908 – ALTERNATIVA TÉCNICA-ECONÔMICA DE REDUÇÃO DE CUSTOS DO SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE LODO DO MUNICÍPIO DE MACAÉ

Bernardo Henrique Silva Melo[(1)]
Engenheiro Ambiental (FUMEC) e mestre em Engenheria Ambiental (UFRJ).
Felipe Sombra dos Santos[(2)]
Engenheiro Químico pela PUC-Rio. Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais na área de Engenharia de Processos e Meio Ambiente pela PUC-Rio. Especialista em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Escola Nacional de Saúde Pública da Fundação Osvaldo Cruz (FIOCRUZ). Doutor em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da UFRJ. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Bioquímica da Escola de Química da UFRJ.
Isaac Volschan Jr.
Engenheiro Civil e Sanitarista. Prof. Titular. Depto. de Recursos Hídricos e Meio Ambiente da Escola Politécnica da UFRJ
Endereço[(1)]**:** Rua Três Corações, 300 Calafate – Belo Horizonte – Minas Gerais - 30411-293 - Brasil - Tel: +55 (31) 99875-5825 e-mail: bernardohsmelo@gmail.com

RESUMO

O lodo de esgoto é um resíduo gerado durante o processo de tratamento de esgoto sanitário, através dos processos de decantação primária, biológico ou químico. O gerenciamento desse tipo de material 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 90% da população tenha acesso ao serviço de esgotamento sanitário, o que deve aumentar substancialmente a geração de lodo de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). No Brasil, a principal forma dedestinação de lodo das ETEs 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 aplicado na agricultura. Neste contexto, este trabalho estimou o volume total de lodo produzido pelas ETEs existentes no município de Macaé-RJ, bem como estimou as despesas operacionais (OPEX) totais com o gerenciamento de lodo. Além disso, foi avaliado de forma técnica e econômica os 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 os 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 mensal total de lodo seco foi de 408 toneladas, 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 ao 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. Esta opção seria a mais ambientalmente adequada, conforme preconiza os princípios de desenvolvimento sustentável das ODS e do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituído pela Lei Federal n°10.305 de 2010.

PALAVRAS-CHAVE: Lodo de esgoto, custo gerenciamento de lodo, redução de custo.

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 n° 498 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 2024 (ABNT, 2024), o lodo gerado nas ETEs, é classificado como Resíduo Não Perigoso de Entrada Única – RNP-U (código 19 06 03 00). 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 na Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS. Neste contexto, em 2020, foi publicada a Resolução CONAMA n° 498, que tem como objetivo estabelecer critérios e procedimentos para a produção e aplicação de biossólidos.

O manuseio de enormes quantidades de lodo acarreta na 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 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, foi estimada a geração de 2,5 milhões de toneladas de lodo proveniente de ETEs (BRASIL, 2021). Com o estabelecimento do Marco Legal do Saneamento no qual é previsto que 90% da população deva ter acesso à coleta e tratamento de esgoto até 2033 (BRASIL, 2020), o que deve aumentar de forma considerável a geração de lodo MARTINS et al. (2021).

No entanto, mesmo que, a disposição final desse material seja bastante complexa e onerosa, 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, 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 as 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.

OBJETIVOS

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.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Macaé pertence ao estado do Rio de Janeiro, e está situada na região Norte Fluminense. De acordo com o IBGE (2021), a cidade 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 Morais e Nova Friburgo. A leste, com o Oceano Atlântico. Na Figura 1 é apresentado o mapa de localização do município de Macaé.

Figura 1 – 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 (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 Mutum, ETE Centro, ETE Lagomar, ETE Sana..

Na Figura 2 é ilustrado o mapa com as localizações das ETEs que foram objeto de estudo, bem como o

descritivo das etapas de tratamento de cada uma delas.

