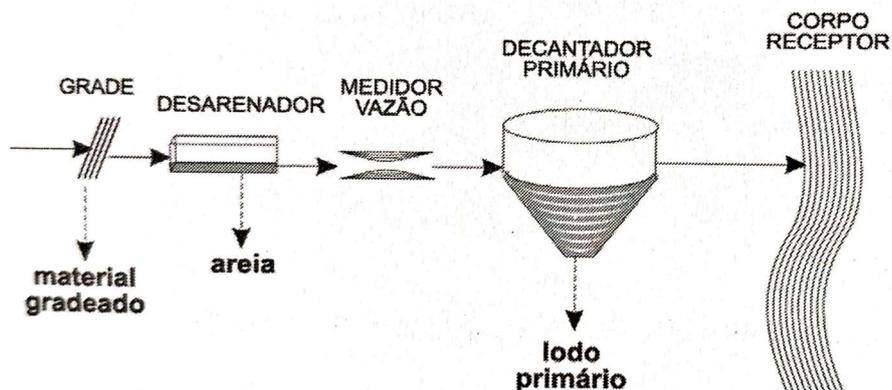
Dessa forma, o projeto das unidades de tratamento e disposição de lodos deve levar em consideração os seguintes fatores: as taxas médias e máximas de produção de lodos; e a capacidade potencial de armazenamento das unidades de tratamento na estação (METCALF & EDDY, 2016). Ademais, a seleção dos processos de tratamento de esgotos está relacionada às características do corpo receptor e da legislação vigente no local de instalação (ATLAS ESGOTOS, 2017).

A seguir, os sistemas de tratamento de esgotos sanitários comumente utilizados em estações municipais brasileiras conforme o Atlas Esgotos (2017) serão abordados, avaliando as suas especificidades de funcionamento, os prós e contras de sua utilização e as características e quantidade do lodo gerado.

#### 3.3.2.1. TRATAMENTO EM NÍVEL PRIMÁRIO

Estações de Tratamento de Esgotos que apresentam apenas processos de tratamento primário atendem 11% da população brasileira servida por coleta e tratamento de esgotos (ATLAS ESGOTOS, 2017), principalmente em regiões marítimas. Dessa forma, são geralmente associados a emissários submarinos que se utilizam da capacidade de diluição e autodepuração dos constituintes dos esgotos que a disposição em corpos d'água promove (ORTIZ, 2007).

Figura 2 - Fluxograma de um sistema de tratamento primário convencional



Fonte: Andreoli et al. (2014).

A eficiência em uma estação de tratamento de esgotos sanitários com funcionalidade baseada apenas em um sistema primário é extremamente limitada. Segundo Von Sperling (2014), esses sistemas apresentam eficiência de remoção de Sólidos Suspensos entre 60 e 70% e para DBO e Coliformes entre 30 e 40%, respectivamente. Dessa forma, ressalta-se a necessidade de um tratamento posterior em locais onde não é possível realizar a diluição de efluente em corpos hídricos.

A geração de lodo em sistemas de tratamento primário é pequena em comparação aos sistemas biológicos de lodos ativados (ANDREOLI et al, 2014). Por consistir de uma mistura complexa de diversos componentes orgânicos e inorgânicos, o lodo primário apresenta um desafio considerável para sua gestão (BHATTACHARYA, 1981). Essa complexidade caracteriza o lodo como não estabilizado, sofrendo digestão anaeróbia natural com o passar do tempo e requerendo etapas de tratamento posteriores antes do seu descarte final.

### 3.3.2.2. TRATAMENTO POR LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO

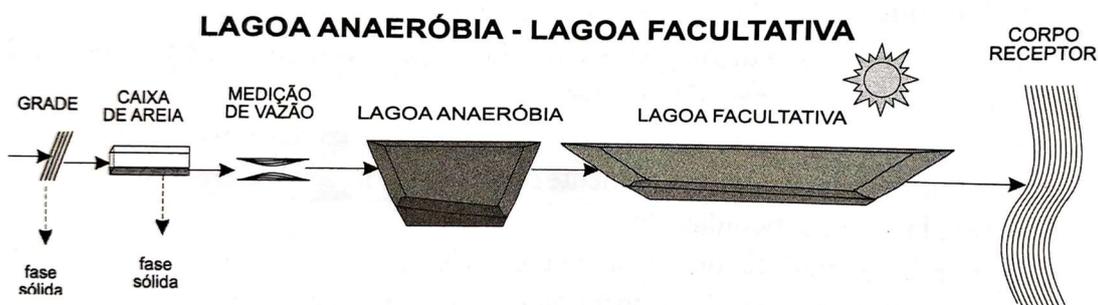
Os sistemas de lagoas de estabilização possuem operação simples e baixo custo operacional e construtivo, com resistência satisfatória às variações de cargas afluentes e boa eficiência para remoção da matéria orgânica presente no esgoto (VON SPERLING, 2014). Porém, o processo requer amplo espaço

para a sua implantação, o que o torna inadequado para vazões extremamente grandes em áreas densamente povoadas (METCALF & EDDY, 2016).

As lagoas de estabilização se utilizam das interações físicas que a água realiza com os diferentes tipos de matéria orgânica presentes no esgoto bruto. A DBO em suspensão tende a sedimentar ao longo da lagoa, formando um lodo que passa por decomposição anaeróbia, enquanto a DBO solúvel e finamente particulada é decomposta aerobiamente por bactérias mantidas em suspensão no meio líquido (VON SPERLING, 2017).

No Brasil, o tratamento de esgotos com uso de lagoas anaeróbias seguidas de lagoa facultativa representa 8% da população atendida com estações de tratamento (ATLAS ESGOTOS, 2017). Esta configuração, conhecida como sistema australiano, inclui uma lagoa com menor área superficial e maior profundidade que irá limitar as reações de fotossíntese, favorecendo o crescimento de bactérias anaeróbias (VON SPERLING, 2017).

*Figura 3 - Fluxograma de um sistema australiano de lagoas de estabilização.*



*Fonte: Von Sperling (2017).*

Comparando a geração e gestão de lodos em lagoas de estabilização com outros sistemas de tratamento, as lagoas destacam-se por uma vantagem significativa: a capacidade de acumular o lodo no fundo sem a necessidade imediata de remoção. Contudo, em lagoas de menor dimensão, como as lagoas anaeróbias, uma vez que o volume útil disponível é impactado pelo acúmulo de sólidos, a gestão eficiente do lodo torna-se crucial e exige estratégias específicas para sua remoção, tratamento e disposição final (VON SPERLING, 2017).

### 3.3.2.2. TRATAMENTO POR REATORES ANAERÓBIOS

Segundo Chernicharo (2016), o conhecimento acerca dos sistemas anaeróbios de tratamento avançou extensamente nas últimas décadas. Assim, essa tecnologia passou a ocupar uma posição destacada dentre as diferentes possibilidades de tratamento de esgotos no país, principalmente com relação ao desenvolvimento de reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB).

Dessa forma, os processos de tratamento operados com reator anaeróbio abrangem aproximadamente 6,5% da população brasileira que possui acesso ao tratamento de esgotos, sendo o sistema predominante nas regiões Centro-oeste, Nordeste e Sul (ATLAS ESGOTOS, 2017). Assim como as lagoas anaeróbias, esses sistemas são de simples operação, baixo custo operacional, elevada vida útil e possuem a vantagem de necessitar de pouca área para implementação (CHERNICHARO, 2016).

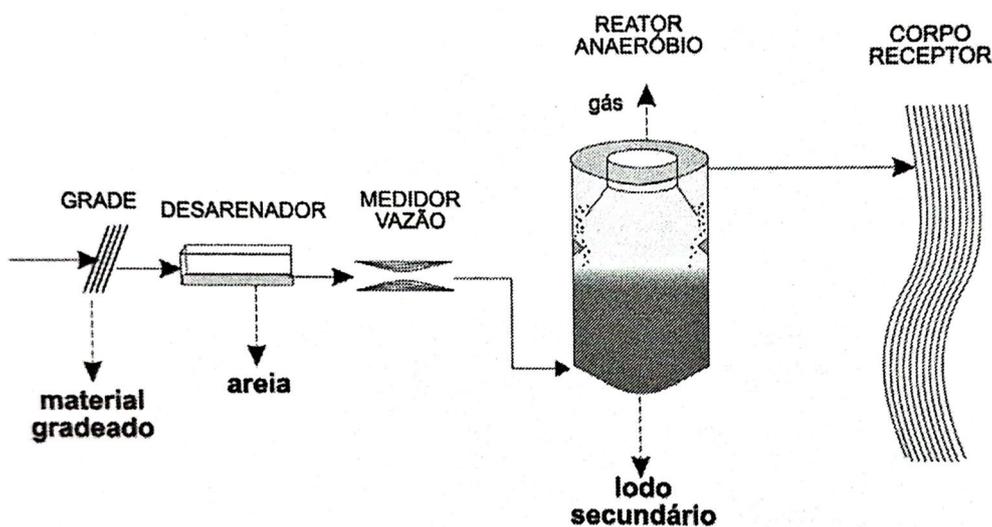
Os processos de tratamento anaeróbio podem ser subdivididos em dois grandes grupos: sistemas convencionais e sistemas de alta taxa. O primeiro se refere a reatores operados com baixas cargas orgânicas e que não retém quantidades elevadas de biomassa ativa. O segundo é relacionado aos reatores operados com baixos tempos de detenção hidráulica com mecanismos de retenção de biomassas (CHERNICHARO, 2016).

Dentro dos reatores de alta taxa, destacam-se os reatores UASB, que proporcionam fluxo ascendente de esgotos através de um leito ativo de alta densidade de lodo, formado por microrganismos de elevada atividade, realizando a digestão anaeróbia do afluente enquanto cultiva um lodo anaeróbio de boa qualidade. O sistema é considerado por Chernicharo (2016) como de bastante simplicidade e sem demanda de equipamentos ou meios de suporte para retenção de biomassa.

Os sistemas UASB apresentam uma eficiência limitada para o tratamento de esgotos sanitários, que é valorizada pelo seu baixo consumo energético. Conforme Jordão & Pessoa (2017), considerando o tempo de detenção hidráulica do reator, a remoção de DQO está limitada à faixa de 40 a 75% e de DBO à 45 e 85%. Além disso, a remoção de nutrientes é relativamente baixa,

encontrando-se acima das relações N/DQO e P/DQO consideradas boas para um processo biológico.

Figura 4 - Fluxograma de um reator de manta de lodo (UASB)



Fonte: Andreoli et al. (2014).

Por consequência das reações metabólicas anaeróbicas, gás metano é formado no interior dos reatores UASB e segue o fluxo ascendente do efluente em tratamento. Esse gás é coletado no topo do reator, sendo separado do esgoto afluente e permitindo a sua queima, reaproveitando a energia térmica presente na molécula (VON SPERLING, 2014).

Conforme Andreoli et al. (2014), a produção de lodo em sistemas UASB é considerável. Caso não seja realizado o descarte periódico da matéria orgânica acumulada dentro do reator, haverá carreamento de sólidos pela saída superior de efluente, aumentando a concentração final de SST, DBO e DQO (JORDÃO & PESSÔA, 2017).

Chernicharo (2016) também apresenta que, devido ao bom grau de estabilização dos lodos de sistemas de tratamento o UASB, o seu envio para desidratação não necessita de etapas prévias de tratamento. Além disso, o lodo seco pode ser utilizado como fertilizante na agricultura, respeitando os cuidados exigidos para a presença de patógenos.

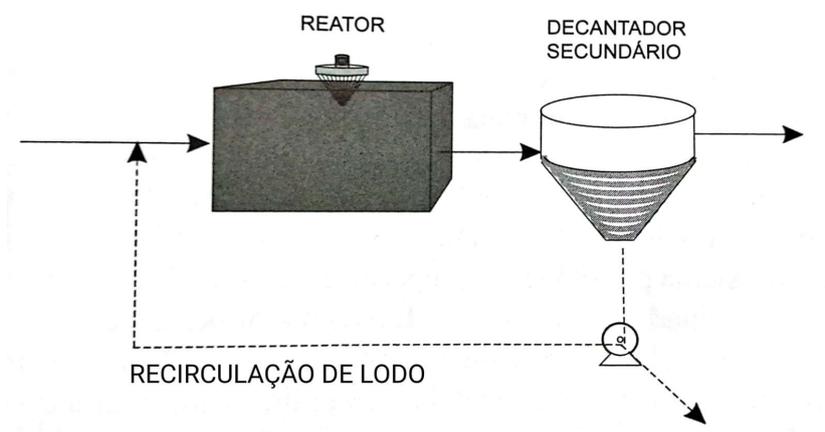
### 3.3.2.3. TRATAMENTO POR LODOS ATIVADOS

Os sistemas de tratamento por lodos ativados convencional e de aeração prolongada abrangem juntos aproximadamente 30% da população que possui acesso ao tratamento de esgotos, sendo o primeiro o de maior participação com 24% do total. Utilizados principalmente em grandes cidades, estes sistemas são caracterizados pela pequena área desprendida e pela boa qualidade de efluente produzido (ATLAS ESGOTOS, 2017).

Von Sperling (2018) indica que, por ser mais complexo que os sistemas anteriores, o sistema de lodos ativados apresenta um índice de mecanização superior, necessitando de maior consumo de energia elétrica e uma operação sofisticada com maior atenção a processos de manutenção.

As operações unitárias principais que integram a etapa biológica de um sistema de lodos ativados convencional são: um reator de aeração, um tanque de decantação (decantador secundário) e a recirculação de lodos (Von Sperling, 2018). O sistema é geralmente estruturado conforme o fluxograma da Figura 5.

*Figura 5 - Operações unitárias principais do Sistema de Lodos Ativados*



*Fonte: Adaptado de Von Sperling (2018).*

O sistema de lodos ativados é caracterizado pela alta carga orgânica presente dentro do reator aeróbio, que realiza a digestão da matéria orgânica presente no esgoto bruto afluente e dos sólidos sedimentados no fundo do decantador secundário que são recirculados, o que eleva a eficiência do sistema (VON SPERLING, 2018). A recirculação é facilitada pela característica de

floculação da biomassa que chega ao tanque de decantação, permitindo sua decantação rápida devido às maiores dimensões dos flocos.

O tempo de detenção hidráulica (TDH) do líquido dentro do sistema de lodos ativados é na ordem de horas, permitindo um volume reduzido para o tanque de aeração. Por sua vez, o tempo de retenção de sólidos é superior ao TDH, aumentando a idade média do lodo e ocasionando a metabolização praticamente completa da matéria orgânica dos esgotos, o que justifica a elevada eficiência dos sistemas de lodos ativados (VON SPERLING, 2018).

Por funcionar com entrada afluyente de DBO contínua, o sistema tende a aumentar a população microbiológica total. Por consequência, isso pode dificultar a oxigenação adequada e sobrecarregar o decantador secundário, reduzindo a sedimentação e ocasionando no carreamento de carga orgânica no efluente final. Dessa forma, o lodo biológico excedente deve ser retirado para manter o sistema em equilíbrio sem acúmulo de matéria orgânica, sendo essa biomassa da mesma ordem que a aumentada pela reprodução de microrganismos no mesmo período (VON SPERLING, 2018).

Segundo Andreoli et al. (2014), os sistemas de lodo ativado são os maiores geradores de volume de lodo por habitante dentre as diferentes opções apresentadas neste trabalho, produzindo diariamente entre 3,1 e 8,2 L/hab (litros de lodo por habitante). Metcalf & Eddy (2016) apresentam a composição química típica de lodos excedentes ativados não tratados, mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição física e química de lodos ativados não tratados

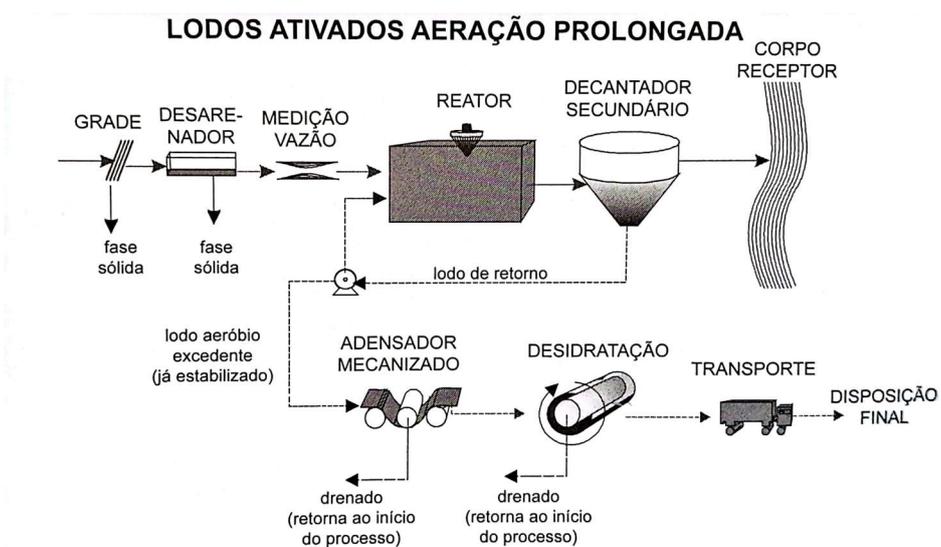
Item	Faixa	Típico
Teor de sólidos secos (% de ST)	0,4 - 1,2	0,8
Sólidos voláteis (% de ST)	60 - 85	70
Graxas e gorduras (% de ST)	5 - 12	8
Proteínas (% de ST)	32 - 41	36
Nitrogênio (N, % de ST)	2,4 - 5	3,8
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , % de ST)	2,8 - 11	5,5
Potássio (K <sub>2</sub> O, % de ST)	0,5 - 0,7	0,6
Celulose (% de ST)	-	
Ferro (não como sulfeto)	-	
Sílica (SiO <sub>2</sub> , % de ST)	-	
pH	6,5 - 8	7,1
Alcalinidade (mg/L como CaCO <sub>3</sub> )	580 - 1100	790
Ácidos orgânicos (mg/L como HAc)	1100 - 1700	1350
Poder energético, kJ/kg de SSV	19000 - 23000	20000

Fonte: Adaptado de Metcalf & Eddy (2016).

Os sistemas de tratamento via lodos ativados, por conta da sua eficiência, podem ser utilizados para o tratamento do esgoto bruto, mas também para o lapidamento de efluentes de outros sistemas afluentes. Diferentes sistemas de lodos ativados existem no Brasil, sendo subdivididos de acordo com a idade do lodo e quanto ao fluxo afluente (VON SPERLING, 2018).

Conforme Von Sperling (2018), a subdivisão de lodos ativados inclui o sistema Convencional, que se caracteriza por possuir reduzida idade de lodo, na faixa de 4 a 10 dias, e alta carga de DBO aplicada; e o sistema de Aeração Prolongada (Figura 6), com elevada idade de lodo, na ordem de 18 a 30 dias, baixa carga de DBO aplicada, e ausência de decantador primário.

Figura 6 - Fluxograma de um Sistema de Lodos Ativos de Aeração Prolongada



Fonte: Andreoli et al. (2014).

Por sua vez, a subdivisão por tipo de fluxo inclui os sistemas de Fluxo Contínuo, onde a fase líquida entra e sai continuamente do reator de lodos ativados, e de Fluxo Intermitente, no qual reatores paralelos recebem a carga afluyente de forma descontínua e, em caso de sistemas de aeração prolongada, incorporam a etapa de digestão aeróbia do lodo. A combinação das diferentes subdivisões é um critério importante para o dimensionamento do projeto e para otimizar os parâmetros de tratamento e eficiência do sistema como um todo.

A operação de sistemas de tratamento de lodo ativado como pós-tratamento de efluentes de reatores UASB tem sido desenvolvida nos últimos anos. Neste cenário, o reator anaeróbio substitui o decantador primário e é capaz de receber o volume de lodo aeróbio excedente. Assim, a massa de lodo produzida é reduzida em até 60% quando comparada à gerada em sistemas convencionais (VON SPERLING, 2018).

