



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Escola Politécnica & Escola de Química

Programa de Engenharia Ambiental

Bernardo Henrique Silva Melo

ESTUDO DE ALTERNATIVA TÉCNICA-ECONÔMICA VISANDO A REDUÇÃO DE
CUSTOS DO SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE LODO DO MUNICÍPIO DE MACAÉ

Rio de Janeiro

2023



Bernardo Henrique Silva Melo

ESTUDO DE ALTERNATIVA TÉCNICA-ECONÔMICA VISANDO A REDUÇÃO DE
CUSTOS DO SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE LODO DO MUNICÍPIO DE MACAÉ

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

Orientador: Isaac Volschan Junior

Rio de Janeiro

2023

Melo, Bernardo Henrique Silva.

Estudo de alternativa técnica-econômica visando a redução de custos do sistema de gerenciamento de lodo do município de Macaé / Bernardo Henrique Silva Melo. – 2023.

f.: 94 il.:

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2023.

Orientador: Isaac Volschan Junior

1. Lodo de esgoto. 2. Custo gerenciamento de lodo. 3. Redução de custo. I. Junior, Isaac Volschan. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de Química. III. Avaliação do sistema de gerenciamento de lodo do município de Macaé e elaboração de alternativas para a sua otimização técnico-financeiro.



ESTUDO DE ALTERNATIVA TÉCNICA-ECONÔMICA VISANDO A REDUÇÃO DE
CUSTOS DO SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE LODO DO MUNICÍPIO DE MACAÉ

Bernardo Henrique Silva Melo

Orientador: Professor Isaac Volschan Junior, D.Sc

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

Aprovado pela Banca:

Presidente, Prof. Isaac Volschan Junior, D.Sc., UFRJ

Prof. Felipe Sombra dos Santos, D.Sc., UFRJ

Prof. Osvaldo Moura Rezende, D.Sc., UFRJ

Profa. Iene Christie Figueiredo, D.Sc., UFRJ

Rio de Janeiro

2023

RESUMO

MELO, Bernardo Henrique Silva. **Estudo de alternativa técnica-econômica visando a redução de custos do sistema de gerenciamento de lodo do município de Macaé.** Rio de Janeiro, 2023. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

O lodo de esgoto é um resíduo gerado no processo de tratamento de esgoto sanitário, através dos processos de decantação primária, biológico ou químico. Seu gerenciamento tem se tornado um grande problema já que apresenta uma geração contínua, exigindo descarte sistemático. Além disso, com o novo Marco do Saneamento, espera-se que perto de 99% da população tenha acesso ao serviço de esgoto, o que deve aumentar substancialmente a geração de lodo de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). No Brasil, a principal forma de destinação de lodo é o aterro sanitário, no entanto a compostagem se apresenta como uma alternativa de baixo custo com potencial de resultar em um composto estabilizado que pode ser usado na agricultura. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo estimar o volume total de lodo produzido pelas ETEs existentes no município de Macaé-RJ, bem como estimar as despesas operacionais (OPEX) totais com o gerenciamento de lodo. Além disso, avaliou técnica e economicamente diferentes cenários para a descentralização do sistema de desaguamento de lodos das ETEs, bem como a alteração do atual tipo de transporte e destinação, visando a redução de custos do gerenciamento de lodo. Foram levantados custos referentes à transporte de lodo úmido e seco em prestadores de serviços locais, operação de centrífugas (mão de obra, químicos, energia elétrica, manutenção); operação de leitos de secagem (remoção de lodo, recuperação das estruturas) e destinação em aterros sanitários e empresas que realizam compostagem. A produção total encontrada de lodo seco foi de 408 toneladas por mês, divididas em cinco ETEs gerando um custo mensal com transporte e destinação final de lodo igual a R\$ 131.655,00 e com gerenciamento do lodo igual a R\$ 199.581,97, deste montante 26%, refere-se a transporte de lodo úmido entre as ETEs e 66%, transporte e destinação de lodo seco. Nos dois cenários de descentralização do sistema de desaguamento de lodo chegou-se a reduções de 17,2% e 16% no custo total de gerenciamento de lodo, considerando respectivamente, o cenário de operacionalização da centrífuga já existente em umas das ETEs analisadas e o cenário de implantação e operação de leitos de secagem em três ETEs. No terceiro cenário, foi possível alcançar uma redução no custo total mensal com gerenciamento de lodo de R\$ 60.029,54, ou 30%, em relação ao custo atual estimado, além destinar o lodo para compostagem, destinação esta, ambientalmente mais adequada e de acordo com os princípios de reciclagem e reutilização de resíduos e de desenvolvimento sustentável do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituído pela Lei Federal nº10.305 de 2010.

Palavras-chave: Lodo de esgoto, custo gerenciamento de lodo, redução de custo.

ABSTRACT

Sewage sludge is a waste generated in the process of sanitary sewage treatment, through primary, biological or chemical decantation processes. Its management has become a major problem since it presents a continuous generation, requiring systematic disposal. In addition, with the new Sanitation Framework, it is expected that close to 90% of the population will have access to sewage services, which should substantially increase the generation of sludge from Sewage Treatment Plants (WWTPs). In Brazil, the main form of sludge disposal is the sanitary landfill, however composting presents itself as a low-cost alternative with the potential to result in a stabilized compost that can be used in agriculture. In this context, the present study aimed to estimate the total volume of sludge produced by the existing WWTPs in the city of Macaé-RJ, as well as to estimate the total operating expenses (OPEX) with sludge management. In addition, it technically and economically evaluated different scenarios for the decentralization of the sludge dewatering system of the WWTPs, as well as the change of the current type of transport and destination, aiming at reducing the costs of sludge management. Costs related to the transportation of wet and dry sludge in local service providers, operation of centrifuges (labor, chemicals, electricity, maintenance) were raised; operation of drying beds (removal of sludge, recovery of structures) and disposal in landfills and companies that perform composting. The total production found of dry sludge was 408 tons per month, divided into five WWTPs generating a monthly cost with transportation and final destination of sludge equal to R \$ 131,655.00 and with sludge management equal to R \$ 199,581.97, of this amount 26%, refers to the transport of wet sludge between the WWTPs and 66%, transport and destination of dry sludge. In the two scenarios of decentralization of the sludge dewatering system, reductions of 17.2% and 16% in the total cost of sludge management were reached, considering respectively, the scenario of operationalization of the centrifuge already existing in one of the ETEs analyzed and the scenario of implementation and operation of drying beds in three WWTPs. In the third scenario, it was possible to achieve a reduction in the total monthly cost with sludge management of R\$ 60,029.54, or 30%, in relation to the current estimated cost, in addition to allocating the sludge for composting, this destination, environmentally more appropriate and in accordance with the principles of recycling and reuse of waste and sustainable development of the National Solid Waste Plan (PNRS), instituted by Federal Law N°. 10.305 of 2010.

Keywords: Sewage sludge, sludge management cost, cost reduction.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS	10
2.1	Objetivo Geral	10
2.2	Objetivos Específicos	10
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1	ETEs: Caracterização e funcionamento	11
3.1.1	Sistemas combinados anaeróbio – Aeróbio	12
3.1.2	Lodos ativados de aeração prolongada.....	15
3.1.3	Lodo como resíduo de ETE.....	18
3.1.4	Taxas de geração de lodo	21
3.1.5	Etapas de processamento do lodo.....	23
3.1.6	Desaguamento de lodo.....	25
3.1.7	Destinação final do lodo	28
3.2	Alternativas para uso benéfico do lodo	30
3.3	Problemática financeira: Custos para gerenciamento de lodo em ETEs	35
4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	38
4.1	SISTEMA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO DE MACAÉ	38
4.1.1	ETE CENTRO.....	40
4.1.2	ETE MUTUM	41
4.1.3	ETE LAGOMAR.....	43
4.1.4	ETE SANA	43
4.1.5	ETE GLICÉRIO	44
5	METODOLOGIA	46
5.1	OBJETIVO 1 - DIMENSIONAR E QUANTIFICAR OS CUSTOS ATUAIS COM GERENCIAMENTO DE LODO	46
5.1.1	Caracterização e quantificação do lodo gerado	46
•	ETE Centro	47
•	ETE Mutum	47
•	ETE Lagomar	47
•	ETEs Sana e Glicério	48
5.1.2	OPEX – Sistema de Desaguamento de lodo	49
5.1.3	Definição das rotas para transporte e destinação final do lodo	53
5.2	OBJETIVO 2 – AVALIAR TÉCNICA E ECONOMICAMENTE CENÁRIOS PARA DESAGUAMENTO DE LODO.....	56
5.3	OBJETIVO 3 – AVALIAR ALTERAÇÃO NO TIPO DE TRANSPORTE E DESTINAÇÃO FINAL DO LODO DESAGUADO.	59
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
6.1	OBJETIVO 1 - DIMENSIONAR E QUANTIFICAR OS CUSTOS ATUAIS COM GERENCIAMENTO DE LODO	60

6.1.1	Caracterização e geração de lodo	60
6.1.2	Cenário Atual – OPEX Gerenciamento de Lodo.....	63
6.2	OBJETIVO 2 – AVALIAÇÃO DE DIFERENTES CENÁRIOS DE DESCENTRALIZAÇÃO DO DESAGUE DE LODO	67
6.2.1	Objetivo 2 - Cenário 1	67
6.2.2	Objetivo 2 - Cenário 2	71
6.3	OBJETIVO 3 – AVALIAR ALTERAÇÃO DO TRANSPORTE DE DESTINAÇÃO FINAL DE LODO PÓS DESÁGUE.....	74
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
	REFERÊNCIAS.....	80

1 INTRODUÇÃO

Por definição o lodo de esgoto é um resíduo gerado pelo tratamento de esgoto sanitário, por processos de decantação primária, biológico ou químico, não incluindo resíduos sólidos removidos de desarenadores, de gredeamento e peneiramento, conforme Resolução nº498 de 2020, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (BRASIL, 2020).

Além dos constituintes típicos do esgoto sanitário (matéria orgânica, macro e micronutrientes e microrganismos patogênicos) o lodo pode conter substâncias químicas indesejáveis, notadamente quando efluentes industriais são tratados conjuntamente com o esgoto doméstico. Exemplos de substâncias químicas que podem conferir características indesejáveis ao lodo englobam metais tóxicos e poluentes orgânicos persistentes (POPs) (BARROS *et al.*, 2022). Por outro lado, quando devidamente processado, com a estabilização de matéria orgânica e higienizado para inativação ou eliminação de patógenos, transforma-se em um fertilizante orgânico poderoso para o uso agrícola (ZHOU *et al.*, 2020). Por apresentar características variadas, o manejo seguro do lodo é considerado tarefa complexa, pois requer uma gestão adequada e ambientalmente aceita antes de sua destinação final, a fim de evitar problemas ambientais e de saúde pública (Yang *et al.*, 2020).

Seguindo os critérios da Norma Brasileira – NBR 10.004 de 2004 (ABNT, 2004), o lodo gerado nas ETEs, é classificado como Resíduo Classe II A – não inerte, podendo apresentar propriedade de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. A Lei Federal nº 12.305 de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), classifica o lodo de esgoto, como resíduo dos serviços público de saneamento básico. Devido as suas características de material essencialmente orgânico, fonte de nutrientes para vegetais, condicionador de solos, o lodo pode se enquadrar nos princípios de reciclagem e reutilização de resíduos e desenvolvimento sustentável previstos no PNRS. Neste contexto, em 2020, foi publicado a Resolução CONAMA nº 498, que tem como objetivo estabelecer critérios e procedimentos para a produção e aplicação de biossólidos.

O manuseio de enormes quantidades de lodo acarreta produção significativa dos custos operacionais totais, e por esse motivo, são necessários estratégias adequadas de reutilização que sejam sustentáveis do ponto de vista ambiental e econômico (LAMASTRA, 2018; KUNH, 2022). O seu gerenciamento representa custos consideráveis no contexto da operação das estações de tratamento de esgoto, podendo ultrapassar 40% de toda a operação de tratamento (LINDTNER, SCHAAR; KROISS, 2008; HASLINGER, KRAMPE;

LINDTNER, 2016) sendo o transporte e disposição final do lodo os mais significativos (BATSTONE; JANSEN., 2011).

No Brasil, segundo dados apresentados no Sistema Nacional de Informações sobre Gestão de Resíduos Sólidos, em 2019, estima-se que tenha sido gerado, 2,5 milhões de toneladas de lodo proveniente de ETEs (BRASIL, 2021). Com o estabelecimento do Marco Legal do Saneamento prevê-se que perto de 90% da população deva ter acesso à coleta e tratamento de esgoto até 2033 (BRASIL, 2020) o que deve aumentar sobremaneira a geração de lodo MARTINS *et al.* (2021).

No entanto, mesmo que, a disposição final desse material seja bastante complexa e cara, esta etapa geralmente é negligenciada na concepção dos sistemas de tratamento de esgoto. Por esta razão, é muito comum que os operadores sejam obrigados a gerenciar o problema de disposição final de lodo de forma emergencial, envolvendo altos custos operacionais e muitas vezes gerando impactos ambientais significativos (ANDREOLI, VON SPERLING, 2014).

Tendo este contexto desafiador do gerenciamento de lodo posto aos profissionais envolvidos nesta área e o fato deste aluno atuar diretamente na gestão operacional do sistema de esgotamento sanitário do município de Macaé-RJ, o presente estudo teve como objetivo inicial estimar a produção atual de lodo das ETEs no município de Macaé-RJ e o atual custo de gerenciamento.

Em um segundo momento, foram avaliadas diferentes alternativas técnicas para a descentralização do gerenciamento de lodo, visando a redução do custo total com o seu gerenciamento. Por último, foi avaliado uma alteração da forma de transportar e destinar o lodo já desaguado visando promover a redução do custo total de gerenciamento de lodo e proporcionar uma destinação ambientalmente mais adequada para este resíduo.

Tais avaliações se basearam nos dados operacionais apresentados na revisão do Plano Municipal de Saneamento Básico, elaborado pelo município em 2021, referências bibliográficas, além de consultas diretas à fornecedores locais, e nacionais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a produção e os custos incorridos no gerenciamento do lodo produzido nas Estações de Tratamento de Esgoto em operação no município de Macaé e avaliar alternativas técnica-econômicas para a redução dos custos com gerenciamento de lodo.

2.2 Objetivos Específicos

Objetivo 1: Estimar as taxas de geração de lodo nas ETEs implantadas no município de Macaé-RJ, considerando os dados apresentados na revisão do Plano Municipal de Saneamento Básico de Macaé (2021) e os custos atuais incorridos no gerenciamento considerando: transporte do lodo úmido até as unidades de tratamento, despesas operacionais (OPEX) do sistema de desaguamento, transporte e destinação final;

Objetivo 2: Avaliar de forma técnica e econômica diferentes cenários para a descentralização do desaguamento do lodo produzido nas ETEs;

Objetivo 3: Propor alteração no tipo de transporte e destinação final do lodo seco, buscando reduzir o custo com gerenciamento de lodo e proporcionar uma destinação ambientalmente mais adequada para este resíduo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo traz a revisão de literatura realizada para embasamento da pesquisa proposta. Iniciou-se com um estudo sobre a caracterização e forma de funcionamento de uma Estação de Tratamento de Esgotos (ETE), com vista a introduzir o assunto, tratando de forma mais específica nesta etapa sobre o sistema combinado de tratamento de esgoto e sobre o uso de lodos ativados de aeração prolongada.

Em seguida, o estudo se voltou para o lodo como resíduo de ETE, considerando sua composição e suas taxas de geração. As etapas de processamento do lodo passaram a ser abordadas logo depois, buscando descrever cada processo e, de forma mais detalhada, sobre o desaguamento, destinação final.

As alternativas para uso benéfico do lodo também são abordadas durante o capítulo, tratando de forma mais específica a compostagem. Considerando a temática central da pesquisa realizada, finaliza-se o capítulo com a problemática financeira relacionada aos custos de gerenciamento do lodo nas ETE.

3.1 ETEs: Caracterização e funcionamento

De acordo com o art. 3º, I, da Lei nº 11.445 de 2007, revogada pela Lei nº 14.026 de 2020, saneamento básico correspondente a um conjunto de serviços públicos, infraestruturas e instalações operacionais de: abastecimento de água potável; esgotamento sanitário; limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos; drenagem e manejo das águas pluviais urbanas (BRASIL, 2020a).

No Brasil e no mundo, o tema saneamento básico ressoa como uma preocupação mundial, fruto de crescente discussão nos foros internacionais (BEZERRA, 2022). Prova disso é que a Organização Mundial das Nações Unidas (ONU), por meio da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, traz dentre os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), o debate acerca da água e saneamento (Objetivo nº6) (ONU,2020). No Brasil, o saneamento básico ainda apresenta índices negativos alarmantes, especialmente por se tratar de um país com elevado grau de urbanização (SANTOS, 2018).

Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, o índice de coleta de esgoto no Brasil é de 60,2%, e 51,2% dos esgotos do país, são tratados. No Sudeste o índice de coleta de esgoto é 72,6%, sendo tratado 77,3% do esgoto coletado. No estado do

Rio de Janeiro o percentual de coleta é 58,17% e 70,54% do esgoto coletado é tratado (SNIS, 2021). No município de Macaé, o índice de tratamento de coleta de esgoto é: 72,6% e o de coleta esgoto é de 57,13%, sendo que deste volume 43,4% é tratado (SNIS, 2021). Neste contexto, o novo Marco do Saneamento (Lei nº 14.026 de 2020), estabeleceu que os contratos de prestação de serviços públicos de saneamento básico deverão definir metas de universalização que garantam o atendimento de 99% da população com água potável e 90% da população com coleta e tratamento de esgoto até 2033 (BRASIL, 2020).

No que tange ao esgotamento sanitário, as Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) são unidades constituintes de um sistema composto por: redes coletoras, estações elevatórias e emissários (TINÔCO *et al.*, 2021). Tem como principal objetivo, aplicar um conjunto de processos e operações unitárias que, quando utilizadas de forma sucessiva, foram capazes de remover as cargas poluidoras do esgoto, para então, esse efluente poder ser encaminhado a um corpo receptor minimizando seus impactos ambientais.

Na visão de Giordano (2015), os processos de tratamento de efluentes envolvem métodos produtivos e ferramentas eficazes que devem ser escolhidos de acordo com alguns fatores essenciais para a obtenção de resultados satisfatórios, dentre eles: legislação ambiental; clima e cultura local; custos de investimento; custos operacionais; quantidade e qualidade do lodo produzido; qualidade do efluente a ser reutilizado; segurança operacional; geração de odor; e interação com a vizinhança.

Neste contexto, Von Sperling (2012), afirma que uma ETE não pode gerar outros tipos de efluentes, pois sua função é reduzir ao máximo a carga de poluentes do meio ambiente. Para tanto, exige a adoção de processos de tratamento físicos, químicos e biológicos, devidamente implantados em função da natureza das substâncias a serem recuperadas e operações unitárias. No presente estudo foram detalhadas duas tecnologias de tratamento biológico, são elas: sistema combinado anaeróbio aeróbio e o sistema de lodos ativados, aeração prolongada.

3.1.1 Sistemas combinados anaeróbio – Aeróbio

O sistema combinado de tratamento de esgoto consiste na combinação entre os sistemas aeróbios e anaeróbios. Ambos são formas de tratamento biológico, que usam microrganismos para degradar e remover contaminantes orgânicos de águas residuais, diferenciando-se pela necessidade de oxigênio para funcionamento pelos sistemas aeróbios. Para essas configurações, o tratamento anaeróbio é usado para redução inicial dos níveis de

contaminantes orgânicos, enquanto o tratamento aeróbio é usado como uma etapa secundária de polimento para reduzir ainda mais a demanda de oxigênio bioquímico e os sólidos suspensos totais. Em alguns casos, a etapa de tratamento aeróbio secundário é usada para oxidar a amônia para formar nitrato (FREITAS, 2016).

Em geral, o uso de ambas as tecnologias em conjunto resulta em um tratamento mais eficiente do que se um sistema aeróbio fosse usado sozinho, bem como uma remoção de contaminantes mais completa do que se o tratamento anaeróbio isolado. Aziz *et al.*(2019), afirma que os sistemas aeróbios são frequentemente utilizados em combinação com processos anaeróbios, a fim de obter uma maior eficiência no tratamento de efluentes.

Além disso, a decisão de usar ambas as tecnologias, normalmente, resultarão em custos de capital mais altos, mas custos operacionais e de descarte de resíduos mais baixos, isso porque resulta em menor requisito de energia e em menor produção de lodo (ZOPPAS; BERNARDES; MENEGUZZI, 2016). As vantagens atribuídas à combinação de processos anaeróbios-aeróbios, de menor produção de lodo, baixo custo operacional, e baixa produção de mal odores, também é citada por (AZIZ *et al.*,2019) e Silva *et al.* (2015) que afirma que a combinação desses dois de métodos possibilita um sistema mais compacto, com menor consumo de energia entre outros.

No que tange à etapa anaeróbia as principais vantagens vinculadas a este tipo de tratamento seriam: eficiência na remoção de matéria orgânica, menor produção de lodo, o que diminuiria as dificuldades do processo após o tratamento do efluente, requerer menos energia, quando comparado ao anaeróbio e, ainda, oferecer a possibilidade de produção de biogás, que pode ser futuramente utilizado na produção de energia (AZIZ *et al.*,2019). Dentre os métodos anaeróbios de tratamento, o reator anaeróbio de manta de lodo com fluxo ascendente (UASB) tem sido relatado como o mais eficiente quando utilizado em conjunto com outras unidades de pós-tratamento, isso deve ao fato de que o reator possui uma grande capacidade volumétrica, efetuando o tratamento de grandes volumes de efluente com reduzido tempo de detenção hidráulica, além de apresentar bom desempenho na remoção da carga orgânica (OLIVEIRA *et al.*,2021).

Dentre os filtros biológicos aeróbios utilizados no tratamento de efluentes, destacam-se os filtros aerados submersos e os filtros biológicos percoladores. Nos filtros aeróbios submersos (FASB) o fluxo segue um curso ascendente, garantindo que o fluxo do afluente e dos compostos presentes no meio líquido tenham a mesma direção dentro do reator (SANTOS, 2018). O meio suporte é preenchido de material poroso, ao qual se alojam os

microrganismos presentes nos biofilmes. Os tanques dos filtros aerados contam com aeradores localizados na parte inferior das unidades, garantindo a aeração do meio e promovendo o tratamento do efluente através de processos aeróbios.

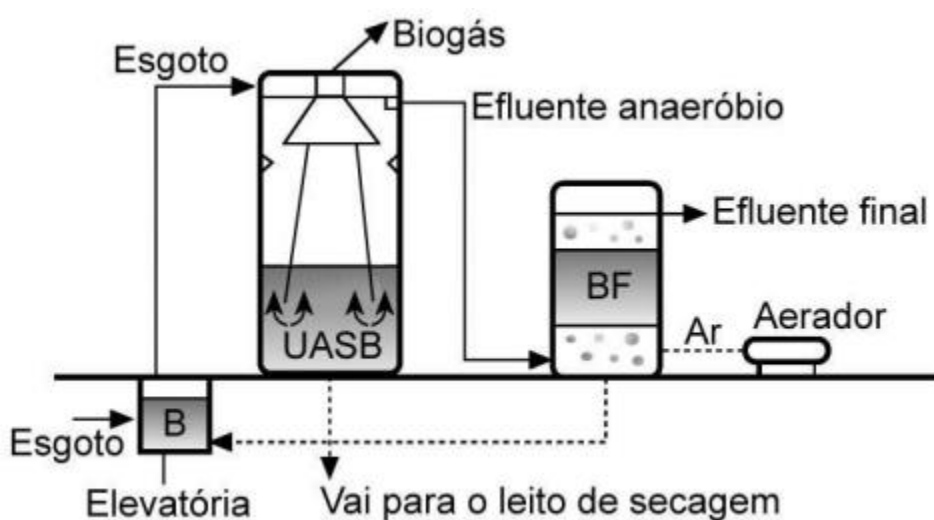
As principais vantagens na utilização dos FASB é a pequena produção de lodo, possibilidade de cobertura dos tanques e alta concentração de biomassa, atribuindo um tratamento eficiente (SILVA, 2016).

LIU *et al.* (2017) afirmou que com o uso dos biofiltros aerados submersos, os níveis mais altos de remoção de poluentes podem ser obtidos porque eles contêm meios de que desempenham um papel fundamental na manutenção de uma grande quantidade de biomassa ativa. Isso favorece a formação de biofilmes e fornece uma variedade de populações microbianas responsáveis pela degradação de poluentes nas águas residuárias.

Segundo YANG *et al.* (2015), nem todos os meios de suporte são adequados para adesão de microrganismos, pois alguns meios de suporte possuem baixo teor de porosidade e pode ocorrer obstruções nos sistemas comprometendo a eficiência da operação. A seleção do meio suporte é muito importante para obter níveis mais altos de remoção de poluentes e para manter a estabilidade do sistema de tratamento (BIAS, 2020)

No caso do município de Macaé, a principal tecnologia de tratamento de esgoto utilizado é o sistema combinado anaeróbio-aeróbio composto por reatores UASB seguido de biofiltros aerados submersos. Na (Figura 01) é possível verificar o desenho esquemático deste tipo de sistema combinado.

Figura 1. Desenho esquemático de um sistema combinado



Fonte: Gonçalves (2016).