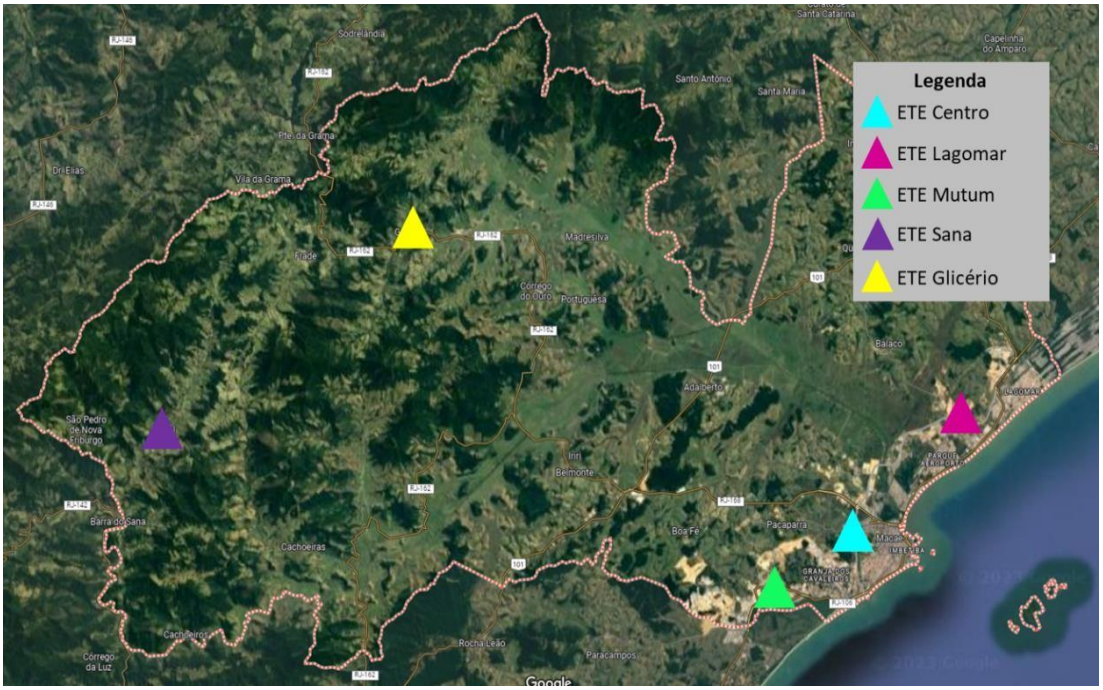


Figura 2 – Localização das ETEs objeto do estudo
Fonte: Adaptado de Macaé (2021).

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. Está 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 filtrantee 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 (NH_3) e Nitrato ($N\text{-}NO_3$).
- **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 3, é apresentado um fluxograma básico das etapas de tratamento da ETE Centro,após o pré-tratamento.

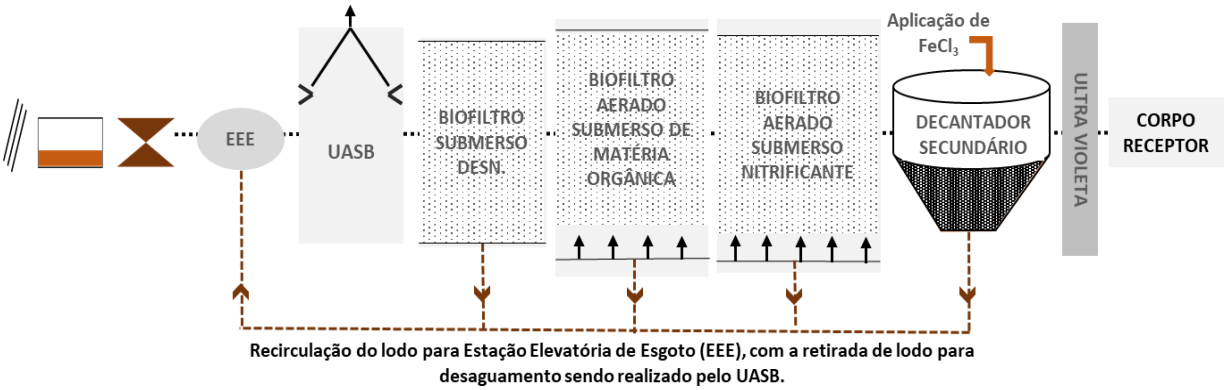


Figura 3 – Fluxograma etapas de tratamento – ETE Centro

De acordo com os dados apresentados no Plano de Saneamento do ano de 2019, a ETE tratou uma vazão média igual a 56,67 $L.s^{-1}$. No que tange à carga orgânica, em 2019, recebeu uma concentração média de DBO igual a 286,96 $mg.L^{-1}$. Aplicando a relação DQO/DBO – 2,4 (Von Sperling, 2005), a unidade apresentou uma DQO de 688,72 $mg.L^{-1}$. 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.

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. A Figura 4 representa o fluxograma da ETE Mutum.