Von Sperling (2018) compara as alternativas de sistemas de tratamento de esgotos com processos de lodos ativados, indicando as principais características do sistema convencional, da aeração prolongada e da combinação com UASB. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Principais Características dos Sistemas de Lodos Ativados

Item Geral	Item Específico	Modalidade		
		Convencional	Aeração Prolongada	Combinação com UASB
Idade do lodo	Idade (dia)	4 - 10	18 - 30	6 - 10
Relação A/M	kgDBO/kgSSVTA.d	0,25 - 0,50	0,07 - 0,15	0,25 - 0,40
Eficiência de Remoção	DBO (%)	85 - 95	93 - 98	85 - 95
	DQO (%)	85 - 90	90 - 95	83 - 90
	Sólidos Suspensos (%)	85 - 95	85 - 95	85 - 95
	Amônia (%)	85 - 95	90 - 95	75 - 90
	Nitrogênio (%)	25 - 30	15 - 25	15 - 25
	Fósforo (%)	25 - 30	10 - 20	10 - 20
	Coliformes (%)	60 - 90	70 - 95	70 - 95
Energia	Consumo energético (kWh/hab.ano)	18 - 26	20 - 35	14 - 20
Volume de lodo	A ser tratado (L/hab.d)	3,5 - 8,0	3,5 - 5,5	0,5 - 1,0

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2018).

### 3.3.3. GESTÃO DE LODOS DE ETE

A importância do gerenciamento do lodo de esgoto proveniente de estações de tratamento é reconhecida desde a realização da ECO-92, na qual a Agenda 21 foi desenvolvida. Destaca-se o seu Capítulo 21, que dispõe sobre o “Manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos e questões relacionadas com esgotos” (ANDREOLI et al, 2014). A redução de produção, o aumento da reutilização e da reciclagem do material e a promoção de depósitos e tratamento ambientalmente corretos são ações orientativas elaboradas na Agenda 21.

A gestão de lodos é uma atividade de grande complexidade e alto custo dentro de um sistema de tratamento de esgotos e, por isso, se for mal executada, pode comprometer os benefícios ambientais e sanitários esperados, apesar do atendimento às normas de qualidade final do efluente. (ANDREOLI et al, 2014).

Ainda, conforme Metcalf & Eddy (2016), as normas que tratam sobre a qualidade final do efluente estão se tornando cada vez mais restritivas, influenciando o desempenho dos processos de tratamento e, por consequência, na quantidade e qualidade dos lodos produzidos no sistema.

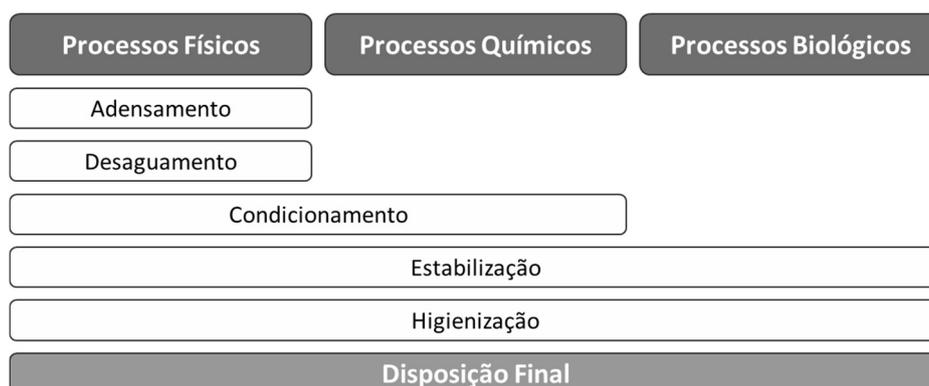
O cenário atual de esgotamento sanitário no Brasil (SNIS, 2023) indica que 55,8% da população brasileira é atendida por rede coletora de esgotos, 50,8% do esgoto gerado é tratado e a produção per capita volumétrica de lodo varia de 1 a 4 litros por dia (ANDREOLI et al, 2014). Desta forma, estima-se que a faixa de geração de lodo no país está entre 108 e 435 mil toneladas por dia. Esse resultado desconsidera o volume potencial de lodo não produzido por conta da parcela de esgotos despejados em corpos hídricos sem tratamento.

Considerando os baixos índices de tratamento de esgotos, Andreoli et al (2014) comentam que a gestão de lodos é um problema crescente no Brasil. Além disso, apresenta tendência de agravamento nos próximos anos conforme se aumenta o número de ETEs em operação, visando atingir as metas do novo Marco Legal do Saneamento Básico.

Andreoli et al (2014) mencionam que, embora o lodo seja apenas uma pequena fração do volume total de esgoto tratado na ordem de 1 a 2%, o custo relacionado ao seu tratamento pode variar entre 20% e 60% do total gasto em estações de tratamento de esgotos e representar 90% dos problemas operacionais da mesma. Mesmo assim, essa atividade é muitas vezes negligenciada por projetos de ETEs que omitem o tema e fazem com que alternativas inadequadas sejam adotadas e operacionalizadas.

Portanto, é fundamental o entendimento acerca da funcionalidade, dos custos, dos benefícios e dos resultados das principais operações utilizadas para o tratamento de lodos. Andreoli et al (2014) afirmam que a incorporação de diferentes etapas de processamento depende das características gerais do lodo produzido na estação de tratamento, ou seja, do tipo de tratamento utilizado, e pode incluir uma ou mais das atividades presentes na Figura 7.

*Figura 7 - Principais etapas do gerenciamento de lodos*



*Fonte: O autor (2024).*

### 3.3.3.1. ETAPAS DO TRATAMENTO DE LODOS

Os principais objetivos do tratamento de lodos envolvem a remoção de umidade, matéria orgânica e organismos patogênicos. Dessa forma, o volume final de lodo pode ser reduzido, minimizando custos com transporte e destinação final, atenuando odores e possibilitando que condições básicas para reciclagem agrícola sejam atingidas (ANDREOLI et al, 2014).

Devido à variedade dos sistemas de tratamento de esgotos disponíveis, não há uma ordem fixa de operações de tratamento de lodos, possibilitando diversas combinações e fluxogramas condizentes com a peculiaridade local. Considerando isso, os principais processos serão descritos de acordo com a ordem exposta por Andreoli et al (2014), sendo as atividades de disposição final expostas em tópico separado.

#### 3.3.3.1.1. ADENSAMENTO

O adensamento de lodo, também conhecido como espessamento, é um processo físico essencial para a redução de volume, visando a redução da umidade do lodo e aumento da concentração de sólidos a partir da remoção parcial de água contida em sua umidade (ANDREOLI et al, 2014). Resultando na diminuição da capacidade volumétrica de unidades subsequentes de tratamento, as vantagens do adensamento incluem a redução do volume nos digestores, o dimensionamento otimizado das bombas, a diminuição do

consumo de produtos químicos no desaguamento e a eficiência energética aprimorada no aquecimento dos digestores (PEDROZA et al, 2010).

Além de contribuir para a otimização dos processos posteriores de tratamento, o adensamento de lodo oferece vantagens significativas para o descarte eficiente. As atividades combinadas para reduzir o teor de água não apenas minimizam os custos de transporte, manejo e armazenamento, mas também aprimoram a sustentabilidade do descarte final (ANDREOLI et al, 2014).

Segundo Metcalf & Eddy (2016), as operações físicas de adensamento mais utilizadas incluem sedimentação gravitacional, flotação, centrifugação e filtração em prensas e tambores rotativos. O adensamento é utilizado, principalmente, em lodos oriundos de processos de tratamento primário e de lodos ativados (ANDREOLI et al, 2014). A eficiência do adensamento pode ser ilustrada com o processamento de lodo excedente de lodos ativados que, originalmente possui concentração típica de sólidos em até 1%, podem ser concentrados em até 4%, reduzindo o volume em até cinco vezes.

#### 3.3.3.1.2. ESTABILIZAÇÃO

Conforme Andreoli et al (2014), o lodo de esgotos, em seu estado natural, é facilmente putrescível e desenvolve odores desagradáveis por conta da riqueza de organismos patogênicos presentes em sua matriz. Dessa forma, a estabilização da fração biodegradável da matéria orgânica é de suma importância para redução de patógenos e evitar a emissão de odores por conta da putrefação.

Metcalf & Eddy (2016) consideram que os meios para eliminar essas condições estão diretamente relacionados a inviabilizar a sobrevivência de microrganismos através de processos biológicos ou químicos. Assim, além dos aspectos mencionados, a estabilização pode resultar na redução do volume do lodo, na produção de gás metano e na melhoria do desaguamento do lodo.

O grau de estabilização do lodo produzido ao longo do sistema de tratamento de esgotos varia de acordo com o processo adotado e, portanto, a necessidade de estabilizar os lodos é consequência do projeto de ETE

estabelecido (ANDREOLI et al, 2014). Alguns aspectos acerca da geração de lodos são imprescindíveis para o sucesso de projetos de estabilização como, por exemplo, a quantidade a ser processada, as legislações vigentes e a integração com outros processos unitários (METCALF & EDDY, 2016).

Segundo Andreoli et al. (2014), os processos de estabilização podem ser divididos em três rotas principais que são descritas no Quadro 2: a biológica, a química e a térmica.

*Quadro 2 - Descrição dos Processos de Estabilização de Lodos*

<b>Rota</b>	<b>Mecanismo de Estabilização</b>
Biológica	Utiliza bactérias para promover a estabilização da fração biodegradável da matéria orgânica presente no lodo.
Química	Utiliza processos de oxidação química da matéria orgânica para atingir níveis adequados de estabilização do lodo.
Térmica	Utiliza a ação do calor sobre a fração volátil da matéria orgânica em recipientes hermeticamente fechados para estabilizar o lodo.

*Fonte: Adaptado de Andreoli et al (2014).*

Os processos de estabilização que atuam na rota biológica são os mais utilizados no país, sendo parte integral do tratamento secundário das estações de tratamento de esgotos sanitários ou industriais. A rota é subdividida em processos anaeróbios e aeróbios, sendo a segunda pouco difundida e utilizada para estabilização de lodo ativado excedente de ETEs com remoção biológica de nutrientes (ANDREOLI et al, 2014).

A efetiva operação dos processos de estabilização é necessária para atender às disposições expressas na Resolução CONAMA nº 498, de 2020, que define todo lodo estabilizado como um bio sólido. Esse é considerado um produto apto a ser aplicado em solos, desde que suas características atendam aos devidos critérios microbiológicos e químicos estabelecidos pela referida Resolução (CONAMA, 2020).

### 3.3.3.1.3. CONDICIONAMENTO

O condicionamento do lodo influencia diretamente na eficiência dos processos de tratamento subsequentes e é anterior à etapa de desaguamento. Pode ser realizado a partir da adição de produtos químicos ou tratamento térmico e visa modificar uma ou mais das seguintes características das partículas de lodo: tamanho, distribuição, cargas de superfície e interação entre partículas (ANDREOLI et al. 2014).

A etapa é comumente realizada via etapas consecutivas de coagulação e floculação, desestabilizando as forças eletrostáticas das partículas e posteriormente aglomerando coloides e sólidos finos em meios de baixa agitação (ANDREOLI et al, 2014). Assim como ocorre para outros processos, sua eficiência é dependente das características do lodo a ser tratado e dos processos mecânicos envolvidos, afetando na quantidade de produtos químicos utilizados.

As diferentes alternativas de processos de condicionamento de lodos possuem efeitos e resultados distintos, sendo sua escolha relacionada aos objetivos finais do tratamento e geração de biossólidos. As principais opções e seus efeitos estão descritas na Tabela 4.

*Tabela 4 - Efeito dos Processos de Condicionamento em Lodos de ETEs*

<b>Agente Condicionante</b>	<b>Mecanismo de Atuação</b>	<b>Efeito na Massa de Lodo</b>
Produto Inorgânico	Coagulação e Floculação	Aumento Significativo
Produto Orgânico	Coagulação e Floculação	Nenhum
Tratamento Térmico	Alteração em Propriedades Químicas e Biológicas	Redução

*Fonte: Adaptado de Andreoli et al (2014).*

### 3.3.3.1.4. DESAGUAMENTO

O desaguamento de lodos, também chamado de etapa de desidratação, tem por objetivo remover ainda mais água da matriz dos lodos e biossólidos,

reduzindo ainda mais o seu volume, aumentando seu teor de sólidos e tornando seu comportamento mecânico similar ao de sólidos. Assim como ocorre com o adensamento, esta etapa tem impacto nos custos de transporte e destinação final (ANDREOLI et al, 2014).

Para Metcalf & Eddy (2016), além dos benefícios anteriores relacionados aos aspectos financeiros, o aumento de teor de sólidos no lodo ou em biossólidos pode propiciar também as seguintes implicações:

- Facilitar a manipulação do material, possibilitando o uso de pás e tratores com pás e o transporte com correias transportadoras;
- Aumentar o poder calorífico do material pela remoção do excesso de umidade, possibilitando a sua incineração;
- Redução da demanda de material estruturante ou ajustes no processo de compostagem;
- Economia na secagem de térmica do material, uma vez que a remoção mecânica é mais barata;
- Produzir um biossólido de maior estabilidade biológica e sem problema de emissão de odores;
- Minimizar a produção de lixiviado (chorume) no local de disposição, principalmente em aterros sanitários.

As características e os tipos de lodo alteram a capacidade de desaguamento, que está diretamente relacionada com o tipo de sólido e a maneira na qual a água está ligada às partículas. Andreoli et al (2014) exemplificam essa questão ao afirmar que lodos ativados apresentam maior dificuldade do que lodos primários digeridos em processos anaeróbios para serem desaguados.

Os métodos de desaguamento podem ser separados em dois tipos principais: naturais ou mecanizados. O primeiro utiliza da tendência natural de evaporação e percolação da água em condições favoráveis, demandando maiores áreas e tempo para que a remoção do líquido da matriz ocorra. Já o segundo baseia-se em operações unitárias de filtração, compactação ou

centrifugação para reduzir a duração do processo e resultando em unidades compactas e sofisticadas de desaguamento de lodos (ANDREOLI et al, 2014).

Como mencionado anteriormente, a execução de uma etapa de condicionamento do lodo aumenta a eficiência do desaguamento, favorecendo a agregação das partículas de sólidos, a formação de flocos e a retirada de água da matriz sólida (ANDREOLI et al, 2014).

#### 3.3.3.1.5. HIGIENIZAÇÃO

O subproduto sólido do tratamento de esgotos sanitários, por concentrar todos os poluentes oriundos das atividades, dos hábitos alimentares e das condições sanitárias da população, retrata com fidelidade as características da comunidade local. Para Andreoli et al (2014), quanto maior o nível de ocorrências de doenças de veiculação hídrica, maior cuidado sanitário é necessário para a disposição final do biossólido.

A etapa de higienização é complementar aos processos de estabilização que, embora reduzam substancialmente o nível de patogenicidade do lodo, não são capazes de exterminar os parasitas intestinais e seus ovos a partir de processos de digestão convencional (ANDREOLI et al, 2014). Portanto, o objetivo da higienização é garantir a máxima redução do nível de patogenicidade do biossólido que, quando disposto no solo, não seja propenso a ocasionar riscos à saúde da população, aos trabalhadores que o manuseiam e impactos negativos no meio ambiente.

Os mecanismos de redução de patógenos presentes em lodos podem seguir três vias distintas: biológica, química e térmica. (ANDREOLI et al, 2014). Conforme Batista (2015), os principais métodos para a higienização de lodos e biossólidos são a compostagem, a calagem e o tratamento térmico. Os dois primeiros apresentam facilidade operacional e baixos custos de manutenção, enquanto o terceiro vem sendo viabilizado em estações de tratamento com processos anaeróbios por conta do aproveitamento do biogás produzido.

### 3.3.3.2. TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE LODOS

As diferentes etapas de tratamento de lodos podem ser combinadas em operações unitárias simplificadas, reduzindo a quantidade de equipamentos e processos necessários para a adequação do biossólido. Assim, tecnologias são empregadas visando atingir os objetivos finais de parâmetros ambientais e financeiros específicos para cada estação de tratamento.

Dentre as diversas tecnologias existentes, este trabalho aborda as que apresentam melhor aplicação no tratamento de lodos oriundos de estações de tratamento de esgotos sanitários. São indicadas também as vantagens e desvantagens inerentes de cada operação.

#### 3.3.3.2.1. COMPOSTAGEM

A compostagem é uma tecnologia de tratamento biológico que decompõe a matéria orgânica presente no lodo a partir de reações aeróbias em condições controladas de temperatura, umidade, oxigênio e nutrientes. A higienização de lodos é uma vantagem desta tecnologia, que ocorre a partir da inativação de microrganismos patogênicos devido ao aumento da temperatura na fase de maior atividade do processo (ANDREOLI et al, 2014).

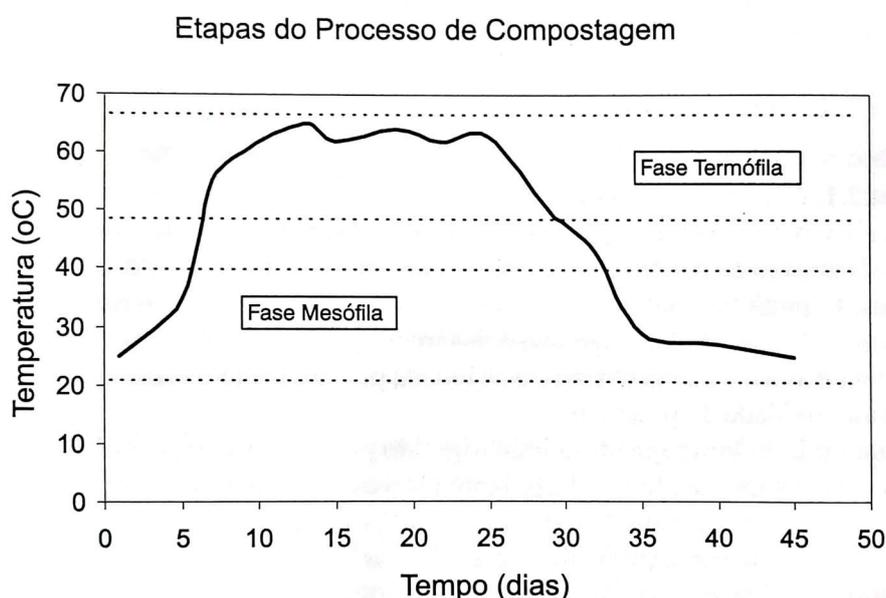
A degradação de lodos brutos e digeridos é possível em sistemas de compostagem, desde que ocorra a adição de materiais biodegradáveis como cavacos de madeira, folhas, resíduos verdes, palha de arroz, serragem ou outros agentes estruturantes. Essa *blendagem* de materiais é necessária para melhor reter a umidade, equilibrar a relação Carbono/Nitrogênio e aumentar a porosidade para melhor aeração do material (ANDREOLI et al, 2014).

Metcalf & Eddy (2016) indicam que, durante o processo de compostagem, entre 20 e 30% dos sólidos presentes na matriz do lodo são convertidos em dióxido de carbono e água. A matéria sólida restante, que tenha sido adequadamente compostada, é convertida em um material com características similares ao húmus, podendo ser aplicado na produção agrícola.

De forma geral, a literatura descreve que o processo ocorre em três fases subsequentes relacionadas ao crescimento de microrganismos (Figura 8):

- Fase Inicial Mesófila: Crescimento acelerado de microrganismos mesófilos, com atividade ótima entre temperaturas de 15°C a 40°C. A expansão da população microbiana resulta no aumento gradativo da temperatura do meio;
- Fase Termófila: Com o tempo, os microrganismos mesófilos dão lugar à bactérias e fungos termófilos de atividade e capacidade de reprodução adaptadas à temperaturas na faixa de 50°C a 70°C, inativando patógenos e consumindo o substrato orgânico;
- Fase Final Mesófila: Com a redução da matéria orgânica presente, as reações bioquímicas são diminuídas e abaixam a temperatura do meio, revertendo ao cenário de predominância de populações mesófilas com atividade moderada.