De acordo com Gonçalves (2016), os sistemas combinados UASB + BFAS apresentam eficiência de 95% para DBO_5 e de 90% para SST. Como vantagens, o autor cita a compactidade e não necessidade de recirculação (θ_{lodo}) e como desvantagens menciona a necessidade de lavagens periódicas. Segundo Metcalf e Eddy (2016), sistemas combinados para desnitrificação biológica e a remoção físico-química de fósforo têm sido utilizados em diversas estações de tratamento de esgoto municipais, nos Estados Unidos, para a tender a níveis de emissão de nitrogênio total e fósforo total, nos seus efluentes, que são menores que 3,0 e 0,10 mg.L^{-1} , respectivamente.

No estudo elaborado por Foco *et al.* (2014), avaliando a eficiência de um sistema anaeróbio – aeróbio, utilizando eletrodutos corrugados de PVC para imobilização da biomassa como meio suporte, obteve-se uma eficiência média de remoção de Demanda Química de Oxigênio (DQO) de 90% e remoção de Nitrogênio Total (NT) de 43%. Já Rosário (2016) operando um sistema combinado em escala de bancada, obteve eficiência de remoção de 94% de DQO, 89% de Sólidos Suspensos Totais (SST) e 94% de NT. Em ambos os casos para a etapa aeróbia foi escolhida a tecnologia de biofiltros aerados submersos.

3.1.2 Lodos ativados de aeração prolongada

Dentre os principais sistemas de tratamento aeróbio, destacam-se o sistema de lodos ativados, lagoas aeróbias e os filtros biológicos aeróbios (SALLES, 2019). Em um estudo realizado em 1.667 ETEs com capacidade instalada para atendimento a aproximadamente 75% da população urbana da região contemplada no estudo (regiões Sul, Sudeste e Centro Oeste do Brasil) as tecnologias de tratamento de esgoto sanitários mais empregadas são: reatores tipo UASB, lagoas de estabilização e lodos ativados. Somadas totalizam 90% da ETEs implantadas sendo responsável por 81% da capacidade de tratamento (CHERNICHARO *et al.*, 2018).

Os sistemas de lodos ativados são amplamente utilizados a nível mundial, para o tratamento de despejos domésticos e industriais, em situações em que é necessária elevada qualidade do efluente e reduzidos requisitos de área. No entanto, o sistema de lodos ativados inclui um índice de mecanização superior ao de outros sistemas de tratamento, implicando em uma operação mais sofisticada e em maiores consumos de energia elétrica (DANIEL, 2008).

Segundo Bezerra (2007) o termo “lodos ativados” designa a massa microbiana floculenta que se forma quando esgotos e outros efluentes biodegradáveis são submetidos à

aeração. O processo de lodos ativados convencional é composto por um tanque de aeração e um decantador secundário (VON SPERLING, 2016).

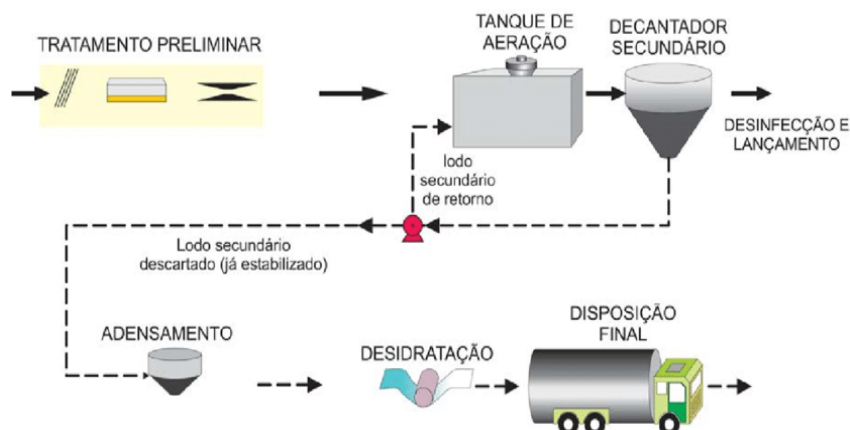
Neste sistema a matéria orgânica proveniente do efluente sanitário ou industrial (afluente ao processo) e o lodo ativado são introduzidos, misturados e aerados em unidades chamadas tanques de aeração (reator biológico), onde uma cultura de bactérias aeróbias e facultativas é mantida em suspensão. O material orgânico presente no efluente é utilizado como fonte de alimento pelos microrganismos, que tendem a crescer e se aglomerar, dando origem aos flocos biológicos denominados de lodos ativados (SILVA *et al.*, 2015). Nos decantadores, o lodo ativado é separado do esgoto tratado, que é retirado em vertedouros, sendo que parte do lodo retorna ao tanque de aeração como reciclo. O lodo produzido em excesso é retirado do tanque de decantação e destinado para tratamento específico (POMPÊO *et al.*, 2015).

A grande demanda de ar fornecida por aeração mecânica ou por meio de difusores alimentados por compressores de ar (TEIXEIRA, 2022), faz com que a tecnologia consuma mais energia em comparação a outros tipos de tratamentos aeróbios.

No entanto, esse sistema costuma ser utilizado como tratamento secundário para efluentes de reatores anaeróbios, devido a sua alta eficiência na remoção da DBO total (IOPP E MENDES, 2020). A eficiência do tratamento por lodos ativados é garantida por um maior tempo de retenção da biomassa, equivalente a idade do lodo, o que permite que os microrganismos tenham tempo para metabolizar de 90% a 95% da matéria orgânica presente no efluente (GUEDES, 2017; SALLES, 2019). O tempo de detenção hidráulico é bem baixo, da ordem de 6 a 8 horas e a idade do lodo em torno de 4 a 10 dias. Como o lodo retirado ainda é jovem e possui grande quantidade de matéria orgânica em suas células, há necessidade de uma etapa de estabilização do lodo (OLIVEIRA, 2019).

Já o sistema de lodos ativados com aeração prolongada, segundo Peleteiro e Almeida (2014), é caracterizado pelo maior tempo de permanência da biomassa no sistema, da ordem de 18 a 30 dias. Como a quantidade de biomassa no reator (em kg SSVT) é maior que no sistema de lodos ativados convencional, o volume do reator aeróbio deve ser também mais elevado, e o tempo de retenção hidráulica varia em torno de 16 a 24h. Na (Figura 2) é feita a representação de um sistema de lodo ativado por aeração prolongada.

Figura 2. Sistema de lodo ativado por aeração prolongada



Fonte: Ponce e Rollemberg (2019).

Para esta modalidade de lodos ativados, conforme Sperling *et al* (2007), há menos matéria orgânica por unidade de volume do tanque de aeração e por unidade de biomassa do reator. Em decorrência, as bactérias, para sobreviver, passam a utilizar nos seus processos metabólicos a própria matéria orgânica biodegradável componente das suas células. Enquanto no sistema convencional a estabilização do lodo é feita em separado (na etapa de tratamento de lodo), usualmente em ambiente anaeróbico, na aeração prolongada ela é feita conjuntamente, no próprio reator, tendo-se, portanto, um ambiente aeróbico. Com isso, não se faz necessário a utilização de decantadores primários nem unidades de digestão de lodo em sistema de aeração prolongada, tornando-o o fluxograma de processo mais simples.

Conforme é possível verificar no (Quadro 1), o sistema de lodo ativado de aeração prolongada se sobressai frente ao lodo ativado convencional por trazer a estabilização do lodo no próprio reator e pela elevada resistência a variações de carga e cargas tóxicas, o que aparece como uma desvantagem no sistema convencional.

Quadro 1 – Vantagens e Desvantagens – Lodo Ativado Convencional x Aeração Prolongada

	Vantagens	Desvantagens
Lodo ativado convencional	Elevada eficiência na remoção de DBO	Baixa eficiência na remoção de coliformes
	Possibilidade de remoção biológica de N e P	Elevados custos de implantação e operação
	Baixos requisitos de área	Elevado consumo de energia
	Processo confiável	Necessidade de operação sofisticada
	Reduzidas possibilidades de maus odores, insetos e vermes	Elevado índice de mecanização
	Flexibilidade operacional	Relativamente sensível a descargas tóxicas Necessário tratamento do lodo e disp. final
Lodo Ativado de Aeração Prolongada	Elevada eficiência na remoção de DBO	Baixa eficiência na remoção de coliformes
	Nitrificação usualmente obtida	Elevados custos de implantação e operação
	Possibilidade de remoção biológica de N e P	Elevado consumo de energia
	Baixos requisitos de área	Elevado índice de mecanização
	Processo confiável	
	Reduzidas possibilidades de maus odores, insetos e vermes	
	Flexibilidade operacional	Necessário tratamento do lodo e disposição final
	Estabilização do lodo no próprio reator	
	Elevada resistência a variações de carga e cargas tóxicas	

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2014).

3.1.3 Lodo como resíduo de ETE

O lodo de esgoto é definido pela Resolução CONAMA nº498 de 2020, como sendo um resíduo gerado no processo de tratamento de esgoto sanitário, por processos de decantação primária, biológico ou químico, não incluindo resíduos sólidos removidos de desarenadores, de gradeamento e peneiramento (BRASIL, 2020). Além disso, é um material que se apresenta em estado semissólido ou líquido pastoso e concentra boa parte dos poluentes e contaminantes que são removidos durante o tratamento de esgoto (BARROS *et al.*, 2020).

A qualidade e a quantidade de lodo gerado são dependentes do tipo e eficiência do tratamento a que o esgoto foi submetido, sendo composto por parte da massa orgânica presente no esgoto afluente da ETE e, principalmente, pela biomassa, que são microrganismos que utilizaram o esgoto como alimento para crescer e se reproduzir (BITTENCOURT, 2022). A tipologia do lodo formado é com base na fase do tratamento, por exemplo, o lodo primário, constituído principalmente de matéria orgânica é produzido quando os sólidos suspensos e os sedimentáveis são separados do esgoto bruto, na etapa de tratamento primário, por meio de

tecnologias como flotação, precipitação e sedimentação. No (Quadro 2), é apresentado a classificação do lodo, de acordo com o tipo e procedência.

Quadro 2. Classificação do lodo por tipo, procedência e características

Tipo de Lodo	Procedência	Características
Lodo primário ou bruto	Proveniente do tratamento primário do esgoto e obtido, normalmente, por sedimentação.	Possui uma coloração acinzentada, é pegajoso, de odor desagradável e pode decompor-se facilmente
Lodo digerido	Processos de estabilização de lodos.	Apresenta redução de SSV superior a 40%, dependendo do processo empregado. Quando bem digerido não possui odor ofensivo
Lodo aeróbio não estabilizado	Sistemas de lodos ativados e em reatores aeróbios com biofilmes – alta carga.	Compreende a biomassa de micro-organismos aeróbios, gerada nos processos metabólicos de degradação da matéria orgânica, descartada do sistema. Necessita de processo de digestão complementar.
Lodo aeróbio estabilizado	Lodos ativados com aeração prolongada e reatores aeróbios com biofilmes – baixa carga	Constitui o lodo excedente, resultante de respiração endógena prevalecente, com um menor teor de matéria orgânica e maior quantidade de sólidos inorgânicos, não havendo necessidade de uma etapa posterior de digestão
Lodo anaeróbio estabilizado	Processos de degradação da matéria orgânica, em condições anaeróbias. Ocorrência em reatores anaeróbios e no fundo de lagoas de estabilização	Lodo com menor teor de matéria orgânica, quanto melhor a digestão, menor o potencial de geração de odor.
Lodo misto	Tratamento conjunto de lodos excedentes, de origem em tratamentos primário e secundário	Suas características são uma composição dos lodos que lhe deram origem
Lodo químico	Produzido em estações de tratamento onde se tem uma etapa físico e química de tratamento da fase líquida.	Lodos compostos por matéria orgânica e compostos químicos principalmente coagulantes e/ou precipitantes, como alumínio e sais de ferro.

Fonte: Von Sperling e Gonçalves (2001).

No que tange à composição do lodo, na (Tabela 1,) são apresentadas as características físico-químicas do lodo gerado em diferentes ETEs, Bettiol e Camargo (2006) compararam essas características em diferentes estações de tratamento no Brasil, verificados pelos autores em base seca.

Conforme verificado na (Tabela 1), a presença de nutrientes no lodo, principalmente o Nitrogênio Total (NT), tem viabilizado a sua aplicação em solos para correção ou atender as

necessidades das plantas (Brown *et al.*,2020). A variar o tipo de tratamento, o NT pode variar de 1% a 7% e grande parte desse N, encontra-se em formas orgânicas (RIGBY *et al.*,2016).

Tabela 1 - Composição físico-química de lodos de esgoto em diferentes ETE

Características	Un	ETE Barueri	ETE Franca	ETE Curitiba	ETE Paranavai	ETE Jundiaí
Umidade	%	71,2	82,7	-	-	76,2
Sólidos Voláteis	%	56,8	72,5	-	-	69,0
pH	-	6,4	5,4	5,9	6,1	5,5
Carbono Orgânico	g.kg ⁻¹	293	382	321	201	226
Nitrogênio Total	g.kg ⁻¹	42,1	68,2	49,1	22,2	21,2
Fósforo	g.kg ⁻¹	26,9	12,9	3,7	0,95	4,5
Potássio	g.kg ⁻¹	1,0	1,0	1,5	0,34	0,66
Cálcio	g.kg ⁻¹	47,8	24,8	15,9	8,3	6,6
Enxofre	g.kg ⁻¹	17,1	15,7	-	-	11,1
Sódio	g.kg ⁻¹	0,5	0,9	-	-	2,4
Magnésio	g.kg ⁻¹	4,5	2,2	6,0	3,0	1,3

Fonte: Bettiol e Camargo (2006).

Outro componente, o fósforo (P), é essencial para a produção alimentar e é encontrado em diferentes formas, que variam conforme os processos empregados (SOUZA,2022). Ao final do tratamento do lodo de esgoto é esperado que mais de 95% do fósforo total do início do processo, seja transferido para o lodo primário e secundário (EWERT *et al.*,2017) Outros nutrientes necessários às plantas como cálcio, magnésio, zinco, ferro, também são encontrados no lodo, constituindo uma fonte completa e importante de nutrientes para as culturas vegetais (BROWN *et al.*,2020).

Mais um aspecto que deve ser considerado na composição do lodo são os microrganismos patogênicos, que podem ser (a) helmintos, (b) fungos, (c) protozoários, (d) vírus e (e) bactérias. A presença de contaminantes microbiológicos do lodo é resultante do material fecal presente nos esgotos, que pode refletir as condições de saúde da população (VON SPERLING, 2005).

O lodo também pode conter substâncias químicas indesejáveis, notadamente quando efluentes industriais são tratados conjuntamente com o esgoto doméstico. Exemplos de substâncias químicas que podem conferir características indesejáveis ao lodo englobam metais pesados e poluentes orgânicos persistentes (POPs) (BARROS *et al.*,2022).

Por apresentar características variadas o manejo seguro do lodo é considerado uma tarefa complexa, já que requer uma gestão adequada e ambientalmente aceita, sendo

necessário recorrer à regulamentação de uso e disposição final desse sub-produto, estabelecendo critérios de tratamento e utilização, afim de minimizar os riscos associados principalmente à presença de patógenos e substâncias químicas (BARROS *et al.*, 2022). No Brasil, o principal instrumento legal relacionado ao uso de biossólido (lodo de esgoto pós beneficiamento) no solo é a Resolução CONAMA nº 498 de 2020 (BRASIL, 2020). Biossólido é definido pela própria CONAMA, como sendo um produto do tratamento do lodo de esgoto sanitário que atende os critérios microbiológicos e químicos estabelecidos nessa Resolução, estando, dessa forma, apto para ser aplicado em solos.

3.1.4 Taxas de geração de lodo

As taxas de geração de lodo configuram-se como um importante indicador para o seu gerenciamento. De acordo com Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2014), o lodo representa cerca de 1 a 2% do efluente tratado nas ETE, porém, o custo de seu gerenciamento pode chegar a 60% dos custos totais de operação de uma ETE. Os autores fizeram um levantamento da quantidade de lodo produzida, com base no sistema de tratamento, estando os resultados apresentados na (Tabela 2).

Tabela 2 – Características e quantidade do lodo produzido

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

Fonte: Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2014).

Conforme apresentado na (Tabela 2,) percebe-se que os sistemas de tratamento anaeróbios apresentam menores taxas de geração de lodo, fato observado por exemplo, se compararmos o indicador de kgSS.kgDQO^{-1} de um lodo ativado convencional (0,60-0,80) e um reator UASB (0,12-0,18). Tal característica confere à tecnologia anaeróbia, de uma maneira geral, uma vantagem de ter menores custos operacionais com gerenciamento de lodo. Outro ponto que pode ser verificado na (Tabela 2) é que comparando os dois sistemas de

lodos ativados apresentados (convencional e aeração prolongada) percebe-se que o segundo, apresenta uma menor taxa de geração de lodo.

3.1.5 Etapas de processamento do lodo

Para um descarte seguro do lodo de esgoto, três aspectos precisam ser considerados: o nível de estabilização da matéria orgânica, os teores de metais pesados e o grau de patogenicidade (BARROS, 2022, apud CASSINI *et al.*,2003; KACPRZAC *et al.*,2017). Ademais, para alcançar níveis aceitáveis desses aspectos para uma destinação segura, é preciso que o lodo passe por uma série de etapas de tratamento, que são descritas no (Quadro 3).

No Brasil, onde o aterro sanitário é o principal método de destinação final de lodo utilizado (SOUZA, 2022), o tratamento do lodo é uma preocupação que se restringe, em muitos casos, somente à estabilização e ao desaguamento, para se atingir um teor de sólidos totais na faixa de 15% - 40%, visando quase que exclusivamente a redução de volumes de lodo antes da sua retirada da área (BARROS, 2022).

Quadro 3 - Etapas de processamento do lodo

Etapas de processamento	Descrição
Adensamento	Processo utilizado para remoção de umidade, consequente, redução do volume da massa de lodo, facilitando, as etapas subsequentes do seu tratamento;
Estabilização	Etapas indicadas para remoção da matéria orgânica e consequente redução de odores;
Condicionamento	Responsável por preparar a desidratação do lodo, realizada predominantemente pela adição de produtos químicos ou o térmico. Tem como principal objetivo aumentar o tamanho das partículas de sólidos, por meio das fases de coagulação e floculação;
Desaguamento	Responsável por reduzir a umidade do lodo ainda mais, produzindo um material com comportamento mecânico próximo ao dos sólidos;
Higienização	Tem como objetivo eliminar ou reduzir a concentração de patógenos

Fonte: Adapt (Barros, 2022)

Conforme (Quadro 3), a primeira etapa de processamento do lodo é o adensamento. Os principais métodos de adensamento de lodo são: Gravidade: aplicados em lodo primário e misto; Flotação por ar dissolvido: aplicados em lodo ativado; Centrifugação: aplicados em

lodos biológicos aeróbios e anaeróbios (KISHI, 2015; BARROS *et al.*, 2022). Os métodos citados estão descritos no (Quadro 4).

Quadro 4 - Métodos de adensamento do lodo

Métodos de adensamento	Descrição
Adensamento por gravidade	Frequentemente utilizados para adensamento de lodos primários (faixa de 4 a 10%), mistos (lodo primário e lodos ativado – 2 a 6%; lodo primário e lodo de reator anaeróbio com biofilme – 4 a 8%).
Adensamento por flotação	Usualmente empregados para o adensamento do lodo ativado em excesso, aumentando a concentração de sólidos para a faixa de 3- 6%.
Adensamento por processos mecânicos	São utilizados equipamentos como: centrífugas, adensadores de esteira e tambores rotativos. A opção por um desses tipos deve considerar a complexidade operacional, bem como os custos de operação e manutenção de tais equipamentos.

Fonte: Kishi (2015).

Através do (Quadro 4), verifica-se que o adensamento produz concentrações de sólidos na faixa de (2% a 10%), enquanto o ponto em que o lodo começa a ter as propriedades de um sólido é entre 15% e 20% de sólidos (LUDUVICE; FERNANDES, 2001).

No que tange à estabilização, de acordo com Barros (2022) e Fernandes (2000), o processo pode ser de três tipos: biológico, químico e térmico. No (Quadro 5), é apresentado a descrição dos tipos de estabilização.

Quadro 5 - Tipos de estabilização

Tipos de estabilização	Descrição
Estabilização biológica	O processo faz uso de bactérias específicas para a estabilização da fração biodegradável das matérias orgânicas, por processos de digestão anaeróbia e aeróbia.
Estabilização química	Ocorre por meio de oxidação química da matéria orgânica. Para tanto, são adicionados produtos químicos, geralmente via alcalina, em que uma base, normalmente a cal, é misturada ao lodo, elevando o pH e destruindo a maior parte dos microrganismos
Estabilização térmica	Ocorre a partir da ação do calor sobre a fração volátil em recipientes hermeticamente fechados

Fonte: Adaptado de Batista (2015).

Em relação à etapa de condicionamento, de acordo com Gonçalves *et al.* (2001), verifica-se que ela pode ser realizada de três diferentes formas: com produtos químicos

inorgânicos; produtos químicos orgânicos; e tratamento térmico. Assim como nas demais etapas, a escolha do método também deve considerar a destinação do lodo, já que o uso de condicionantes químico inorgânico pode, por exemplo, aumentar a massa de lodo a ser gerenciada na estação, visto que eles são incorporados às tortas de lodo produzidas. O principal objetivo do condicionamento é aumentar o tamanho das partículas de sólidos, por meio das fases de coagulação e floculação (BARROS *et al.*, 2022);

No que diz respeito ao processo de desaguamento/ou secagem trata-se de um procedimento utilizado para aumentar a concentração de sólidos de uma parcela da fração líquida (METCALF & EDDY, 2016). O lodo após o desaguamento contém cerca de 13% - 40% de matéria seca (KRUSZYNSKI, 2020). Esse processo será mais bem abordado no tópico a seguir, assim como os tipos de destinação final de lodo mais usados.

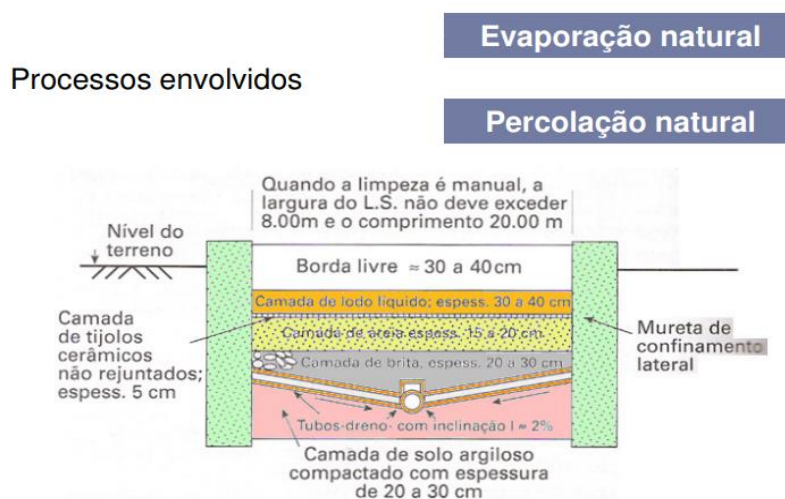
Por fim o processo de higienização, que tem como objetivo reduzir e até eliminar microrganismos patogênicos (vírus, bactérias, protozoários e ovos de helmintos), é realizada principalmente através das vias química, térmica e biológica. De acordo com Mendonça (2017) a compostagem, a caleação e a secagem térmica são as formas mais simples, econômicas e eficazes para eliminar e/ou inviabilizar microrganismos patogênicos.

3.1.6 Desaguamento de lodo

Os processos de desaguamento de lodo podem ser realizados por meios naturais, mecânicos ou térmicos. De acordo com Batista (2015) processos naturais são os mais utilizados nas ETEs, destacando-se o uso de lagoas de lodo ou leitos de secagem, que funcionam como filtros granulares de bateladas de lodo. De acordo com Barros *et al.*, (2022), os meios naturais fazem o uso da evaporação e da percolação como principais mecanismos de remoção de água. Nos processos naturais (leito de secagem), utilizam-se a evaporação e a percolação como principais mecanismos de remoção de água. (GONÇALVES *et al.*, 2001).

O leito de secagem é um dos métodos mais antigos e mais usados para desidratação do lodo (FROTA, 2020). Caracterizando-se como sendo tanques compostos por três camadas: camada suporte; meio filtrante; e sistema de drenagem, conforme é ilustrado na (Figura 3).

Figura 3 - Esquema de um leito de secagem



Fonte: Kishi (2015)

As vantagens dos leitos de secagem envolvem o baixo custo de implantação, a simplicidade da operação, o baixo consumo de energia e de condicionantes químicos e a alta concentração de sólidos. Enquanto suas desvantagens ficam a cargo de ser necessário grandes áreas e de lodo já pré-estabilizado, além disso, são influenciados pelo clima local e o processo de remoção do lodo ocorre de forma manual (VON SPERLING, 2014). Em relação às vantagens Silva (2016) afirma que o uso do leito de secagem para retirar água do lodo de esgoto é um dos processos mais usados, por ser simples, apresentar baixo consumo de energia e ser barato. Porém durante o tempo que o lodo permanece nos leitos e quando já está disposto em aterro sanitário, continua produzindo biogás.