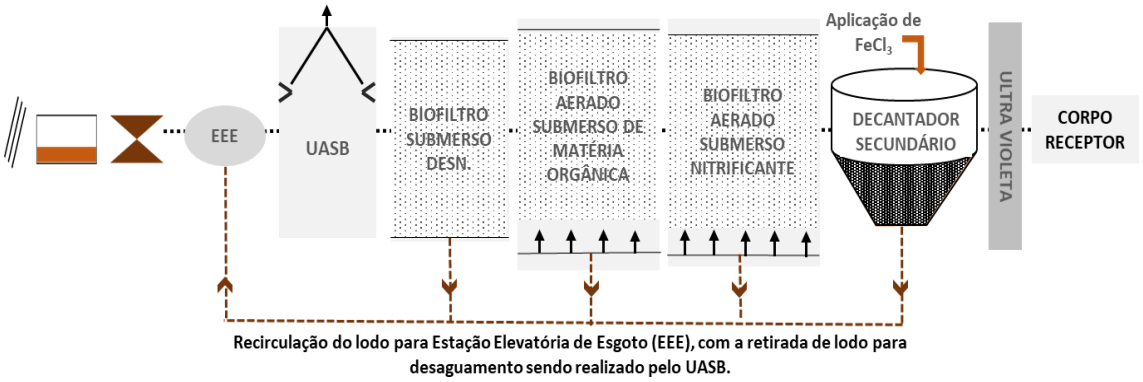


Figura 4 – Fluxograma etapas de tratamento – ETE Centro

Nas Figuras 5 (a) e 5 (b) são possíveis de verificar a configuração dos tanques de tratamento, bem como do sistema de desinfecção.

Figura 5 (a) – Fotos dos módulos de tratamento. (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 $L.s^{-1}$. No que tange à carga orgânica, em 2019, recebeu uma concentração média de DBO igual a 134,73 $mg.L^{-1}$. Aplicando a relação DQO/DBO – 2,4 (Von Sperling, 2005), a unidade apresentou uma DQO de 323,36 $mg.L^{-1}$. Para efeito deste estudo foi 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, através do uso de caminhões tanque (20m³).

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 a outorga da estação indica uma vazão média de lançamento igual a 29,5 $L.s^{-1}$, vazão essa que foi 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 m³). Na Figura 6 é apresentado o fluxograma da ETE Lagomar.

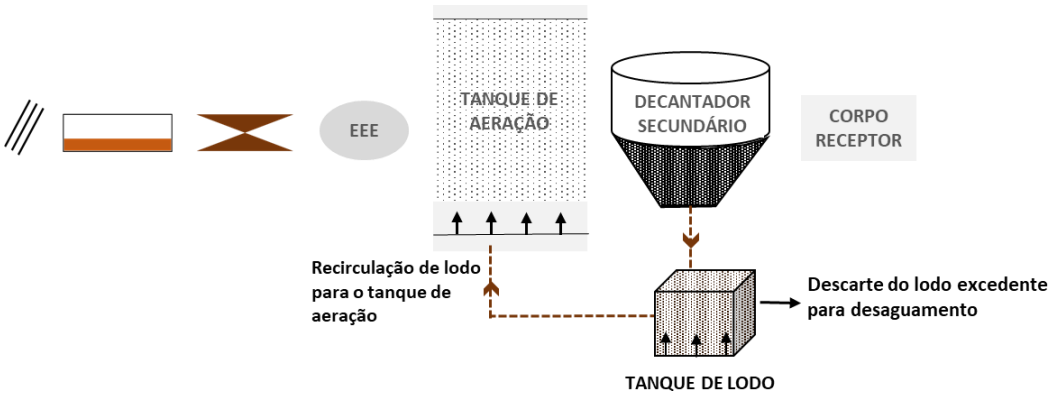


Figura 6 – Fluxograma etapas de tratamento – ETE Lagomar

ETE SANA

Implantada em outubro de 2014, essa ETE possui um módulo de tratamento, com capacidade instalada para atender uma vazão média de 5 $L.s^{-1}$ e máxima de 9 $L.s^{-1}$. Ela é equipada com tratamento terciário, capaz de remover DBO, DQO, SST, Nitrogênio, Fósforo e organismos patogênicos. 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 foi de $5L.s^{-1}$. A estação possui o fluxograma de tratamento igual à ETE Centro, conforme pode ser visualizado através da Figura 7.