*Figura 8 - Etapas do Processo de Compostagem*



*Fonte: Andreoli et al. (2014).*

De acordo com Andreoli et al (2014), existem três maneiras principais para executar o processo de compostagem:

- Leiras Revolvidas (Windrow): a mistura sólida é disposta em longas leiras, mecanicamente revolvidas e misturadas em intervalos regulares, por ao menos 15 dias. A aeração ocorre por meio natural, através da difusão do ar na mistura.
- Leiras Estáticas Aeradas (Static Pile): a mistura é colocada em uma rede tubular perfurada com aspiração mecânica de ar e não há qualquer revolvimento mecânico na leira. O processo se completa entre 30 e 60 dias.
- Reatores Biológicos (In-vessel): a mistura é inserida em sistemas fechados com alto grau de controle de variáveis e minimização de odores. A duração desta alternativa está na faixa de 28 a 35 dias.

Para obter um eficiente processo de compostagem, é necessário ter conhecimento antecipado da produção diária de biossólidos pela estação de tratamento de esgotos sanitários (METCALF & EDDY, 2016). Além disso, é imprescindível o controle dos seguintes parâmetros, segundo Andreoli et al (2014): relação Carbono/Nitrogênio na faixa de 26 a 31, estrutura física com 30% a 40% de porosidade, umidade dos sólidos entre de 50% a 60%, aeração e temperatura adequadas às fases e pH na faixa de 6,5 a 9,0.

Outros fatores que afetam o tipo de sistema de compostagem a ser adotado são a natureza dos biossólidos produzidos, o processo de estabilização utilizado antes da compostagem, o tipo de equipamento de desaguamento e os produtos químicos empregados (METCALF & EDDY, 2016).

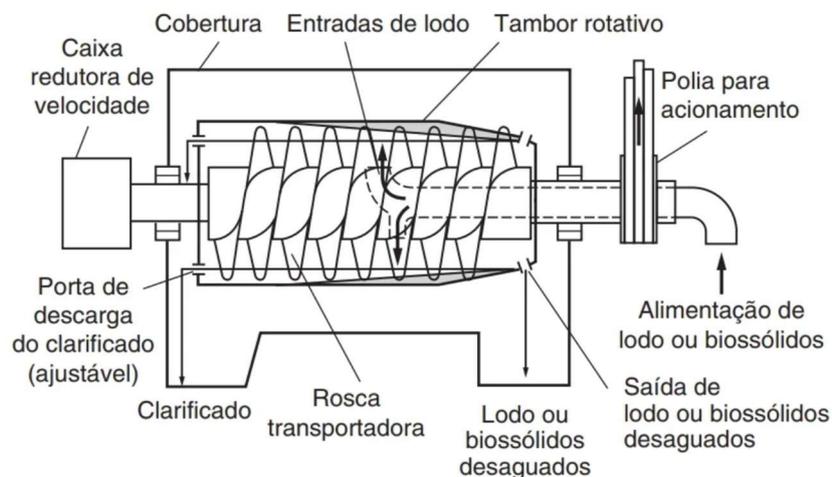
A compostagem surge como uma alternativa economicamente viável apenas para sistemas centralizados, visto que, em sistemas de pequeno porte, o custo e o manejo operacional se tornam complicados ao passo da necessidade de incorporação de outros resíduos além dos lodos e biossólidos (ANDREOLI et al, 2006). Assim, sistemas municipais de tratamento de esgotos são elegíveis ao uso desta tecnologia para o tratamento de lodos, obtendo vantagens econômicas e ambientais por conta da produção de subprodutos com grande valor agrônômico como condicionadores de solo (ANDREOLI et al, 2014).

### 3.3.3.2.2. TECNOLOGIAS DE DESAGUAMENTO MECÂNICO

Tecnologias de desaguamento mecânico surgem como uma alternativa viável para grandes centros urbanos, onde a área disponível para estações de tratamento de esgotos é reduzida e as instalações atendem elevadas demandas de efluentes. Metcalf & Eddy (2016) afirmam que, por conta do grande leque de opções para desaguamento, é necessário realizar ensaios de bancada ou em unidades piloto para determinar o melhor dispositivo.

Dentre os processos mecanizados, a centrifugação é amplamente utilizada nos EUA e Europa, sendo aplicável tanto para a etapa de adensamento, quanto para a de desaguamento. Considerada um processo de sedimentação, a separação sólido/líquido forçada ocorre em tambores rotativos alimentados pelos biossólidos gerados no tratamento de esgotos, sendo mais utilizadas as centrífugas de eixo horizontal (METCALF & EDDY, 2016).

*Figura 9 - Diagrama Esquemático de Centrífuga de Eixo Horizontal*



*Fonte: Adaptado de Metcalf & Eddy (2016).*

A centrifugação ocorre em duas etapas principais. A primeira de clarificação, onde as partículas sólidas do lodo são sedimentadas pela força centrífuga incidente, e a segunda de compactação, quando o lodo perde parte da água capilar por conta da prolongada centrifugação (ANDREOLI et al, 2014). A fração líquida clarificada pode ser tratada ou retornar para a alimentação da estação de tratamento de efluente, enquanto o material sólido resultante do processo é comumente chamado de torta com teor de sólidos elevado.

De acordo com Metcalf & Eddy (2016), a concentração de sólidos na torta final depende do tipo de lodo ou de bio-sólidos, e varia entre 20 e 30%. Valores acima de 25% são considerados ideais para os processos posteriores de destinação final, como incineração, aplicação no solo e disposição em aterros sanitários. Além disso, a eficiência da centrifugação e o teor de sólidos da torta são impactados positivamente pela dosagem de químicos.

*Tabela 5 - Vantagens e Desvantagens das Centrífugas de Eixo Horizontal*

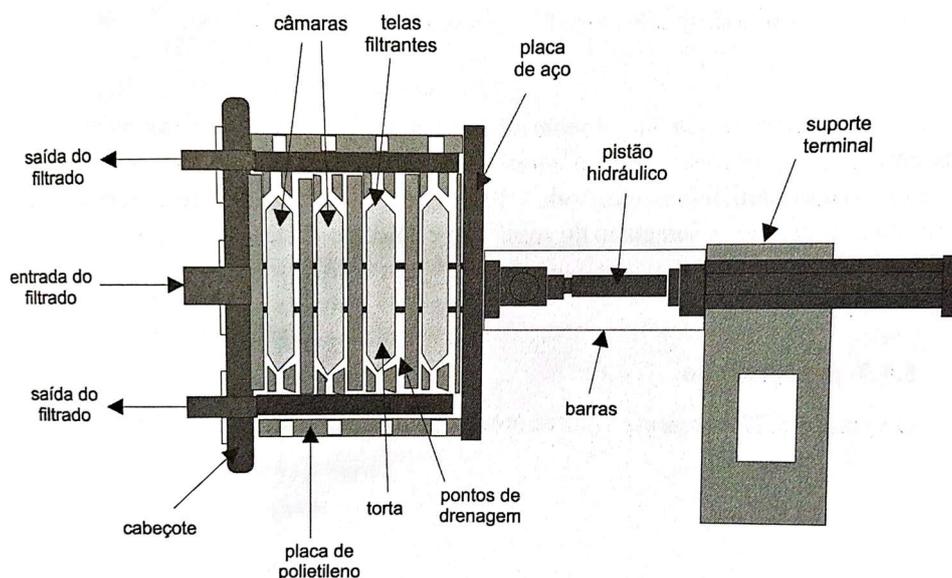
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Podem ser usadas tanto para adensamento quanto para desaguamento de lodos e bio-sólidos	Ajustes complexos e demorados para o funcionamento inicial com alto consumo energético na partida
Ocupam áreas reduzidas	Ruídos e vibrações
Opera sob alta taxa de carregamento	Desgaste das lâminas
Facilidade de instalação	Manutenção cuidadosa
Requer pequena dosagem de químicos durante o condicionamento	Produto de importação com preço elevado no Brasil

*Fonte: Adaptado de Andreoli et al (2014).*

Assim como a centrifugação, a tecnologia de filtros prensas foi desenvolvida para uso industrial e posteriormente adaptada para uso no desaguamento de lodos, e seu funcionamento é esquematizado na Figura 10. Apresentam alto grau de confiabilidade, concentração final de sólidos superior à de outros equipamentos mecânicos, baixo consumo de produtos químicos para condicionamento e excelente qualidade de efluente (ANDREOLI et al, 2014).

A remoção da água é obtida em operações por bateladas, com o bombeamento de lodo para câmeras envelopadas com telas filtrantes, elevando a pressão presente no espaço entre placas e forçando a passagem do material semissólido pelos filtros. É neste momento que os sólidos são retidos, formando uma torta que é removida facilmente, podendo ser encaminhada para estocagem ou destinação final (ANDREOLI et al, 2014).

Figura 10 - Diagrama Esquemático de Filtro Prensa



Fonte: Andreoli et al (2014).

A partir dessa configuração operacional e com resultados de concentração de sólidos superiores a 35% (METCALF & EDDY, 2016), os equipamentos são largamente utilizados nos EUA e Europa e têm sido otimizados com processos automatizados para reduzir a necessidade de mão de obra. Desempenhos ótimos de filtro prensa no desaguamento de lodos atingem faixas de 45% no teor de sólidos (ANDREOLI et al, 2014).

### 3.3.3.2.3. ALTERNATIVAS PARA DOSAGEM DE QUÍMICOS

A dosagem de químicos durante o processo de condicionamento é imprescindível para garantir o adequado desaguamento em processos como centrifugação, prensas desaguadoras por correias, prensas rotativas, extrusoras e filtros prensa. Como especificado anteriormente, os produtos químicos mais utilizados são compostos inorgânicos e polímeros solúveis em água, ou uma combinação de ambos (METCALF & EDDY, 2016).

Dentre os compostos inorgânicos utilizados no tratamento de lodos, se destacam a cal, o cloreto férrico, o sulfato ferroso, o sulfato de alumínio e o cloreto de alumínio. De acordo com Metcalf & Eddy (2016), a aplicação de químicos inorgânicos é ideal para o condicionamento de biossólidos que serão

submetidos ao processo de desaguamento por filtros prensa e, no caso de sais de ferro e cal, podem aumentar o teor de sólidos secos entre 20 e 30%.

Os polímeros orgânicos são amplamente utilizados para o condicionamento de lodos e são adequados ao uso em diversos cenários de tratamento por possuírem grande variedade no mercado em termos de composição química, desempenho e relação custo-benefício (ANDREOLI et al, 2014). Os produtos orgânicos se dissolvem em água, formando soluções viscosas, aderindo às partículas de lodo e causando a dessorção de água de superfície, a neutralização de cargas e aglomerando materiais particulados.

Os polímeros podem ser classificados como não iônicos, catiônicos e aniônicos, visando carrear diferentes cargas de superfície ao material. Conforme Metcalf & Eddy (2016), os polímeros utilizados para o condicionamento de lodos e biossólidos são, geralmente, catiônicos, com alta densidade de carga positiva e elevada massa molar.

Como explicado anteriormente neste trabalho, a adição de produtos químicos ao efluente ou ao lodo durante o tratamento implica no aumento do volume ou massa a serem tratadas. A adição de 1 tonelada de cal ou cloreto férrico resultará em 1 tonelada adicional de lodo, enquanto que, para polímeros orgânicos, o acréscimo é na faixa de 15 a 30% da massa aplicada (ANDREOLI et al. 2014).

Um outro ponto de atenção com relação à dosagem de químicos no tratamento de lodos se refere à redução da aptidão à combustão do lodo desidratado. Segundo Andreoli et al (2014), o condicionamento químico inorgânico irá impactar negativamente o potencial de queima para a incineração, enquanto polímeros orgânicos não apresentam efeitos neste potencial.

### 3.3.3.3. TRANSFORMAÇÃO E DESTINAÇÃO FINAL DE LODOS

A problemática da destinação final de lodos é um tópico de grande importância para o saneamento ambiental brasileiro, cuja gravidade ainda não é tratada com a devida seriedade. Para Bettiol et al (2006), o planejamento da disposição de lodos tem sido negligenciado mesmo sendo um aspecto de alto

custo do sistema de tratamento de esgotos, atingindo até 50% do orçamento operacional de uma estação.

Todos os processos de tratamento, transformação e disposição de lodo apresentam vantagens e desvantagens que, de acordo com as características do lodo e com a situação local, podem justificar a escolha de seu uso (ANDREOLI et al, 2014). A gestão de lodos em regiões metropolitanas, por exemplo, pode apresentar custos de transporte elevados que favoreçam as soluções *in loco* com pouco reaproveitamento de recursos, ao invés de aplicações de reuso agrícola.

Assim como para a escolha de sistemas de tratamento de esgotos e de lodo, a escolha do reaproveitamento e da disposição final do bio-sólido é diretamente dependente das características locais. Dessa forma, as características do lodo, da região onde a ETE se encontra, das legislações vigentes e dos objetivos almejados pela empresa de saneamento irão determinar qual será o sistema mais adequado.

Diversas alternativas de transformação e destinação final de lodos foram desenvolvidas ao longo dos anos, sendo as principais descritas neste trabalho conforme a lógica apresentada no Quadro 3.

*Quadro 3 - Alternativas de Transformação e Destinação de Lodo*

<b>Alternativa</b>	<b>Tipo</b>	<b>Aplicação</b>
Secagem Térmica	Transformação	Redução de volume e preparação para reuso
Incineração	Transformação	Redução de volume e preparação para reuso
Condicionamento de Solos	Destinação Final	Reuso para paisagismo e recuperação de áreas degradadas e florestais
Reuso Agrícola	Destinação Final	Reuso no setor primário da economia

Reuso Industrial	Destinação Final	Reuso no setor secundário da economia
Aterros Sanitários	Destinação Final	Não há reuso e reaproveitamento do lodo

*Fonte: O autor (2024).*

### 3.3.3.3.1. SECAGEM TÉRMICA

A secagem térmica busca a evaporação da umidade presente no lodo, produzindo *pellets* com características físico-químicas adequadas para reuso agrícola, incineração e disposição em aterros sanitários de acordo com o tipo de lodo alimentado, sendo assim, um processo de alta flexibilidade. Seu uso como combustível sólido para fornos e caldeiras também se torna viável, principalmente devido ao alto teor de sólidos obtido, na faixa de 65 a 95% (ANDREOLI et al, 2014).

A significativa redução no volume de lodo por conta do processo de secagem térmica implica na redução dos custos com transporte e estocagem, na produção de um biossólido final estabilizado e livre de patógenos e com retenção de características de condicionador de solo com capacidade irrestrita para reuso agrícola. Por sua vez, a secagem térmica apresenta riscos de liberação de odores e gases para a atmosfera, além da produção de um efluente líquido adicional que necessita de tratamento (ANDREOLI et al, 2014).

O efluente produzido durante o processo é proporcional à umidade retirada do lodo que, quando comparado à vazão afluente de uma ETE convencional, não representa um acréscimo crítico de volume. Dessa forma, a recirculação do líquido para a entrada da estação se torna uma alternativa viável para estações capazes de tratar a carga adicional (ANDREOLI et al, 2014).

Os processos de secagem térmica são separados em indiretos, diretos ou mistos, sendo o primeiro indicado para obtenção de subprodutos com teor de sólidos de até 85%, enquanto o segundo é mais indicado para produção de *pellets* com concentração de sólidos superior a 90% (ANDREOLI et al, 2014).

### 3.3.3.3.2. INCINERAÇÃO

A incineração é um processo avançado de oxidação térmica que resulta na redução do volume de resíduo que irá para disposição final. Sua operação envolve a destruição da matéria orgânica e de patógenos presentes no biossólido através da combustão, produzindo como subprodutos: vapor d'água, dióxido de carbono, dióxido de enxofre, particulados e cinzas inertes (METCALF & EDDY, 2016). De acordo com Andreoli et al (2014), o volume de sólidos residuais situa-se na faixa de 4% do volume de lodo alimentado, reduzindo substancialmente os custos com transporte e disposição final.

O processo de incineração de lodos surge como uma alternativa para centros urbanos com população superior a 500.000 habitantes, podendo processar a cada hora mais de uma tonelada de lodos com diferentes concentrações de matéria orgânica (ANDREOLI et al, 2014). Grandes cidades podem se beneficiar de incineradores para fazer a combustão conjunta de resíduos sólidos urbanos e lodos, principalmente quando as opções de reuso de sólidos e disposição final em aterros sanitários são limitadas ou inexistentes (METCALF & EDDY, 2016).

Por outro lado, conforme Andreoli et al (2014), mesmo com o potencial aproveitamento energético do calor gerado durante o processo de incineração e redução de volume de resíduos, seu balanço energético é negativo e, portanto, não pode ser considerada como uma forma de valorização.

Para atingir condições de combustão autógena a concentração de sólidos no lodo deve ser superior à 35%, valores inferiores requerem o uso de combustível auxiliar (ANDREOLI et al, 2014). Assim, o lodo que será processado por incineração deve passar por etapas anteriores de tratamento para reduzir o teor de água presente em sua matriz e, conseqüentemente, aumentar o teor de sólidos. Os processos de estabilização não são recomendados por conta da degradação da matéria orgânica presente no lodo (METCALF & EDDY, 2016).

A queima incompleta da matéria orgânica pode originar poluentes perigosos para a saúde pública, como monóxido de carbono, dioxinas e furanos. Visando reter a emissão de poluentes para a atmosfera, os incineradores utilizam

sistemas de lavadores de gases, precipitadores eletrostáticos e filtros de alta eficiência, sendo necessário o monitoramento regular dos seus gases liberados (ANDREOLI et al, 2014).

O subproduto de maior interesse na incineração de lodos são as cinzas inertes e residuais que exigem disposição final adequada. A disposição inadequada pode resultar em riscos de lixiviação de metais pesados, contaminação de corpos hídricos e absorção por plantas. Desta forma, é recomendada a sua disposição final em aterros sanitários e é desaconselhado o seu uso em solo (ANDREOLI et al, 2014).

#### 3.3.3.3.3. CONDICIONAMENTO DE SOLOS

A aplicação de lodos e biossólidos resulta em alterações nas propriedades naturais do solo. Essas alterações podem ter impactos positivos, como aumento da disponibilidade de nutrientes e expansão da atividade microbiana, ou negativos, como acúmulo de elementos tóxicos e lixiviação de compostos e contaminação de corpos hídricos próximos (ANDREOLI et al, 2014).

Metcalf & Eddy (2016) indicam que os usos de biossólidos para condicionamento de solo incluem: recuperação de áreas de mineração, áreas degradadas, áreas florestais e paisagismo. O impacto nestes cenários é benéfico pelo aumento do teor de matéria orgânica, da capacidade de troca iônica e da concentração de nutrientes no solo ocasionadas pela inserção de biossólidos.

A utilização de biossólidos no paisagismo se difere do uso agrícola exatamente pelo caráter de condicionador de solo implicado, ao invés de ser considerado um fertilizante orgânico (METCALF & EDDY, 2016). Conforme Andreoli et al (2014), a aplicação em parques e jardins de acesso público requer um nível de exigência sanitária superior às outras alternativas de disposição final, como aterros sanitários ou reutilização em matrizes de concreto.

No Brasil, essa exigência sanitária é legislada pela Resolução nº 498, de 2020, que define os critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. O CONAMA considera que o uso do lodo de esgoto em solos é uma alternativa de destinação ambientalmente

adequada e se enquadra nos princípios de reciclagem de resíduos em consonância com a Lei nº 12.305, de 2010 (CONAMA, 2020).

Para destinação e uso em solos, a caracterização do biossólido deve incluir os seguintes aspectos: potencial agrônômico, redução de atratividade de vetores, substâncias químicas e qualidade microbiológica. Dessa forma, conforme o Artigo 9º da Resolução 498/2020, o biossólido pode ser classificado em duas classes, de acordo com os requisitos presentes no Quadro 4.