No desaguamento destacam-se, também, as lagoas de lodo, que atuam de forma semelhante aos leitos de secagem, porém o processo ocorre por meio de evaporação, não havendo meio filtrante nesse método. A indicação de uso da lagoa varia de acordo com as características locais como o clima e a permeabilidade do lodo (VON SPERLING, 2014). Metcalf e Eddy (2002) ressaltam que o processo de desaguamento é um processo capaz de reduzir os custos de transporte para o local da destinação final do lodo, visto que reduz o seu volume.

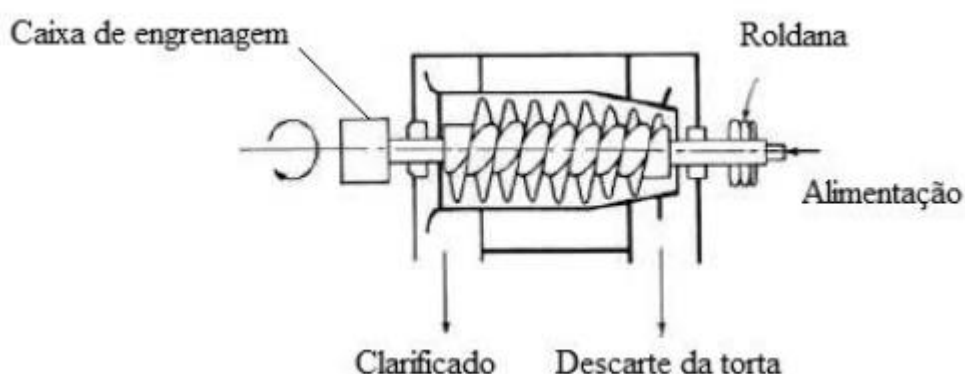
De acordo com Batista (2015), os processos mecânicos envolvem equipamentos com centrífugas, filtros prensa, filtros a vácuo e prensas desaguadoras, promovendo a remoção da água ocorre de forma parcial, com o teor de sólidos ficando entre 15 e 35%.

Atualmente, no Brasil, há uma tendência da utilização de centrífugas, quando se trata de desaguamento mecânico de lodo de esgoto. O princípio básico das centrífugas é a diferença

de aceleração de materiais de densidade diferentes, que ao serem expostos à força centrífuga, que atinge 500 a 3.000 vezes a força da gravidade, separam-se. Essa força é atingida pela rotação do tambor cilíndrico, dentro do qual o lodo é descarregado (CERQUEIRA, 2019).

Ressalta-se que a centrifugação ocorre em três etapas: clarificação; compactação e desaguamento (Figura 4). Na etapa de clarificação, as partículas sólidas que compõem o lodo são sedimentadas, passando para a compactação, o lodo perde parte da água capilar sob ação prolongada da centrifugação e, por fim, no desaguamento, ocorre a remoção da torta do processo de tratamento.

Figura 4. Centrífuga horizontal para desaguamento de lodos



Fonte: Vanzetto (2012).

As centrífugas do tipo DECANter, são utilizadas para desaguamento de lodo a mais de 30 anos, tendo sido bastante difundida nos Estados Unidos e no Brasil (CERQUEIRA, 2019). Vanzetto (2012), reuniu as principais vantagens e desvantagens deste equipamento, as quais são citadas no (Quadro 6).

Dentre as principais vantagens verificadas no (Quadro 6), pode-se destacar a necessidade de uma área pequena para implantação e a mínima geração de odores, tornando essa tecnologia bastante atrativa para áreas urbanas, como desvantagem o consumo relativamente alto de energia, o que onera os custos com gerenciamento de lodo.

Quadro 6. Vantagens e desvantagens das centrífugas decanter

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

Fonte: Vanzetto (2012).

Diante do exposto, verifica-se que as centrífugas também se destacam para desaguamento dos lodos nas ETE, podendo serem utilizadas como sistemas complementares, com sua capacidade efetiva dependendo das características do lodo a ser desaguado e da concentração desejada na torta e do clarificado, variando geralmente entre 40 e 70% (OLIVEIRA, 2010).

3.1.7 Destinação final do lodo

O manejo do lodo, separação, adensamento, estabilização e acondicionamento são considerados um grande desafio, tanto tecnicamente como operacionalmente (LORENCETTI, 2022). Além disso, com o estabelecimento do Marco Legal do Saneamento (Lei nº14.026 de 2020), prevê-se que perto de 99% da população deva ter acesso à água e coleta e tratamento de esgoto até 2033 (BRASIL, 2020) o que deve aumentar substancialmente a geração de esgoto e consequentemente a produção de lodo, que é um subproduto do tratamento de esgoto (TSUTSUI *et al*, 2021).

Dentre as formas de destinação final, incluem-se: uso agrícola, reflorestamento e paisagismo, remediação e recuperação de áreas degradadas, uso na indústria de construção, uso na indústria de recuperação de energia, produção de adsorventes e bio-óleo à base de lodo e em aterro sanitário (SOUZA, 2022). No Brasil, a alternativa de destinação do lodo de esgoto dos municípios brasileiros tem sido o aterro sanitário e com poucas práticas na agricultura (SOUZA, 2022; IBGE, 2020).

Em função do potencial esgotamento da capacidade de recebimento dos aterros atuais e dos problemas econômicos e ambientais relacionados à abertura de novas áreas para a disposição destes resíduos, é importante analisar alternativas que sejam técnica e economicamente viáveis (MARTINS *et al.*, 2021). O (Quadro 7) mostra as principais vantagens e desvantagens referentes às alternativas de disposição de lodo comumente adotadas.

Quadro 7 - Vantagens e Desvantagens – Tipo de disposição

Alternativa de disposição	Vantagens	Desvantagens
Descarga oceânica	Baixo custo	Poluição das águas, flora e fauna oceânica
Incineração	Redução de volume	Custos elevados
	Esterilização	Disposição das cinzas
		Poluição atmosférica
Aterro sanitário	Baixo custo	Necessidade de grandes áreas
		Localização próxima a centros urbanos
		Características especiais do solo
		Isolamento ambiental
		Produção de gases e percolado
		Dificuldade de reintegração da área após desativação
"Landfarming"	Degradação microbiana de baixo custo	Acúmulo de metais pesados e elementos de difícil decomposição no solo
Disposição superficial no solo	Disposição de grandes volumes por unidade de área.	Possibilidade de contaminação do lençol freático
		Liberação de odores e atração de vetores
		Dificuldade de reintegração da área após desativação
Recuperação de áreas degradadas	Taxas elevadas de aplicação	Odores; limitações de composição e uso
	Resultados positivos sobre a reconstituição do solo e flora	Contaminação do lençol freático, fauna e flora
Reciclagem agrícola	Grande disponibilidade de áreas	Limitações referentes à composição e a taxas de aplicação
	Efeitos positivos sobre o solo; uso potencial como fertilizante.	Contaminação do solo com metais
	Solução a longo prazo	Contaminação de alimentos com elementos tóxicos e organismos patogênicos
Resposta positiva das culturas ao uso		Odores

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2005).

3.2 Alternativas para uso benéfico do lodo

No Brasil, a Lei Federal nº12.305 de 2020, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), classifica os resíduos sólidos gerados em sistemas de tratamento de esgoto, como resíduos dos serviços públicos de saneamento básico. Devido às suas características, o lodo, se enquadra nos princípios de reciclagem e reutilização de resíduos e de desenvolvimento sustentável da PNRS (BRASIL, 2010). Além disso, a PNRS, estabelece que, na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser considerada a seguinte ordem de

prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento de resíduos sólidos e disposição de rejeitos em aterro.

Em muitos países, as políticas de sustentabilidade incluem o incentivo a reciclagem de resíduos biodegradáveis, incluindo o uso agrícola de biossólido. Nos Estados Unidos, o Código de Regulamentações Federais - 40 CFR Parte 503, regulamenta e estabelece requisitos para o uso e descarte de lodo de esgoto e prevê diferentes práticas de gerenciamento, como agricultura, restauração das terras degradadas, incineração, aterro e outros. No ano de 2019, por exemplo, os Estados Unidos, destinou em terras, na maioria agrícolas, 51% de um total de cerca de 4,75 milhões de toneladas métricas de massa seca (SOUZA; 2022, apud EPA, 2019), já a Austrália aplicou na agricultura 67% do total de 371 mil toneladas de sólidos secos, gerado em 2019 (SOUZA;2022, apud AUSTRALIAN E NEW ZEALAND BIOSOLIDS PARTNERSHIP, 2019).

Já Brasil, em que pese o grande potencial para uso agrícola de biossólido, a principal forma de destinação final ainda são os aterros sanitários. No entanto, segundo o Instituto ETEs Sustentáveis (INCT, 2020) a atualização de alguns parâmetros e procedimentos provenientes na Resolução CONAMA nº498 de 2020 amplia as possibilidades de utilização de lodos de esgoto no solo, mediante o emprego de algum tipo de tratamento e beneficiamento sendo denominados de biossólidos no final deste processo. Os métodos que podem ser utilizados são definidos pela própria resolução e incluem etapas de pré-tratamento e estabilização química, física e biológica (LORENCETTI, 2022).

Dentre os poucos estados que tem experiência com essa prática de destinação estão São Paulo e Paraná, segundo Bittencourt (2018), entre 2007 e 2017, no estado do Paraná, foram aplicadas 258.836 toneladas de biossólido em 15.423 ha de áreas agrícolas. O material foi aplicado em cultivos de cevada, feijão, café, milho, eucalipto, pinus, implantação de gramas, adubação verde, implantação e pós-colheita de fruteiras de caroço, amora para bichos-da-seda, aveia, citros (laranja, pokan, limão Taiti), noz-pecã, seringueira, azavém, soja, cana-de-açúcar e trigo, beneficiando 290 agricultores em 81 municípios (BITTENCOURT, 2018).

Nos processos para produção do biossólido a compostagem é uma alternativa natural de tratamento de lodo de esgoto sanitário, promovendo sua estabilização e higienização. Trata-se de um tratamento biológico aeróbio, em que ocorre a transformação da matéria orgânica em compostos estáveis, água e CO₂ (SOUZA, 2022), possibilitando que o biossólido produzido possa ser aplicado em solos agrícolas, aproveitando a matéria orgânica e os nutrientes ali

presentes (MATTOS *et al.*,2020). Dentre as principais vantagens que a compostagem pode trazer aos materiais submetidos aos processos podemos citar:

- Estabilização bioquímica, tornando-os isentos de maus odores e menos atrativo a vetores de doenças;
- Inibição de patógenos responsáveis por algumas doenças em plantas, animais e seres humanos;
- Obtenção de um material orgânico adequado à melhoria das características físicas, químicas e biológicas do solo.

O processo de compostagem é desenvolvido em pilhas ou em leiras (MATTOS,2020) e envolve uma população macro e mesofauna, como formigas, besouros, minhocas, e ácaros, e uma diversidade de microrganismos, incluindo fungos e bactérias mesofílicas e termofílicas, que utilizam matéria orgânica para o seu metabolismo, e reduz a fração biodegradável do resíduo para uma fração úmida estável (KALDERIS; AIVALIOTI; GIDARAKOS,2010). Esses microrganismos apresentam uma fisiologia complexa, em que a atividade microbiana depende das condições físico-químicas, como temperatura, pH do meio e quantidade de nutrientes disponíveis em cada momento da compostagem (ROBLEDO-MAHÓN; CALVO; ARANDA, 2020).

De acordo com a Resolução CONAMA nº 481 de 2017 (BRASIL, 2017), que estabelece critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos, a adição de lodos de ETE é permitida, quando não classificados como resíduo perigoso, e mediante autorização do órgão ambiental, o qual deverá estabelecer critérios de admissão e restrição de resíduos orgânicos industriais nos processos, respeitada a legislação pertinente.

Uma alternativa encontrada por algumas ETEs brasileiras para o gerenciamento do lodo de esgoto, tem sido o seu uso agrícola no solo, como fertilizantes orgânicos, corretivos de solo e inoculantes após submetê-lo ao processo de compostagem (SOUZA, 2022). A regularização deste uso é feita através da Instrução Normativa – IN 61 de 2020 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), que estabelece regras definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registros, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura (MAPA, 2020). No (Quadro 8) é apresentado a classificação dos fertilizantes de acordo com as matérias-primas utilizadas na sua produção. O lodo de esgoto é classificado como Classe B.

Quadro 8 – Determinação da classe do fertilizante

Classe do Fertilizante	Origem da Matéria Prima
Classe A	“ Matéria-prima gerada nas atividades extrativas, agropecuárias, industriais, agroindustriais e comerciais, incluindo aquelas de origem mineral, vegetal, animais, lodos industriais e agroindustriais de sistema de tratamento de águas residuárias com uso autorizado pelo Órgão Ambiental, resíduos de frutas, legumes, verduras e restos de alimentos gerados em pré e pós consumo, segregados na fonte geradora e recolhidos por coleta diferenciada, todos isentos de despejos ou contaminantes sanitários, resultando em produto de utilização segura na agricultura”
Classe B	“Quaisquer quantidades de matérias primas orgânicas geradas nas atividades urbanas, industriais e agroindustriais, incluindo uma fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos da coleta convencional, lodos gerados em estações de tratamento de esgotos, lodos industriais e agroindustriais gerados em sistemas de tratamento de água residuárias contendo qualquer quantidade de despejo ou contaminantes sanitários.”

Fonte: MAPA, 2020

No (Quadro 9), é apresentado um comparativo entre as características do processo de compostagem, no estudo elaborado por Bortolini (2018). Se for realizar uma análise comparativa entre as duas tecnologias, percebe-se que no quesito “Potencial Poluidor” a opção pela compostagem mostra-se mais atrativa em relação ao aterro sanitário, uma vez que o primeiro não gera gás metano (CH_4) e segundo além de emitir o metano, apresenta impactos relacionados à: contaminação de lençóis freáticos, atmosfera a saúde humana. Outra vantagem do método da compostagem em relação aos aterros sanitários é que no primeiro ocorre a valorização dos resíduos aos transformá-los em adubo orgânico e nos aterros essa opção é inexistente. No entanto, os aterros possuem uma capacidade de receber grandes quantidades de resíduos diariamente com alta capacidade de processamento ao passo que as leiras permanecem até 60 dias no local fazendo com que a capacidade de processamento seja afetada diretamente pela área do empreendimento.

Quadro 9 - Características do processo de compostagem e aterros sanitários

Classe do Fertilizante	COMPOSTAGEM	ATERROS SANITÁRIOS
Necessidade de área de operação	Baixo Necessidade de espaço para a formação de leiras, mas o local se torna disponível quando o processo é finalizado.	Alto Demanda de grande área para disposição e operação dos resíduos e não aproveitamento do espaço.
Custo de instalação e operação	Baixo Os custos são relacionados a aquisição do local e maquinários de tecnologia simples.	Alto Demanda de tecnologias de prevenção de poluição até 20 anos após o seu encerramento.
Potencial Poluidor	Baixo A atividade possui baixo potencial poluidor, pois não gera CH ₄ e lixiviado no processo.	Alto Os impactos estão relacionados a emissão de metano, contaminação de lençóis freáticos, atmosfera e saúde humana.
Vida útil do empreendimento	Alto Não há restrição de tempo de vida para a atividade.	Baixo A operação tem em média 20 anos de prozo e seu monitoramento demanda mais de 20 anos.
Complexidade da Operação	Baixo Operação simples realizada por equipamentos para revolvimento e peneiramento do material estabilizado.	Alto Envolve preparação e impermeabilização do solo, cobertura diária e montagem de drenos para a captação e queima de gases.
Capacidade de processamento	Médio O tratamento de resíduos depende da disponibilidade da área para montagem das leiras que permanecem até 60 dias no local, a capacidade de processamento é afetada diretamente pela área do empreendimento.	Alto Tem capacidade para receber grandes quantidades e resíduos diariamente, porém o volume recebido afeta a vida útil dos aterros.
Eficiência na proteção contra a emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE)	Alta Não há necessidade de implementação de tecnologias extras devido a não geração de CH ₄ e óxido nitroso (N ₂ O) no processo de decomposição aeróbio.	Baixa Necessita de drenagem de gases contínua que não atinge 100% dos gases gerados.
Capacidade de valorização dos resíduos orgânicos	Alto Ocorre a valorização dos resíduos ao transformá-los em adubo orgânico.	Inexistente Os resíduos orgânicos são aterrados e seu potencial de valorização é desperdiçado.

Fonte: BORTOLINI, 2018

Dentre alternativas para o uso do lodo, observa-se a prática de conversão do lodo como óleo combustível, oxidação úmida e pirólise (TSUTIYA, 2000; CHEN *et al.*, 2018). A aplicação de lodo de esgoto como matéria-prima de materiais de construção também foi aprontado como um potencial uso, já praticado no Japão e Coreia do Sul, porém (URBAN, *et al.*; 2018) afirmam que ainda não há consenso em sua aplicação nessa área, porque os estudos que foram realizados em relação ao assunto, apesar de considerar a viabilidade operacional,

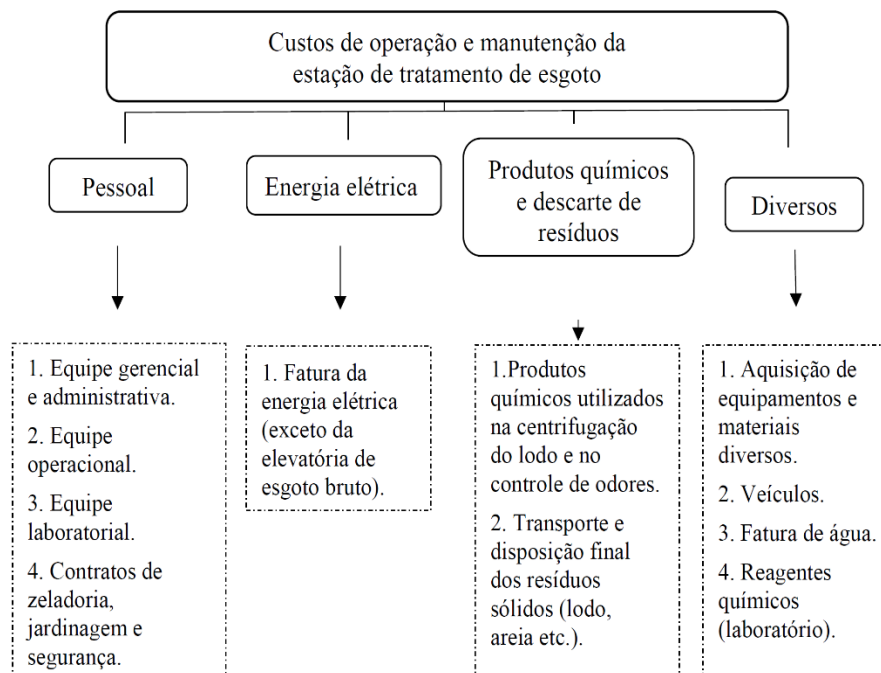
econômica e financeira, não considera os possíveis impactos ambientais, bem como à saúde dos trabalhadores que precisarão manusear esses materiais.

Já no setor energético, o uso do lodo de esgoto tem sido realizado para beneficiamento do biogás como combustível para geração de energia, obtendo o dobro da energia do que a gerada no sistema de lodos ativados convencional com digestão anaeróbia do lodo, possibilitando que a energia excedente seja comercializada (URBAN; ISAAC; MARITA, 2018). Esse uso do lodo de esgoto tem sido realizado em países como o Reino Unido, Japão e em países na Europa (SHARMA *et al.*, 2017).

3.3 Problemática financeira: Custos para gerenciamento de lodo em ETEs

A questão financeira tem sido uma das principais problemáticas relatadas no âmbito de uma ETE, dada a complexidade de sua composição, sendo destacado por Souza, Duarte e Tinôco (2021) como envolvendo quatro grupos: pessoal; energia elétrica; produtos químicos e descarte de resíduos; e diversos, conforme é ilustra a (Figura 5).

Figura 5 - Composição de custos de uma ETE



Fonte: (TINOCO *et al.*, 2021).

Os custos referentes ao gerenciamento do lodo em uma ETE estão inseridos no grupo de produtos químicos e descarte de resíduos, portanto, envolvem o uso de produtos químicos para centrifugação do lodo e controle de odores, bem como o transporte e a disposição final desses resíduos.

No entanto, apesar das ETE serem um assunto bem trabalhado pela literatura publicada, verificou-se que quando se trata dos custos de operação e implantação nessas estações, os estudos tendem a ser mais escassos, questão ratificada na pesquisa realizada por Souza, Duarte e Tinôco (2021), que avaliaram a eficiência econômico-ambiental da ETE através da determinação de indicador de desempenho, calculado via identificação e quantificação de todos os custos operacionais e de manutenção envolvidos nos seus processos internos de tratamento.

Em seus resultados os autores verificaram custos mensais foram correlacionados com os dados de vazões do período, e os de Operação e Manutenção (O&M) por metro cúbico de esgoto tratado ao longo dos anos de 2016, 2017 e 2018 assumiram valores médios de R\$ 0,32, R\$ 0,30 e R\$ 0,38·m⁻³, respectivamente (TINÔCO *et al*, 2021).

Os custos referentes ao pessoal e ao consumo energético exerceram, em todos os meses analisados, o primeiro e o segundo componentes de maior representatividade no custo total, assumindo as seguintes composições percentuais: 56,72 e 26,75% no segundo semestre do ano de 2016; 46,69 e 28,73% no ano de 2017; e 52,44 e 27,56% no ano 2018. Ao final concluíram que os grupos pessoal e energia são responsáveis por cerca de 75% de todos os custos de O&M da ETE (TINÔCO *et al*, 2021).

Freitas *et al*. (2009) sugerem um sistema para apuração de custos em empresas de saneamento que possibilita conhecer os custos de água e esgoto nos diversos centros de custos da companhia, ao nível de Gerências, Unidades de Negócios, Coordenações, Sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário e, por Municípios e Localidades em que a companhia possui concessão. Ao mesmo tempo, possibilita que os centros de custos também funcionem como centros de responsabilidades.

Amaral, Aisse e Possetti (2018) analisaram o custo do ciclo de vida de quatro diferentes cenários de tratamento e destinação final do lodo e biogás. Os autores verificaram alto custo dos cenários um, secagem térmica do lodo utilizando o biogás, e cenários dois e três, utilização do calor da combustão do lodo, deve-se ao valor de aquisição do equipamento para a secagem do lodo, representando 56% do total, incluindo-se custos de implantação e operação. O cenário três previu o aterro sanitário como destinação final das cinzas da

combustão do lodo. O cenário base (lodo sendo higienizado por meio da EAP e destinado à agricultura) foi o cenário com o menor custo do ciclo de vida, porém apresentou o maior custo para a destinação do lodo.

Os autores também evidenciaram que o custo de destinação do lodo no cenário um diminuiu 54%, e no cenário dois diminuiu 73%, em comparação com o cenário base, em virtude do menor volume de lodo/cinza a ser destinado. O custo para a destinação das cinzas em aterro sanitário foi 18% maior do que o da destinação agrícola (AMARAL; AISSE; POSSETTI, 2018).

Na pesquisa realizada por Santos (2018), foi verificado que os custos operacionais para gerenciamento do lodo apresentam grande variação entre as ETE brasileiras. Os resultados verificados pelos autores apontaram que o processo de Lagoas apresentou a menor mediana de custos operacionais, com valor igual a R\$ 0,40.m⁻³.

A mediana geral dos custos operacionais de todas as estações foi de R\$ 0,96.m⁻³, e o maior custo operacional foi de R\$ 4,67.m⁻³, para uma ETE, com equivalente populacional menor do que 5.000 habitantes e cujo tratamento é realizado por reator UASB. Já o menor custo operacional foi de R\$ 0,13.m⁻³, foi de uma ETE com equivalente populacional maior do que 50.000 habitantes e processo de tratamento por reatores UASB seguidos de filtros biológicos percoladores (SANTOS, 2018).

Outra pesquisa relacionada aos custos ao gerenciamento de lodos nas ETE foi realizada por Tsutsui *et al.* (2021), que avaliaram o custo de compostagem do lodo in natura produzido na Estação de Tratamento de Esgotos (ETE), da SABESP de Botucatu, São Paulo e determinar o valor dos nutrientes presentes no lodo compostado com e sem adição de material estruturante (ME).

Os autores tomaram como base a produção de 16 toneladas diárias de lodo, o que gera um custo anual aproximado de R\$ 1.466.438,40 em transporte e disposição em aterro localizado no município de Paulínia, São Paulo. Os resultados verificados pelos autores demonstraram que o composto com material estruturante (ME) geraria uma receita anual de R\$ 349.653,90 e o produto sem ME de R\$ 51.269,90. Com isso, concluíram que o resultado econômico é positivo, pois o custo da compostagem, descontado o valor dos nutrientes, é menor que o custo de disposição em aterros sanitários (TSUTSUI *et al.*, 2021).

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 SISTEMA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO DE MACAÉ

A cidade de Macaé pertence ao estado do Rio de Janeiro, e está situada na região Norte Fluminense. De acordo com o IBGE (2021), o município possui uma população de estimada de 266.136 habitantes e uma área territorial de 1.216,989 km². Toda esta área é dividida por 6 distritos: Sede, Cachoeiros de Macaé, Córrego do Ouro, Glicério, Frade e Sana e faz divisa ao norte com as cidades de Carapebus e Cachoeira de Macabu, ao sul: Rio das Ostras e Casimiro de Abreu; a Oeste, Trajano de Moraes e Nova Friburgo. A leste, com o Oceano Atlântico. Na (Figura 6) é apresentado o mapa de localização do município de Macaé.