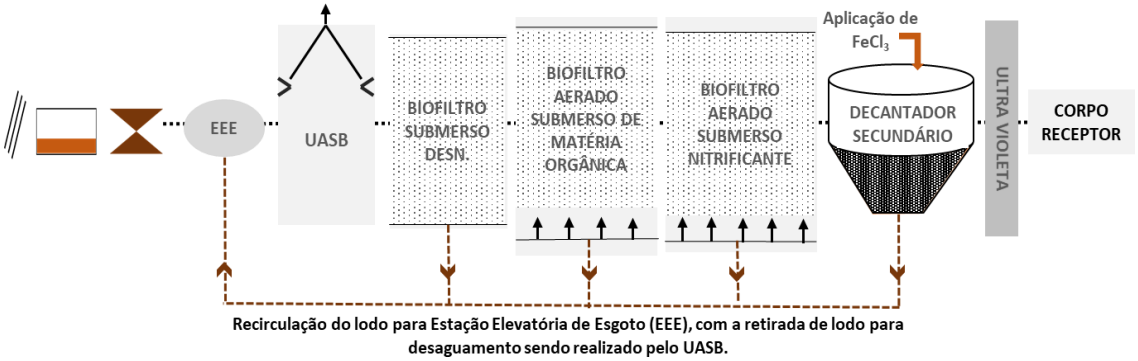


Figura 7 – Fluxograma etapas de tratamento – ETE Sana

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

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 $L.s^{-1}$. Possui sistema de tratamento terciário, capaz de remover DBO, DQO, SST, Nitrogênio, Fósforo e organismos patogênicos. O fluxograma de tratamento é representado através da Figura 8.

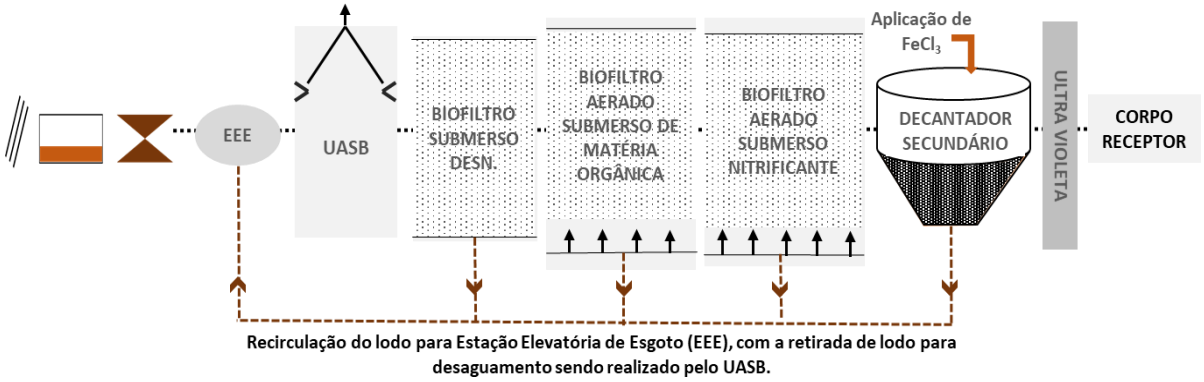


Figura 8 – Fluxograma etapas de tratamento – ETE Glicério

Nas Figuras 9 (a) e 9 (b) são apresentadas as fotos das instalações da ETE Glicério.

Figura 9 (a) – Entrada ETE Glicério **(b) – Módulo de Tratamento – ETE Glicério**
Fonte: O autor (2023)

Na Tabela 1 é apresentada um resumo com o tipo de tratamento realizado em cada uma das ETEs estudas nas fases líquida e sólida. Percebe-se através da Tabela, 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.

Tabela 1: 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; DecantadorSecundário; Desinfecção	Enviado em caminhões tanque para a ETE Lagomar

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

METODOLOGIA UTILIZADA

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 é detalhada. Já no terceiro tópico foi apresentado a metodologia para avaliar a alteração no tipo de transporte e destinação final do lodo seco.

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

A primeira parte deste trabalho consistiu na caracterização e quantificação do lodo gerados pelas ETEs. A partir dessas informações foi 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.

- 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%.

Nas Tabelas de 2 a 5 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 2 – Parâmetros aplicados no dimensionamento – 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 (Q_{esg})	100	$L.s^{-1}$	Macaé, 2021	Capacidade nominal, conforme Licença Ambiental.
Coef.de prod. de sólidos (Y)	0,30	kgSST.(kg DQOaplic)$^{-1}$	Andreoli *et al*, 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 3 – Parâmetros aplicados no dimensionamento – 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.(kg DQO aplic)$^{-1}$	Andreoli *et al*, 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 4 – Parâmetros aplicados no dimensionamento – ETE Lagomar

Parâmetro	Valor	Unidade	Referência	Observação
Conc. DQO - Esgoto Afluente	591,4	mg. L^{-1}	-	Média da carga considerada nasETEs 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.(kg DQO aplic)$^{-1}$	Andreoli *et al*, 2014	Lodos ativados, aeração rolongada
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 5 – Parâmetros aplicados no dimensionamento – 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 (Qesg)	5	$L.s^{-1}$	Macaé, 2021	Capacidade nominal de cada ETE, conforme Licença Ambiental.
Coef.de prod. de sólidos (Y)	0,30	kgSST.(kg DQO aplic)$^{-1}$	Andreoli *etal*, 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