*Quadro 4 - Classificação de Biossólidos para Aplicação em Solo*

<b>Classe</b>	<b>Critérios de Classificação</b>
Classe A	Deverá atender ao limite máximo de $10^3$ <i>Escherichia coli</i> por grama de sólidos totais ( $g^{-1}$ de ST) e ser proveniente de um dos processos de redução de patógenos descritos na Resolução, com a devida demonstração de atendimento dos respectivos parâmetros operacionais.
Classe B	Deverá atender ao limite máximo de $10^6$ <i>Escherichia coli</i> por grama de sólidos totais ( $g^{-1}$ de ST) e ser proveniente de um dos processos de redução de patógenos descritos na Resolução, com a devida demonstração de atendimento dos respectivos parâmetros operacionais.

*Fonte: Adaptado de CONAMA (2020).*

A Resolução 498 indica, em sua Seção IV, que não há restrições para aplicação de biossólidos Classe A ou Classe B em florestas plantadas, recuperação de solos e de áreas degradadas (CONAMA, 2020). Assim, a destinação final de biossólidos de esgotos sanitários para estes cenários é limitada apenas pela qualidade do tratamento do lodo e de suas características.

Por fim, há a subdivisão dos biossólidos de acordo com os valores máximos permitidos de substâncias químicas presentes. A separação engloba a Classe 1, com aplicação livre, e a Classe 2, onde a aplicação é permitida apenas se a taxa máxima anual e a carga máxima acumulada de substâncias não exceder os limites estabelecidos em qualquer análise das amostras coletadas (CONAMA, 2020).

#### 3.3.3.3.4. REUSO AGRÍCOLA

Os biossólidos estabilizados possuem em sua composição diversos nutrientes essenciais para o crescimento vegetal, como nitrogênio, fósforo, ferro, cálcio, magnésio e outros macronutrientes. Além disso, esses componentes também são essenciais para consumo e desenvolvimento animal, implicando em diferentes possibilidades de reuso no setor primário (METCALF & EDDY, 2016).

Segundo Batista (2015), a aplicação de biossólidos no setor agrícola possibilita que, além da recuperação de nutrientes, ocorra a promoção de melhorias físicas, especialmente na estruturação do solo, e seja realizada uma solução definitiva para a disposição do lodo. Essa valoração de lodos e biossólidos que hoje geralmente são enviados para aterros sanitários como rejeitos, permite que insumos agrícolas sejam gerados em estações de tratamento de esgotos municipais.

Aplicados em taxas suficientes para suprir as demandas das culturas cultivadas, o uso agrícola de biossólidos, assim como para a aplicação em solo, exige um maior cuidado sanitário, necessitando de processos de estabilização e higienização eficientes (ANDREOLI et al, 2014).

Dentre as classes de biossólidos dispostas na Resolução CONAMA 498, de 2020, algumas restrições são impostas no que se refere ao tempo entre aplicação e o cultivo ou colheita dos produtos agrícolas. Para biossólido de Classe A, há restrição máxima relacionada à aplicação no mês anterior à colheita, e para Classe B, pode ser proibida, como no caso de cultivo de alimentos que são consumidos crus ou com parte comestível que tenha contato com o solo onde o biossólido tenha sido aplicado.

Para Batista (2015), embora o reuso agrícola seja uma alternativa viável do ponto de vista econômico e ambiental, a organização gerencial e técnica deve ser criteriosa. Dessa forma, será possível garantir a segurança sanitária e ambiental de produtores e consumidores, ao mesmo tempo que o agricultor poderá tirar o máximo proveito possível do uso do lodo de esgoto.

### 3.3.3.3.5. REUSO INDUSTRIAL

Em cenários onde o reuso agrícola se apresenta como inviável economicamente e, ainda sim, há a intenção da reciclagem do lodo ou biossólido gerado pelo sistema de tratamento, o reuso em setores industriais tem se apresentado como uma alternativa viável.

Segundo Batista (2015), indústrias de cerâmica vermelha e cimenteira são as que apresentam um maior potencial de uso de resíduos na sua composição, muito por conta da flexibilidade das propriedades tecnológicas de seus produtos. Conforme Alvarenga (2019), na fabricação de cimento, concreto e blocos cerâmicos, o uso de lodo de esgotos pode substituir a necessidade de aplicação de agregados leves, como areias e pequenas pedras.

Além disso, a aplicação de cinzas de lodo na produção de cimento é capaz de reduzir o custo operacional de fabricação e, como o cimento é o item mais caro na produção do concreto, há espaço para redução dos custos para estes itens que são indispensáveis para a construção civil (ALVARENGA, 2019).

Produzidos a partir da manipulação de argila cozida, os produtos cerâmicos como tijolos, telhas, ladrilhos, manilhas e blocos podem incluir em sua matriz estrutural o lodo de ETE, formando o bloco cerâmico ecológico (ALVARENGA, 2019). Para tal, o lodo é adicionado ao processo durante a etapa de preparação da massa cerâmica e auxilia na correção de umidade do material.

Em experimentos realizados por Da Silva et al (2015), o lodo de ETE higienizado por caleação apresenta viabilidade de adição para até 25% da massa da argila, atendendo a todos os parâmetros preconizados pelas normas vigentes para fabricação dos blocos cerâmicos. Em estudo similar, Araújo (2008) afirma que a fabricação de telhas com até 25% de lodo higienizado com cal na matriz apresenta propriedades tecnológicas satisfatórias e, do ponto de vista ambiental, a incorporação do resíduo na fabricação de cerâmica vermelha resolve os possíveis problemas de disposição inadequada.

Para Batista (2015), apenas quando existem fatores limitantes às formas tradicionais de descarte do lodo, tais como a disposição em aterros sanitários ou

reuso agrícola, a viabilidade econômica para reuso industrial prevalece. Sendo que, mesmo que ocorra viabilidade técnica do projeto, os aspectos negativos para este tipo de destinação final precisam ser criteriosamente avaliados.

#### 3.3.3.3.6. ATERROS SANITÁRIOS

A disposição em aterros não possui a intenção de recuperar nutrientes ou aplicar uma finalidade útil para lodos e biossólidos (ANDREOLI et al, 2014). Sendo assim, a NBR 8149, de 1992, define os aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos como:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza os princípios da engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume possível.

O confinamento dos sólidos em células impermeabilizadas de aterros sanitários ocorre seguida do recobrimento com camada de terra, resultando em um processo de biodegradação anaeróbia que, dentre seus vários subprodutos, gera gás metano que pode ser reaproveitado. Segundo Andreoli et al (2014), a disposição de lodo em aterros pode ocorrer em condições exclusivas ou em codisposição com os resíduos sólidos urbanos gerados no município.

A disposição em aterros sanitários exclusivos adequados às características do resíduo apresenta uma vantagem no ponto de vista ambiental e de infraestrutura comparada ao outro cenário, sendo preferencialmente destinados lodos com teor de sólidos superior a 30% ou secos termicamente. Por sua vez, a codisposição dos resíduos em aterros sanitários municipais requer uma adequação entre as características do material e as do aterro (ANDREOLI et al, 2014).

Embora a mistura entre lodos e RSU possa resultar na aceleração do processo de degradação microbiana, implicando em uma estabilização mais rápida, essa alternativa reduz a vida útil do aterro sanitário caso o volume de lodo a ser disposto seja elevado. Portanto, o risco de saturação do aterro é aumentado, dificultando a gestão ambiental municipal, a operação e a contenção de contaminantes (ANDREOLI et al, 2014).

A estabilização do lodo e a redução do teor de patógenos apresentam importância secundária para a disposição em aterros sanitários. Desta forma, Andreoli et al (2014) consideram que há maior flexibilidade para absorver a destinação de quantidades e qualidades variáveis de lodo, inclusive excedentes emergenciais de demandas de outras formas de disposição final e operando de forma independente.

Diferentes teores de sólidos na matriz do lodo implicam na variação de volume requerido para disposição em aterros, resultado conhecido como Fator de Demanda. A Tabela 6 apresenta os fatores típicos para algumas faixas e demonstra como o teor de umidade impacta no transporte, volume ocupado e operação do aterro (ANDREOLI et al, 2014).

*Tabela 6 - Fator de Demanda volumétrica de aterro por teor de sólidos*

<b>Teor de sólidos no lodo (%)</b>	<b>Fator de Demanda volumétrica de aterro por tonelada de matéria seca (m<sup>3</sup>/t seca)</b>
15	6,93
20	5,43
25	4,30
40	2,75
90	1,10
Cinzas	0,32

*Fonte: Andreoli et al (2014).*

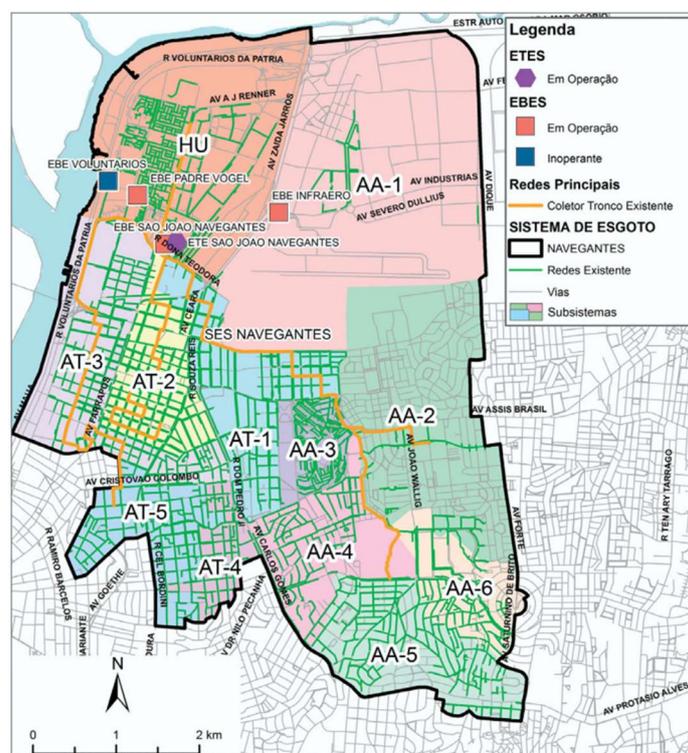
Andreoli et al (2014) afirmam que o principal impacto da disposição em aterros corresponde à poluição subterrânea e superficial de corpos hídricos, relacionado à lixiviação do material aterrado e percolação de líquidos que compromete a qualidade dos recursos hídricos. Além disso, diversos aspectos ambientais são afetados com a instalação de um aterro sanitário e, portanto, são esperados impactos na qualidade do ar e solo e nos meios biótico e antrópico.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. ESTUDO DE CASO: ETE SÃO JOÃO/NAVEGANTES

A Estação de Tratamento de Esgotos São João/Navegantes faz parte do Sistema de Esgotamento Sanitário (SES) Navegantes, localizado na região noroeste do município de Porto Alegre. Conforme dados apresentados pelo Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE) em 2015, estão operantes 309,53 km de redes coletoras na área, garantindo a coleta e tratamento de 52,73% do efluente total gerado pela população residente.

Figura 11 - Sistema de Esgotamento Sanitário Navegantes



Fonte: DMAE (2015).

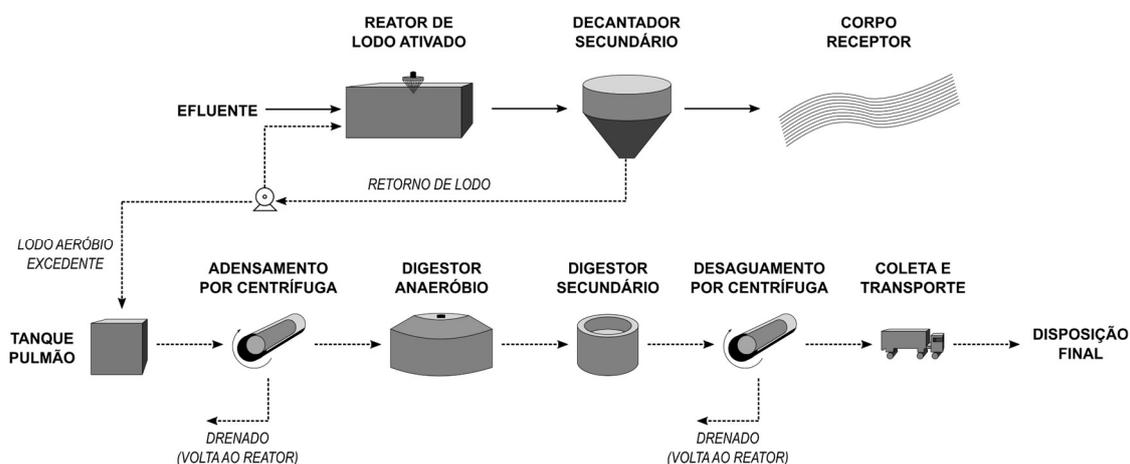
Situada no Bairro Navegantes, na Avenida A. J. Renner, 495, a ETE São João/Navegantes possui uma área disponível de aproximadamente 7,5 ha e foi projetada para tratar todo o esgotamento sanitário de seu respectivo SES. Sua operação é organizada a partir de dois módulos implantados com vazão nominal de 222 L/s, resultando na capacidade de tratamento de 444 L/s (DMAE, 2015).

O sistema de tratamento é composto por tratamento preliminar, via gradeamento mecanizado e caixa de areia, e tratamento secundário, com

utilização de lodos ativados em configuração de aeração prolongada. Estão instalados, na referida ETE, quatro reatores com aeração por ar difuso, dispositivos para a recirculação de lodo e quatro decantadores secundários.

Além do tratamento do efluente, são realizadas etapas para o manejo do excesso de lodo biológico gerado, que compreendem adensamento preliminar com centrífugas, tratamento de lodo por digestores anaeróbios e secundários, desidratação final com centrífugas e acondicionamento em contêiner para disposição final (DMAE, 2015 e FEPAM, 2023). O fluxograma do sistema de tratamento de lodos é apresentado abaixo:

*Figura 12 - Fluxograma de Tratamento de Lodos da ETE São João/Navegantes*



*Fonte: O autor (2024).*

O efluente final tratado da ETE é enviado para o coletor geral pluvial presente no Bairro Humaitá, sendo transportado e desaguado no Lago Guaíba, no Delta do Jacuí. Já o biossólido desidratado é recolhido diariamente e transportado para a Unidade de Transbordo do DMLU no Bairro Lomba do Pinheiro. Posteriormente, esse material é enviado para o Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio, no município de Minas do Leão, em conjunto com os resíduos sólidos urbanos coletados.

#### 4.1.1. PROJETO E LICENÇA DE OPERAÇÃO

Projetada no ano de 1996, a ETE São João/Navegantes será responsável por realizar a coleta e tratamento de 178.342 habitantes no ano de 2035 (DMAE, 2015). Sua capacidade de tratamento de esgotos atual é de 444 L/s, com

planejamento final prevendo a expansão para 666 L/s, com a execução de um terceiro módulo. Porém, com a reavaliação do ano final do plano para 2035, a vazão média de esgotos a serem tratados na ETE deverá ser de 876 l/s.

A licença de operação foi renovada recentemente (LO 03654/2023) com validade até 08/11/2028, mantendo a sua vazão afluente limite em 38.361,60 m<sup>3</sup>/dia (440 L/s). Além disso, é descrita a necessidade de atendimento aos padrões de emissão estabelecidos pela Resolução CONSEMA nº 355/2017, apresentados na Tabela 7. A LO considera apenas a vazão de 444 L/s, destacando a importância de uma nova revisão de acordo com a construção e implementação do terceiro módulo de tratamento.

Conforme o Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) de Porto Alegre, realizado no ano de 2015, o projeto executivo do terceiro módulo deve contemplar o aumento de vazão previsto e melhorar qualitativamente o efluente final para o atendimento de padrões, construindo unidades de decantação primária dos esgotos, e tratamento complementar para remoção de nutrientes e desinfecção.

*Tabela 7 - Padrões de Emissão Estabelecidos na Licença de Operação*

<b>Parâmetro</b>	<b>Padrão de Emissão a Ser Atendido</b>
Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	<= 1000 ou 95% de eficiência
DQO (O <sub>2</sub> /L)	<= 40
DBO (O <sub>2</sub> /L)	<= 150
Espumas	Virtualmente ausentes
Fósforo Total (mg/L)	<= 1 ou 75% de eficiência
Materiais Flutuantes	Ausentes
Nitrogênio Amoniacal (Nam/L)	<= 20
Odor	Livre de odor desagradável
Óleos e graxas vegetais e animais	<= 30
pH	6,0 - 9,0
Sólidos Sedimentáveis (mL/L)	<= 1,0 em Cone Imhoff

---

Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	<= 50
Subst. Tensoativas (MBAS/L)	<= 2,0
Temperatura (°C)	< 40
Vazão (m³/dia)	<= 38.361,60

---

*Fonte: Adaptado de LO 03654 / 2023, FEPAM (2023).*

Além disso, outros itens relacionados ao processo de tratamento de esgotos são mencionados como essenciais para o atendimento, como: a readequação do fluxograma operacional do tratamento da fase sólida, a modificação do sistema de adensamento de lodo e a modificação do sistema de difusão de ar dos tanques de lodos ativados (DMAE, 2015).

#### 4.1.2. GERAÇÃO DE LODO

O lodo ativado excedente é enviado para dois biodigestores anaeróbios (Figura 13) que realizam a estabilização da matéria orgânica e eliminação de organismos patogênicos. O biogás produzido nesse processo é conduzido e encaminhado a um queimador tipo *flare*, sem reaproveitamento energético.

*Figura 13 - Digestor anaeróbio da ETE São João/Navegantes*



*Fonte: O autor (2024).*

Posteriormente, o lodo é encaminhado por gravidade para os digestores secundários abertos, que realizam o polimento do lodo a partir de reações aeróbias, reduzindo nutrientes e eliminando os microrganismos anaeróbios restantes (DMAE, 2024). A matéria sólida restante no tanque, com alto teor de

umidade, é condicionada com adição de polieletrólitos para desaguamento em centrífugas. Conforme dados disponibilizados pelo DMAE, a geração de biossólido desaguado está na faixa de 8 toneladas/dia, apresentando 80% de umidade, ausência de odores e textura de terra úmida, como é possível observar na Figura 14.

*Figura 14 – Lodo Desaguado da ETE São João/Navegantes*



*Fonte: O autor (2024).*

De acordo com a equipe técnica do DMAE, não há caracterização recente e representativa da composição físico e química do biossólido final, sendo apenas informado que é considerada a relação de 1:1 entre massa e volume de lodo. Portanto, visando estimar os custos envolvidos com a disposição final para novas alternativas, a massa específica do lodo foi considerada como  $1.000\text{kg/m}^3$ .

#### 4.2. CENÁRIOS DE DESTINAÇÃO FINAL

Dentre as diversas alternativas de transformação e disposição final de lodos existentes, o presente trabalho aprofunda aquelas que se relacionam com os princípios de valorização e reaproveitamento de resíduos expostos pela Lei Federal nº 12.305 de 2010. Portanto, os cenários de destinação do lodo para empreendimentos que realizam coprocessamento ou incineração foram desconsiderados por não agregarem valor direto ao resíduo.

A secagem térmica, embora apresente aplicabilidade em pequena escala e consiga ótimos resultados de desaguamento, não foi considerada na avaliação de cenários. A ausência de empreendimentos especializados na Região

Metropolitana e a necessidade de investimentos financeiros para instalação na ETE São João/Navegantes foram fatores preponderantes para a decisão.

Conforme Andreoli et al (2014), a aplicação em parques e jardins de acesso público requer um nível de exigência sanitária superior às outras alternativas de disposição final e, portanto, o trabalho não considerou esse cenário de disposição.

A análise do reuso agrícola, embora possa ser realizada a partir do tratamento *in situ* do biossólido gerado pela ETE São João/Navegantes, foi avaliada considerando o envio do biossólido final para empreendimentos especializados na região, evitando investimentos relacionados à implementação de novos processos na área da ETE.