Figura 6 – Mapa localização do município de Macaé



Fonte: (TAVARES, 2018)

Localizado a 182 quilômetros do Rio de Janeiro, Macaé tem ligação direta à BR-101, e é cortado por duas importantes rodovias estaduais – a RJ-106 e a RJ-168. A partir do final da década de setenta, com o descobrimento das reservas em alto mar, a cidade de Macaé tem vivenciado diversos problemas urbanos como o rápido e desordenado crescimento

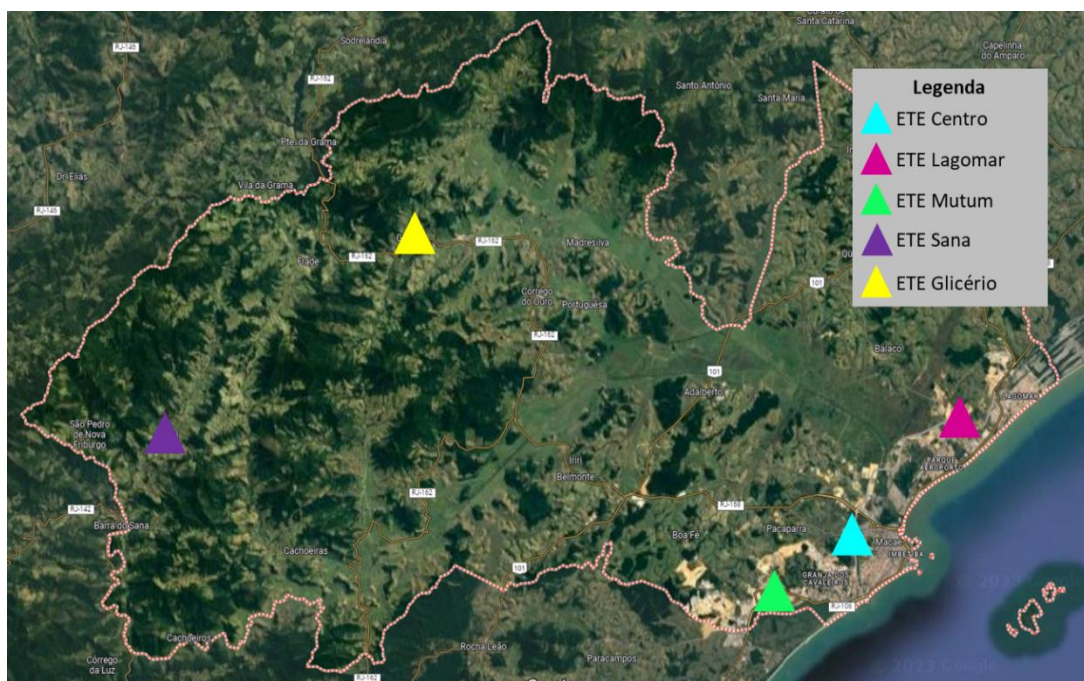
populacional. Boa parte deste cenário é resultante do aumento da demanda de mão de obra para atender as necessidades da indústria de petróleo e a instalação de novas estruturas para o setor (EUZEBIO, 2020).

Em relação ao saneamento básico do município de Macaé, no que tange aos serviços de esgotamento sanitário, eles são geridos pela Secretaria Adjunta de Saneamento (SEMASA), sendo ela também responsável pela operação desse sistema nos distritos de Sana e Glicério e parte da área sede do município. A outra parte da Sede está sob responsabilidade de uma Concessionária que é responsável pela operação, manutenção do sistema de esgotamento sanitário, bem como investimentos em ampliação de coleta e tratamento de esgoto, assinado no dia 05 de novembro de 2012 (MACAÉ, 2021).

De acordo com o Plano Municipal de Saneamento, atualmente, existem cinco ETEs na área da Sede e duas fora da área da sede; uma no distrito do Sana e outra em Glicério. No presente estudo foram analisadas cinco ETEs – ETE Centro, ETE Lagomar, ETE Lagomar, ETE Sana, ETE Sana. A ETE Infraero, citada no Plano de Saneamento não será objetivo de estudo nesta dissertação, uma vez que ela atende especificamente a população que utiliza o Aeroporto e está sob responsabilidade do próprio Aeroporto.

Na (Figura 7) é representado o mapa com as localizações das ETEs que foram objeto de estudo, bem como o descritivo das etapas de tratamento de cada uma delas.

Figura 7 – Localização das ETEs objeto do estudo



Fonte: Adaptado de Macaé (2021).

4.1.1 ETE CENTRO

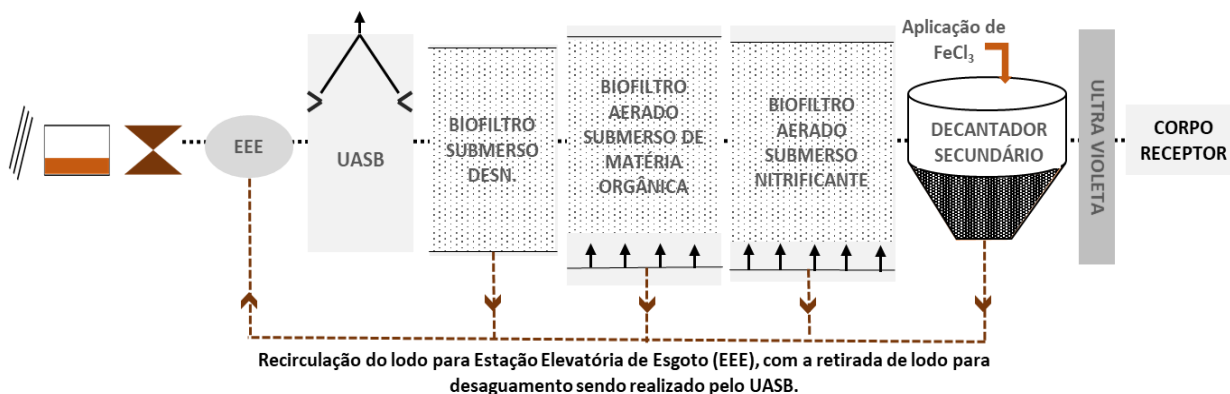
Atualmente, apresenta um módulo de tratamento, com uma capacidade instalada 100 L.s⁻¹. É equipada com tratamento terciário, capaz de remover Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Suspensos Totais (SST), Nitrogênio, Fósforo e organismos patogênicos.

Segue abaixo o descritivo das etapas de tratamento da ETE, e sua respectiva função:

- **UASB – Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente:** Reator composto por manta de lodo, com elevada atividade metabólica onde ocorre a digestão anaeróbia da matéria orgânica do esgoto. Esta é a única etapa em que o lodo é removido do sistema.
- **Biofiltro Submerso Desnitrificante – BFDesn:** Etapa em que ocorre a redução do nitrato em nitrogênio molecular. Além do efluente vindo dos reatores UASB, recebe também o efluente recirculado do Biofiltro Aerado Submerso Nitrificante.
- **Biofiltro Aerado Submerso de Matéria Orgânica – BFmo:** Neste compartimento busca-se remover a matéria orgânica remanescente. É equipado com material filtrante e aeração artificial e possui fluxo ascendente.
- **Biofiltro Aerado Submerso Nitrificante – BFn:** Possui a mesma configuração do compartimento anterior (BFmo). Tem como função converter a amônia (NH₃) e Nitrato (N-NO₃).
- **Desfosfatação:** Nesta etapa é realizado a dosagem de cloreto férrico (coagulante) para a remoção de fósforo.
- **Decantador Secundário:** Tem como função promover o polimento final do efluente tratado.
- **Desinfecção:** Nesta etapa o efluente é submetido a radiação ultravioleta, através de lâmpadas UV.

Na (Figura 8), é apresentado um fluxograma básico das etapas de tratamento da ETE Centro, após o pré-tratamento.

Figura 8 – Fluxograma etapas de tratamento – ETE Centro



Fonte: O autor, com base em Macaé (2021)

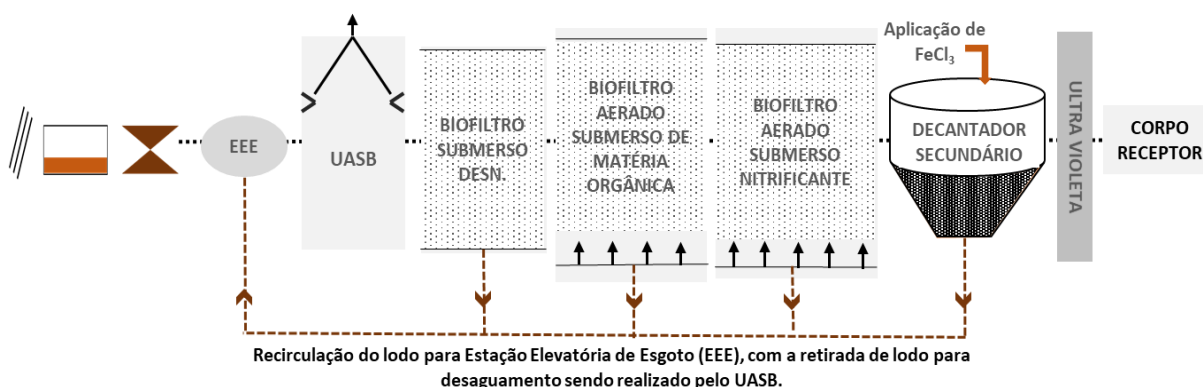
De acordo com os dados apresentados no Plano de Saneamento, a ETE, em 2019, tratou uma vazão média igual a $56,67 \text{ L.s}^{-1}$. No que tange à carga orgânica, em 2019, recebeu uma concentração média de DBO igual a $286,96 \text{ mg.L}^{-1}$. Aplicando a relação DQO/DBO – 2,4 (von Sperling, 1996), a unidade apresentou uma DQO de $688,72 \text{ mg.L}^{-1}$. Para elaboração deste estudo será considerado a capacidade de tratamento do módulo existente, que é de 100 L.s^{-1} .

No que tange ao gerenciamento de lodo da unidade seu lodo atualmente é desaguado através de bag, mas está sendo implantado um prédio para centrífuga.

4.1.2 ETE MUTUM

Implantada em abril de 2014, possui dois módulos de tratamento, cada um com uma capacidade instalada de 20 L.s^{-1} . É equipada com tratamento terciário, capaz de remover DBO, DQO, SST, Nitrogênio, Fósforo e organismos patogênicos. A estação possui o fluxograma de tratamento igual à ETE Centro. Segue na (Figura 09), fluxograma da ETE Mutum.

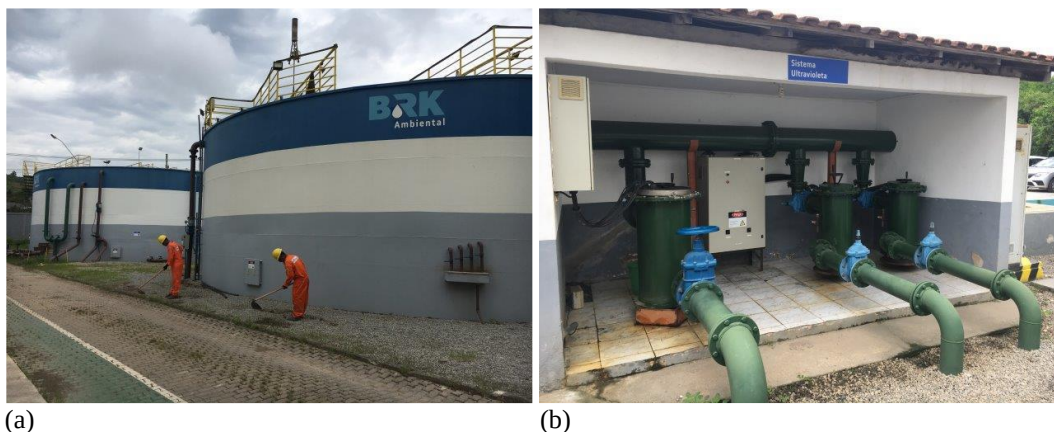
Figura 9 – Fluxograma etapas de tratamento – ETE Centro



Fonte: O autor, com base em Macaé (2021)

Nas (Figuras 10 (a) e 10 (b)) é possível verificar a configuração dos tanques de tratamento, bem como do sistema de desinfecção:

Figura 10 (a) – Fotos dos módulos de tratamento Figura 10 (b) – Reatores Ultravioleta



Fonte: Macaé (2021)

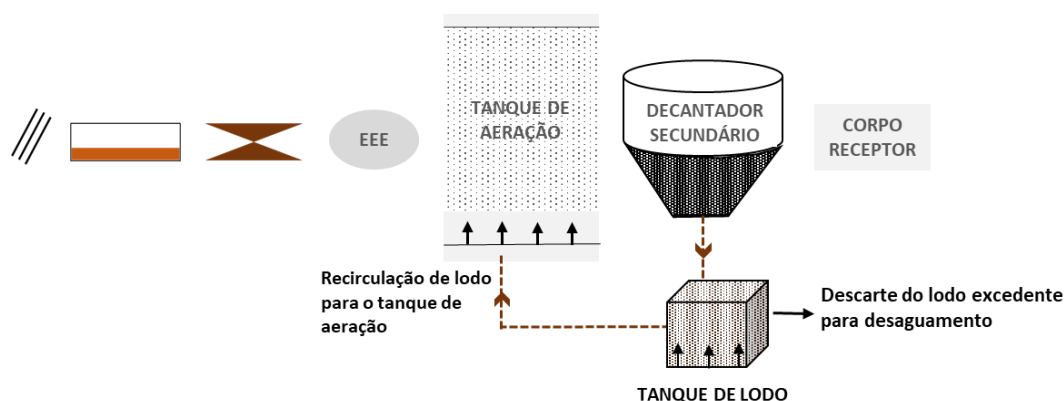
De acordo com os dados apresentados no Plano de Saneamento, a ETE, em 2019, tratou uma vazão média igual a $19,3 \text{ L.s}^{-1}$. No que tange à carga orgânica, em 2019, recebeu uma concentração média de DBO igual a $134,73 \text{ mg.L}^{-1}$. Aplicando a relação DQO/DBO – 2,4 (von Sperling, 1996), a unidade apresentou uma DQO de $323,36 \text{ mg.L}^{-1}$. Para efeito deste estudo será considerado a vazão média apresentada para o ano de 2019.

Sobre a gestão de lodo, todo o lodo produzido na estação é encaminhado para a ETE Centro em caminhões tanque (20m^3).

4.1.3 ETE LAGOMAR

Já a ETE Lagomar, apresenta um sistema de tratamento à nível secundário, através da uma tecnologia de lodos ativados, aeração prolongada, seguido de decantador secundário e filtro biológico de brita. Possui uma capacidade instalada de 40 L.s^{-1} , mas sua outorga indica uma vazão média de lançamento igual a $29,5 \text{ L.s}^{-1}$, vazão essa que será considerada no presente estudo. Para definição da sua carga orgânica foi considerado a concentração média afluente de DQO das ETEs Centro e Mutum. Em relação ao gerenciamento de lodo, todo seu lodo é encaminhado para a ETE Centro, para desaguamento, através de caminhões tanque (20 m^3). Na (Figura 11) é apresentado o fluxograma da ETE Lagomar.

Figura 11 – Fluxograma etapas de tratamento – ETE Lagomar

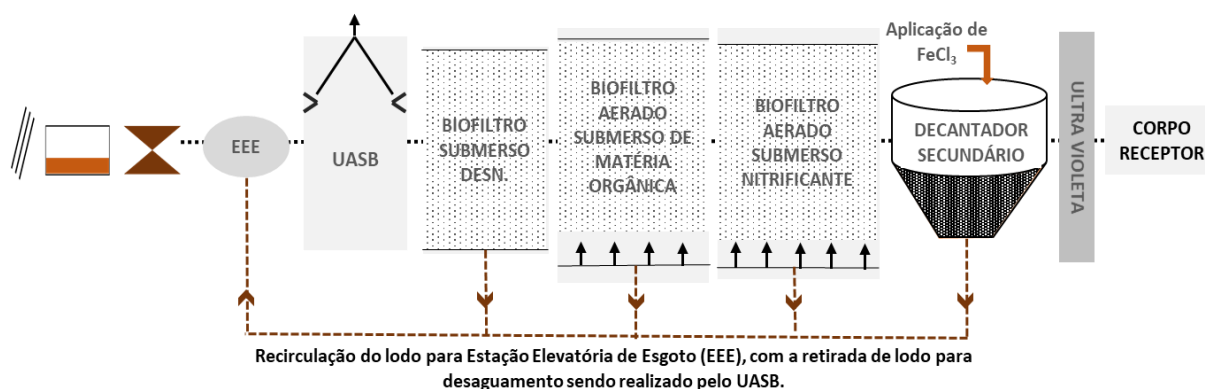


Fonte: O autor, com base em Macaé (2021)

4.1.4 ETE SANA

Implantada em outubro de 2014, possui um módulo de tratamento, com capacidade instalada para atender uma vazão média de 5 L.s^{-1} e máxima de 9 L.s^{-1} . É equipada com tratamento terciário, capaz de remover DBO, DQO, SST, Nitrogênio, Fósforo e organismos patogênicos. Não foram disponibilizados dados de análises laboratoriais desta ETE. Para definição da sua carga orgânica foi considerado a concentração média afluente de DQO das ETEs Centro e Mutum sendo que a vazão média considerada no estudo, será a de 5 L.s^{-1} . A estação possui o fluxograma de tratamento igual à ETE Centro. Na (Figura 12), é apresentado o fluxograma da ETE Sana.

Figura 12 – Fluxograma etapas de tratamento – ETE Sana



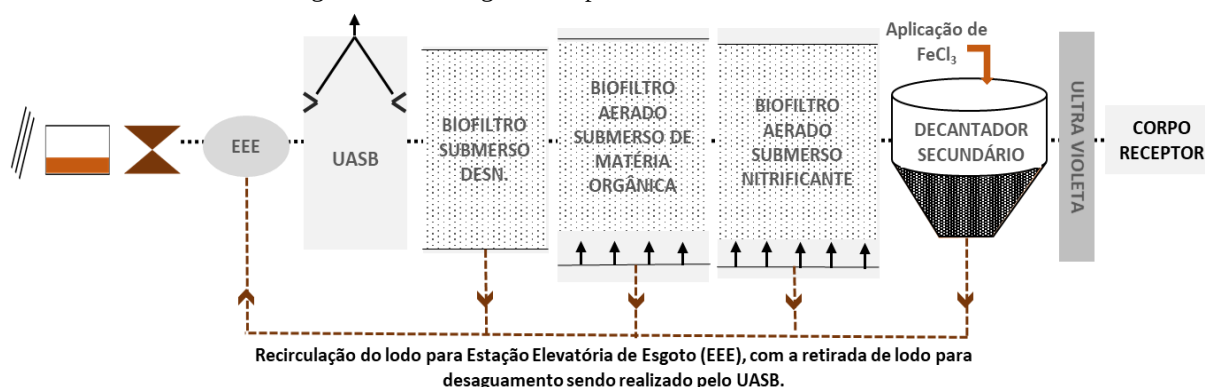
Fonte: O autor, com base em Macaé (2021)

No que tange à gestão de lodo, todo seu lodo é transportado para a ETE Lagomar e posteriormente ETE Centro.

4.1.5 ETE GLICÉRIO

Assim com a ETE Sana, a ETE Glicério possui um módulo de tratamento com capacidade para atender uma vazão máxima de 9 L.s^{-1} e média de 5 L.s^{-1} . Também é equipada com tratamento terciário, capaz de remover DBO, DQO, SST, Nitrogênio, Fósforo e organismos patogênicos. O fluxograma de tratamento é o mesmo da ETE Sana assim como os parâmetros aplicados neste estudo e a gestão de lodo. Na (Figura 13) é apresentado o fluxograma da ETE Glicério.

Figura 13 – Fluxograma etapas de tratamento – ETE Glicério



Fonte: O autor, com base em Macaé (2021)

Nas (figuras 14 (a) e 14 (b)) são apresentadas fotos das instalações da ETE Glicério.

Figura 14 (a) – Entrada ETE Glicério



(a)

Figura 14 (b) – Módulo de Tratamento – ETE Glicério



(b)

Fonte: O autor (2023)

No (Quadro 10) é apresentado um resumo com o tipo de tratamento realizado em cada uma das ETEs estudadas nas fases líquida e sólida. Percebe-se através dele, que quatro ETEs possuem a mesma tecnologia de tratamento, e que toda a fase de tratamento de lodo (fase sólida) é realizada de maneira centralizada, na ETE Centro.

Quadro 10 – Resumo dos tipos de tratamento na fase sólida e líquida das ETEs

ETE	Tecnologia tratamento fase líquida	Tratamento fase sólida
ETE Centro	Terciário (UASB; BFDesn; BFmo; BFn; Desfosfatação; Decantador Secundário; Desinfecção	Submetido desaguamento em centrífuga e posteriormente encaminhado para aterro sanitário.
ETE Mutum	Terciário (UASB; BFDesn; BFmo; BFn; Desfosfatação; Decantador Secundário; Desinfecção	Enviado em caminhões tanque para a ETE Centro
ETE Lagomar	Secundário (Lodos ativados, aeração prolongada);	Enviado em caminhões tanque para a ETE Centro
ETE Sana	Terciário (UASB; BFDesn; BFmo; BFn; Desfosfatação; Decantador Secundário; Desinfecção	Enviado em caminhões tanque para a ETE Lagomar
ETE Glicério	Terciário (UASB; BFDesn; BFmo; BFn; Desfosfatação; Decantador Secundário; Desinfecção	Enviado em caminhões tanque para a ETE Lagomar

Fonte: O autor, com base em Macaé (2021)

5 METODOLOGIA

A metodologia foi dividida em 3 tópicos, separados por objetivos, como forma de facilitar a organização e o entendimento de cada um deles. No primeiro foi apresentado a metodologia para determinar as taxas de geração de lodo das ETEs e a quantificação dos custos atuais com seu gerenciamento. No segundo, a metodologia para analisar as diferentes alternativas para a descentralização do sistema atual de desaguamento de lodo e detalhada. Já no terceiro tópico foi apresentado a metodologia para avaliar a alteração no tipo de transporte e destinação final do lodo seco.

5.1 OBJETIVO 1 - DIMENSIONAR E QUANTIFICAR OS CUSTOS ATUAIS COM GERENCIAMENTO DE LODO

A primeira parte deste trabalho consiste na caracterização e quantificação do lodo gerados pelas ETEs. A partir dessas informações será possível estimar os custos inerentes ao OPEX, não somente do sistema de desaguamento de lodo, como de todo o seu gerenciamento, considerando o transporte de lodo úmido de uma estação à outra, transporte e destinação final do lodo seco até o aterro sanitário.

5.1.1 Caracterização e quantificação do lodo gerado

Para caracterização e quantificação do lodo gerado pelas ETEs foram utilizadas informações apresentadas no Plano Municipal de Saneamento Básico de Macaé-RJ (MACAÉ, 2021). Dados como tecnologia de tratamento de cada uma das unidades, vazões médias e máximas, métodos de tratamento e gerenciamento de lodo, foram retirados deste estudo. Dados específicos de produção de lodo, bem como os resultados de teor de sólidos de lodo “úmido” quando “seco,” não foram disponibilizados, nem pelo Poder Concedente, nem pela Concessionária, sendo utilizado, portanto, referências bibliográficas. No presente trabalho o termo “lodo seco” será usado para designar o lodo já desaguado com concentração de sólidos igual a 20%.

Nos (Tabelas de 3 a 6) foram apresentados os resumos dos parâmetros utilizados para caracterização e quantificação do lodo gerado em cada uma das ETEs, bem como os valores utilizados como referência.

- ETE Centro

Tabela 3 – Parâmetros aplicados no dimensionamento – ETE Centro

Dados – ETE Centro				
Parâmetro	Valor	Unidade	Referência	Observação
Conc. DBO - Esgoto Afluente	286,9	mg. L ⁻¹	Macaé, 2021	-
Conc. DQO - Esgoto Afluente	688,7	mg. L ⁻¹	von Sperling, 2005	Calculado, relação DBO/DQO = 2,4
Vazão média afluente (Qesg)	100	L.s ⁻¹	Macaé, 2021	Capacidade nominal, conforme Licença Ambiental.
Coef.de prod. de sólidos (Y)	0,30	kgSST.(kgDQO aplicada) ⁻¹	Andreoli <i>et al</i> , 2014	UASB + Pós-tratamento aeróbio (Lodos ativados ou FBP).
Concentração de lodo (%)	3,5	%	Sanevix, 2023	
Massa específica do lodo	1020	Kg.m ⁻³	von Sperling, 2005	-

Fonte – O autor, com base em MACAÉ (2021), VON SPERLING (2005); ANDREAOLI *ET AL* (2014); SANEVIX (2023).

- ETE Mutum

Tabela 4 – Parâmetros aplicados no dimensionamento – ETE Mutum

Dados – ETE Mutum				
Parâmetro	Valor	Unidade	Referência	Observação
Conc. DBO - Esgoto Afluente	134,7	mg. L ⁻¹	Macaé, 2021	-
Conc. DQO - Esgoto Afluente	323,4	mg. L ⁻¹	von Sperling, 2005	Calculado, relação DBO/DQO = 2,4
Vazão média afluente (Qesg)	19,3	L.s ⁻¹	Macaé, 2021	Capacidade nominal, conforme Licença Ambiental.
Coef.de prod. de sólidos (Y)	0,30	kgSST.(kgDQO aplicada) ⁻¹	Andreoli <i>et al</i> , 2014	UASB + Pós-tratamento aeróbio (Lodos ativados ou FBP).
Concentração de lodo (%)	3,5	%	Sanevix, 2023	
Massa específica do lodo	1020	Kg.m ⁻³	von Sperling, 2005	-

Fonte – O autor, com base em MACAÉ (2021), VON SPERLING (2005); ANDREAOLI *ET AL* (2014); SANEVIX (2023).