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

Onde:
C_{DQO} = Carga de DQO diária
Q_{ESGOTO} = Vazão média de esgoto afluente à ETE ($m^3.dia^{-1}$)
$Concen_{DQO}$ = Concentração média de DQO esgoto bruto ($kg.m^{-3}$)

- Produção de Lodo

$$P_{Lodo} = C_{DQO} * Y_{DQO}$$ Equação (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 ($kgSST.kgDQOAplicada^{-1}$)

- Vazão volumétrica de lodo produzido

$$Q_{Lodo} = \frac{P_{Lodo}}{C_{Lodo} * \rho}$$ Equação (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

$$M_{Lodo} = Q_{Lodo} * \rho \qquad \text{Equação (4)}$$

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

$$M_{Lodo\,F} = M_{Lodo\,I} * \frac{C_{Lodo\,I}}{C_{Lodo\,F}} \qquad \text{Equação (5)}$$

Onde:
M_{LodoF} = Massa final de lodo (kg)
M_{LodoI} = Massa inicial de lodo (kg)
C_{LodoI} = Concentração inicial do lodo ($kg_{SST}.kg_{Lodo}^{-1}$)
C_{LodoF} = Concentração final do lodo ($kg_{SST}.kg_{Lodo}^{-1}$)

- 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 standy-by. Além disso, tendo como referência a taxa de produção diária de lodo, definiu-se que cada centrífuga possui uma vazão de 13 $m^3.hora^{-1}$.

Na Figura 10 é apresentado um fluxograma da rota de transporte, tratamento e destinação do lodo, existente no município de Macaé.

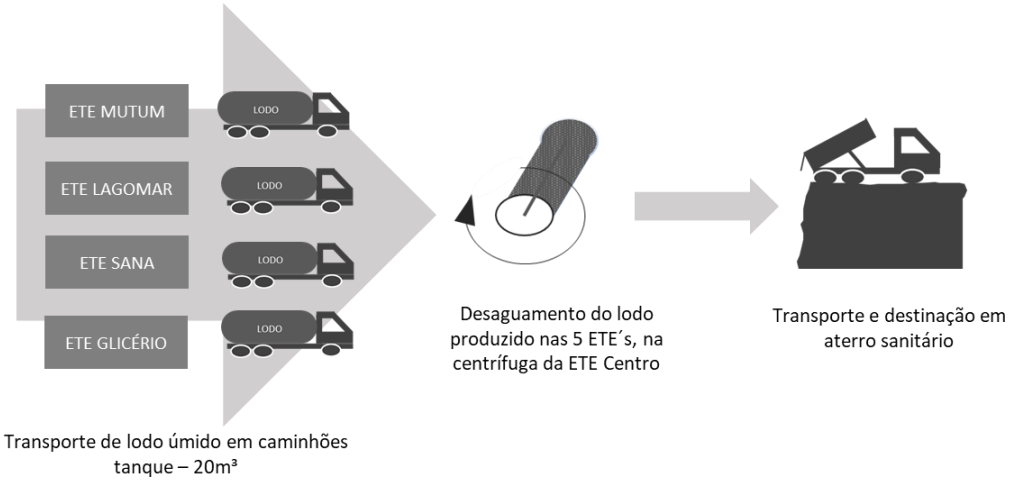


Figura 10 – Fluxograma atual da rota, tratamento e destinação do lodo
Fonte: O autor, com base em Macaé (2021)

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):

$$Horas_{t} = Q_{Lodo}/Q_{Centrífuga} \qquad \text{Equação (6)}$$

Onde:
$Horas_T$ = Funcionamento da Centrífuga (horas.dia^{-1})
Q_{Lodo} = Vazão diária de lodo produzido (m³.dia^{-1})
$Q_{Centrífuga}$ = Vazão de trabalho da centrífuga (m³.hora^{-1})

Nas Tabelas 6 e 7 são apresentados a relação de equipamentos e as respectivas potências instaladas utilizadas.

- Centrífuga 1 – Vazão de trabalho: 13m³.hora^{-1}

Tabela 6 – Relação de potência/equipamento - Centrífuga 12 m³.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: 6m³.hora^{-1}

Tabela 7 – Relação de potência/equipamento - Centrífuga 6 m³.hora^{-1}

Equipamento	Potência (CV)	Equipamentosem 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.

Na Tabela 8 é possível verificar a composição do custo da tarifa encontrada que foi empregada.