Para possibilitar o entendimento do atual cenário de disposição e permitir a comparação com novas metodologias, foi incluído na análise a disposição em aterro sanitário, utilizado atualmente para a destinação final de lodo da ETE São João/Navegantes. Dessa forma, os cenários de disposição final avaliados no presente trabalhos são: Aterros Sanitários, Compostagem e Reuso Industrial.

Visando otimizar as operações de transporte dos resíduos e considerando os impactos ambientais e econômicos relacionados aos longos trajetos, a área de interesse do presente trabalho foi concentrada nos 34 municípios que fazem parte da Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA). Os municípios selecionados são apresentados com as suas respectivas distâncias rodoviárias da capital na Tabela 8.

*Tabela 8 - Municípios Selecionados para a Avaliação*

<b>Municípios da RMPA</b>	<b>Distância (km)</b>
Alvorada	27
Araricá	62
Arroio dos Ratos	55
Cachoeirinha	12
Campo Bom	55
Canoas	10

---

Capela de Santana	55
Charqueadas	53
Dois Irmãos	53
Eldorado do Sul	10
Estância Velha	43
Esteio	19
Glorinha	47
Gravataí	25
Guaíba	24
Igrejinha	85
Ivoti	48
Montenegro	57
Nova Hartz	71
Nova Santa Rita	20
Novo Hamburgo	37
Parobé	73
Portão	41
Porto Alegre	-
Rolante	93
Santo Antônio da Patrulha	75
São Jerônimo	65
São Leopoldo	32
São Sebastião do Caí	60
Sapiranga	53
Sapucaia do Sul	22
Taquara	73
Triunfo	92
Viamão	10

---

*Fonte: O autor (2024).*

O levantamento dos empreendimentos elegíveis para a avaliação dos cenários de disposição foi realizado utilizando a ferramenta de Consulta Genérica disponível no Portal de Licenciamento Ambiental da FEPAM. Para tal, utilizou-se como critérios de pesquisa os ramos de atividades equivalentes aos cenários de disposição final e os municípios apresentados na Tabela 8.

A partir da lista obtida com a ferramenta de Consulta Genérica, os empreendimentos foram criteriosamente selecionados de acordo com o seu porte e a sua situação operacional. Na Tabela 9 são apresentados os códigos escolhidos para a consulta e os respectivos números de empreendimentos avaliados no presente trabalho. Por sua vez, a Figura 15 apresenta a localização de todos os empreendimentos selecionados na área de interesse.

*Tabela 9 - Códigos de Consulta FEPAM e Total de Empreendimentos*

Cenário de Disposição Final	Código FEPAM	Número de Empreendimentos	
		Total	Selecionados
Aterro Sanitário	3.541,30	6	2
	3.541,32	7	3
Compostagem	3.116,10	9	6
Indústrias Cerâmicas	1.030,10	2	0
	1.030,20	77	21
	1.040,10	17	5
Indústrias de Cimento e Concreto	1.050,10	7	4
	1.051,00	58	13
	1.053,00	3	3

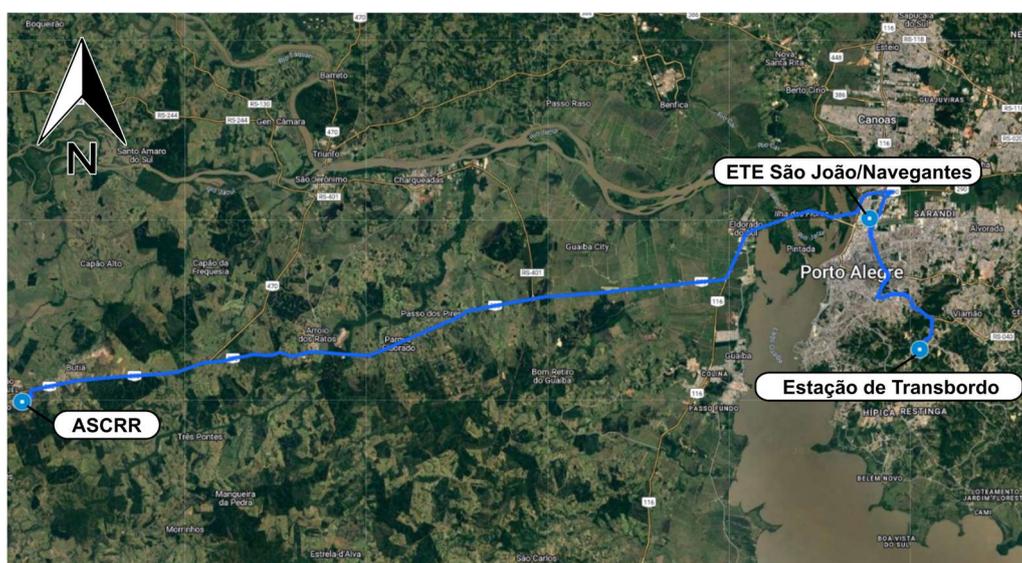
*Fonte: O autor (2024).*



O ASCRR possui capacidade total de 23 milhões de toneladas e é integrado com uma usina termelétrica para reaproveitamento do biogás produzido na degradação anaeróbica dos resíduos ali descartados. Assim, o ASCRR apresenta condições sanitárias e ambientais condizentes às de aterros sanitários comuns descritos na literatura.

Porém, devido à logística de transbordo e à sua localização, no município de Minas do Leão, é necessário realizar transporte rodoviário de longas distâncias. O trajeto é apresentado pela Figura 16.

*Figura 16 - Rota de transporte do lodo até o ASCRR*



*Fonte: O autor (2024).*

#### 4.2.2. COMPOSTAGEM

A região metropolitana de Porto Alegre é atendida por diversas empresas privadas especializadas no processo de compostagem. As mesmas têm sido desenvolvidas para atender as demandas de cidades e indústrias que buscam uma alternativa mais sustentável de disposição final de resíduos sólidos.

Dentro da área de interesse, foram selecionadas 06 empresas para a compostagem dos resíduos, sendo elas: Agropecuária Olhos D'Água, Bio-C, Compostagem Santa Rosa, Ecocitrus, RS Compostagem e Rumo Certo.

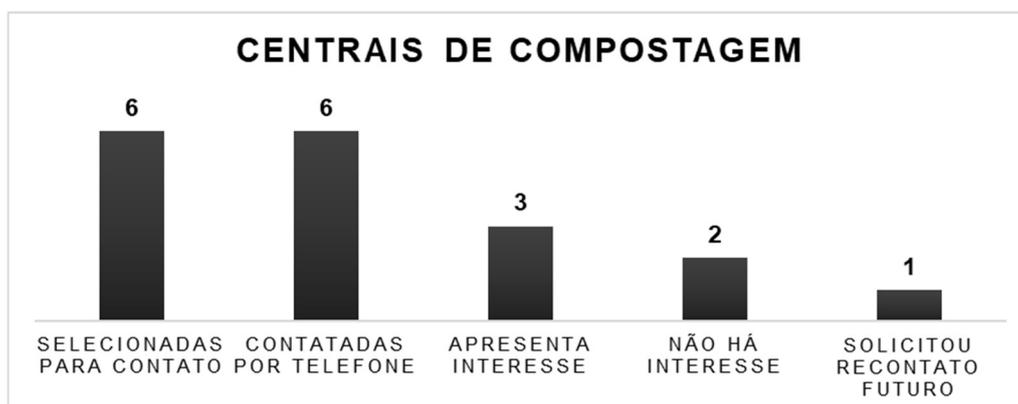
Tabela 10 - Empresas de Compostagem Consideradas para o Trabalho

Central de Compostagem	Município	Distância da ETE
Agropecuária Olhos D'Água	Arroio dos Ratos	76,1 km
Bio-C	Montenegro	47,9 km
Compostagem Santa Rosa	Triunfo	60,1 km
Ecocitrus	Montenegro	57,4 km
RS Compostagem	Portão	44,7 km
Rumo Certo	Portão	41,9 km

Fonte: O autor (2024).

A partir da ligação telefônica, 03 centrais de compostagem demonstraram algum grau de interesse em receber o lodo da ETE São João/Navegantes e apresentaram propostas comerciais para estimativas de custo com a disposição.

Figura 17 - Resultado do Contato Telefônico com Centrais de Compostagem



Fonte: O autor (2024).

Com o auxílio da ferramenta *Google Maps*, foi possível estimar as rotas rodoviárias a serem percorridas para a disposição nas centrais que apresentaram o melhor custo-benefício em sua respectiva proposta comercial, apresentadas na Figura 18.

Figura 18 - Rotas até as Centrais de Compostagem



Fonte: O autor (2024).

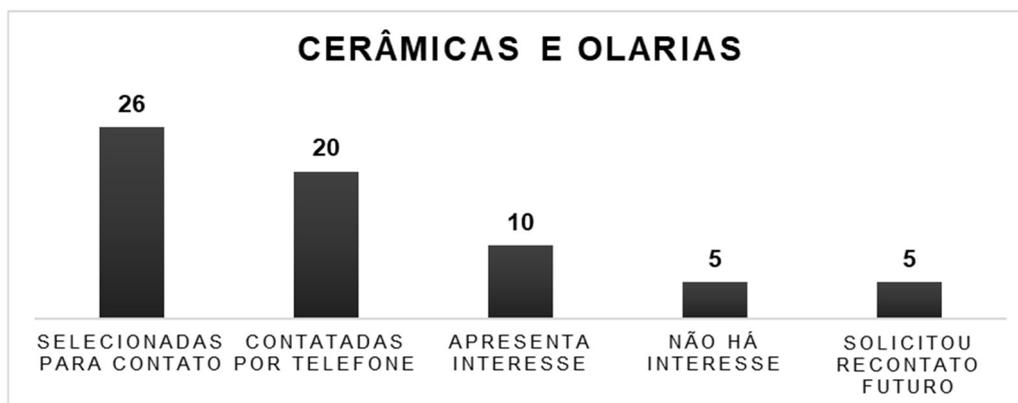
#### 4.2.3. REUSO INDUSTRIAL

Conforme dados apresentados pelo Observatório da Indústria do Rio Grande do Sul, o setor de Minerais Não-Metálicos apresenta resultados negativos no ano de 2023. A variação acumulada para faturamento real e produção são de -8,5% e -7,4%, respectivamente. Dessa forma, alternativas de redução de custos nos processos produtivos são observadas pelas indústrias da região, que buscam estabilidade econômica.

##### 4.2.3.1. INDÚSTRIAS CERÂMICAS E OLARIAS

Dentro da área de interesse, 26 indústrias do ramo cerâmico foram selecionadas para avaliação e, dessas, foi possível fazer contato com 20. A partir da ligação telefônica, metade das cerâmicas e olarias demonstraram algum grau de interesse em receber o lodo da ETE São João/Navegantes.

Figura 19 - Resultado do Contato Telefônico com Cerâmicas e Olarias



Fonte: O autor (2024).

Para ilustrar as diferentes possibilidades de rotas de disposição, algumas indústrias foram escolhidas para a avaliação de viabilidade econômica, sendo elas: Kaspary, Pauluzzi, Olaria São Francisco e Olaria Tijocosta.

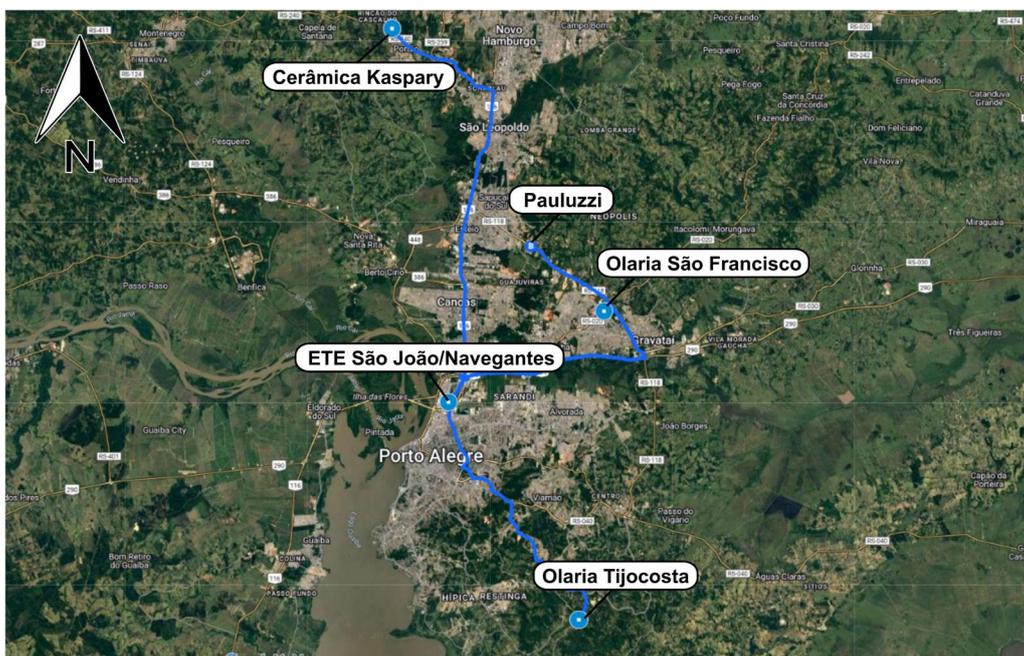
Tabela 11 – Exemplos de Indústrias Cerâmicas consideradas para o trabalho

Indústrias	Município	Distância da ETE
Kaspary	Portão	44,4 km
Pauluzzi	Sapucaia do Sul	25,4 km
Olaria São Francisco	Gravataí	22,5 km
Olaria Tijocosta	Viamão	29,5 km

Fonte: O autor (2024).

Com o auxílio da ferramenta *Google Maps*, foi possível estimar as rotas rodoviárias a serem percorridas para a disposição, apresentadas na Figura 20.

Figura 20 - Rotas até as Indústrias Cerâmicas

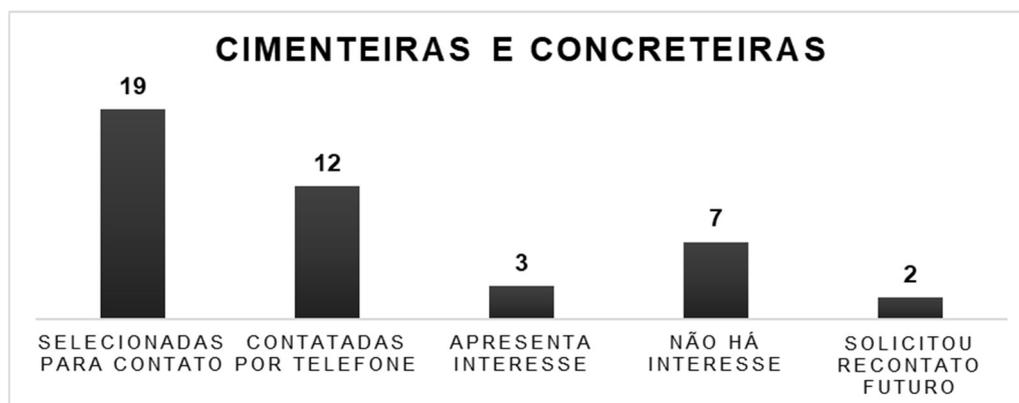


Fonte: O autor (2024).

#### 4.2.3.1. INDÚSTRIAS DE CIMENTO E CONCRETO

Dentro da área de interesse, 20 indústrias do ramo cimenteiro ou de concreto foram selecionadas para avaliação e, dessas, foi possível fazer contato com 12. A partir da ligação telefônica, apenas 3 empreendimentos demonstraram algum grau de interesse em receber o lodo da ETE São João/Navegantes em curto prazo sem grandes condicionantes.

Figura 21 - Resultado do Contato Telefônico com Cimenteiras e Concreteiras



Fonte: O autor (2024).

Para ilustrar as diferentes possibilidades de rotas de disposição, algumas indústrias foram escolhidas para a avaliação de viabilidade econômica, sendo elas: Construsinos, Groove e Tecmold.

*Tabela 12 - Indústrias de Cimento e Concreto consideradas para o trabalho*

<b>Indústrias</b>	<b>Município</b>	<b>Distância da ETE</b>
Construsinos	São Leopoldo	35,6 km
Groove	São Leopoldo	35,5 km
Tecmold	Gravataí	29,8 km

*Fonte: O autor (2024).*

Com o auxílio da ferramenta *Google Maps*, foi possível estimar as rotas rodoviárias a serem percorridas para a disposição, apresentadas na Figura 22.

*Figura 22 - Rotas até as Indústrias de Cimento*



*Fonte: O autor (2024).*

#### 4.3. DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO

A avaliação de alternativas é um processo complexo que envolve aspectos que permeiam as esferas técnica, econômica, ambiental e legal, ultrapassando os limites físicos na qual a ETE está implementada (ANDREOLI et al 2014). As adequações necessárias na estação para permitir a viabilidade de um cenário devem ser estudadas e consideradas na avaliação,

principalmente quando se envolve a implementação de uma nova operação unitária no local.

A escolha da alternativa que melhor atende aos diferentes aspectos avaliados segue a afirmação de Andreoli et al (2014) de que haverá uma automática hierarquização de alternativas quando aplicada a ótica de uma política sustentável. Assim, dentro do estudo de caso da ETE São João/Navegantes serão consideradas intangíveis as seguintes premissas:

- A qualidade final do esgoto tratado será melhorada ou, ao menos, mantida no seu patamar atual, estabelecendo que a taxa de biossólido produzido na ETE tenderá a se elevar até 2035.
- O biossólido produzido deverá ser reciclado ao máximo, apresentando benefícios socioeconômicos para a sociedade local direta ou indiretamente.

Uma matriz de resultados foi elaborada para avaliar as diferentes alternativas de disposição final do biossólido gerado na ETE São João/Navegantes. Assim, graus de classificação de 1 a 5 foram desenvolvidos para os critérios avaliativos: Atendimento à Legislação Vigente, Impactos Socioambientais, Impacto Financeiro e Características Técnicas. Quanto maior o grau de classificação obtido, mais adequada a alternativa se insere dentro do critério avaliativo.

A metodologia estatística utilizada é a de Ponderação Aditiva Simples (PAS), onde pesos foram estabelecidos para os critérios considerando sua importância para o presente trabalho, multiplicando o grau de classificação obtido. Desta forma, as alternativas foram hierarquizadas de acordo com a Equação 1, indicando sua capacidade de solução e adaptação ao objetivo do presente trabalho.

$$P_i = \sum_{j=1}^n C_{ij} \cdot W_j \text{ (Equação 1)}$$

Onde:

$P_i$ : é a pontuação final da alternativa  $i$ .

$V_{ij}$ : é o grau de classificação da alternativa  $i$ , no critério  $j$ .

$W_j$ : é o peso atribuído ao critério  $j$ .

Os pesos estabelecidos para os critérios na PAS consideram sua importância nas esferas técnica, econômica, ambiental e legal. O Atendimento à Legislação Vigente e os Impactos Socioambientais, por estarem diretamente relacionados às esferas mencionadas e serem condicionantes à ideia de sustentabilidade, recebem peso 5, grau máximo.

Os Impactos Econômicos recebem grau 3 na escala de pesos, visando possibilitar a implementação de alternativas que possam apresentar custo superior ao cenário atual, mas que apresentem vantagens na esfera ambiental e legal sem a implementação de novas operações na ETE. Portanto, embora seja um critério importante para determinar a escolha de investir em novos projetos operacionais, não apresenta criticidade para custos com disposição.

Por fim, o critério de Características Técnicas das alternativas também recebe grau 3. Tal escolha tem como base o princípio de que mudanças operacionais e o aumento da complexidade de tratamento de lodos se justificam para a obtenção de biossólidos de melhor qualidade, garantindo o atendimento legal e expandindo opções de disposição.