- ETE Lagomar

Tabela 5 – Parâmetros aplicados no dimensionamento – ETE Lagomar

Dados – ETE Lagomar				
Parâmetro	Valor	Unidade	Referência	Observação
Conc. DQO - Esgoto Afluente	591,4	mg. L ⁻¹	-	Média da carga considerada nas ETEs Centro, Mutum
Vazão média afluente (Qesg)	29,5	L.s ⁻¹	Macaé, 2021	Vazão média, conforme outorga para lançamento de efluentes.
Coef.de prod. de sólidos (Y)	0,50	kgSST.(kgDQO aplicada) ⁻¹	Andreoli <i>et al</i> , 2014	Lodos ativados, aeração prolongada
Concentração de lodo (%)	3,5	%	Sanevix, 2023	
Massa específica do lodo	1020	Kg.m ⁻³	von Sperling, 2005	-

Fonte – O autor, com base em MACAÉ (2021), VON SPERLING (2005); ANDREAOLI *ET AL* (2014); SANEVIX (2023).

- ETEs Sana e Glicério

Tabela 6 – Parâmetros aplicados no dimensionamento – ETEs Sana e Glicério

Dados – ETEs Sana e Glicério				
Parâmetro	Valor	Unidade	Referência	Observação
Conc. DQO - Esgoto Afluente	591,4	mg. L ⁻¹	-	Média da carga considerada nas ETEs Centro, Mutum
Vazão média afluente (Q _{esg})	5	L.s ⁻¹	Macaé, 2021	Capacidade nominal de cada ETE, conforme Licença Ambiental.
Coef.de prod. de sólidos (Y)	0,30	kgSST.(kgDQO aplicada) ⁻¹	Andreoli <i>et al</i> , 2014	UASB + Pós-tratamento aeróbio (Lodos ativados ou FBP).
Concentração de lodo (%)	3,5	%	Sanevix, 2023	
Massa específica do lodo	1020	Kg.m ⁻³	von Sperling, 2005	-

Fonte – O autor, com base em MACAÉ (2021), VON SPERLING (2005); ANDREAOLI *ET AL* (2014); SANEVIX (2023).

Para estimar a quantidade de lodo gerado nas ETEs foram aplicadas as seguintes fórmulas (von SPERLING; GONÇALVES, 2014):

- Carga de DQO afluente à ETE – Equação (1);

$$C_{DQO} = Q_{ESGOTO} * Concen_{DQO} \quad (1)$$

Onde:

C_{DQO} = Carga de DQO diária

Q_{ESGOTO} = Vazão média de esgoto afluente à ETE (m³.dia⁻¹)

$Concen_{DQO}$ = Concentração média de DQO esgoto bruto (kg.m⁻³)

- Produção de Lodo – Equação (2);

$$P_{Lodo} = C_{DQO} * Y_{DQO} \quad (2)$$

Onde:

P_{Lodo} = Produção diária de lodo – massa seca (KgSST.dia⁻¹)

C_{DQO} = Carga de DQO diária

Y = Coeficiente de produção de lodo (KgSST.kgDQO_{Aplicada}⁻¹)

- Vazão volumétrica de lodo produzido – Equação (3);

$$Q_{Lodo} = \frac{P_{Lodo}}{C_{Lodo} * \rho} \quad (3)$$

Onde:

Q_{Lodo} = Vazão diária de lodo produzido ($m^3.dia^{-1}$)

P_{Lodo} = Produção diária de lodo ($kg_{SST}.dia^{-1}$)

C_{Lodo} = Concentração de lodo ($kg_{SST}.kg_{Lodo}^{-1}$)

ρ = Massa específica do lodo ($kg_{Lodo}.m^{-3}$)

- Massa úmida de lodo produzido– Equação (4);

$$M_{Lodo} = Q_{Lodo} * \rho \quad (4)$$

Onde:

M_{Lodo} = Massa úmida de lodo diário ($kg.dia^{-1}$)

Q_{Lodo} = Vazão diária de lodo produzido ($m^3.dia^{-1}$)

ρ = Massa específica do lodo ($kg_{Lodo}.m^{-3}$)

- Cálculo da produção de massa seca e úmida – Equação (5);

$$M_{LodoF} = M_{LodoI} * \frac{C_{LodoI}}{C_{LodoF}} \quad (5)$$

Onde:

M_{LodoF} = Massa final de lodo (kg)

M_{LodoI} = Massa inicial de lodo (kg)

C_{Lodo} = Concentração inicial do lodo ($kg_{SST}.kg_{Lodo}^{-1}$)

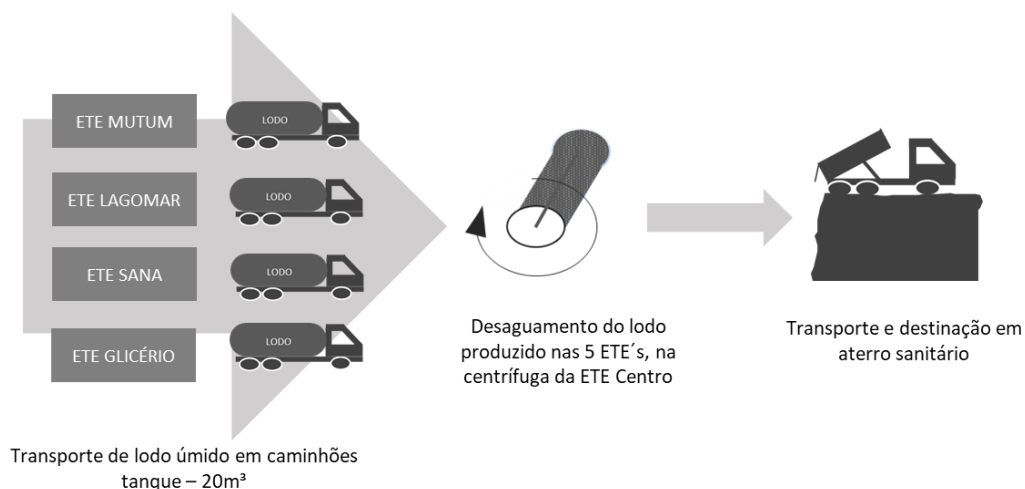
C_{Lodo} = Concentração final do lodo ($kg_{SST}.kg_{Lodo}^{-1}$)

5.1.2 OPEX – Sistema de Desaguamento de lodo

No que tange ao desaguamento de lodo, é informado que todo o lodo produzido pelas cinco ETEs passa pelo processo de desaguamento na ETE Centro e que está sendo construído um local para abrigar a centrífuga. Para este estudo será considerado que todo o lodo será submetido ao deságue em uma centrífuga (sistema 1+1) sendo um equipamento em operação e o outro em standby-by. Além disso, tendo como referência a taxa de produção diária de lodo, definiu-se que cada centrífuga possui uma vazão de $13m^3.hora^{-1}$.

Segue na (Figura 15), fluxograma da rota de transporte, tratamento e destinação do lodo, existente no município de Macaé.

Figura 15 – Fluxograma atual da rota, tratamento e destinação do lodo



Fonte – Fonte: O autor, com base em Macaé (2021)

Com base nesta premissa, foi feito contato com fornecedores e empresas projetistas para consolidação dos custos operacionais (potência e consumo energético previsto) referente aos equipamentos que compõe o sistema de desaguamento de lodo (misturador de lodo, bomba de lodo, preparador de polímero, bomba de polímero) e da própria centrífuga com base nas suas respectivas vazões.

A quantidade de horas de funcionamento variou em função dos diferentes tipos de cenários realizados no presente estudo, através da Equação (6):

$$Horas_t = Q_{Lodo} / Q_{Centrífuga} \quad (6)$$

$$Horas_T = \text{Funcionamento da Centrífuga (horas.dia}^{-1}\text{)}$$

$$Q_{Lodo} = \text{Vazão diária de lodo produzido (m}^3\text{.dia}^{-1}\text{)}$$

$$Q_{Centrífuga} = \text{Vazão de trabalho da centrífuga (m}^3\text{.hora}^{-1}\text{)}$$

Nas (Tabelas 7 e 8) são apresentados a relação de equipamentos e as respectivas potências instaladas utilizadas no presente estudo:

- Centrífuga 1 – Vazão de trabalho: $13\text{m}^3.\text{hora}^{-1}$

Tabela 7 – Relação de potência/equipamento - Centrífuga $12\text{m}^3.\text{hora}^{-1}$

Relação de Equipamentos/Potências – Centrífuga (Vazão de trabalho – $12\text{m}^3.\text{hora}^{-1}$)			
Equipamento	Potência (CV)	Equipamentos em operação	Referência
Bomba de Lodo	5,03	1	Sanevix,2023
Preparador de Polímero	2,00	1	Sanevix,2023
Bomba de Polímero	1,00	1	Sanevix,2023
Centrífuga	30,00	1	Sanevix,2023

Fonte – O autor, com base em SANEVIX (2023).

- Centrífuga 2 – Vazão de trabalho: $6\text{m}^3.\text{hora}^{-1}$

Tabela 8 – Relação de potência/equipamento - Centrífuga $6\text{m}^3.\text{hora}^{-1}$

Relação de Equipamentos/Potências – Centrífuga (Vazão de trabalho – $6\text{m}^3.\text{hora}^{-1}$)			
Equipamento	Potência (CV)	Equipamentos em operação	Referência
Bomba de Lodo	2,99	1	Sanevix,2023
Preparador de Polímero	0,75	1	Sanevix,2023
Bomba de Polímero	1,00	1	Sanevix,2023
Centrífuga	20,00	1	Sanevix,2023

Fonte – O autor, com base em SANEVIX (2023).

Para ambas as centrífugas, foi considerado a aplicação de misturadores estáticos. Além disso, para consumo energético desses equipamentos está sendo considerado sua potência nominal.

No que tange à definição das tarifas de energia, foi utilizada a mesma referência indicada por Cerqueira (2019). Definiu-se, portanto, pela utilização da modalidade tarifária Horo-sazonal Verde, Subgrupo A4 (2,3 a 25 kV), já que a Tarifa Verde tende a ser mais vantajosa que a azul e pelo Subgrupo A4, já que tensão de fornecimento na faixa entre 2,5 e 25 kV tende a ser mais aplicável em função das cargas instaladas nas ETEs conforme observada por Valente, (2015). Além disso foi considerado que as centrífugas irão trabalhar em horário fora de ponta, ou seja, entre 07:00 e 17:59.

No (Tabela 9), é possível verificar a composição do custo da tarifa encontrada que será aplicada no presente trabalho.

Tabela 9 – Composição da tarifa de energia elétrica

Composição da Tarifa de Energia								
Sigla	Base Tarifária	Subgrupo	Modalidade	Posto	Unidade	TUSD ¹	TE ²	(TUSD+TE)
Enel RJ	Base Econômica	A4	Verde	Fora Ponta	mWh	164,05	293,48	457,53

¹ TUSD: Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição;² TE: Tarifa Energia;

Fonte – Modificado de Aneel (2023)

Definidos os valores de potência dos equipamentos que compõe o sistema de desaguamento de lodo, o valor da tarifa e a quantidade de horas.dia⁻¹ de operação da centrífuga, o valor do custo mensal com energia elétrica será encontrado a partir da Equação (7):

$$\text{Custo Mensal Energia} = C_{kW} * \text{Tarifa} \quad (7)$$

Onde:

$$C_{kW} = \text{Consumo médio mensal (kW.mês}^{-1}\text{)}$$

Para definição do consumo médio mensal, foi usado a Equação (8):

$$C_{kW} = (\text{Somatório Potência Instalada} * 0,74) * \text{Horas}_T * 30 \quad (8)$$

$$\text{Horas}_T = \text{Funcionamento da Centrífuga (horas.dia}^{-1}\text{)}$$

Além dos custos com energia elétrica, foram considerados também os custos com os seguintes itens:

- Mão de obra
- Produto Químico;
- Manutenção.

Para composição dos custos de mão de obra, foram consideradas 2 funções para a operação das Centrífugas: Operador e Analista de ETE.

Para definição de horas trabalhadas com a operação das centrífugas definiu-se que um operador teria todo o seu tempo dedicado à operação e manutenção das centrífugas. Neste período, ele estaria dedicando seu tempo à operação das centrífugas bem como dos equipamentos e atividades correlatas ao sistema de desaguamento (preparo de polímero, realização de análises, lavagem da centrífuga após o uso, movimentação de caçambas de resíduos e pequenas manutenções). Já para a função de analista, por ocupar uma posição de supervisor, o tempo dedicado a esta operação seria 1/4 do tempo despendido pelo Operador.

O custo mensal adotado, teve como referência os valores médios de salário encontrados no website: www.salario.com.br, para as funções de Operador de ETE e Analista de ETE.

Para determinação dos custos com encargos (FGTS, INSS, Férias...), foi considerado o percentual de 113,75% sob o salário base (salário bruto) – CERQUEIRA (2019). Na (Tabela 10) é apresentado a composição do custo de mão de obra considerada no estudo.

Tabela 10 – Composição custo mão de obra

Função	Salário – Mão de Obra/Centrífuga		Referência
	Salário.mês ⁻¹ – R\$	% Tempo dedicado às centrífugas	
Operador	2152,20	100	www.salario.com
Analista de ETE	2921,91	25	www.salario.com

Fonte – O autor, com base em SALARIO.COM (2023).

- Produto Químico;

Em relação ao produto químico foi definido que para cada tonelada de massa seca de lodo, será aplicado quatro quilos de polímero, conforme indicado por (METCALF & EDDY,2016). O preço R\$.kg⁻¹ de polímero considerado foi de R\$27,99, mesmo valor da aquisição realizada pela Companhia Catarinense de Água e Saneamento (CASAN), em novembro de 2021 (CASAN,2023).

- Manutenção

O levantamento com os custos anuais de manutenção das centrífugas, teve como referência a mesma proposta encaminhada pela Sanevix.

5.1.3 Definição das rotas para transporte e destinação final do lodo

Uma vez indicado que todo o lodo gerado é encaminhado para deságue na ETE Centro, através da ferramenta do Google Maps, foi possível determinar as distâncias entre as ETEs e o aterro sanitário onde ocorre a destinação final do lodo.

Para levantamento dos custos incorridos com o transporte e destinação deste lodo, foi feito contato (via telefone/e-mail) com empresas que realizam este tipo de serviço no município de Macaé. Foram encaminhados os valores de R\$.km⁻¹ tanto para o transporte de lodo úmido em caminhões tanque do lodo úmido (antes do desaguamento, teor de sólidos = 3,5%) tanto para o transporte de lodo seco (pós desaguamento, teor de sólidos = 20%) em caminhão poliguindaste e carreta basculante. No que tange, ao transporte de lodo úmido, para distâncias superiores à 50 km e menores ou igual à 75km, foi acrescido o 25% ao valor de transporte (R\$.m⁻³) fornecido por empresa local (Transpacheco) para distâncias até 50km. Para distâncias superiores à 75 km e inferiores a 100 km, foi acrescido o valor de 50%.

Na (Tabela 11) são apresentados os custos unitários para transporte de lodo.

Tabela 11 – Descrição do valor para diferentes tipos de transporte

Item	Valor	Unidade	Referência
Transporte de lodo úmido (distâncias até 50 km)	55	R\$.m ⁻³	Transpacheco, 2023
Transporte de lodo seco em caminhão poliguindaste	7,5	R\$.km ⁻¹	Ecologika, 2023
Transporte de lodo seco em carreta basculante	8	R\$.km ⁻¹	Ecologika, 2023

Fonte – O autor, com base em TRANSPACHECO (2023); ECOLOGIKA (2023).

Segue também (Tabela 12), com a capacidade de transporte e característica do lodo que cada um dos equipamentos. Para os equipamentos que transportam lodo seco, foi definido que sua capacidade de transporte será 25% da capacidade nominal informada.

Tabela 12 – Descrição do valor para diferentes tipos de transporte

Tipo de Equipamento	% Sólidos do material transportado	Unidade de transporte	Capacidade Nominal	Referência
Transporte de lodo úmido (distâncias até 50 km)	3,5%	m ³	20	Transpacheco
Transporte de lodo “seco” em caminhão poliguindaste	20%	t	10	Ecologika
Transporte de lodo “seco” em carreta basculante	20%	t	25	Ecologika

Fonte – O autor, com base em TRANSPACHECO (2023); ECOLOGIKA (2023).

Para calcular os custos com o transporte de lodo úmido por mês, foi utilizado a seguinte Equação (9):

- Transporte de lodo em caminhões tanque (20 m³)

$$C_{Transp} = Q_{Lodo} * Unit_{Trans} * 30 \quad (9)$$

Onde:

C_{Transp} = Custo com transporte (R\$)

Q_{Lodo} = Vazão diária de lodo produzido (m³.dia⁻¹)

$Unit_{Trans}$ = Custo por viagem (R\$.m⁻³)

Já para se obter os custos com transporte de lodo seco, utilizou-se a seguinte Equação (10):

- Transporte de lodo em caminhões poliguindaste

$$C_{Transp} = \frac{Q_{Lodo}}{Cap_{Transp}} * D * Unit_{Trans} * 30 \quad (10)$$

Onde:

C_{Transp} = Custo com transporte (R\$)

Q_{Lodo} = Vazão diária de lodo produzido (m³.dia⁻¹)

C_{Transp} = Capacidade de transporte ($m^3.viagem^{-1}$)

D = Distância (ida e volta) - (km)

$Unit_{Trans}$ = Custo por viagem ($R\$.viagem^{-1}$)

Na (Figura 16) é representado o modelo do caminhão utilizado para transporte de lodo úmido.

Figura 15 – Exemplo de caminhão tanque – 20³



Fonte – Eurovac (2023)

No que se refere aos custos com destinação final de lodo, também foi feito contato com gerenciadoras de resíduos situadas no município de Macaé, com objetivo de levantar a forma e o custo para destinação final ($R\$.t^{-1}$).

A apresentação o valor para destinação de lodo em aterro sanitário, no município de Macaé, está representada no (Tabela 13).

Tabela 13 – Valor para destinação final

Tipo de Destinação	Unidade	Valor	Referência
Aterro Sanitário	$R\$. t^{-1}$	260,00	Ecologika, 2023

Fonte – O autor, com base em ECOLOGIKA (2023).

Para cálculo dos custos com destinação do lodo pós desaguamento, foi utilizado a Equação (11):

$$C_{Dest} = M_{Lodo} * Uni_{Dest} \quad (11)$$

Onde:

C_{Dest} = Custo com destinação final (R\$)

M_{Lodo} = Massa úmida de lodo produzida ($t.dia^{-1}$)

Uni_{Dest} = Custo unitário para destinação em aterro ($R\$.t^{-1}$)

Figura 17 (a) – Lodo acondicionado em caçamba



(a)

Figura 17 (b) – Detalhe do lodo seco



(b)

Fonte – O autor (2023)

5.2 OBJETIVO 2 – AVALIAR TÉCNICA E ECONOMICAMENTE CENÁRIOS PARA DESAGUAMENTO DE LODO

Nesta etapa, foram avaliados os custos de operação de processos de desaguamento de lodo através dos dados retirados de bibliografia e consultas a fornecedores. Os dois cenários estão representados, como:

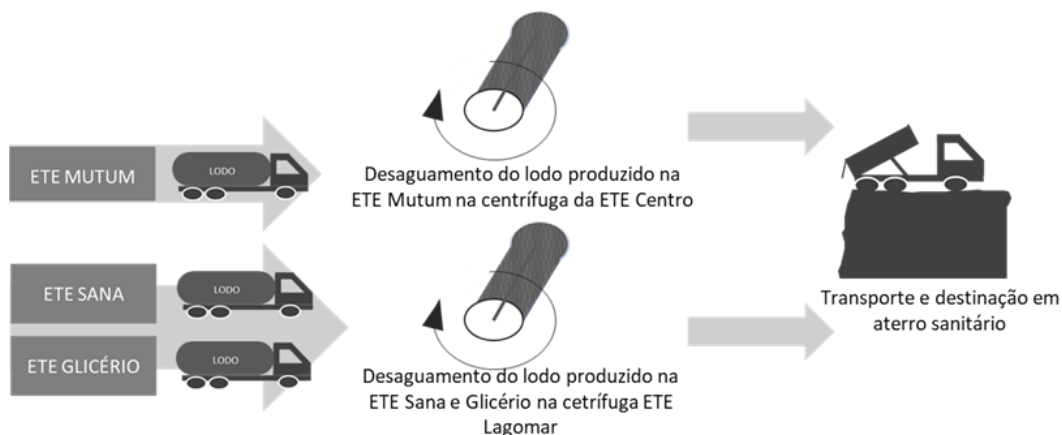
- Cenário 1: Operacionalização da centrífuga existente na ETE Lagomar para atender três ETEs (Lagomar, Sana e Glicério). Dessa maneira o lodo desaguado dessas unidades seguiria diretamente do Lagomar para o aterro sanitário, sem passar pela ETE Centro.

Neste primeiro cenário, além dos custos operacionais do sistema de desaguamento (energia elétrica, mão de obra, produto químico e manutenção anual), será acrescido os custos com transporte deste lodo. Com base nas informações adquiridas e na projeção realizada de taxa de geração de lodo na ETE Lagomar, a vazão da centrífuga considerada no estudo será de: $6\text{m}^3.\text{hora}^{-1}$.

As referências foram as mesmas aplicadas no objetivo 1. Os custos definidos para transporte e destinação de lodo terão como referência os valores encaminhados por uma gerenciadora de resíduos local, a Ecologika e o lodo úmido, pela Transpacheco. Já as informações de potência, consumo energético dos equipamentos e custo anual de manutenção, têm como referência os dados repassados pela empresa projetista Sanevix.

Na (Figura 18) é representado o fluxograma de gerenciamento de lodo, proposto para o Cenário 1, do objetivo 2.

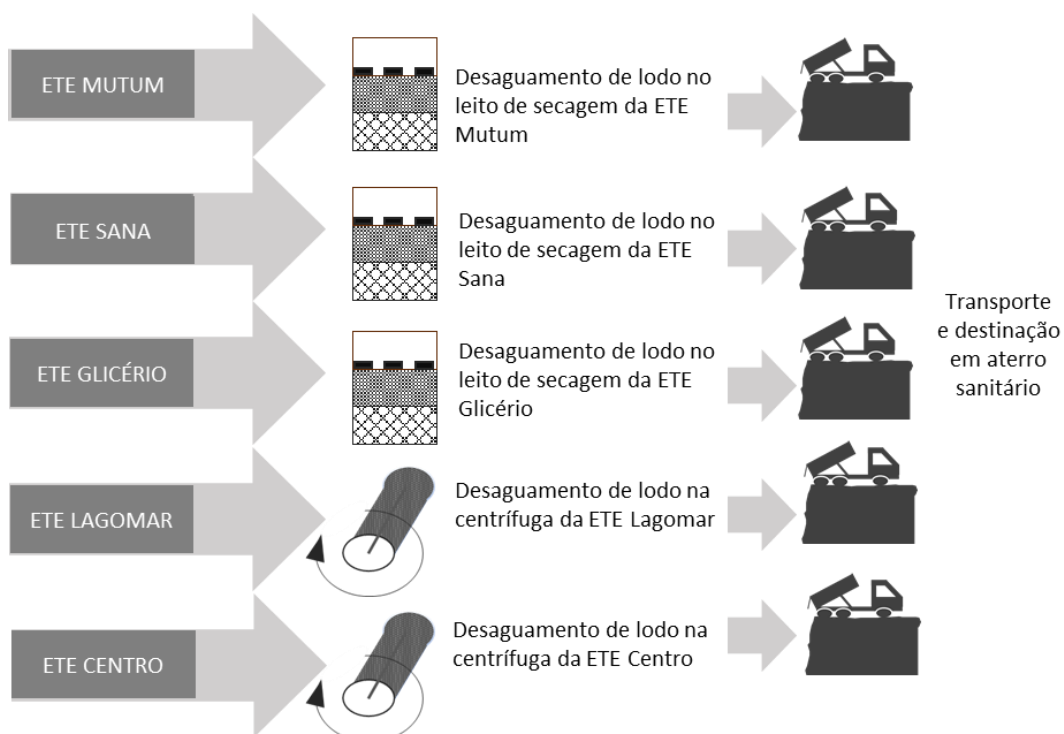
Figura 18 – Fluxograma de rota, tratamento e destinação do lodo – Cenário 1



Fonte – O autor (2023)

- Cenário 2: Descentralização do Gerenciamento de lodo das unidades Mutum, Sana e Glicério, com a consolidação do OPEX considerando a utilização de 3 leitos de secagem, uma em cada unidade (Sana, Glicério e Mutum), (Figura 19);

Figura 19 – Fluxograma de rota, tratamento e destinação do lodo – Objetivo 2 – Cenário 2



Fonte – O autor (2023)

Neste segundo cenário, do objetivo 2, usou-se como referência os custos de implantação de leito de secagem, apresentados por (CERQUEIRA, 2019), acrescido por

reajustes inflacionários (IPCA – Índice de Preços ao Consumidor Amplo), para o período entre janeiro de 2019 dezembro de 2022, usando como base a ferramenta disponibilizada no site do IBGE. A variação observada entre os custos de implantação para diferentes portes foi indicada como ganho de escala.