Tabela 8 – Composição da tarifa de energia elétrica

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 desaguamentode 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):

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

Onde:
C_{kW} = Consumo médio mensal (kW.mês^{-1})
Para definição do consumo médio mensal, foi usado a Equação (8):

$$C_{kW} = (Somatório\ Potência\ Instalada * 0{,}74) * Horas_T * 30 \qquad \text{Equação (8)}$$

$Horas_T$ = Funcionamento da Centrífuga (horas.dia^{-1})
Além dos custos com energia elétrica, foram considerados também os custos de:

- Mão de obra
- Produto Químico;
- Manutenção.

Para composição dos custos de mão de obra, foram consideradas 2 funções para a operação das Centrífugas, como 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 encontradosno 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 9 é apresentada a composição do custo de mão de obra considerada.

Tabela 9 – Composição custo mão de obra

Função	Salário.mês^{-1} (R$)	% Tempo dedicado às centrífugas	Referência
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, seria 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 os dados obtidos juntos a Sanevix.

- 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 na qual ocorre a destinação final do lodo.

Para levantamento dos custos incorridos com o transporte e destinação deste lodo, foram realizadas cotações 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 75 km, foi acrescido o 25% ao valor de transporte (R$.m^{-3}), conforme cotações obtidas com empresa local (Transpacheco) para distâncias até 50 km. Para distâncias superiores à 75 km e inferiores a 100 km, foi acrescido o valor de 50%.

Na Tabela 10 são apresentados os custos unitários para transporte de lodo.

Tabela 10 – 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).

Na Tabela 11 é apresentada a descrição do valor 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 11 – 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%	m³	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 utilizada a Equação (9):

- Transporte de lodo em caminhões tanque (20 m³)

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

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 Equação (10):

- Transporte de lodo em caminhões poliguindaste

$$CTransp = \frac{Q_{Lodo}}{C_{Transp}} * D * Unit_{Trans} * 30 \qquad \text{Equação (10)}$$

Onde:
C_{Transp} = Custo com transporte (R$)
Q_{Lodo} = Vazão diária de lodo produzido ($m^3.dia^{-1}$)
C_{Transp} = Capacidade de transporte ($m^3.viagem^{-1}$)
D = Distância (ida e volta) - (km)
$Unit_{Trans}$ = Custo por viagem ($R\$.viagem^{-1}$)

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 apresentada na Tabela 12.

Tabela 12 – 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 utilizada a Equação (11)

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

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}$)

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 de dados retirados de bibliografia e consultas a fornecedores. Os dois cenários estão representados, como:

- Cenário 1: Operacionalização da centrífuga existente na ETE Lagomar para a 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.
- 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);

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 foi de: $6m^3.hora^{-1}$.

As referências foram as mesmas aplicadas no Objetivo 1. Os custos definidos para transporte e destinação de lodo tiveram 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 foram obtidos junto a fornecedores locais.

Na Figura 11 é apresentado o fluxograma de gerenciamento de lodo, proposto para o Cenário 1, do objetivo 2.

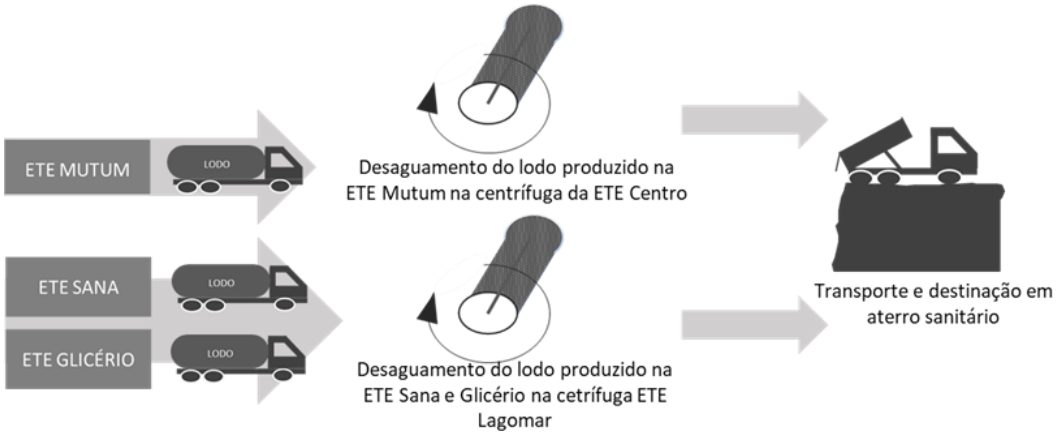


Figura 11 – Fluxograma de rota, tratamento e destinação do lodo – Cenário 1
Fonte : O autor (2023)

Já no segundo cenário, do Objetivo 2, foi usado 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 e dezembro de 2022, usando como base a ferramenta disponibilizada pelo IBGE. A variação observada entre os custos de implantação para os diferentes portes foi indicada como ganho de escala.