Dessa forma, os pesos atribuídos são apresentados abaixo:

*Tabela 13 - Pesos atribuídos aos Critérios de Avaliação*

<b>Critério de Avaliação</b>	<b>Peso Atribuído</b>
Atendimento à Legislação Vigente	5
Impactos Socioambientais	5
Impacto Financeiro	3
Características Técnicas	3

*Fonte: O autor (2024).*

#### 4.3.1. CRITÉRIO 1: ATENDIMENTO À LEGISLAÇÃO VIGENTE

Em 1981 foi promulgada a Lei Federal nº 6.938, que estabelece a Política Nacional do Meio Ambiente no Brasil. Essa legislação instituiu instrumentos de gestão ambiental, como o licenciamento ambiental, e definiu diretrizes para o uso sustentável dos recursos naturais. Além disso, a legislação prevê a responsabilidade civil e penal por danos ambientais, visando a prevenção e reparação de impactos ambientais.

A partir da Resolução CONAMA nº 237/97, foram estabelecidos os procedimentos e critérios utilizados no licenciamento ambiental e no exercício da competência, bem como as atividades e empreendimentos sujeitos ao licenciamento ambiental. No âmbito de Porto Alegre, os órgãos ambientais competentes para executar o licenciamento são a FEPAM e a Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura (SEMA-POA), sendo a segunda apenas para empreendimentos de pequeno porte e impacto local.

Considerando a criticidade da conformidade legal e o desenvolvimento de padrões e critérios mais restritos em âmbitos estaduais, as seguintes legislações foram incluídas para a análise do presente critério:

- ABNT NBR 10004/2004 - Resíduos sólidos – Classificação
- Lei Federal nº 12.305/2010 - Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos do Brasil;
- Lei Federal nº 14.026/2020 - Estabelece o Novo Marco Legal do Saneamento Básico.
- Lei Municipal nº 12.022/2016 - Proíbe a Incineração de RSU Recicláveis no Município de Porto Alegre;
- Resolução CONAMA nº 237/97 - Estabelece os procedimentos e critérios utilizados no licenciamento ambiental;
- Resolução CONAMA nº 481/2017 - Define critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem;
- Resolução CONAMA nº 498/2020 - Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos;

A avaliação do critério tem como base duas premissas: o atendimento às legislações vigentes (tanto municipais como estaduais) e a conformidade com os requisitos expostos na Licença de Operação. Portanto, o Critério de Atendimento à Legislação Vigente possuirá classificação baseada na Tabela 14.

*Tabela 14 - Graus de Classificação do Critério de Atendimento à Legislação Vigente*

<b>Grau</b>	<b>Critério para Classificação</b>
1	O atendimento às legislações vigentes é inexistente ou parcial, seja por ausência de licenciamento, não atendimento de padrões ou impossibilidade por projetos de lei. Requer desenvolvimento legal para ser viável.
3	Há pleno atendimento à Licença de Operação e as demais legislações vigentes são majoritariamente atendidas de acordo com suas disposições, embora pontos pertinentes sejam observados.
5	Há pleno atendimento à Licença de Operação e às demais legislações vigentes. Existe avaliação de expansão operacional, indicando flexibilidade para alterações legais e de recebimento de materiais.

*Fonte: O autor (2024).*

#### 4.3.2. CRITÉRIO 2: IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS

O gerenciamento e disposição de lodos podem apresentar impactos positivos ou negativos ao meio ambiente e a sociedade. A definição de impacto ambiental de acordo com a NBR ISO 14.001 inclui qualquer modificação no meio ambiente, total ou parcialmente resultante dos elementos das atividades, produtos ou serviços de uma organização (ABNT, 2015). Já os impactos gerados na sociedade envolvem aspectos como a aceitabilidade, os incômodos e a geração de empregos.

Diversos impactos socioambientais que estão relacionados à geração de lodo em estações de tratamento de esgotos podem ser desenvolvidos e descritos em função das condições locais e da tecnologia empregada. Assim, aqueles mais relevantes a serem avaliados, considerando confiabilidade do sistema de monitoramento empregado, são apresentados na Tabela 15, baseada no trabalho de Andreoli et al (2014).

Tabela 15 - Possíveis Impactos Socioambientais no gerenciamento do lodo

Item	Comentário
Odores	Fator preponderante no caso de aterro sanitário, compostagem e reciclagem agrícola ou fator secundário em reuso industrial. Fator avaliado em Licenças de Operação.
Atração de Vetores	Fator preponderante no caso de aterro sanitário e compostagem. Fator com potencial impacto à saúde pública.
Ruído	Fator importante em áreas urbanizadas.
Risco Sanitário	Relação entre o número de pessoas expostas ao uso do lodo, sendo conectada à qualidade do biossólido e sua higienização.
Contaminação Atmosférica	Emissões geradas no transporte e na gestão do lodo devem ser consideradas e minimizadas.
Contaminação de Solo e Subsolo	Fator variável em função da disposição final e sua metodologia aplicada. Fator avaliado em Licenças de Operação.
Contaminação de Corpos Hídricos	Fator preponderante para disposição em solo ou aterros e variável em função da disposição final e sua metodologia aplicada. Fator avaliado em Licenças de Operação.
Incômodos à população	Fator que envolve a possibilidade de resistência da população à implementação da destinação.

*Fonte: Adaptado de Andreoli et al (2014).*

A avaliação do critério tem como base duas premissas: a variedade dos impactos negativos associados à gestão do biossólido final e a relação entre benefícios e malefícios da atividade. Portanto, o Critério de Impacto Socioambiental seguirá a lógica apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 - Graus de Classificação do Critério de Impacto Socioambiental

Grau	Critério para Classificação
1	A alternativa apresenta impactos negativos que requerem severo monitoramento e seus benefícios para sociedade e meio ambiente são poucos.
2	A alternativa apresenta impactos negativos que requerem severo monitoramento e a relação entre benefícios e malefícios é neutra.
3	A alternativa apresenta impactos negativos que requerem monitoramento e a relação entre benefícios e malefícios é neutra.
4	A alternativa apresenta impactos negativos que requerem monitoramento,

---

mas seus benefícios para sociedade e meio ambiente se sobressaem.

- 5 A alternativa apresenta impactos negativos facilmente controláveis e seus benefícios para sociedade e meio ambiente se sobressaem.
- 

*Fonte: O autor (2024).*

#### 4.3.3. CRITÉRIO 3: IMPACTO FINANCEIRO

A avaliação econômica é um fator fundamental para garantir a viabilidade de um projeto de tratamento e destinação de lodos. Conforme Andreoli et al (2014), os custos devem ser divididos em custos de processamento, transporte e disposição, avaliando custos de investimento, operacionais e administrativos.

Para garantir uma avaliação homogênea entre as diferentes alternativas de tratamento e disposição de lodos, os custos devem ser agrupados de acordo com sua natureza. Assim, os itens avaliados para composição do impacto financeiro são distribuídos no Quadro 5 e aqueles de interesse ao trabalho são descritos no tópico de Avaliação de Viabilidade Econômica.

*Quadro 5 - Grupos de Custos para destinação de lodo*

<b>Grupo de Custo</b>	<b>Itens Passíveis de Avaliação</b>
Processamento	I. Aquisição de Matéria Prima e Energia II. Aquisição e Manutenção de Equipamentos III. Investimento em Mão de Obra
Transporte	I. Aquisição e Manutenção de Frota II. Consumo de Combustíveis em Rota III. Contratos com Frota Terceirizada
Disposição	I. Contratos com Destinatário Final II. Custo Total por Tonelada

*Fonte: O autor (2024).*

Nota-se que, considerando os custos operacionais atuais, qualquer alternativa que não exija investimentos na ETE São João/Navegantes não apresentará variação no custo de processamento. Por sua vez, diferentes

destinos para a disposição do biossólido podem resultar em impactos nos custos de transporte do mesmo.

Por fins de simplicidade, no Critério de Impacto Financeiro será considerado apenas o custo de transporte e disposição, onde o atual valor investido anualmente na destinação do resíduo será considerado como 'Custo Base Zero' ( $C_{BZ}$ ) e, portanto, o Custo Total ( $C_T$ ) das alternativas será apresentado como % deste  $C_{BZ}$ .

A avaliação do critério tem como base a premissa de sustentabilidade econômica, onde o objetivo é não impactar no custo total de disposição já realizado na ETE São João/Navegantes. Assim, a classificação do Critério de Impacto Financeiro seguirá a lógica apresentada na Tabela 17.

*Tabela 17 - Graus de Classificação do Critério de Impacto Financeiro*

<b>Grau</b>	<b>Indicador <math>I_{IF}</math></b>
1	$C_T/C_{BZ} > 200\%$
2	$C_T/C_{BZ} > 140\%$
3	$C_T/C_{BZ} > 110\%$
4	$100\% \leq C_T/C_{BZ} \leq 110\%$
5	$C_T/C_{BZ} < 100\%$

*Fonte: O autor (2024).*

#### 4.3.4. CRITÉRIO 4: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

As características técnicas e operacionais do tratamento e da disposição final do lodo são fatores imprescindíveis para avaliar sua aplicabilidade local. O bom funcionamento, a flexibilidade, a simplicidade técnica e a escalabilidade do processo surgem como critérios avaliativos.

O desempenho operacional de alternativas de disposição de lodo pode ser avaliado como a confiabilidade que o sistema possui sobre a qualidade de seu processo, garantindo que impactos ambientais e sociais não ocorram.

Assim, a avaliação dos relatórios técnicos de vistorias da FEPAM surge como uma alternativa para identificar essa confiabilidade.

Em cenários de alta variabilidade de quantidade e qualidade do lodo gerado pelo sistema de tratamento de esgotos, a avaliação da flexibilidade do processo de disposição se torna importante. Andreoli et al (2014) consideram uma solução flexível se for possível absorver essas variações de quantidade e qualidade do lodo sem impossibilitar sua aplicação.

Como exemplo, Andreoli et al (2014) citam que a reciclagem agrícola tem grande capacidade de absorção de quantidades variáveis, mas apresenta limitações com relação à qualidade do lodo recebido. Já a incineração, por apresentar grande eficiência na destruição de matéria orgânica, pode receber lodos com diferentes composições, mas possui limitações de capacidade.

A simplicidade técnica e a escalabilidade do processo consideram o caráter de expansão do sistema de tratamento da ETE São João/Navegantes. Andreoli et al (2014) consideram que alternativas importadas, inovadoras ou adequadas a situações locais devem ser avaliadas em seus pontos críticos, visto que sua aplicação pode gerar problemas de manutenção recorrentes ou resultados insatisfatórios no novo local.

A ETE São João/Navegantes, por ser um sistema de Lodos Ativados de Aeração Prolongada acompanhado de digestão anaeróbia e polimento em digestor secundário, não apresenta variações de quantidade e qualidade na geração do biossólido. Portanto, a complexidade e escalabilidade da tecnologia de tratamento e disposição serão apenas consideradas para cenários onde é necessária a implementação de operações unitárias na ETE São João/Navegantes.

A avaliação do critério tem como base duas premissas: confiabilidade operacional da alternativa e a necessidade de implementações operacionais na ETE São João/Navegantes. Assim, a classificação do Critério de Características Técnicas seguirá a lógica apresentada na Tabela 18.

Tabela 18 - Graus de Classificação do Critério de Características Técnicas

Grau	Critério para Classificação
1	A alternativa apresenta grandes limitações na confiabilidade, flexibilidade e escalabilidade. Requer a implementação de operações na ETE São João/Navegantes ou no destinatário final.
2	A alternativa apresenta limitações na confiabilidade, flexibilidade e escalabilidade. Requer a implementação de operações na ETE São João/Navegantes ou no destinatário final.
3	A alternativa é confiável, mas apresenta limitações na flexibilidade e na escalabilidade. Requer a implementação de operações na ETE São João/Navegantes ou no destinatário final.
4	A alternativa é altamente confiável, mas apresenta limitações na flexibilidade ou na escalabilidade. Pode requerer a implementação de operações simples apenas no destinatário final.
5	A alternativa é altamente confiável, flexível e escalável. Não requer novas instalações na ETE São João/Navegantes ou no destinatário final.

*Fonte: O autor (2024).*

#### 4.4. AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Dentre os aspectos econômicos de um projeto de disposição de lodo, os custos com transporte para o destinatário final são condicionantes comuns em todas as alternativas. Por envolver longas distâncias e o transporte de grandes quantidades de lodo, esse aspecto se torna o principal condicionante da viabilidade econômica.

Em operações com empresas especializadas, é comum que as mesmas possuam frota própria para realização dos fretes, estabelecendo um custo padrão para a operação. Desta forma, deu-se prioridade para orçamentos de destinação que condicionam a responsabilidade de transporte para a empresa destinatária, explicitando o custo por frete do custo por disposição.

Caso a empresa destinatária optasse por não assumir a responsabilidade pelo traslado do biossólido, os custos com combustíveis, manutenção e aquisição de caminhões deveriam ser incluídos no cálculo. Porém, por envolver estudos operacionais, custos variáveis, altos investimentos e execução de licitações, a alternativa de aquisição de novos caminhões para destinação de

lodo pelo DMAE não foi considerada, sendo substituída pelo aluguel de frota terceirizada conforme licitações anteriores.

Devido às variabilidades dos processos produtivos das indústrias cimenteira e cerâmica, outro custo que não será incluído refere-se às possíveis adaptações necessárias no processo produtivo dos blocos de concreto e cerâmicos. A inclusão de uma unidade de estocagem e o aluguel de equipamentos para misturar o lodo às matrizes produtivas deve ser avaliada pela empresa e incluída no orçamento de custo com disposição.

#### 4.4.1. CUSTO DE TRANSPORTE

Para definir o custo de transporte do lodo para o destinatário final foi necessário considerar o valor do frete e a quantidade de viagens diárias a serem realizadas. Assim, a seguinte equação foi utilizada:

$$C_{Tr} = \frac{P_D / M_E}{V_T} \times C_F \text{ (Equação 2)}$$

Onde:

$C_{Tr}$ : é o Custo Diário de Transporte do Lodo (R\$/dia)

$P_D$ : é a Produção Diária de Lodo (t/dia)

$M_E$ : é a Massa Específica do Lodo (t/m<sup>3</sup>)

$V_T$ : é o Volume Transportado por Frete (m<sup>3</sup>)

$C_F$ : é o Custo de Transporte por Frete (R\$)

Nos casos em que a empresa destinatária se responsabilizou pelo transporte do bio-sólido, o custo de frete considerado é aquele apresentado em orçamento pela empresa terceirizada. Por sua vez, o custo de transporte por frete em cenários onde o DMAE seja responsável por realizar o traslado foi considerado com base no Contrato Registrado 23.10.000001796-7-13 obtido pelo Portal LicitaCon, resultando em um frete unitário de R\$ 435,00.

Foi verificado, em conjunto com a equipe técnica responsável pela ETE São João/Navegantes, que o custo atual de transporte de lodo para a Unidade de Transbordo de Resíduos de Porto Alegre é aplicado unicamente ao DMAE, enquanto o custo de transporte da Unidade de Transbordo até o Aterro Sanitário é de responsabilidade do DMLU. Conforme apresentado no PMGIRS (2023), o custo atual com transporte da Unidade de Transbordo até o Aterro Sanitário é de R\$435,00/dia, ou R\$158.775,00/ano.

#### 4.4.2. CUSTO COM DISPOSIÇÃO

Para definir o custo com a disposição do lodo para o destinatário final, foi necessário considerar a produção diária de lodo e o custo unitário de destinação estabelecido pela empresa destinatária. A seguinte equação estabelece a relação entre o Custo com Disposição e a produção diária de lodo:

$$C_D = (P_D/M_E) \times C_{Tu} \text{ (Equação 3)}$$

Onde:

$C_D$ : é o Custo Diário com Disposição (R\$/dia)

$P_D$ : é a Produção Diária de Lodo (t/dia)

$M_E$ : é a Massa Específica do Lodo (t/m<sup>3</sup>)

$C_{Tu}$ : é o Custo de Transporte Unitário (R\$/m<sup>3</sup>)

Foi verificado, em conjunto com a equipe técnica responsável pela ETE São João/Navegantes, que o custo atual com disposição de lodo para o ASCRR é arcado pelo DMAE. Conforme apresentado no PMGIRS (2023), o custo atual com disposição no Aterro Sanitário é de R\$ 704,00/dia, ou R\$ 256.960,00/ano.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados obtidos para os diferentes cenários de disposição final são apresentados e discutidos abaixo.

### **5.1. DISPOSIÇÃO EM ATERRO SANITÁRIO**

#### **5.1.1. CLASSIFICAÇÃO CONFORME CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO**

##### **5.1.1.1. ATENDIMENTO À LEGISLAÇÃO VIGENTE**

O Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio possui Licença de Operação (LO) válida e emitida em dezembro de 2023. Dentro da mesma, os requisitos de atendimento presentes no Capítulo 8 seguem critérios de seleção para recebimento de resíduos conforme a Norma NBR ABNT 10.004 (2004).

Em avaliação via sistema SOL-FEPAM, o empreendimento foi vistoriado pelo Órgão Ambiental no último trimestre. O Relatório de Fiscalização nº 153 de 2023 indica que “o empreendimento se encontrava em condições adequadas de operação no momento da vistoria”. Os últimos relatórios de monitoramento de águas pluviais e subterrâneas indicam que não há contaminação de recursos hídricos por conta do empreendimento, atendendo aos itens previstos no Capítulo 11 da LO.

Conforme estabelecido no Art. 3º da Lei Federal 12.305 de 2010, a disposição final ambientalmente adequada em aterros envolve a distribuição ordenada de rejeitos que, por definição, são os resíduos sólidos que não podem mais ser tratados e recuperados por processos disponíveis. Portanto, no contexto da reciclagem e recuperação de nutrientes e, considerando também os demais cenários existentes de tratamento e recuperação de lodo, a alternativa de disposição em Aterro Sanitário não contempla integralmente as informações dispostas na Lei Federal.

Assim, pontos pertinentes acerca deste cenário são levantados, priorizando outras alternativas para o reaproveitamento dos resíduos. Dessa forma, em concordância ao estabelecido no item 4.3.1., a atividade se enquadra como Grau 3 na classificação do Critério de Atendimento à Legislação Vigente.

### 5.1.1.2. IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS

Conforme exposto no item 3.3.3.3.6., diversos aspectos ambientais são afetados com a instalação de um aterro sanitário e, portanto, são esperados impactos na qualidade do ar e solo e nos meios biótico e antrópico. Sendo o principal impacto da disposição em aterros corresponde à poluição subterrânea e superficial de corpos hídricos (ANDREOLI et al, 2014).

A partir das informações levantadas via Sistema SOL-FEPAM, os possíveis impactos ambientais da operação do aterro sanitário são frequentemente monitorados e requerem análises de riscos e planos de ação para atuação em caso de não conformidades. A Licença de Operação vigente para o ASCRR apresenta extensa descrição dos diversos monitoramentos que devem ser realizados pelo empreendimento e, de acordo com as últimas vistorias realizadas pelo Órgão Ambiental, todos os itens estavam em conformidade com os níveis estabelecidos.

Por ser uma alternativa de disposição final que não realiza o reaproveitamento direto dos nutrientes e do potencial agronômico dos lodos de ETEs, os aterros sanitários não apresentam grandes benefícios socioeconômicos quando comparados com alternativas que reciclam o material. Além disso, a utilização de aterros para disposição de lodo diminui a vida útil do mesmo, dificultando a gestão ambiental municipal e ocasionando dificuldades na operação e contenção de contaminantes na área.

Assim, com a redução da vida útil do ASCRR, um novo local deverá ser escolhido para implementação de Aterro Sanitário, visando atender às diversas demandas municipais para disposição de RSU. A construção, que exige grandes extensões de terra, mudará drasticamente a dinâmica socioambiental da área, afetando a vida silvestre, desvalorizando terrenos e resultando em incômodos à população resistente ao novo empreendimento.

Portanto, a alternativa apresenta impactos negativos que requer severo monitoramento e seus benefícios para sociedade e meio ambiente são poucos. Assim, em concordância ao estabelecido no item 4.3.2., a atividade se enquadra como Grau 1 na classificação do Critério de Impactos Socioambientais.

### 5.1.1.3. IMPACTO FINANCEIRO

Considerando que a atual forma de disposição de bio-sólidos da ETE São João/Navegantes envolve o envio para o Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio, este cenário apresenta Índice de Impacto Financeiro igual a 100%.