Para consolidar os custos operacionais do leito de secagem, verificou-se junto a um prestador de serviços local o custo para remoção de lodo seco (limpeza do leito), com o valor sendo disponibilizado em R\$.t⁻¹. A opção por terceirização deste serviço é uma prática realizada por outras concessionárias, dentre elas a SANEPAR, conforme citado por (CERQUEIRA, 2019). Além disso, foi definido o valor de 20% do valor do Capex de implantação do leito de secagem, como sendo o valor anual gasto com recuperação do leito de secagem (recomposição de areia, brita...). Segue no (Tabela 14) o valor considerado para construção dos leitos de secagem, já com os devidos reajustes.

Tabela 14 – Valores para implantação e limpeza do leito de secagem

Item	Valor	Unidade	Referência
Custo CAPEX – Leito de Secagem – Vazão média ETE – 5 L.s⁻¹	1.142,35	R\$.m ⁻²	Cerqueira, 2019
Custo CAPEX – Leito de Secagem – Vazão média ETE – 20 L.s⁻¹	1.075,14	R\$.m ⁻²	Cerqueira, 2019
Retirada manual de lodo leito de secagem	68,14	R\$.t ⁻¹	LMC Serviços, 2023

Fonte – O autor, com base em CERQUEIRA (2019); LMC SERVIÇOS (2023).

Para o seu dimensionamento, foi usado a Equação (12):

$$Área_{útil} = \frac{T_{ciclo} * P_{Lodo}}{Tx_{apli}} \quad (12)$$

Em que:

$Área_{útil}$ = Área necessária para implantação dos leitos (m²)

T_{ciclo} = Tempo de ciclo (d)

P_{Lodo} = Produção diária de lodo (kg_{SST}.dia⁻¹)

Tx_{Appl} = Taxa de aplicação de sólidos (kgST)

Tendo como referência a NBR 570 de 1989, será considerada uma taxa nominal de aplicação de sólidos igual a 15 kg ST.m⁻², um tempo de ciclo de secagem igual a 15 dias e um período de remoção de lodo seco igual a 5 dias, ou seja, a duração do ciclo do leito de secagem será igual a 20 dias, visando obter teores de sólidos na ordem de 20 – 30%.

A metodologia para transporte e destinação do lodo seco, será a mesma aplicada nas etapas anteriores.

5.3 OBJETIVO 3 – AVALIAR ALTERAÇÃO NO TIPO DE TRANSPORTE E DESTINAÇÃO FINAL DO LODO DESAGUADO.

Nesta etapa foram revistos os custos com transporte e destinação de lodo seco alterando o caminhão poliguindaste, por uma carreta basculante. A capacidade de transporte ($t.viagem^{-1}$), bem como seu custo (R\$ por quilômetro) já foram apresentadas na metodologia do Objetivo 2 (Tabela 11). A destinação também será alterada, o lodo produzido nas ETEs não será mais encaminhado para aterro sanitário e passará a ser encaminhado para compostagem no município de Cachoeira de Macacu. Segue no (Tabela 15) o valor para destinação.

Tabela 15 – Valores destinação de lodo para compostagem

Tipo de Destinação	Unidade	Valor	Referência
Compostagem	R\$.t ⁻¹	104,50	Vide Verde (2023)

Fonte – O autor, com base em VIDE VERDE (2023).

Tal alteração tem como objetivo otimizar o transporte de lodo produzido nas ETEs, com foco na redução de custo operacional, bem como garantir uma destinação ambientalmente mais adequada para lodo.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos foram distribuídos em três tópicos, separados pelos diferentes objetivos do estudo. No primeiro tópico são apresentados e discutidos os resultados de produção de lodo e os custos atuais do seu gerenciamento. Já no segundo os resultados alcançados com a simulação dos cenários 1 e 2 propostos no Objetivo 2 são avaliados e comparados aos custos atuais do gerenciamento de lodo encontrado no tópico 1. No terceiro, é apresentado os valores encontrados considerando a alteração na forma de transporte e destinação do lodo seco e avaliado o impacto econômico dessa alteração em relação ao cenário aos cenários apresentados anteriormente.

6.1 OBJETIVO 1 - DIMENSIONAR E QUANTIFICAR OS CUSTOS ATUAIS COM GERENCIAMENTO DE LODO

Neste capítulo foram apresentados e discutidos os principais resultados referentes à, inicialmente, caracterização e quantificação do lodo, bem como a apresentação e análise dos custos estimados atualmente com o gerenciamento de lodo do município de Macaé. Aplicando os dados existentes no Plano de Saneamento e as demais fórmulas e parâmetros apresentados na metodologia, na (Tabela 16) são representados os respectivos valores de produção de lodo.

6.1.1 Caracterização e geração de lodo

- Carga de DQO Afluente (1)

Tabela 16 – Determinação da carga DQO Afluente

Carga de DQO Afluente	Un.	ETE Centro	ETE Mutum	ETE Lagomar	ETE Sana	ETE Glicério
Concentração média de DQO Afluente	mg.L ⁻¹	688,72	323,36	506,04	506,04	506,04
Concentração média de DQO Afluente	kg.m ⁻³	0,68872	0,32336	0,50604	0,50604	0,50604
Vazão média afluente (Qesgoto)	L.s ⁻¹	100,00	19,30	29,51	5,00	5,00
Vazão média afluente (Qesgoto)	m ³ .dia ⁻¹	8640,00	1667,52	2549,60	432,00	432,00
Carga DQO afluente	kgDQO.dia ⁻¹	5.950,5	539,2	1.290,2	218,6	218,6

Fonte – O autor (2023)

- Produção diária de lodo em massa seca

(2)

- Tabela 17 – Produção diária de lodo em massa seca

Produção de Lodo	Un.	ETE Centro	ETE Mutum	ETE Lagomar	ETE Sana	ETE Glicério
Coeficiente de produção de lodo (Y)	kgSS. kgDQO ⁻¹	0,30	0,30	0,50	0,30	0,30
Carga DQO afluente	kgDQO. dia ⁻¹	5.950,5	539,2	1.290,2	218,6	218,6
Produção diária de lodo em massa seca	kgSS.dia ⁻¹	1.785,2	161,8	645,1	65,6	65,6

Fonte – O autor (2023)

- Vazão diária de lodo produzido

(3)

Tabela 18 – Produção diária de lodo – m³.dia⁻¹

Vazão Volumétrica de lodo produzido	Un.	ETE Centro	ETE Mutum	ETE Lagomar	ETE Sana	ETE Glicério
Produção diária de lodo em massa seca	kgSS.dia ⁻¹	1.785,2	161,8	645,1	65,6	65,6
Concentração do lodo	%	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Massa específica do lodo	Kg.m ⁻³	1020	1020	1020	1020	1020
Vazão diária de lodo produzido	m ³ .dia ⁻¹	50,0	4,5	18,1	1,8	1,8

Fonte – O autor (2023)

- Massa úmida diária de lodo:

(4)

Tabela 19 – Produção de massa úmida – kg.dia⁻¹

Massa úmida de lodo produzido	Un.	ETE Centro	ETE Mutum	ETE Lagomar	ETE Sana	ETE Glicério
Vazão diária de lodo produzido	m ³ .dia ⁻¹	50,0	4,5	18,1	1,8	1,8
Massa específica do lodo	Kg.m ⁻³	1020	1020	1020	1020	1020
Massa úmida diária de lodo	Kg.dia ⁻¹	51.000,0	4590,0	18.462,0	1.836,0	1.836,0

Fonte – O autor (2023)

- Massa úmida diária de lodo ($\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1}$), pós desaguamento (5)

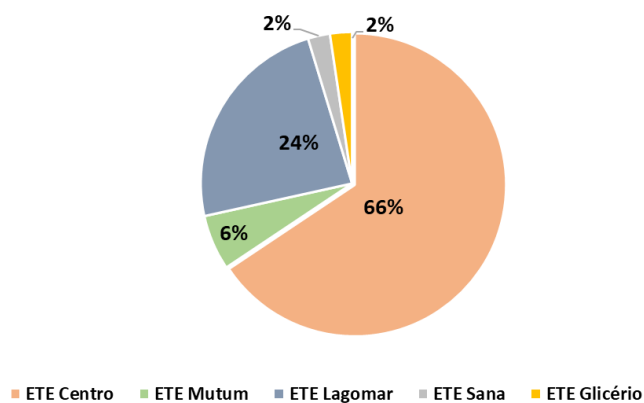
Tabela 20 – Produção de massa úmida, 20%, $\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1}$

Massa úmida de lodo - Pós Centrifuga (20%)	Un.	ETE Centro	ETE Mutum	ETE Lagomar	ETE Sana	ETE Glicério
Massa úmida diária de lodo	$\text{Kg} \cdot \text{dia}^{-1}$	51.000,0	4590,0	18.462,0	1.836,0	1.836,0
% Sólidos inicial do lodo	%	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
% Sólidos final do lodo	%	20	20	20	20	20
Massa úmida diária de lodo (20%)	$\text{Kg} \cdot \text{dia}^{-1}$	8.925,0	803,3	3.230,9	321,3	321,3
Massa úmida mensal de lodo (20%)	$\text{t} \cdot \text{mês}^{-1}$	267,8	24,1	96,9	9,6	9,6

Fonte – O autor (2023)

Com os valores de produção diária de lodo seco, chega-se a um total de 408 toneladas de lodo produzido por mês, nas ETEs de Macaé, distribuídos da seguinte forma: ETE Centro: 267,8 t; Mutum: 24,1 t; Lagomar: 96,9 t e Sana e Glicério, cada uma produzindo 9,6 $\text{t} \cdot \text{mês}^{-1}$. Na (Figura 20) é apresentado a distribuição percentual da produção mensal de lodo, por ETE.

Figura 20 – Percentual de produção mensal de lodo seco por ETE.

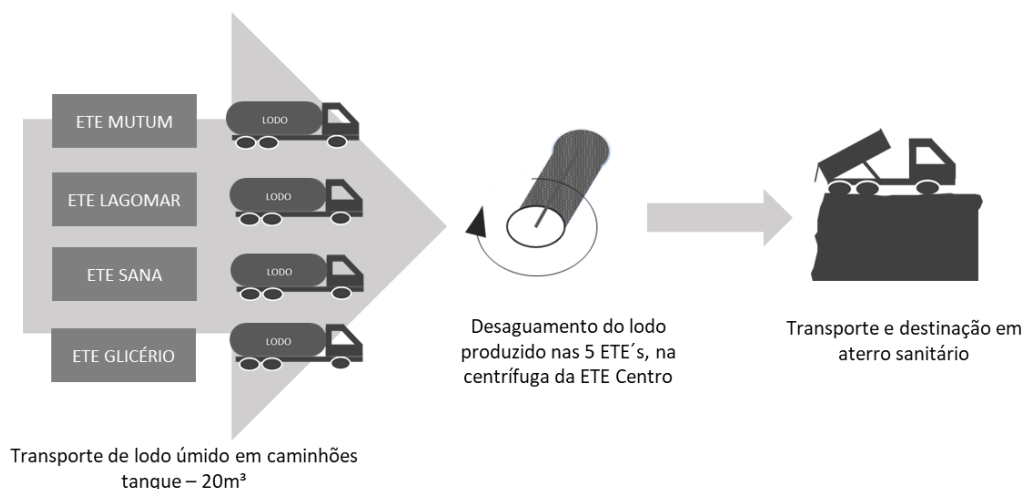


Fonte – O autor (2023)

Percebe-se através do (Figura 20) que 66% de toda produção de lodo tem como origem a ETE Centro, outro ponto que chama a atenção é que praticamente $\frac{1}{4}$ do volume produzido de lodo seco tem como origem a ETE Lagomar. Isso pode ser explicado pelo maior coeficiente de produção de lodo (Y) da tecnologia da tecnologia aplicada nesta planta ($0,5 \text{ kgSS} \cdot \text{kgDQO}^{-1}$), sendo as demais $0,3 \text{ kgSS} \cdot \text{kgDQO}^{-1}$.

6.1.2 Cenário Atual – OPEX Gerenciamento de Lodo

Figura 21 – Fluxograma atual da rota, tratamento e destinação do lodo



Fonte – O autor (2023)

Na (Tabela 21) é representado a distância total de deslocamento das quatro ETEs para a ETE Centro, onde é realizado o desaguamento de lodo por meio de um sistema de centrífugas. Além disso, é apresentado o volume total de lodo transportado.mês⁻¹ e o respectivo custo mensal desta atividade por ETE.

Tabela 21 – Relação de distâncias, volume e custos de transporte de lodo úmido

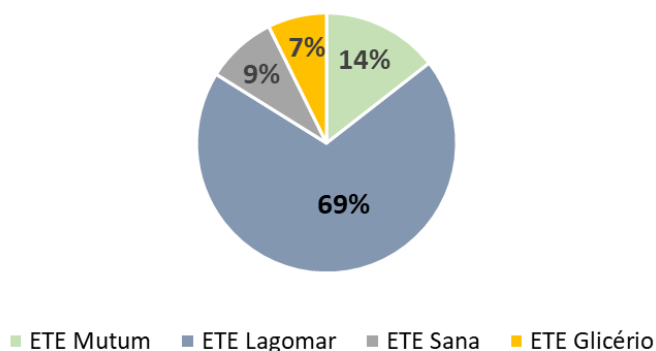
Distâncias/Valor da Viagem ETE Centro	ETE Mutum	ETE Lagomar	ETE Sana	ETE Glicério
Distância média entre a ETE de destino e ETE geradora do lodo - km	7,0	17,3	86,2	58,4
Distância média entre a ETE geradora de lodo e a ETE de destino - km	7,0	17,3	86,2	58,4
Volume mensal de lodo transportado (m³. mês ⁻¹)	135,0	651,0	54,0	54,0
Capacidade de transporte – Caminhão tanque (m³)	20	20	20	20
Custo para transporte (R\$.m ⁻³) – Distâncias até 50 km – IDA	55	55	N/A	N/A
Custo para transporte (R\$.m ⁻³) – Distâncias 50km < x < 75km - IDA	N/A	N/A	N/A	68,75
Custo para transporte (R\$.m ⁻³) – Distâncias 75km < x < 100km - IDA	N/A	N/A	82,50	N/A
Custo para total para transporte de lodo úmido R\$.mês⁻¹	7.425,00	35.805,00	4.455,00	3.712,50
Custo Total com transporte de lodo úmido – R\$.mês⁻¹				51.397,50

Fonte – O autor (2023)

Analisando os valores tabulados (Tabela 21), observa-se que grande parte do custo referente ao transporte de lodo, é proveniente do Lagomar. Tal fato pode ser observado por 2 diferentes fatores. O primeiro deles, é que a tecnologia de tratamento existente na esta ETE apresenta um maior coeficiente de produção de sólidos (y), conforme representado na (Tabela 5). Outro fator, é que além de destinar o lodo produzido na ETE Lagomar, tanto o lodo da ETE Sana como o da ETE Glicério são acondicionados temporariamente no Lagomar, antes de ser transportado para a ETE Centro.

No (Figura 22) é possível verificar a distribuição do percentual do custo de cada transporte em relação ao valor total. Destaque para as viagens provenientes da ETE Lagomar, que representa quase 70% do custo total dessa atividade.

Figura 22 – Distribuição do custo com transporte de lodo por ETE



Fonte – O autor (2023)

Já na (Tabela 25), é representada a composição de custo de OPEX do sistema de desaguamento de lodo na ETE. Verifica-se, inicialmente, a composição do custo de mão-de-obra (Tabela 22), seguido da energia elétrica, (Tabela 23), consumo de químicos (Tabela 24) e por último o valor mensal da revisão anual da centrífuga.

Tabela 22 – Composição de custo de mão de obra - Centrífuga

Função	Função	Encargos - %	% tempo dedicado	Custo Total
	Salário Base (R\$.mês ⁻¹)	Salário base (%)	atividade (%)	(R\$.mês ⁻¹)
Operador de ETE	2.152,20	113,75	100	2.448,13
Analista de ETE	2.921,91	113,75	25	830,92
Valor total mês mão de obra (R\$.mês ⁻¹)				3.279,05

Fonte – O autor (2023)

Tabela 23 – Composição de custo energia elétrica – Centrífuga

Equipamento	Potência Instalada (CV)	Consumo de Energia (kwh)	Equip. em Operação (un)	Horas de Operação (h.dia ⁻¹)	Consumo por dia (kw.dia ⁻¹)	Consumo mês (kw.mês ⁻¹)
Bomba de Lodo	5,03	3,72	1	5,9	21,9	658,44
Preparador de polímero	2,00	1,48	1	5,9	8,7	261,96
Bomba de Polímero	1,00	0,74	1	5,9	4,4	130,98
Centrífuga	30,00	22,20	1	5,9	131,0	3929,4
Consumo Total (kw.mês⁻¹)						4.980,78
Custo médio da tarifa (R\$.kwh⁻¹)						0,45733
Custo total com energia elétrica – R\$.mês⁻¹						2.277,86

Fonte – O autor (2023)

Tabela 24 – Composição de custo com produto químico – Centrífuga

Item	Relação de dosagem (kg.t ⁻¹)	R\$.kg ⁻¹ de polímero	Produção de lodo t.SS.mês ⁻¹	Custo mês de produto químico (R\$.mês ⁻¹)
Polímero	4,00	27,99	81,7	9.147,13

Fonte – O autor (2023)

Com base nas composições e no valor previsto para manutenção anual encaminhada pela Sanevix, chegou-se ao valor consolidado de OPEX do sistema de desaguamento de lodo existente na ETE Centro igual a R\$14.277,82 por mês. Importante frisar que o custo anual de manutenção, foi dividido pelos doze meses do ano. Ou seja, o valor mensal de manutenção anual representa um doze avos de R\$ 21.905,10. Segue (Tabela 25) com a consolidação do OPEX da centrífuga da ETE Centro.

Tabela 25 – Composição OPEX – Centrífuga

Composição – Item	R\$.mês ⁻¹
Mão de obra	3.279,05
Energia Elétrica	2.277,86
Produto Químico	9.147,13
Custo Anual de Manutenção	1.825,43
OpeX – Centrífuga Centro	16.529,47

Fonte – O autor (2023)

No que tange ao transporte e destinação do lodo seco, através dos dados encaminhados pelo fornecedor local, onde é cobrado o valor de R\$ 7,50.km⁻¹ para transportar o lodo em caminhões tipo poliguindaste e o valor de R\$260,00 por tonelada para destinação de lodo, chegou-se ao valor total de R\$ 131.655,00, por mês, sendo R\$ 25.575,00 gasto com transporte e R\$ 106.080,00, gasto com destinação.

Na (Tabela 26), a composição dos custos com transporte e destinação de lodo seco.

Tabela 26 – Composição custo – Transporte e destinação de lodo seco – Objetivo 1

Equipamento	Transporte mensal de lodo (t.mês ⁻¹)	Capacidade de transporte (t.viagem ⁻¹)	Nº de viagens mês	Distância (Ida + Volta) – ETE Centro (km)	R\$.km ⁻¹ para transporte	Custo mês. Transp ⁻¹
Caminhão Poliguindaste	4	7,5	55	62	7,50	25.575,00
Custo para destinação (R\$.t ⁻¹)						260,00
Custo Total com destinação (R\$.mês ⁻¹)						106.080,00
Custo Total (transporte + destinação) – R\$.mês ⁻¹						131.655,00

Fonte – O autor (2023)

Através da consolidação destes valores, considerando a produção total de lodo encaminhado para a ETE Centro, que neste caso, refere-se a todo o lodo produzido no município de Macaé, teremos um valor de custo total reais por tonelada. para transporte e destinação de lodo seco igual a R\$ 322,68.

Chegamos, portanto, a um custo final de gerenciamento de lodo, considerando transporte de lodo úmido, OPEX da Centrífuga e Transporte e disposição do lodo seco igual a R\$ 199.581,97 por mês, ou R\$ 489,17 por tonelada de lodo destinado.

Na (Tabela 27) é representada a composição dos valores para o objetivo 1 – Atual.

Tabela 27 – Composição OPEX Gerenciamento de Lodo – Objetivo 1

Composição – Item	R\$.mês ⁻¹
Transporte Lodo – Úmido	51.397,50
Opex – Centrífuga ETE Centro	16.529,47
Transporte e destinação final em Aterro Sanitário	131.655,00
Opex – Cenário Atual	199.581,97

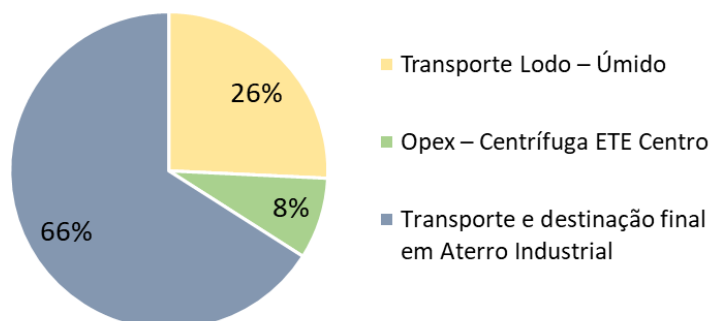
Fonte – O autor (2023)

Analisando especificamente o valor para destinação final de lodo deste estudo, ele se mostra bem superior a valores encontrados nos estudos de (VALENTE, 2015) e (BIELSHOWSKI 2014) de R\$ 120.t⁻¹ e R\$ 160,00.t⁻¹. Mesmo em referências mais recentes, como o estudo apresentado por (CECATO, 2018), o valor de R\$260,00 por tonelada encontrado em Macaé, continua acima dos valores encontrados nas ETES Canasvieiras e Lagoa da Conceição, em Santa Catarina. O valor encontrado nestes locais foi de R\$218,64 por tonelada de lodo destinado.

Outro ponto que pode ser observado é que, ao ser verificado os percentuais de composição do OPEX de gestão de lodo, observou-se que, quase 70% deste valor é

direcionado para transporte e destinação de lodo seco, seguido de transporte de lodo úmido (26%) e operação de centrífugas (8%). A distribuição está representada na (Figura 23).

Figura 23 – Distribuição do OPEX – Objetivo 1



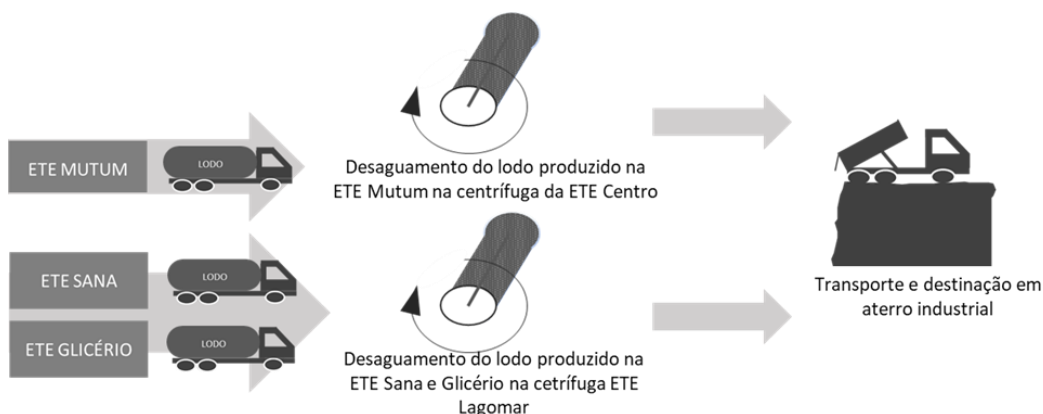
Fonte – O autor (2023)

6.2 OBJETIVO 2 – AVALIAÇÃO DE DIFERENTES CENÁRIOS DE DESCENTRALIZAÇÃO DO DESAGUE DE LODO

6.2.1 Objetivo 2 - Cenário 1

Neste primeiro cenário, do objetivo 2, foram apresentados os custos OPEX de gerenciamento de lodo, considerando a operacionalização do sistema de desaguamento de lodo existente na ETE Lagomar. Na (Figura 24), é representado o fluxograma deste cenário.

Figura 24 – Fluxograma de rota, tratamento e destinação do lodo – Objetivo 2 – Cenário 1



Fonte – O autor (2023)

De acordo com o Plano de Saneamento de Macaé, o sistema está fora de operação, mas recebe o lodo gerado nas ETEs, Sana e Glicério, antes de ser encaminhado para a ETE Centro. Em relação ao transporte de lodo úmido, as viagens da ETE Lagomar para a ETE Centro não mais existirão a vista que o lodo será desaguado na própria Lagomar. No entanto, se manterá as viagens da ETE Mutum para ETE Centro, assim com as viagens da ETE Sana e Glicério para o Lagomar.