Para consolidar os custos operacionais do leito de secagem, verificou-se junto a uma empresa 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...). O modelo esquemático é ilustrado através da Figura 12, e o valor considerado para construção dos leitos de secagem, já com os devidos reajustes estão representados na Tabela 14.

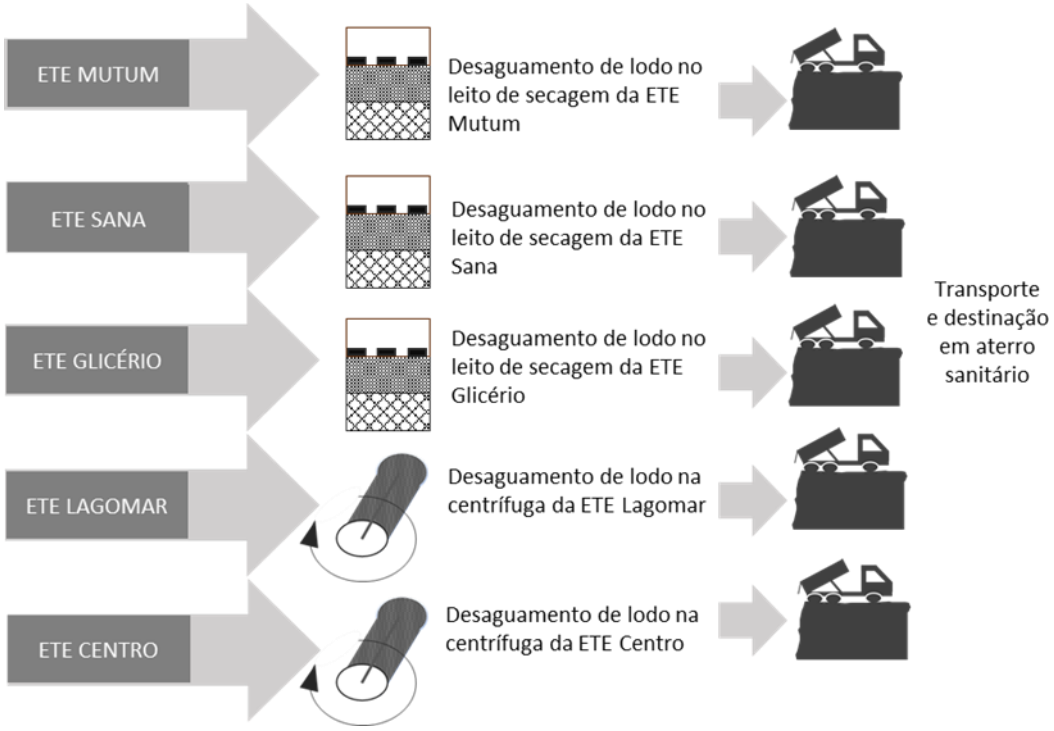


Figura 12 – Fluxograma de rota, tratamento e destinação do lodo – Objetivo 2 – Cenário 2
Fonte: O autor (2023)

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 dimensionamento, foi usada a Equação (12):

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

Em que:
$Área_{útil}$ = Área necessária para implantação dos leitos (m²)
T_{Ciclo} = Tempo de ciclo (d)
P_{Lodo} = Produção diária de lodo ($kgSST.dia^{-1}$)
Tx_{Apli} = Taxa de aplicação de sólidos (kgST)

Tendo como referência a NBR 570 de 1989 foi 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, com ciclo do leito de secagem igual a 20 dias, visando obter teores de sólidos na ordem de 20 – 30%. A metodologia para transporte e destinação do lodo seco foi a mesma aplicada nas etapas anteriores.

OBJETIVO 3 – AVALIAR ALTERAÇÃO NO 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 ($t.viagem^{-1}$), assim como o custo (R$ por quilômetro) também já foram apresentadas na Tabela 10. A destinação também foi alterada, o lodo produzido nas ETEs não seria mais encaminhado para aterro sanitário e passaria a ser encaminhado para compostagem no município de Cachoeira de Macacu. O valor para destinação desse lodo é apresentado na Tabela 15.

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).

Essa alteração teve 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.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos foram distribuídos em três tópicos, separados pelos diferentes objetivos desenvolvidos. No primeiro tópico foram 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 foram avaliados e comparados aos custos atuais do gerenciamento de lodo encontrado no tópico 1. No terceiro, foi 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.