Portanto, em concordância com o item 4.3.3., a atividade se enquadra como Grau 4 na classificação do Critério de Impacto Financeiro.

### 5.1.1.4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Conforme exposto no Capítulo 8 da Licença de Operação do ASCRR, o empreendimento admite somente o recebimento de resíduos sólidos urbanos, Classe II, não sendo permitido o recebimento de resíduos de saúde, de construção civil ou de resíduos industriais. O lodo da ETE São João Navegantes possui como destino final o ASCRR e, portanto, não há necessidade de adaptações na ETE.

Assim, a alternativa é altamente confiável, flexível e escalável, e não requer novas instalações na ETE São João/Navegantes ou no destinatário final. Portanto, em concordância ao estabelecido no item 4.3.4., a atividade se enquadra como Grau 5 na classificação do Critério de Características Técnicas.

### 5.1.1.5. RESUMO DA CLASSIFICAÇÃO

A Tabela 19 resume o resultado da classificação da alternativa de disposição final do lodo gerado na ETE São João/Navegantes no ASCRR.

*Tabela 19 - Resumo da Classificação de Critérios: Aterro Sanitário*

<b>Critério de Avaliação</b>	<b>Grau Atribuído</b>
Atendimento à Legislação Vigente	3
Impactos Socioambientais	1
Impacto Financeiro	4
Características Técnicas	5

*Fonte: O autor (2024).*

## 5.2. DISPOSIÇÃO PARA COMPOSTAGEM

### 5.2.1. AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A avaliação de viabilidade econômica para o cenário de destinação final com compostagem considera os custos envolvidos com o transporte e disposição nas empresas Compostagem Santa Rosa e Ecocitrus. Foram realizados orçamentos tendo em vista o cenário atual de geração de biossólidos na ETE São João/Navegantes e, para ambos os cenários, as empresas se responsabilizaram pelo frete do resíduo até o respectivo local de compostagem.

Os parâmetros levantados em orçamento com as empresas de compostagem são apresentados na Tabela 20.

*Tabela 20 - Parâmetros Base para Avaliação Econômica: Compostagem*

Parâmetro	Valor	Simbologia
Produção Diária de Lodo	8 t/dia	$P_D$
Massa Específica do Lodo	1,000 t/m <sup>3</sup>	$M_E$
Volume Transportado por Frete	14 m <sup>3</sup>	$V_T$
Custo de Transporte por Frete	R\$ 1.300,00	$C_F$
Custo de Transporte Unitário	R\$ 100,00/m <sup>3</sup>	$C_{Tu}$

*Fonte: O autor (2024).*

O memorial de cálculo para o cenário de destinação final para empresas de compostagem se caracteriza da seguinte forma:

#### **Custo de Transporte ( $C_{Tr}$ )**

$$C_{Tr} = \frac{P_D / M_E}{V_T} \times C_F = \frac{8,0 / 1,000}{14} \times 1.300$$

$$C_{Tr} = R\$ 742,86/dia$$

#### **Custo com Disposição ( $C_D$ )**

$$C_D = (P_D / M_E) \times C_{Tu} = (8,0 / 1,000) \times 100,00$$

$$C_D = R\$ 800,00/dia$$

### Custo Total ( $C_T$ )

$$C_T = C_{Tr} + C_D = R\$ 742,86 + R\$ 800,00$$

$$C_T = R\$ 1.542,85/dia \Rightarrow R\$ 563.142,85/ano$$

### Indicador Impacto Financeiro ( $I_{IF}$ )

$$I_{IF} = C_T/C_{BZ} = R\$ 563.142,85/R\$ 415.735,00$$

$$I_{IF} = 1,354 \Rightarrow 135,4\%$$

Os dados calculados são resumidos na Tabela 21.

*Tabela 21 - Avaliação de Viabilidade Econômica: Compostagem*

Parâmetro	Valor	Simbologia
Custo de Transporte	R\$ 742,86/dia	$C_{Tr}$
Custo com Disposição	R\$ 800,00/dia	$C_D$
Custo Total Anual	R\$ 563.142,85	$C_T$
Indicador Impacto Financeiro	135,4 %	$I_{IF}$

*Fonte: O autor (2024).*

## 5.2.2. CLASSIFICAÇÃO CONFORME CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

### 5.2.2.1. ATENDIMENTO À LEGISLAÇÃO VIGENTE

As unidades avaliadas para o cenário apresentam Licenças de Operação (LO) válidas e emitidas nos últimos dois anos. Os requisitos de atendimento presentes nas LO são condizentes com as informações estabelecidas nas Seções II e III da Resolução CONAMA nº 481 e nos Artigos 3º e 35º da Lei Federal 12.305 de 2010. Além disso, seguem critérios de seleção para recebimento de resíduos de acordo com a Norma NBR ABNT 10.004 (2004).

Conforme avaliado pelo sistema SOL-FEPAM, ambos empreendimentos foram vistoriados pelo Órgão Ambiental nos últimos seis meses. Para a Compostagem Santa Rosa, o Relatório de Fiscalização nº 415 de 2023 indica que “a operação e as estruturas do processo de compostagem estão adequadas” e “não há demandas a serem exigidas”. A única solicitação presente no

documento, referente a limpeza de caixa separadora de água e óleo, foi atendida com apresentação de relatório no prazo estabelecido.

Para a Ecocitrus, o Relatório de Fiscalização nº 485 de 2023 informa que “a renovação da Licença de Operação poderá ser emitida” e solicita adequações em estruturas para tal. A Licença de Operação, emitida em outubro de 2023 contempla os itens solicitados que foram apresentados via ofício no Sistema SOL-FEPAM.

Assim, além de atender às legislações vigentes, há pleno atendimento às Licenças de Operação, renovadas recentemente, incluindo expansão operacional e melhorias nas estruturas de acordo com a legislação. Portanto, em concordância ao estabelecido no item 4.3.1., a atividade se enquadra como Grau 5 na classificação do Critério de Atendimento à Legislação Vigente.

#### 5.2.2.2. IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS

Conforme exposto no item 3.3.3.2.1., a compostagem se apresenta como uma alternativa viável obtendo vantagens econômicas e ambientais por conta da produção de subprodutos com grande valor agrônomo como condicionadores de solo (ANDREOLI et al, 2014). Os principais impactos negativos das atividades de compostagem são expostos nas Licenças de Operação e se referem aos odores, ruídos, contaminação de solo e de recursos hídricos.

A partir das informações levantadas via Sistema SOL-FEPAM, esses possíveis impactos ambientais são frequentemente monitorados e requerem análises de riscos e planos de ação para atuação em caso de não conformidades. De acordo com as últimas vistorias realizadas pelo Órgão Ambiental, todos os itens estavam em conformidade aos níveis de monitoramento estabelecidos.

A produção e venda de composto orgânico, a partir da compostagem, apresenta benefícios claros à sociedade. Como exemplo, a Compostagem Santa Rosa, entre junho e novembro de 2023 realizou a revenda de 9.105 toneladas de composto estabilizado, auxiliando na produção agropecuária do Rio Grande

do Sul e impactando positivamente na esfera social com a geração de empregos e movimentação econômica.

Assim, a alternativa apresenta impactos negativos que requerem monitoramento, mas seus benefícios para sociedade e meio ambiente se sobressaem. Portanto, em concordância ao estabelecido no item 4.3.2., a atividade se enquadra como Grau 4 na classificação do Critério de Impactos Socioambientais.

#### 5.2.2.3. IMPACTO FINANCEIRO

Com base nos resultados apresentados na Tabela 21, o envio do lodo gerado na ETE São João/Navegantes para as empresas de compostagem selecionadas apresenta Índice de Impacto Financeiro igual a 135,4%, ou seja, apresenta custo superior ao cenário atual.

Portanto, em concordância com o item 4.3.3., a atividade se enquadra como Grau 3 na classificação do Critério de Impacto Financeiro.

#### 5.2.2.4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Ao realizar o orçamento da destinação para as empresas de compostagem, foi avaliada a necessidade de alterações na ETE para atendimento de limitações dos locais selecionados. Posto isso, conforme exposto pelos representantes da Compostagem Santa Rosa e Ecocitrus, o biossólido da ETE São João/Navegantes tende a apresentar características compatíveis para o recebimento nas centrais, visto o processo de tratamento realizado na estação.

As únicas alterações que podem impactar a destinação para as usinas de compostagem estão relacionadas à variação do volume diário destinado e às mudanças nas características do lodo ocasionadas por tal alteração. Para o primeiro caso, o impacto é predominantemente financeiro, conforme apresentado nos cálculos de viabilidade econômica, e, para o segundo, o impacto pode acarretar a inviabilidade de destinação para os empreendimentos e inconformidades à LO vigente da ETE.

Porém, como os empreendimentos informaram que já realizam o recebimento de resíduos orgânicos de diversas fontes industriais e sanitárias, há grande flexibilidade para ambos os exemplos de possíveis alterações. Sendo assim, deve ser mantido contato com a usina em caso de grandes alterações.

Assim, a alternativa é altamente confiável, flexível e escalável, e não requer novas instalações na ETE São João/Navegantes ou no destinatário final. Portanto, em concordância ao estabelecido no item 4.3.4., a atividade se enquadra como Grau 5 na classificação do Critério de Características Técnicas.

#### 5.2.2.5. RESUMO DA CLASSIFICAÇÃO

A Tabela 22 resume o resultado da classificação da alternativa de compostagem do lodo gerado na ETE São João/Navegantes.

*Tabela 22 - Resumo da Classificação de Critérios: Compostagem*

<b>Critério de Avaliação</b>	<b>Grau Atribuído</b>
Atendimento à Legislação Vigente	5
Impactos Socioambientais	4
Impacto Financeiro	3
Características Técnicas	5

*Fonte: O autor (2024).*

### 5.3. DISPOSIÇÃO COM REUSO INDUSTRIAL: CERÂMICAS

#### 5.3.1. AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A avaliação de viabilidade econômica para o cenário de destinação final com reuso em indústrias cerâmicas considera os custos envolvidos com o transporte e disposição nas empresas Kaspary, Pauluzzi, Olaria São Francisco e Olaria Tijocosta. Foram realizados orçamentos tendo em vista o cenário atual de geração de biossólidos na ETE São João/Navegantes e, para ambos os cenários, as empresas escolheram não se responsabilizar pelo frete do resíduo até a respectiva unidade.

Para o cenário, não foram considerados os custos envolvidos com alterações e melhorias no processo de tratamento do lodo na ETE São João/Navegantes. Os parâmetros levantados em orçamento com as indústrias cerâmicas são apresentados na Tabela 23.

*Tabela 23 - Parâmetros Base para Avaliação Econômica: Reuso Cerâmica*

Parâmetro	Valor	Simbologia
Produção Diária de Lodo	8 t/dia	$P_D$
Massa Específica do Lodo	1,000 t/m <sup>3</sup>	$M_E$
Volume Transportado por Frete	10 m <sup>3</sup>	$V_T$
Custo de Transporte por Frete	R\$ 435,00	$C_F$
Custo de Transporte Unitário	R\$ 00,00/m <sup>3</sup>	$C_{Tu}$

*Fonte: O autor (2024).*

O memorial de cálculo para o cenário de destinação final para indústrias cerâmicas se caracteriza da seguinte forma:

#### **Custo de Transporte ( $C_{Tr}$ )**

$$C_{Tr} = \frac{P_D / M_E}{V_T} \times C_F = \frac{8,0 / 1,000}{10} \times 435,00$$

$$C_{Tr} = R\$ 348,00/dia$$

**Custo Total ( $C_T$ )**

$$C_T = C_{Tr} + C_D = R\$ 348,00 + R\$ 0,00$$

$$C_T = R\$ 348,00/dia \Rightarrow R\$ 127.020,00/ano$$

**Indicador Impacto Financeiro ( $I_{IF}$ )**

$$I_{IF} = C_T/C_{BZ} = R\$ 127.000,00/R\$ 415.735,00$$

$$I_{IF} = 0,305 \Rightarrow 30,5 \%$$

Os dados calculados são resumidos na Tabela 24.

*Tabela 24 - Avaliação de Viabilidade Econômica: Reuso Cerâmica*

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Simbologia</b>
Custo de Transporte	R\$ 348,00/dia	$C_{Tr}$
Custo com Disposição	R\$ 00,00	$C_D$
Custo Total Anual	R\$ 127.020,00	$C_T$
Indicador Impacto Financeiro	30,5 %	$I_{IF}$

*Fonte: O autor (2024).*

### 5.3.2. CLASSIFICAÇÃO CONFORME CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

#### 5.3.2.1. ATENDIMENTO À LEGISLAÇÃO VIGENTE

Durante o levantamento das indústrias cerâmicas próximas à região metropolitana, foram constatadas diversas inconformidades com relação a validade das Licenças de Operação dos empreendimentos, sendo comum a operação sem o atendimento à Resolução CONAMA nº 237. Diante disso, há severas restrições legais e sociais para o estabelecimento de uma parceria para disposição de lodo.

Conforme avaliado pelo sistema SOL-FEPAM, parte dos empreendimentos contatados foram vistoriados pelo Órgão Ambiental nos últimos seis meses, enquanto parte não apresenta registros no sistema quando pesquisado o CNPJ informado. Dentre as vistorias analisadas, foi constatada a

ocorrência de inconformidades relacionadas à drenagem e ao arraste de sedimentos para fora da área dos estabelecimentos.

Assim, embora o reaproveitamento de biossólidos em indústrias cerâmicas seja permitido pela legislação, o atendimento às legislações vigentes é parcial no cenário regional devido ao não atendimento do licenciamento ambiental, requerendo desenvolvimento legal para ser viável. Portanto, em concordância ao estabelecido no item 4.3.1., a atividade se enquadra como Grau 1 na classificação do Critério de Atendimento à Legislação Vigente.

#### 5.3.2.2. IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS

Segundo Batista (2015), indústrias de cerâmica vermelha apresentam um maior potencial de uso de resíduos na sua composição, podendo substituir a necessidade de extração de argila em lavras a céu aberto. Os principais impactos negativos relacionados às indústrias cerâmicas são expostos nas Licenças de Operação e se referem à projeção de partículas, ruídos, contaminação de solo e de recursos hídricos.

A partir das informações levantadas via Sistema SOL-FEPAM, esses possíveis impactos ambientais são frequentemente monitorados e requerem análises de riscos e planos de ação para atuação em caso de não conformidades. Conforme comentado, as últimas vistorias realizadas pelo Órgão Ambiental em indústrias do setor, indicam ocorrências ambientais relacionadas a poluição atmosférica e a contaminação de solos e recursos hídricos.

Parte dos empreendimentos selecionados que foram contatados por telefone mencionaram enfrentar grandes dificuldades para manter o negócio ativo e sustentável economicamente. A recente elevação dos custos com aquisição e transporte da matéria-prima para fabricação de cerâmicos foi citada como fator preponderante para a redução de receitas e o potencial encerramento de atividades produtivas.

A possibilidade de substituição de até 25% da matéria-prima por lodos de ETEs, como apresentado nos trabalhos de Da Silva et al (2015) e Araújo (2008), foi muito bem recebida pelos empreendimentos e permitiu um amplo aceite do

uso do biossólido da ETE São João/Navegantes, mesmo com o alto teor de umidade apresentado pelo mesmo.

O potencial impacto social positivo do uso de biossólidos como substituto da argila em cerâmicas vermelhas pode auxiliar na retomada do setor, garantindo segurança financeira aos mais de 25.000 cidadãos empregados, conforme dados apresentados pelo Sindicato das Indústrias de Olaria e de Cerâmica para Construção no Estado do Rio Grande do Sul - SINDICER/RS.

Assim, a alternativa apresenta impactos negativos que requerem monitoramento, mas seus benefícios para sociedade e meio ambiente se sobressaem. Portanto, em concordância ao estabelecido no item 4.3.2., a alternativa de reuso em cerâmicas se enquadra como Grau 4 na classificação do Critério de Impacto Socioambiental.

#### 5.3.2.3. IMPACTO FINANCEIRO

Com base nos resultados apresentados na Tabela 24, o envio do lodo gerado na ETE São João/Navegantes para as empresas cerâmicas selecionadas apresenta Índice de Impacto Financeiro igual a 30,5%, ou seja, a destinação é economicamente favorável ao DMAE.

Portanto, em concordância com o item 4.3.3., a atividade se enquadra como Grau 5 na classificação do Critério de Impacto Financeiro.

#### 5.3.2.4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Dentre os principais motivos de recusa das empresas em trabalhar com biossólidos da ETE São João/Navegantes, a umidade do lodo se sobressai como principal ponto. Por conta da sua faixa de umidade em 80%, a porcentagem de lodo aplicável na matriz cerâmica é reduzida, o que não interessou algumas das empresas. Aquelas que demonstraram interesse o fizeram, principalmente, pela possibilidade de não arcarem com custos de compra de parte da matéria prima.

Outro ponto de atenção levantado pelas indústrias cerâmicas está relacionado à aceitabilidade do público geral para com o uso de lodos nos seus produtos, principalmente com relação a emissão de odores. Desta forma, a

efetiva higienização do lodo pelos biodigestores, removendo patógenos e contaminantes que causam maus odores, é um fator determinante.

Em reunião com o representante da Tijocosta, foi informado que o uso de lodos de ETEs para a fabricação de tijolos era realizado, apresentando resultados positivos na aplicação de até 20% de massa de lodos com 80% de umidade. Porém, devido aos odores apresentados e ao baixo benefício financeiro obtido na época, a operação foi descontinuada.

Considerando o processo de tratamento do DMAE, a indústria se mostrou aberta a negociar o recebimento de amostras do biossólido para avaliar sua aplicabilidade em seu processo produtivo. Portanto, há viabilidade da destinação para cerâmicas sem investimentos estruturais na ETE São João/Navegantes que, em caso de adesão de outras indústrias, pode resultar em uma destinação extremamente viável economicamente.

Assim, a alternativa é altamente confiável, mas apresenta limitações na flexibilidade ou na escalabilidade e, visando uma maior viabilidade, pode requerer a implementação de operações simples de secagem no destinatário final. Portanto, em concordância ao estabelecido no item 4.3.4., a atividade se enquadra como Grau 4 na classificação do Critério de Características Técnicas.

#### 5.3.2.5. RESUMO DA CLASSIFICAÇÃO

A Tabela 25 resume o resultado da classificação da alternativa de reuso industrial do lodo gerado na ETE São João/Navegantes.

*Tabela 25 - Resumo da Classificação de Critérios: Reuso Cerâmica*

<b>Critério de Avaliação</b>	<b>Grau Atribuído</b>
Atendimento à Legislação Vigente	1
Impactos Socioambientais	4
Impacto Financeiro	5
Características Técnicas	4

*Fonte: O autor (2024).*

## 5.4. DISPOSIÇÃO COM REUSO INDUSTRIAL: CIMENTEIRAS

### 5.4.1. AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A avaliação de viabilidade econômica para o cenário de destinação final com reuso em indústrias cimenteiras leva em consideração os custos envolvidos com o transporte e disposição nas empresas Groove, Construsinos e Tecmold. Foram realizados orçamentos considerando o cenário atual de geração de biossólidos na ETE São João/Navegantes e, para ambos os cenários, as empresas escolheram não se responsabilizar pelo frete do resíduo até a respectiva unidade.

Para o cenário, não foram considerados os custos envolvidos com alterações e melhorias no processo de tratamento do lodo na ETE São João/Navegantes. Os parâmetros levantados em orçamento com as indústrias cimenteiras são apresentados na Tabela 26.