Segue na (Tabela 28), composição de custos de transporte, conforme as condições deste cenário:

Tabela 28 – Relação de distâncias, volume e custos de transporte de lodo úmido - Objetivo 2 – Cenário 1

Distâncias/Valor da Viagem ETE Centro	ETE Mutum	ETE Lagomar	ETE Sana	ETE Glicério
Distância média entre a ETE de destino e ETE geradora do lodo - km	7,0	N/A	86,2	58,4
Distância média entre a ETE geradora de lodo e a ETE de destino - km	7,0	N/A	86,2	58,4
Produção mensal de lodo (m³.mês⁻¹)	135,0	N/A	54,0	54,0
Capacidade de transporte – Caminhão tanque (m³)	20	20	20	20
Custo para transporte (R\$.m⁻³) – Distâncias até 50 km - IDA	55	55	N/A	N/A
Custo para transporte (R\$.m⁻³) – Distâncias 50km < x < 75km - IDA	N/A	N/A	N/A	68,75
Custo para transporte (R\$.m⁻³) – Distâncias 75km < x < 100km - IDA	N/A	N/A	82,50	N/A
Custo para total para transporte de lodo úmido R\$.mês⁻¹	7.425,00	0,00	4.455,00	3.712,50
Custo Total com transporte de lodo úmido – R\$.mês⁻¹				15.592,50

Fonte – O autor (2023)

Em relação à centrífuga da ETE Centro, também haverá uma redução de custo em relação ao valor apresentado no Objetivo 1, uma vez que menos lodo será direcionado para a Estação, reduzindo seu tempo médio de funcionamento. O custo mensal com operação das centrífugas passará de R\$ 16.529,47 por mês para R\$ 13.264,50. Esta redução será gerada devido ao menor consumo de energia e produto químico. Os custos de mão de obra e custo anual de manutenção se mantiveram fixos.

Tabela 29 – Composição de custo com produto químico – Centrífuga – Centro

	Relação de dosagem (kg.t ⁻¹)	R\$.kg de polímero ⁻¹	Produção de lodo t.SS.mês ⁻¹	Custo mês de produto químico (R\$.mês ⁻¹)
Polímero	4,00	27,99	58,4	6.538,46

Fonte – O autor (2023)

Tabela 30 – Composição de custo energia elétrica – Centrífuga – Centro

Equipamento	Potência Instalada (CV)	Consumo de Energia (kwh)	Equip. em Operação (un)	Horas Operação (h.dia ⁻¹)	Consumo por dia (kw.dia ⁻¹)	Consumo mês (kw.mês ⁻¹)
Bomba de Lodo	5,03	3,72	1	4,2	15,62	468,60
Preparador de polímero	2,00	1,48	1	4,2	6,22	186,60
Bomba de Polímero	1,00	0,74	1	4,2	3,11	93,30
Centrífuga	30,00	22,20	1	4,2	93,24	2797,20
Consumo Total (kw.mês⁻¹)						3.545,70
Custo médio da tarifa (R\$.kwh⁻¹)						0,45733
Custo total com energia elétrica – R\$.mês⁻¹						1.621,55

Fonte – O autor (2023)

No entanto, com o início da Operação da centrífuga na ETE Lagomar, passará a existir um custo operacional relacionado à esta atividade. Na (Tabela 31), são apresentados os custos com energia elétrica.

Tabela 31 – Composição de custo energia elétrica – Centrífuga - Lagomar

Equipamento	Potência Instalada (CV)	Consumo de Energia (kwh)	Equip. em Operação (un)	Horas Operação (h.dia ⁻¹)	Consumo por dia (kw.dia ⁻¹)	Consumo mês (kw.mês ⁻¹)
Bomba de Lodo	2,99	2,21	1	3,6	7,96	238,80
Preparador de polímero	0,75	0,56	1	3,6	2,02	60,60
Bomba de Polímero	1,00	0,74	1	3,6	2,66	79,80
Centrífuga	20,00	14,80	1	3,6	53,28	1.598,40
Consumo Total (kw.mês⁻¹)						1.977,60
Custo médio da tarifa (R\$.kwh⁻¹)						0,45733
Custo total com energia elétrica – R\$.mês⁻¹						904,42

Fonte – O autor (2023)

Também em relação ao OPEX da centrífuga no Lagomar, será considerado a necessidade de mão de obra, bem com o consumo de polímero referente a parcela de lodo que será desaguada nesta planta.

Na (Tabela 32) é representada o custo mensal com polímero, para a centrífuga do Lagomar considerando a produção de lodo seco, da própria ETE da das ETEs, Sana e Glicério.

Tabela 32 – Composição de custo com produto químico – Centrífuga – Lagomar

	Relação de dosagem (kg.t⁻¹)	R\$.kg de polímero⁻¹	Produção de lodo t.SS.mês⁻¹	Custo mês de produto químico (R\$.mês⁻¹)
Polímero	4,00	27,99	23,3	2.608,67

Fonte – O autor (2023)

Seu custo anual com manutenção teve com referência o valor apresentado pela Sanevix, considerando uma centrífuga com vazão nominal de 6 m³.hora⁻¹, tal valor também está incluso. Na (Tabela 33) é apresentada a composição deste OPEX.

Tabela 33 – Composição OPEX – Centrífuga – Lagomar

Composição – Item	R\$.mês⁻¹
Mão de obra	3.279,05
Energia Elétrica	904,42
Produto Químico	2.608,67
Custo Anual de Manutenção	1.155,30
Opex – Centrífuga Lagomar	7.947,44

Fonte – O autor (2023)

Em relação ao transporte e tratamento de lodo seco, também haverá uma pequena redução no custo de transporte em relação ao Objetivo 1, já que a ETE Lagomar está instalada a uma distância menor do local de destinação final do lodo do que a ETE Centro, conforme (Tabela 34).

Os custos com essa atividade apresentado no Objetivo 1, chegava a R\$131.655,00, já neste cenário apresentou uma redução de R\$ 3.120,00, ficando em R\$ 128.535,00 por mês.

Segue (Tabela 34) com a consolidação dos valores.

Tabela 34 – Composição custo – Transporte e destinação de lodo seco – Objetivo 2, Cenário 1

Equipamento	Transporte mensal de lodo (t.mês ⁻¹)	Capacidade de transporte (t.viagem ⁻¹)	Nº de viagens mês	Distância (Ida + Volta) – ETE (km)	R\$.km para transporte ⁻¹	Custo mês. Transp ⁻¹
Caminhão Poliguindaste – Origem ETE Lagomar	116,1	7,5	16	36	7,50	4.320,00
Caminhão Poliguindaste – Origem ETE Centro	291,9	7,5	39	62	7,50	18.135,00
Custo total para transporte - R\$.mês⁻¹						22.455,00
Custo para destinação – R\$.t⁻¹						260,00
Custo Total com destinação - R\$.mês⁻¹						106.080,00
Custo Total (transporte + destinação) – R\$.mês⁻¹						128.535,00

Fonte – O autor (2023)

Ainda comparando os dois cenários, verificamos que a principal redução percebida entre eles foi gerada pelo custo de Transporte de Lodo, sendo possível perceber uma redução de R\$ 35.805,00.

Tabela 35 – Composição OPEX Gerenciamento de Lodo – Objetivo 2, Cenário 1

Item analisado	Objetivo 1 - Cenário Atual	Objetivo 2 – Cenário 1
Transporte Lodo – Úmido (R\$.mês ⁻¹)	51.397,50	15.592,50
Consolidado - Opex – Centrífugas (R\$.mês ⁻¹)	16.529,47	21.211,93
Consolidado - Transporte e destinação final (R\$.mês ⁻¹)	131.655,00	128.535,00
Opex – Cenário 1 – Objetivo 2	199.581,97	165.339,43
Valor R\$.t⁻¹	489,17	405,24

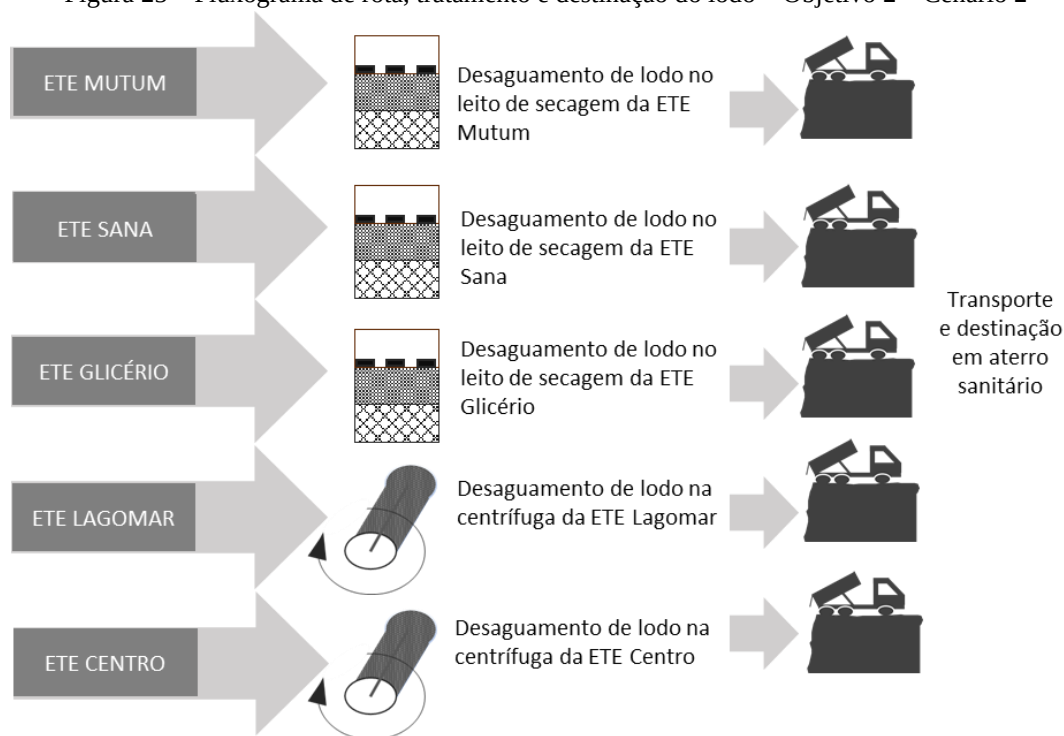
Fonte – O autor (2023)

Realizando uma análise macro dos indicadores, percebe-se que o segundo cenário proporciona uma redução de R\$ 34.242,54, ou 17,2%, no custo mensal de gerenciamento de lodo, chegando em um valor de real por tonelada de R\$405,24, contra R\$ 489,17 reais por tonelada do cenário atual.

6.2.2 Objetivo 2 - Cenário 2

Para este segundo cenário, na qual está sendo avaliada a descentralização do sistema de desaguamento de lodo, foi considerado a implantação de leitos de secagem nas três ETEs que não possuem centrífuga, conforme fluxograma representado na (Figura 25).

Figura 25 – Fluxograma de rota, tratamento e destinação do lodo – Objetivo 2 – Cenário 2



Fonte – O autor (2023)

Inicialmente, para a consolidação dos valores de OPEX, foi necessário o dimensionamento dos leitos de secagem. Conforme indicado na metodologia o valor R\$.m⁻² para implantação do leito de secagem foi de respectivamente R\$ 1.142,35 e R\$ 1.075,14 para as ETEs Sana/Glicério e ETE Mutum.

Os dados do dimensionamento do leito de secagem foram utilizados para consolidação do OPEX deste cenário (Custo Anual com recuperação do Leito de Secagem – 15% do valor do Capex). Segue (Tabelas 36 e 37) com dimensionamento dos leitos que foram analisados:

Tabela 36 – Dimensionamento dos leitos de secagem

ITEM	ETE SANA/GLICÉRIO	ETE MUTUM
Produção de Lodo (kg.dia ⁻¹)	65,6	161,8
Produção de Lodo/ciclo (kg.ciclo ⁻¹)	1.312	3.236
Taxa de Aplicação de Lodo (ST.m ⁻²)	15	15
Área mínima implantação leito (m ²)	87,4	215,7
Custo implantação Leito de Secagem (R\$.m ⁻²)	1.142,35	1.075,14
Custo Total – Implantação do Leito (R\$)	99.841,39	231.907,70

Fonte – O autor (2023)

Na consolidação do OPEX dos leitos de secagem, o mesmo valor será considerado tanto para ETE Sana como Glicério, totalizando, R\$ 4.636,33, somando ambas.

Para aos três leitos analisados, não foram incluídos os custos com mão-de-obra, já que está sendo considerado que a atividade de operação dos leitos seria incorporada à rotina dos operadores que já trabalham nas respectivas Estações de Tratamento.

Tabela 37 – Dimensionamento dos leitos de secagem

Composição – OPEX Leitos de Secagem	ETE GLICÉRIO/ SANA - Valor	ETE MUTUM - Valor
Massa diária de lodo seco produzido (kg.dia⁻¹)	321,3	803,3
Duração de ciclos (dias)	20	20
Número de ciclos.ano⁻¹	18	18
Massa anual de lodo seco produzido (t.ano⁻¹)	115,2	289,2
Custo para remoção manual de lodo (R\$.t⁻¹)	68,14	68,14
Custo Anual com remoção manual de lodo (R\$.ano⁻¹)	7.849,73	19.706,09
Custo Anual com recuperação de leito de secagem (R\$.ano⁻¹)	19.968,28	46.381,54
Custo Opex – Anual (leito de secagem) (R\$.ano⁻¹)	27.818,01	66.087,63
Custo Opex – Mensal (leito de secagem) (R\$.mês⁻¹)	2.318,17	5.507,30

Fonte – O autor (2023)

Através dessa configuração operacional, o transporte de lodo úmido entre as Estações deixa de existir, com as centrifugas passando a desaguar somente o lodo produzido nas ETEs onde elas estão instaladas, causando uma redução no valor de OPEX dessas plantas. No entanto, é percebido um aumento no custo de transporte de lodo, uma vez que algumas ETEs encontram-se mais distantes do ponto de destinação final. Tal fato é consequência da maior distância entre as ETEs e o aterro sanitário onde será realizado a destinação final do lodo. Na (Tabela 38) é apresentado as distâncias ida e volta de cada uma das unidades até o aterro.

Tabela 38 – Distância das ETEs até destinação final

Distância das ETEs até destinação final	ETE Centro	ETE Mutum	ETE Lagomar	ETE Sana	ETE Glicério
Distância média (ida e volta) até o aterro sanitário - km	62	78	36	164	102

Fonte – O autor (2023)

Para as ETEs localizadas fora da área urbana de Macaé, foi acrescido o custo para deslocamento (ida e volta) do caminhão da sua base, até a ETE onde será retirado o rejeito. As distâncias são apresentadas na (Tabela 39).

Tabela 39 – Distância das ETEs entre a base da empresa transportadora

Distância entre a base da empresa transportadora até a ETE	ETE Sana	ETE Glicério
Distância média (ida e volta) - km	182	118

Fonte – O autor (2023)

Na (Tabela 40), é representada um comparativo dos 3 cenários analisados até o momento. Percebe-se que, os dois cenários estudados, em alternativa ao cenário atual, atingem menores valores consolidados de custo mensal com gerenciamento de lodo. Reduzem, respectivamente, 17,2% e 16,2% ou R\$ 34.242,54 e R\$ 32.345,73 por mês.

Tabela 40 – Composição OPEX Gerenciamento de Lodo – Objetivo 2, Cenário 2

Item analisado	Objetivo 1 - Cenário Atual	Objetivo 2 – Cenário 1	Objetivo 2 – Cenário 2
Transporte Lodo – Úmido (R\$.mês⁻¹)	51.397,50	15.592,50	-
Consolidado - Opex – Centrifugas (R\$.mês⁻¹)	16.529,47	21.211,93	19.932,61
Consolidados – Opex – Leitões de Secagem (R\$.mês⁻¹)	-	-	10.143,64
Consolidado - Trans. e Destinação final (R\$.mês⁻¹)	131.655,00	128.535,00	137.160,00
Opex TOTAL	199.581,97	165.339,43	167.236,25
Valor R\$.t⁻¹	489,17	405,24	409,89

Fonte – O autor (2023)

6.3 OBJETIVO 3 – AVALIAR ALTERAÇÃO DO TRANSPORTE DE DESTINAÇÃO FINAL DE LODO PÓS DESÁGUE

Para o objetivo 3, será feito a avaliação da alteração das formas de transporte e destinação final do lodo seco.

No que tange ao transporte, ele deixará de ser realizado através de caminhão poliguindaste e passará a ser executado por carretas basculantes (que apresentam uma maior capacidade de transporte de carga) e a destinação deixará de ser realizada em aterro sanitário, localizado nos arredores de Macaé e passará a ser feito em uma fazenda de compostagem em Cachoeira de Macacu. Na (Figura 26), é apresentado a carreta que está sendo proposta para realizar o transporte do lodo, sua capacidade de transporte é de 18,8 toneladas por viagem.

Figura 26 – Modelo Carreta Basculante



Fonte – O autor (2023)

Conforme verificado na (Tabela 41), o valor total gasto com transporte de lodo, terá um aumento considerável, em função, principalmente do aumento da distância em relação ao local de destinação final de lodo, no entanto, o valor final pago para destinação de R\$ 104,50 por tonelada (Vide Verde, 2023) é muito inferior ao atual valor de destinação R\$ 260,00 por tonelada. Este valor de destinação final está mais próximo dos valores referenciados em outros estudos, o que pode indicar que o município de Macaé e arredores, apresenta uma situação mais específica em relação à disponibilidade de destinação final, pelo lodo de ETE, do que outras regiões.

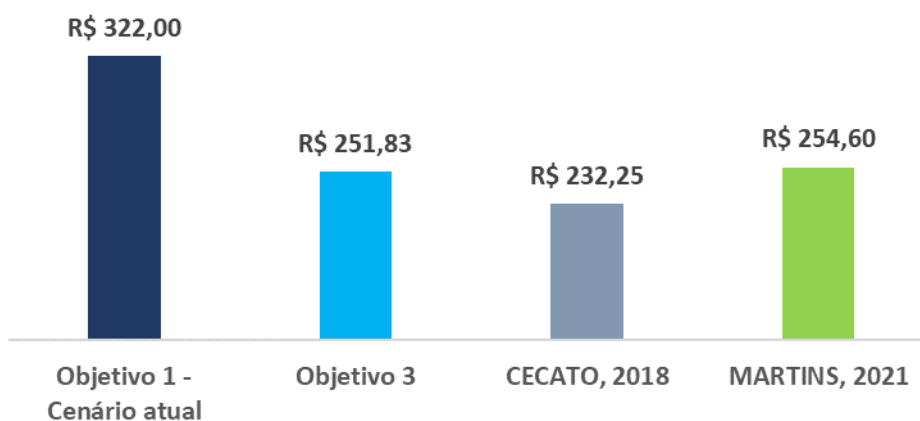
Tabela 41 – Composição custo – Transporte e destinação de lodo seco – Objetivo 3

Equipamento	Transporte mensal de lodo (t.mês ⁻¹)	Capacidade de transporte (t.viagem ⁻¹)	Nº de viagens mês	Distância (Ida + Volta) – Aterro (km)	R\$.km para transporte ⁻¹	Custo mês. Transp ⁻¹
Carreta Basculante – Origem ETE Lagomar	116,1	18,8	7	342	8,00	19.152,00
Carreta Basculante – Origem ETE Centro	291,9	18,8	16	320	8,00	40.960,00
Custo para transporte (R\$.mês ⁻¹)						60.112,00
Custo para destinação – R\$.t ⁻¹						104,50
Custo Total com destinação (R\$.mês ⁻¹)						42.636,00
Custo Total (transporte + destinação) – R\$.mês ⁻¹						102.748,00

Fonte – O autor (2023)

No que tange aos custos com transporte e destinação de lodo, conforme (Figura 27) foi verificado uma redução significativa entre a situação atual (Objetivo 1) e a proposta de alteração do Objetivo 3.

Figura 27 – Custo transporte e destinação do lodo seco por tonelada



Fonte – O autor (2023)

O valor encontrado no cenário atual, encontra-se acima dos valores encontrados por (CECATO, 2018) e (MARINS, 2021). O primeiro ao analisar os custos com transporte e destinação de lodo de algumas ETEs do estado de Santa Catarina, encontrou um valor médio de R\$ 232,25 por tonelada. Já o segundo, analisando os custos com transporte e destinação de lodo ETE no município de Botucatu, encontrou o valor de R\$ 254,60 por tonelada de lodo destinado.

Já se compararmos o valor para transporte e destinação verificado no Objetivo 3 com os encontrados na literatura, verifica-se que eles estão bem semelhantes (Figura 28). O valor encontrado por Martins (2021) foi de R\$254,60 por tonelada de lodo transportado e destinado nas ETEs em Botucatu-SP, ao valor encontrado para as ETEs estudadas por Cecato *et al.* 2018, de R\$ 251,83.

Já na (Tabela 42), são tabulados os custos totais mensais com o gerenciamento de lodo dos 4 cenários analisados, bem como seus respectivos valores de R\$.t⁻¹.

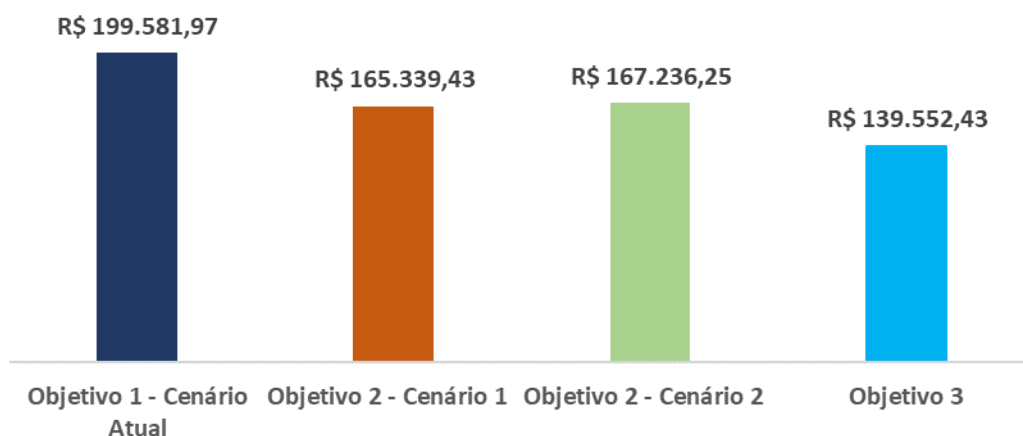
Tabela 42 – Composição OPEX Gerenciamento de Lodo – Comparativo

Item analisado	Objetivo 1 - Cenário Atual	Objetivo 2 – Cenário 1	Objetivo 2 – Cenário 1	Objetivo 3
Transporte Lodo – Úmido (R\$.mês⁻¹)	51.397,50	15.592,50	-	15.592,50
Consolidado - Opex – Centrífugas (R\$.mês⁻¹)	16.529,47	21.211,93	19.932,61	21.211,93
Consolidados – Opex – Leitões de Secagem (R\$.mês⁻¹)	-	-	10.143,64	-
Consolidado - Trans. e Destinação final (R\$.mês⁻¹)	131.655,00	128.535,00	137.160,00	102.748,00
Opex TOTAL	199.581,97	165.339,43	167.236,25	139.552,43
Valor R\$.t⁻¹	489,17	405,24	409,89	342,04

Fonte – O autor (2023)

Analisando a (Tabela 42) e o (Figura 28) e comparando o melhor cenário do Objetivo 2 (Cenário 1), que avalia alternativas para descentralização do sistema de desaguamento de lodo, é possível reduzir o custo médio mensal de com gerenciamento de lodo de R\$ 165.339,43 para R\$ 139.552,43, uma economia de R\$ 25.787,00 (15,5% de redução). somente alterando o tipo de equipamento de transporte e o local para destinação final de resíduos.

Figura 28 – Custo mensal gerenciamento de lodo



Fonte – O autor (2023)

Já analisando o ganho econômico do Objetivo 3 em relação ao Objetivo 1, verificasse uma redução no custo médio mensal de gerenciamento de lodo de R\$ 60.029,54, ou 30%, em relação ao que é praticado hoje. Ampliando o período de avaliação para 12 meses, verifica-se que em 1 ano, com as alterações propostas, pode-se alcançar uma redução de mais de R\$ 700.000,00. Essa redução é ainda mais impactante se pensamos no horizonte de 30-35, considerando a duração dos contratos de concessão assinados recentemente, como por exemplo, se avaliarmos o horizonte de um tempo médio de duração de um contrato de concessão, como assinado em 2020 entre a Companhia de Saneamento de Alagoas (CASAL) e a BRK Ambiental, de 35 anos. (BRK,2023).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, foi possível avaliar todo o contexto de gerenciamento de lodo, desde a sua geração, transporte entre ETEs, operação de sistema de desaguamento até o seu transporte para destinação final.

Os resultados encontrados no Objetivo 1, trouxeram uma perspectiva não somente da produção de lodo, como de custo total do seu gerenciamento, para as Estações de Tratamento de Esgoto em operação no município de Macaé-RJ, podendo ser destacar os seguintes itens:

- A produção mensal de lodo, pós desaguamento em centrífuga foi de 408 toneladas, distribuídos da seguinte forma: Centro: 267,8 t, Mutum: 24,1 t., Lagomar: 96,9 t., Sana e Glicério, cada um produzindo 9,6 toneladas por mês. A produção de lodo verificada na ETE Lagomar é causada não somente pela sua carga afluyente, mas também pela opção de tecnologia de tratamento aplicada, que possui um maior coeficiente de produção de lodo.

- O transporte de lodo úmido entre ETEs representa um custo significativo no OPEX deste gerenciamento, tendo vista os valores praticados na região. Além disso, as distâncias entre as unidades operacionais e a escolha por tecnologias de tratamento que apresentam um maior coeficiente de produção de lodo podem impactar ainda mais esta questão.