*Tabela 26 - Parâmetros Base para Avaliação Econômica: Reuso Cimento*

Parâmetro	Valor	Simbologia
Produção Diária de Lodo	8 t/dia	$P_D$
Massa Específica do Lodo	1,000 t/m <sup>3</sup>	$M_E$
Volume Transportado por Frete	10 m <sup>3</sup>	$V_T$
Custo de Transporte por Frete	R\$ 435,00	$C_F$
Custo de Transporte Unitário	R\$ 0,00/m <sup>3</sup>	$C_{Tu}$

*Fonte: O autor (2024).*

O memorial de cálculo para o cenário de destinação final para indústrias de cimento se caracteriza da seguinte forma:

#### **Custo de Transporte ( $C_{Tr}$ )**

$$C_{Tr} = \frac{P_D / M_E}{V_T} \times C_F = \frac{8,0 / 1,000}{10} \times 435,00$$

$$C_{Tr} = R\$ 348,00/dia$$

**Custo Total ( $C_T$ )**

$$C_T = C_{Tr} + C_D = R\$ 348,00 + R\$ 0,00$$

$$C_T = R\$ 348,00/dia \Rightarrow R\$ 127.020,00/ano$$

**Indicador Impacto Financeiro ( $I_{IF}$ )**

$$I_{IF} = C_T/C_{BZ} = R\$ 127.000,00/R\$ 415.735,00$$

$$I_{IF} = 0,305 \Rightarrow 30,5 \%$$

Os dados calculados são resumidos na Tabela 27.

*Tabela 27 - Avaliação de Viabilidade Econômica: Reuso Cimento*

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Simbologia</b>
Custo de Transporte	R\$ 348,00/dia	$C_{Tr}$
Custo com Disposição	R\$ 00,00	$C_D$
Custo Total Anual	R\$ 127.020,00	$C_T$
Indicador Impacto Financeiro	30,5 %	$I_{IF}$

*Fonte: O autor (2024).*

#### 5.4.2. CLASSIFICAÇÃO CONFORME CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

##### 5.4.2.1. ATENDIMENTO À LEGISLAÇÃO VIGENTE

Em contrapartida às indústrias cerâmicas e olarias, as indústrias de cimento e concreto da região metropolitana estavam em conformidade com a Resolução CONAMA nº 237. As indústrias de cimento, por serem consideradas como grandes poluidoras potenciais pela FEPAM, apresentavam as licenças em dia com o Órgão Estadual, enquanto as indústrias de concreto possuíam licença junto com os respectivos Órgãos Municipais.

Conforme avaliado pelo sistema SOL-FEPAM, os maiores empreendimentos do segmento foram vistoriados pelo Órgão Ambiental nos últimos seis meses. Em ambos os casos, não houve vistorias por conta de denúncias públicas e os documentos expostos são relacionados aos itens previstos na LO.

Assim, há pleno atendimento à Licença de Operação e as demais legislações vigentes são majoritariamente atendidas de acordo com suas disposições. Portanto, em concordância ao estabelecido no item 4.3.1., a atividade se enquadra como Grau 3 na classificação do Critério de Atendimento à Legislação Vigente.

#### 5.4.2.2. IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS

Conforme Alvarenga (2019), na fabricação de cimento, concreto e blocos cerâmicos, o uso de lodo de esgotos pode substituir a necessidade de aplicação de agregados leves, como areias e pequenas pedras. A redução de lavras apresenta impacto ambiental positivo, reduzindo a exploração mineral de áreas e mantendo seu aspecto ambiental intacto.

Assim como para as indústrias cerâmicas, os principais impactos negativos são expostos nas Licenças de Operação e se referem à projeção de partículas, ruídos, contaminação de solo e de recursos hídricos. A indústria de cimentos, por ser considerada com um alto potencial poluidor, é intensamente monitorada para garantir que não haja impactos para o meio ambiente e sociedade local.

Os principais estudos estão relacionados a aplicação de cinzas de lodo que, portanto, implica na incineração do resíduo e na emissão de gases de efeito estufa. Além disso, devido à presença de matéria orgânica na composição dos biossólidos, há a possibilidade de geração e emissão de dioxinas e furanos, compostos químicos perigosos e capazes de implicar grandes impactos à sociedade e ao meio ambiente.

Por sua vez, o potencial de aplicação do biossólido *in natura* tem potencial de substituir apenas uma pequena fração do agregado miúdo ao concreto, reduzindo a resistência à compressão do concreto de referência. Conforme apresentado por Feitosa (2009), o uso do lodo de esgoto, como parte do agregado miúdo ao concreto, mesmo para edificações de pequeno porte, deve ter uso restrito.

Portanto, uma grande variedade de impactos socioambientais está relacionada a uma alternativa que requer intenso controle técnico para atingir um grau de aplicabilidade para a indústria. Além disso, os seus benefícios para sociedade e meio ambiente são pouco palpáveis, visto que a aplicação do lodo *in natura* em baixas quantidades afeta as qualidades técnicas do produto.

Assim, a alternativa apresenta impactos negativos que requerem severo monitoramento e seus benefícios para sociedade e meio ambiente são poucos. Assim, em concordância ao estabelecido no item 4.3.2., a atividade se enquadra como Grau 1 na classificação do Critério de Impactos Socioambientais.

#### 5.4.2.3. IMPACTO FINANCEIRO

Com base nos resultados apresentados na Tabela 27, o envio do lodo gerado na ETE São João/Navegantes para as empresas de cimento selecionadas apresenta Índice de Impacto Financeiro igual a 30,5%, ou seja, a destinação é economicamente favorável ao DMAE.

Portanto, em concordância com o item 4.3.3., a atividade se enquadra como Grau 5 na classificação do Critério de Impacto Financeiro.

#### 5.4.2.4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Dentre os principais motivos de recusa das empresas em trabalhar com bio-sólidos da ETE São João/Navegantes, a umidade do lodo se sobressai como principal ponto negativo. Além disso, a pequena porcentagem de lodo aplicável na matriz do produto da indústria não interessou algumas das empresas.

Assim como para indústrias cerâmicas, outro ponto de atenção está relacionado à aceitabilidade do público geral para com o uso de lodos em seus produtos, principalmente com relação a emissão de odores. Desta forma, a efetiva higienização do lodo pelos biodigestores, removendo maus odores, é um fator determinante para a possibilidade de negócio.

Em reunião com o representante da Groove, foi informado o grande interesse desta indústria cimenteira na implementação de processos sustentáveis com aplicação de resíduos sólidos. Como exemplo, foram

apresentados alguns dos recentes ensaios realizados pela Groove para estudar a viabilidade de implementação de lodos de ETEs no seu processo produtivo.

Os resultados dos ensaios demonstraram que apenas os lodos e biossólidos com faixa de umidade inferior a 50% possuíam a resistência estrutural desejada pela indústria. Conforme os resultados apresentados, isso ocorre por conta da matéria orgânica e sólidos voláteis presentes na matriz do lodo que eram degradados ou volatilizados durante o processo produtivo.

Considerando os ensaios, a indústria se mostrou aberta a negociar o recebimento do biossólido, caso este tenha seu teor de umidade reduzido. Portanto, a viabilidade da destinação requer investimentos estruturais na ETE São João/Navegantes, com a implementação de processos de secagem avançados com filtro prensa ou via secagem térmica.

Assim, a alternativa apresenta limitações na confiabilidade, flexibilidade e escalabilidade e requer a implementação de operações na ETE São João/Navegantes, implicando em maior complexidade. Em concordância ao estabelecido no item 4.3.4., a atividade se enquadra como Grau 2 na classificação do Critério de Características Técnicas.

#### 5.4.2.5. RESUMO DA CLASSIFICAÇÃO

A Tabela 28 resume o resultado da classificação da alternativa de reuso em indústrias cimenteiras do lodo gerado na ETE São João/Navegantes.

*Tabela 28 - Resumo da Classificação de Critérios: Reuso Cimento*

<b>Critério de Avaliação</b>	<b>Grau Atribuído</b>
Atendimento à Legislação Vigente	3
Impactos Socioambientais	1
Impacto Financeiro	5
Características Técnicas	2

*Fonte: O autor (2024).*

## 5.5. MATRIZ DE ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO DO LODO

A partir da classificação dos critérios de avaliação para as diferentes alternativas de disposição final do lodo gerado na ETE São João/Navegantes, foi realizada a construção da Matriz de Alternativas de Disposição do Lodo. Nela estão compilados os resultados dos itens anteriores em conjunto com os pesos estabelecidos no item 4.3. deste trabalho.

Assim, a partir do uso da Equação 1, foi possível realizar a Ponderação Aditiva Simples para o cenário multicritério e estabelecer a pontuação condizente com cada uma das alternativas. A Tabela 29 apresenta a matriz consolidada com seus resultados de avaliação.

*Tabela 29 - Resultado da Matriz de Alternativas de Disposição do Lodo*

Critério de Avaliação	Alternativas de Disposição				Peso
	Aterro Sanitário	Compostagem	Reuso Cerâmica	Reuso Cimento	
Atendimento à Legislação Vigente	3	5	1	3	5
Impactos Socioambientais	1	4	4	1	5
Impacto Financeiro	4	3	5	5	3
Características Técnicas	5	5	4	2	3
<b>TOTAL</b>	<b>47</b>	<b>69</b>	<b>52</b>	<b>41</b>	<b>-</b>

*Fonte: O autor (2024).*

Conforme exposto na Tabela 29, a alternativa de Compostagem é a que apresenta melhor resultado perante os diferentes critérios de avaliação, atingindo 85,3% da pontuação máxima atingível. Assim, evidencia-se que a alternativa é preferível perante os demais cenários de disposição de lodo.

Analisando a Tabela 29, torna-se claro que os resultados positivos nos critérios de Atendimento à Legislação Vigente e Impactos Socioambientais

impulsionam os resultados da alternativa de compostagem em comparação às demais. Assim, pode-se observar a importância na escolha do peso atribuído para os critérios de avaliação, sendo imprescindível uma análise concisa e imparcial para o processo de decisão.

Cabe ressaltar que, para o critério de Impacto Financeiro, a alternativa de compostagem pode ser afetada negativamente por novos orçamentos relacionados à disposição do lodo em empresas terceiras. Portanto, é imprescindível que a avaliação de viabilidade econômica seja realizada novamente com os orçamentos realizados diretamente ao DMAE.

Visando evitar a implementação de processos tecnológicos de alto custo de instalação e operação, os resultados do critério de Características Técnicas demonstram como, para um empreendimento com recursos limitados, tecnologias inovadoras e processos de tratamento adicionais podem inviabilizar um cenário de disposição final do lodo.

Por não incluir características físicas e químicas do resíduo gerado na estação de tratamento de esgotos, os critérios de classificação podem ser utilizados para novos estudos nas demais ETEs do Rio Grande do Sul. Dessa forma, resultados distintos podem ser obtidos por conta das diferentes configurações de operações unitárias de tratamento e da presença de empreendimentos na região.

Considerando a circulação econômica e os impactos socioambientais positivos, a alternativa de compostagem se destaca pela reciclagem de nutrientes e higienização do lodo gerado na ETE São João/Navegantes. O desenvolvimento de novos empreendimentos focados neste tipo de tratamento indica que há grande espaço para o desenvolvimento do negócio, com resultados positivos nas esferas ambiental, econômica e social.

A alternativa de disposição em aterro sanitário é impactada pela impossibilidade de reaproveitamento do material e baixo benefício à sociedade. Além disso, devido a criticidade de possuir apenas um empreendimento com capacidade de atender às demandas da região metropolitana, o impacto na vida útil do ASCRR se tornou parte integral da redução da classificação da alternativa.

Observa-se também o impacto negativo ocasionado pelas não conformidades legais em indústrias cerâmicas. Este resultado demonstra como uma alternativa com grande potencial socioambiental e com viabilidade técnico-econômica, pode ser prejudicada pela maneira como os empreendimentos tratam a questão ambiental durante sua operação, o que contradiz a intenção de uma alternativa sustentável.

Evidencia-se, portanto, a necessidade do desenvolvimento de projetos socioambientais para a regularização legal e a conscientização ambiental das indústrias cerâmicas da região. A aplicação do lodo no cenário industrial gera ganhos econômicos aos empreendedores que, por consequência, podem garantir sua estabilidade operacional e promover a valorização de resíduos.

Por sua vez, a limitação da quantidade de lodo aplicável na matriz sólida de cimentos minimizou os seus impactos positivos. Assim, as alternativas de Reuso Industrial apresentam um desafio de conectar e instigar a sustentabilidade destes setores da indústria para o efetivo estudo e implementação do lodo em seu processo produtivo.

## **6. CONCLUSÃO**

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar as alternativas principais de disposição de lodo para a ETE São João Navegantes. A partir de uma análise multicritério, combinada com a avaliação de viabilidade econômica para o transporte do resíduo, foi possível identificar os principais pontos positivos e negativos dos distintos cenários na Região Metropolitana de Porto Alegre.

A classificação em graus dos critérios foi elaborada para auxiliar a análise e fornece uma base lógica para a seleção das alternativas, garantindo que a problemática do tratamento e disposição final do lodo sejam avaliadas com uma perspectiva focada na sustentabilidade ambiental e econômica, seguindo os critérios legislativos atuais.

Considerando a necessidade de se encontrar alternativas ambientalmente adequadas para uma problemática em expansão, a avaliação do estado da arte das alternativas serve como base para que novos estudos e

trabalhos sejam realizados para garantir uma maior flexibilidade para disposição do lodo de ETEs.

Os principais cenários para disposição de lodo levantados pelo presente trabalho foram: aterros sanitários, centrais de compostagem, indústrias cerâmicas e indústrias de cimento. Por meio do método de Ponderação Aditiva Simples, as soluções de centrais de compostagem e indústrias cerâmicas são consideradas preferíveis para o bio sólido gerado na ETE São João/Navegantes do DMAE.

A disposição em centrais de compostagem está diretamente relacionada aos princípios de reciclagem e valorização expressos na PNRS, não requerendo investimentos para tratamento adicional do lodo gerado na ETE e apresentando custos de disposição semelhantes à atual disposição em aterros. Além disso, o composto gerado nos empreendimentos é inserido no mercado de biofertilizantes, implicando no reuso agrícola e na circulação da economia.

O reuso em indústrias cerâmicas e olarias possui grande potencial para o desenvolvimento social e econômico da região, sendo um cenário de disposição com grande aplicabilidade e potencial de retorno financeiro para todos os envolvidos. Porém, a regularização ambiental dos empreendimentos é uma etapa imprescindível para a implementação da alternativa.

Por sua vez, o cenário de reuso em indústrias de cimento e concreto é limitado pela baixa aplicabilidade do lodo *in natura* na matriz de produção, sendo um grande empecilho para a logística do lodo produzido na ETE. Dessa forma, não se recomenda para um primeiro momento o investimento na alternativa.

Como recomendação para futuros trabalhos na área, sugere-se incluir na avaliação os lodos gerados pelas demais ETEs de Porto Alegre nos estudos de viabilidade técnica e econômica. Dessa forma, será possível identificar oportunidades de melhorias e reduzir a quantidade de resíduos enviados diariamente ao Aterro Sanitário de Minas do Leão, preservando sua vida útil e valorizando os resíduos gerados na cidade de Porto Alegre.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA) (Brasil). **Atlas Esgotos: Despoluição de bacias hidrográficas**. Brasília: [s. n.], 2017.

ALVARENGA, J.M.C. **Uso de lodo gerado em estação de tratamento de água na fabricação de bloco cerâmico ecológico para uso em construções rurais**. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente) – UFSCAR: 2019.

ANDREOLI, C.V. et al. **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Projeto PROSAB, 2006.

ANDREOLI, C.V., VON SPERLING, M., FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2ª ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; v. 6).

ARAÚJO, F.S.D. **Influência do lodo de ETE na massa para fabricação de cerâmica vermelha**. Dissertação de Mestrado (Centro de Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8149: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - Procedimento**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9648: Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário - Procedimento**. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12209: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários.** Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14001: Sistemas de gestão ambiental - Requisitos com orientações para uso.** Rio de Janeiro, 2015.

**ATLAS, Socioeconômico do RS.** SPGG do Estado do Rio Grande do Sul. 6ª ed. Porto Alegre, 2021.

BATISTA, L. F. **Lodos gerados nas Estações de Tratamento de Esgotos no Distrito Federal: um estudo de sua aptidão para o condicionamento, utilização e disposição final.** Tese (Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.) - Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Lodo de Esgoto: Impactos ambientais na agricultura.** 1ª ed. Jaguariúna: Embrapa, 2006.

BHATTACHARYA, S.N. **Flow characteristics of primary and digested sewage sludge.** Department of Chemical Engineering, Royal Melbourne Institute of Technology, 1981.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. **Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico.** Presidência da República: Casa Civil, Brasília, DF.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Presidência da República: Casa Civil, Brasília, DF.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. **Novo Marco Legal do Saneamento Básico.** Presidência da República: Secretaria-Geral, Brasília, DF.

CHERNICHARO, C.A.L. **Reatores anaeróbios**. 2ª ed. Belo Horizonte: UFMG, 2016. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; v. 5).

CONAMA. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução n. 481**, de 03 de outubro de 2017. Diário Oficial da União, Brasília, 2017.

CONAMA. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução n. 498**, de 18 de agosto de 2020. Diário Oficial da União, Brasília, 2020.

CONSEMA. Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. **Resolução CONSEMA 479**, de 08 de dezembro de 2022. Diário Oficial do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

DA SILVA C. R. L., et al. **Viabilidade da incorporação do lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) em massa cerâmica para produção de blocos**. Cerâmica, v. 61, n. 357, p. 31–40, mar. 2015.

DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgoto. **Plano Municipal de Saneamento Básico: Diagnóstico**. Porto Alegre, 2015.

FEITOSA, M.C.A. **Sewage sludge: some applications in engineering**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2009.

GARCIA, J.B.F. **Recuperação e Caracterização de fósforo por meio das cinzas do lodo excedente de uma ETE municipal**. Dissertação de Mestrado em Ciências Ambientais, UNESP, Sorocaba, 2022.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Ranking do Saneamento do Instituto Trata Brasil de 2023**. São Paulo: 20 de março de 2023.

JORDÃO, E. P. **Eficiência energética em tratamento de esgotos**. Revista DAE, São Paulo, SP, v. 177, 2008.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 8ª ed. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental: Rio de Janeiro, 2017.

METCALF & EDDY. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. 5ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MILARÉ, É. **Os três anos do novo marco legal do saneamento**. O Estado de São Paulo: 31 de julho de 2023. Disponível em: <<https://analise.com/dna/artigos/12341>>. Acesso em: 19 de novembro de 2023.

ORTIZ, Jayme Pinto. **Emissários submarinos: projeto, avaliação de impacto ambiental e monitoramento**. São Paulo: CETESB, 2007.

PEDROZA, M.M. et al. **Produção e tratamento de lodo de esgoto: uma revisão**. Liberato, Novo Hamburgo, v. 11, n. 16, 2010.

PMPA. Prefeitura Municipal de Porto Alegre. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos: PMGIRS-POA (2023-2033)**. Porto Alegre, 2023.

SEMA-POA, Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. Lei nº 12.022, de 5 de abril de 2016. **Proíbe, no município de Porto Alegre, a Incineração de RSU Recicláveis**. Prefeitura Municipal, Porto Alegre, RS.

SEMA-PR, Secretário de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Resolução nº 021, de 22 de abril de 2009. **Dispõe sobre licenciamento ambiental para empreendimentos de saneamento no Paraná**. Curitiba, PR.

SNIS, SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Panorama do Saneamento Básico no Brasil 2021**. 1. ed. Brasília: [s. n.], 2021.

SNIS, SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos 2021**. 2. ed. Brasília: [s. n.], 2023.

TCHOBANOGLIOUS, G; LEVERENZ, H; ASANO, T. **Direct potable reuse: A future imperative**. Journal of Water Reuse and Desalination 1(1):2. 2011.

VAN HAANDEL, A.C; ALEM SOBRINHO, P. **Alternativas de Uso de Resíduos de Saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. (Projeto PROSAB).

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4ª ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; v. 1).

VON SPERLING, M. **Lagoas de estabilização**. 3ª ed. Belo Horizonte: UFMG, 2017. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; v. 3).

VON SPERLING, M. **Lodos Ativados**. 4ª ed. Belo Horizonte: UFMG, 2018. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; v. 4).