- O elevado custo, para transporte e destinação final de lodo seco, especialmente a destinação final em aterro, indica a necessidade de buscar novos parceiros para destinação final, já que o valor encontrado em outras referências no Rio de Janeiro, foi de 160 R\$ por tonelada, citado por (Bielshowski 2014). No entanto, os estudos mais atuais de Cecato (2018) e Tsutsui (2021) avaliando custos de destinação de lodo no estado de Santa Catarina e Botucatu, respectivamente, R\$232,25 e R\$254,60, indicam valores mais próximos do encontrado em Macaé.

- O valor final do custo mensal encontrado com o gerenciamento do lodo das ETEs estudadas, R\$ 199.581,97 (R\$ 489,17 por tonelada) indicam o quão significativo a gestão do lodo no contexto da Operação das ETEs.

Já no Objetivo 2, no qual foram propostas alternativas de otimização do sistema atual, conclui-se que:

- A descentralização dos sistemas de desaguamento de lodo demonstrou ser uma alternativa bastante viável do ponto de vista econômico haja vista os valores R\$.t⁻¹ alcançados nos dois cenários estudados, ambos inferiores em 17,2 e 16,2% em relação ao cenário atual;

- A alternativa de otimização da centrífuga já existente na estação do Lagomar, se mostrou mais viável do que a alternativa de construção e operação de leitos de secagem nas unidades de Sana, Glicério e Mutum. Tal fato, pode ser justificado pelo baixo custo operacional das centrífugas e o fato de não ser necessário a realização de investimento para a aquisição deste equipamento.

- Outro fato observado neste cenário é que as centrífugas alteram muito pouco seu custo operacional em função de pequenas alterações no volume de lodo. Ou seja, a partir do momento que já existe o equipamento disponível, o mesmo deve ser demandado.

Sobre o Objetivo 3 é possível destacar as seguintes conclusões:

- A análise dos custos com transporte e destinação, devem contemplar não somente as distâncias entre a unidade geradora e a receptora, como também a capacidade de transporte dos equipamentos;

- O valor encontrado para destinação final, através da compostagem do lodo, indica que essa forma de destinação está se tornando mais viável do ponto de vista financeiro, além de atestar elevado valor R\$ por tonelada praticado nos arredores de Macaé-RJ, considerando a destinação em aterro.

- A otimização da unidade de tratamento de lodo da ETE Lagomar e demais ações propostas no melhor cenário do Objetivo 2, somado às alterações indicadas no Objetivo 3, conseguirá promover uma redução do custo mensal com gerenciamento de lodo das unidades de Macaé de aproximadamente 30%, com uma economia de mais de R\$700.000,00 reais ano.

Por fim, quanto à situação atual do gerenciamento de lodo em Macaé, foi possível verificar que as ações propostas são viáveis do ponto de vista técnico e financeiro e, no caso de serem implantadas, trarão uma redução no custo mensal com gerenciamento de lodo produzido nas ETEs. No entanto, cabe afirmar a necessidade de se buscarem não só novas formas de aproveitamento desse subproduto das ETEs, como também tecnologias de desaguamento que consigam entregar em larga escala um lodo com índices inferiores de umidade.

Para futuros estudos, seria importante que fossem analisados custos para implantação e operação de sistema de compostagem e a viabilidade das próprias concessionárias de esgoto realizarem esse tipo de atividade ao invés de destinarem o lodo seco às fazendas de compostagem. Além disso, para melhor planejamento das práticas a serem aplicadas no gerenciamento de lodo seria importante elaborar a projeção dos avanços dos índices de coleta e tratamento de esgoto previstos para os próximos anos.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004. 71p.

AMARAL, Karina Guedes Cubas; AISSE, Miguel Mansur; POSSETTI, Gustavo Rafael Collere. Avaliação da sustentabilidade no gerenciamento do lodo e biogás, em estação de tratamento de esgotos, utilizando a técnica de ACV. **Revista DAE** | São Paulo | v. 68, n 226 / pp 06-17 | Out a Dez, 2020.

ANDREOLI, C.V., VON SPERLING, M., FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Vol. 6. UFMG – SANEPAR. 2014.

ANEEL – **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Base de Dados das Tarifas das Distribuidoras de Energia Elétrica. Disponível em: <https://portalrelatorios.aneel.gov.br/luznatarifa/basestarifas>. Acesso: jan.2023.

Aziz, A., Basheer, F., Sengar, A., Irfanullah; Khan, S. U., Farooqi, I. H. Biological wastewater treatment (anaerobic-aerobic) technologies for safe discharge of treated slaughterhouse and meat processing wastewater. **Science of the Total Environment**, v. 686, p. 681-708, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.295>

BARROS, KK *et al.* Valoração e gerenciamento dos subprodutos sólidos do tratamento do esgoto. Parte A: Higienização e uso de lodo de esgoto no solo Nota Técnica 1 – Tópicos de interesse. Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, 2022.

BIELSCHOWSKY, M. C. **Modelo de gerenciamento de lodo de Estações de Tratamento de Esgotos: aplicação do caso da bacia da baía de Guanabara**. Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2014.

BARBOSA, E.M. **Avaliação do impacto de lodos de estações de tratamento de água à biota aquática através de estudos ecotoxicológicos**. São Carlos, 2000. 200 f. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.

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. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-168/2015, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015. 197p.

BETTIOL, W., CAMARGO, O. A. **Lodo de esgoto:** Impactos ambientais na agricultura. 1. ed. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006.

BEZERRA, V. G. de S. *et al.* Desempenho de estação de tratamento de esgoto doméstico no semiárido brasileiro e potencial de seu efluente para fins de irrigação. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 4, p. 36159-36174, 2021.

BIAS, Gerlandia Soares. **Tratamento de águas residuárias em Sistema Biológico Combinado:** reator anóxico seguido de reator aeróbio com meio suporte imobilizado. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Estadual da Paraíba, PB, 2020.

BITTENCOURT, Simone; AISSE, Miguel Mansur; SERRAT, Beatriz Monte. Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do estado do Paraná, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, p. 1129-1139, 2017.

BORJA, Patrícia Campos. Política pública de saneamento básico: uma análise da recente experiência brasileira. **Saúde e Sociedade**, v. 23, p. 432-447, 2014.

BORTOLINI, R.L.R. **Composto orgânico de lodo de reator UASB e casca de café: Qualidade e oportunidades para produção e uso agrícola em Minas Gerais.** Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.

BORSOI, Z. *et al.* **Tratamento de esgoto:** tecnologias acessíveis. Informe Infra-Estrutura: Área de Projetos de Infra-Estrutura, 2013.

BRAGA, B. (coord.). **Introdução à engenharia ambiental**. Prentice Hall, 2002.

BRASIL. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Lei Federal n. 11.445**, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis n. 6.766, de 19 de dezembro de 1979; 8.036, de 11 de maio de 1990; 8.666 de 21 de junho de 1993; 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei n. 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Brasília, DF, 2007.

BRASIL. Sistema Nacional de Informações sobre a gestão de resíduos sólidos. 2021. Disponível em: <https://sinir.gov.br/relatorios/nacional/>. Acesso em abril.2023

BRASIL. **Decreto nº 7.404**, de 23 de dezembro de 2010.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 2 de agosto de 2010.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 357**, de 17 de março de 2005.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 375**, de 29 de agosto de 2006.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 498**, de 19 de agosto de 2020.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Instrução Normativa nº61**, de 08 de julho de 2020.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 430**, de 13 de maio de 2011.

BRASIL. Resolução CONAMA nº481, de 3 de outubro de 2017.

CASTRO, Alfred Luciano Gomes de Castro *et al.* Cenário da disposição do lodo de esgoto. **Multi-Science Journal**, 1(2):66-73. 2015.

CECATO *et al.* Estimativa dos custos de operação de um biorreator com membrana. Revista DAE. Vol.67. 2018.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares.** 2011. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/publicacoes-e-relatorios/1-publicacoes/-relatorios>>. Acesso em jan. 2023.

CERQUEIRA, Pedro Lindstron Wittica. **Custos de desaguamento e higienização de lodo em ETEs com reatores UASB seguidos de pós-tratamento aeróbio: subsídios para estudos de concepção.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

CHERNICHARO *et al.* Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas. **Revista DAE**, nº213, 2018.

CORDEIRO, J. S. Gerenciamento Integrado de Resíduos de Estações de Tratamento de Águas. Anais. In: **20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, cd, I-062.** 2001.

CUNHA, F. **Avaliação do lodo de uma estação de tratamento de esgoto visando sua potencial utilização na agricultura.** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro. Minas Gerais. 2017.

DA SILVA ALVARENGA, Alessandra. **Avaliação do Programa de Controle do Culicídeo Vetor (*Aedes aegypti* Linnaeus, 1762) no Município de Macaé.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Campus Macaé. Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais e Conservação.2017.

DANIEL, D. Devanir. **Avaliação de processos biológicos utilizados no tratamento de efluentes de laticínios.** Dissertação de mestrado. Universidade de Ribeirão Preto. Programa de Pós Graduação em Tecnologia Ambiental.2008.

DAVIS, R. D., HALL, J. E. **Production, Treatment and Disposal of Wastewater Sludge in Europe from a UK perspective**. v.7, n.2. European Water Pollution Control, 1997.

DUMONTET, S.; SCOPA, A.; KERJE, S., KROVACEK, K. The importance of pathogenic organism in sewage and sewage sludge. **Air & Waste management**. v.51, p.848-860, 2001.

ECOLOGIKA. Informações Dissertação – Bernardo Melo [mensagem pessoal]. Mensagens recebidas por: <bmelo@poli.ufrj.br>. Janeiro de 2023.

ECOSAN, **Destinação Final de Lodos de ETAs e ETEs**. 2014. Disponível em: <http://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/destinacao-final-de-lodos-de-et-as-e-et-es/>. Acesso: jan.2023.

EUZEBIO, Camilla Szerman. **Concentração Atmosférica de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos e estimativa de Benzo[a]Pireno-equivalente em área industrial/urbana litorânea – Estudo de caso: Macaé, RJ**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Campus Macaé. Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais e Conservação.2020.

EWERT, W *et al.* Sustainable sewage sludge management fostering phosphorus recovery and energy efficiency. **Main P-REX deliverables – Sludge processes**, 2017.

FEITOSA, F. A. C., MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia** – Conceitos e Aplicações. 2. ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000. 391 p il.

Feng, L., Luo, J. & Chen, Y. Dilemma of Sewage Sludge Treatment and Disposal in China. *Environ. Sci. Technol.* 49, 4781–4782 (2015).

FERNANDES, F. Estabilização e Higienização de Biossólidos. In: BETIOL, W; CAMARGO, O. A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa, 2000. p. 45-68.

FESTI, Aparecido Vanderlei. **Estimativa da infiltração e do afluxo devidos à precipitação na rede de esgoto sanitário em município de pequeno porte**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

FOCO, M. L. R e NOUR, E. A. A. Desempenho de Sistema Combinado Anaeróbio-Aeróbio na Remoção de Nitrogênio no Tratamento de Esgoto Sanitário. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, vol. 35, nº 2, p. 131-138, jul./dez. 2014.

FOSTER, S; HIRATA. R; GOMES. D; D'ELIA. M; PARIS. M. Groundwater Quality Protection: A Guide for Water Service Companies, Municipal Authorities, and Environment Agencies. 2006.

FREIRE, Renato Sanches *et al.* Novas tendências para o tratamento de resíduos industriais contendo espécies organocloradas. **Química nova**, v. 23, p. 504-511, 2012.

FREITAS, Daiane Cristina de. **Remoção de nitrogênio e fósforo do esgoto sanitário por reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo (RAALF), com recirculação da fase líquida**. 2016. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental. Área de concentração: Tecnologias e Processos Ambientais. 2016.

FREITAS, Juliana Gardenalli de; FERREIRA FILHO, Sidney Seckler; PIVELI, Roque Passos. Viabilidade técnica e econômica da regeneração de coagulantes a partir de lodos de estações de tratamento de água. **Eng. sanit. ambient**, p. 137-145, 2005.

FREITAS, Neurisangelo Cavalcante *et al.* Proposta de um sistema de apuração de custos para empresas de saneamento: um estudo de caso na companhia de água e esgoto do Ceará-Cagece. In: **Anais do Congresso Brasileiro de Custos-ABC**. 2009.

FROTA, Thais Braga. **Análise de viabilidade técnica e financeira de alternativas de processos para desidratação de lodos de estações de tratamento de água**. Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2020.

GIORDANO, G., SURERUS, V. **Efluentes industriais**: estudo de tratabilidade. Rio de Janeiro: Publit, 2015.

BRK. Nossa atuação em Alagoas. Disponível em: <<https://www.brkambiental.com.br/nossa-atuacao>> Acesso: Abril.2023.

GONÇALVES, R. F., LUDUVICE, C. A. L., ANDRADE NETO, C.O. et. al. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por reatores com biofilme**. In: CHERNICHARO, C. A. L. (Org.). Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Rio de Janeiro, 2001.

GONÇALVES, Ricardo F. Soluções de Tratamento de Esgoto para Pequenas Comunidades e Loteamentos. **Curso da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental–ABES. Espírito Santo**, 2016.

GUIMARAES, Andrea Aparecida de Sousa. **Utilização do resíduo de goiaba (Psidium guajava L.) na alimentação de poedeiras comerciais**. Dissertação de mestrado. Universidade Rural de Pernambuco, Departamento de Zootecnica. 2007.

IBGE – **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. IBGE Cidades. Disponível em: <https://ibge.gov.br/cidades-e-estados/rj/macae.html>. Acesso: jan.2023.

INCT - Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em ETESs Sustentáveis. Proposta que define critérios para uso do lodo de esgoto em solos. 2020. Acesso em: abril.2023

JORDÃO, E. P. e PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. Rio de Janeiro: ABES, 3. ed. 1995.

KISHI, Tiemy. **Tratamento e disposição de lodo de esgoto**. UFPR, 2015. Disponível em: https://docs.ufpr.br/~rtkishi.dhs/TH029/TH029_15_Lodos.pdf. Acesso em: jan.2023.

KUNH, Sheila Simone. **Viabilidade técnica e econômica da produção de briquetes de lodo do tratamento primário de efluente avícola e serragem**. Tese (Doutorado), UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE. Cascavel – PR, 2022.

LAMASTRA, Lucrezia; et al. **Sewage sludge for sustainable agriculture: contaminants' contentes and potential use as fertilizer**. Chemical and Biological Technologies in Agriculture. Piacenza, Italy, 2018.

LEITE, C.H.P. *et al.* Novo marco legal do saneamento básico: alterações e perspectivas. Revista Engenharia Sanitária Ambiental, 2022.

LINS, Thomás Correia; DE LIMA, André Suêlto Tavares. Lodo de Esgoto como alternativa de fertilização agrícola para o município de Igaci-AL. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 8, p. e13511830461-e13511830461, 2022.

LIU, Y., LEI Y., YIN XI, LIAO, Z., ZHANG, X. High-load domestic wastewater treatment using a combined anaerobic-aerobic bio-filter with coal cinder as medium. **Environmental Technology**, vol. 39, n. 1, p. 102-108, 2017.

LOBO, T.F., GRASSI FILHO, H., BULL, L.T., KUMMER, A.C.B. Efeito do lodo de esgoto e do nitrogênio nos fatores produtivos do girassol. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.17, p.504-509, 2013.

LORENCETTI, G.T. **Lodo de ETE agroindustrial**: Uso agrícola e produção de Biochar. Tese. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2022.

LMC. Dados Dissertação – Bernardo Melo [mensagem pessoal]. Mensagens recebidas por: <bmelo@poli.ufrj.br>. Janeiro de 2023.

LUDUVICE, M., FERNANDES, F. Principais tipos de transformação e descarte do lodo. In: C. V. ANDREOLI; M. VON SPERLING & F. FERNANDES (Ed.). **Lodo de esgotos**: Tratamento e disposição final. Belo Horizonte: DESA/UFMG, v.6, 2001. p. 399-423.

KRUSZYNSKI, **A plan for sludge treatmentfor wastewater treatment plants of different size**. Sludge Technological Ecological Progress increasing the quality and reuse of sewage sludge contentes. European Union, 2020.

MACAÉ. Prefeitura Municipal. **Revisão do Plano Municipal de Saneamento Básico – Produto 7 – Tomo IV – Limpeza Urbana e Manejo de Resíduos Sólidos**. Macaé, 2021.

MACAÉ. Prefeitura Municipal. **Revisão do Plano Municipal de Saneamento Básico – Produto 7 – Tomo II – Esgotamento Sanitário**. Macaé, 2021.

MACAÉ. Prefeitura Municipal. Informações socioeconômicas. Disponível em: <https://macae.rj.gov.br/cidade/conteudo/titulo/informacoes-socioeconomicas>. Acesso: jan.2023.

MANOEL FILHO, J. **Contaminação da água subterrânea**. In: FEITOSA, F. A. C. & MANOEL FILHO, J. Hidrologia: conceitos e aplicações. Fortaleza: CPRM, UFPE, 2000. p. 109-114.

METCALF & EDDY *et al.* **Wastewater engineering: treatment and resource recovery**. McGraw Hill Education, 2002.

METCALF & EDDY *et al.* Tratamento de efluentes e recuperação de Recursos [recurso eletrônico], tradução: Ivanildo Hespanhol, José Carlos Mierzwa – 5. Ed - 2016.

MEDEIROS, Daniel Reis. **Eficiência, sedimentabilidade e composição da microfauna de sistemas de lodos ativados de fluxo contínuo e em batelada, removendo nitrogênio**. Porto Alegre, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

OLIVEIRA *et al.* Processos biológicos para o tratamento de efluentes: uma revisão integrativa. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**. p.397-415, 2021.

PASTERNAK, S. Habitação e saúde. **Revista USP**.v.30, n. 86, p. 51-66, 2016.

PELETEIRO, C. S., ALMEIDA, M. L. R. de. **Dimensionamento, análise e comparação da viabilidade econômica de uma estação de tratamento de esgotos utilizando os processos**

de lodos ativados convencional e aeração prolongada. Rio de Janeiro, 2014. Projeto de graduação (Engenharia Ambiental) UFRJ/Escola Politécnica.

PEREIRA, C. M. Cultivo de peixes em efluentes domésticos provenientes de lagoas de estabilização. **Anais do 22o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 1, p.10–18, 2003.

PONCE, Francisco de Assis Martins; ROLLEMBERG, Silvio Luiz de Sousa; OLIVEIRA, André Gadelha de. **Aplicação da análise de confiabilidade para avaliação de estações de tratamento de esgoto no estado do Ceará.** 2019.

ROMAN, N. **Microbial environmental risks associated sewage sludge disposal.** Journal of Microbiological Biotechnology, Troy, v. 3, n. 2, p. 000131, 2018.

ROSÁRIO, T. M. da S. **Aplicação do sistema combinado por filtro anaeróbio seguido de biofiltro aerado submerso ao tratamento de esgotos sanitários de unidades residenciais unifamiliares.** 2016. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

ROSS, J. L. S. Geomorfologia ambiental. In: CUNHA, S. B. da C; GUERRA, A. J. (org.). **Geomorfologia do Brasil.** 4. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006. p. 351-388.

ROSS, J. L. S. Geomorfologia aplicada aos EIA-RIMASl. In: CUNHA, S. B. da C., GUERRA, A. J. (org.). **Geomorfologia e meio ambiente.** 4. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. p. 291-336.

SANTOS, Filipe Nepomuceno Bicalho. **Análise comparativa dos custos operacionais de 44 estações de tratamento de esgoto na região sudeste do Brasil.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, 2018.

SANEVIX. Dados Dissertação – Bernardo Melo [mensagem pessoal]. Mensagens recebidas por: <bmelo@poli.ufrj.br>. Janeiro de 2023.

SHARMA, B., SARKAR, A., SINGH, P., SINGH, R.P. Agricultural utilization of biosolids: A review on potential effects on soil and plant grown. **Waste Management**, v. 64, p. 117–132, 2017.

SILVA, Alessandra; VON SPERLING, Marcos; OLIVEIRA FILHO, José Maria. Avaliação das unidades de tratamento do lodo em uma ETE de lodos ativados convencional submetida a distintas estratégias operacionais. **Engenharia Sanitária e ambiental**, v. 12, n. 2, p. 127-133, 2007.

SILVA, Ana Paula Moni. Lodo de leito de secagem (LLS): Caracterização, aproveitamento energético e avaliação do ciclo de vida. Tese. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá/MG, 2016.

SILVA, Gustavo H. R; NOUR, Edson A. A. Reator compartimentado anaeróbio/aeróbio tratando esgoto sanitário operado a diferentes tempos de detenção hidráulica. In: VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Anais...** Vitória/ES. 2002.

Silva, T. M. R. **Aplicação de sistema combinado por filtro anaeróbio seguido de biofiltro aerado submerso ao tratamento de esgotos sanitários de unidades residenciais unifamiliares**. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2016.

Silva, V. E. M. **Tratamento de efluentes vinícolas por processos biológicos**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal, 2015.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto – ano de referência 2020. dos Serviços de Água e Esgotos**. Brasília: SNS/MDR, 2021.

SOUZA, Bruno de Medeiros; DUARTE, Marco Anton.io Calazans; TINÔCO, Juliana Delgado. Custos de operação e manutenção de estação de tratamento de esgotos por reator anaeróbio e lodos ativados. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, p. 505-515, 2021.

SOUZA, Tatiane Pereira. Tratamento do lodo de esgoto por compostagem: uso agrícola do composto e a redução da emissão de gases do efeito estufa. Dissertação. Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 2022.

SOUZA, Valter Rodson da Silva. **Estudo da eficiência de digestores anaeróbios de fluxo ascendente em série**. Monografia. Colegiado de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana – BA, 2008.

TEIXEIRA PINTO, M.T. Higienização de lodos. In: ANDREOLI, C.V., VON SPERLING, M., FERNANDES, F. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Vol. 6. UFMG – SANEPAR. 2001.

TEIXEIRA, Rossana Borges. **Avaliação do ciclo de vida regionalizada dos sistemas de tratamento de esgoto sanitário**. Tese. Universidade Federal Paulista. Bauru/SP, 2022.

TINÔCO *et al*, 2021. Custos de operação e manutenção de estação de tratamento de esgotos por reator anaeróbio e lodos ativados. **Caderno Engenharia Ambiental e Sanitária**, 2021.

TON.ETTI, A.L. *et al*. Tratamento de esgoto e produção de água de reúso com o emprego de filtros de areia. **Eng Sanit Ambient** | v.17 n.3 | jul/set 2012 | 287-294.

TRANSPACHECO. Dados Dissertação – Bernardo Melo [mensagem pessoal]. Mensagens recebidas por: <bmelo@poli.ufrj.br>. Janeiro de 2023.

TSUTIYA, M. T. Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgoto. In: BETTIOL, W., CAMARGO, O.A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p.69-105.

TSUTIYA, M. T., BUENO, R. C. R. Contribuição de águas pluviais em sistemas de esgoto sanitário no Brasil. **Seminários Redes de Esgoto Sanitários e Galerias de Águas Pluviais: Interferências e Interconexões** - São Paulo, n. 1, p. 6, 2004.

TSUTSUI, Maura Seiko *et al.* Análise econômica da produção de lodo de esgoto compostado para fins agrícolas na estação de tratamento de esgoto de Botucatu-SP. **Energia na Agricultura**, v. 36, n. 2, p. 218-229, 2021.

URBAN, Rodrigo Custodio; ISAAC, R. de L., MORITA, Dione Mari. Uso benéfico de lodo de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto: estado da arte. **Revista DAE**, v. 67, n. 219, p. 128-158, 2019.

VALENTE, V. B. **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em estações de Tratamento de Esgoto no Brasil**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

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

VIDEVERDE COMPOSTAGEM. Dados Dissertação – Bernardo Melo [mensagem pessoal]. Mensagens recebidas por: <bmelo@poli.ufrj.br>. Janeiro de 2023.

VON SPERLING, Marcos. **Lodos ativados**. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

VON SPERLING, M., GONÇALVES, R.F. **Sludge characteristics and production**. In.: ANDREOLI, C., VON SPERLING, M., FERNANDES, F. (Eds.) *Sludge Treatment and Disposal*, London: IWA Publishing, p. 4-30, 2001.

VON SPERLING, Marcos. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental: Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

VON SPERLING, Marcos. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

VON SPERLING, Marcos. **Lodos ativados**. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

WASSERMAN, Julio Cesar *et al.* Mercury contamination in the sludge of drinking water treatment plants dumping into a reservoir in Rio de Janeiro, Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 28713-28724, 2018.

YANG, K., YUE Q., HAN W., JIAOJIAO K., BAYOU G., ZHAO P., DUAN LIAN. Effect of novel sludge and coal cinder ceramic media in combined anaerobic–aerobic biofilter for tetracycline wastewater treatment at low temperature. **Chemical Engineering Journal**, vol. 277, n. 1, p.130–139, out. 2015.

ZHOU, G. *et al.* Selecting sustainable technologies for disposal of municipal sewage sludge using a multi-criterion decision-making method: A case study from China. **Resources Conservation and Recycling**, v.161, p. 104881, 2020.

ZOPPAS; *et al.* Parâmetros operacionais na remoção biológica de nitrogênio de águas por nitrificação e desnitrificação simultânea. **Revista Engenharia Ambiental**, v.21, p29-42, 2016

ZOBY JUNIOR, Luiz Carlos. **Aplicação do modelo ASM1 na simulação das condições operacionais de uma estação de tratamento de efluentes por lodo ativado**. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.