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. Considerando para cálculos os dados existentes no Plano de Saneamento e as demais fórmulas e parâmetros apresentados na metodologia, foram então apresentados nas Tabela 16-20 os respectivos valores das variáveis de processo para cada uma das ETE avaliadas.

- Caracterização e geração de lodo
  - Carga de DQO Afluente

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

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 massaseca	$kgSS.dia^{-1}$	1.785,2	161,8	645,1	65,6	65,6

Fonte: O autor (2023)

  - Vazão diária de lodo produzido

Tabela 18 – Produção diária de lodo – $m^3.dia^{-1}$

Vazão Volumétrica de lodo produzido	Un.	ETE Centro	ETE Mutum	ETE Lagomar	ETE Sana	ETE Glicério
Produção diária de lodo em massaseca	$kgSS.dia^{-1}$	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

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	m³.dia^{-1}	50,0	4,5	18,1	1,8	1,8
Massa específica dolodo	kg.m^{-3}	1020	1020	1020	1020	1020
Massa úmida diária delodo	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 (kg.dia^{-1}), pós desaguamento

Tabela 20 – Produção de massa úmida, 20%, kg.dia^{-1}

Massa úmida de lodo - Pós Centrífuga (20%)	Un.	ETE Centro	ETE Mutum	ETE Lagomar	ETE Sana	ETE Glicério
Massa úmida diária de lodo	kg.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%)	kg.dia^{-1}	8.925,0	803,3	3.230,9	321,3	321,3
Massa úmida mensal de lodo (20%)	t.mês^{-1}	267,8	24,1	96,9	9,6	9,6

Fonte: O autor (2023)

Em função da produção diária de lodo seco foram obtidos 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 t.mês^{-1}. Na Figura 13 é possível observar a distribuição percentual da produção mensal de lodo, por ETE.

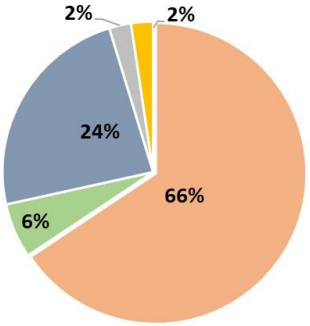


Figura 13 – Percentual de produção mensal de lodo seco por ETE.
Fonte: O autor (2023)

Percebe-se através da Figura 13 que 66% de toda produção de lodo teve origem na ETE Centro. Além disso, ainda constata-se que ¼ 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 aplicada a esta unidade (0,5 kgSS.kgDQO^{-1}), sendo as demais 0,3 kgSS.kgDQO^{-1}.

- Cenário Atual – OPEX Gerenciamento de Lodo

A Figura 14 ilustra o sistema de destinação do lodo da ETE até o aterro sanitário através do uso de caminhões tanque de capacidade volumétrica de 20 m^3.

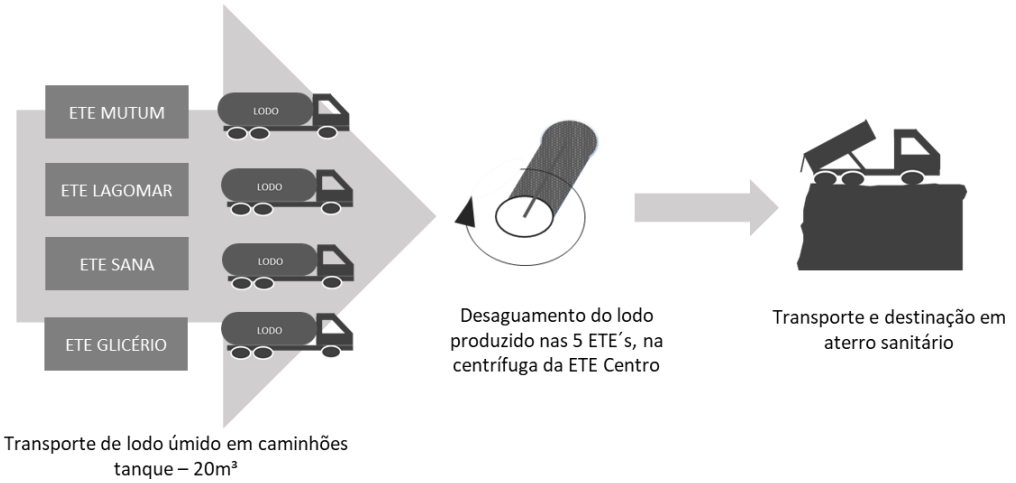


Figura 14 – Fluxograma atual da rota, tratamento e destinação do lodo
Fonte – O autor (2023)

Na Tabela 21 é representada 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 ao longo do mês, assim como o respectivo custo mensal desta atividade por ETE.

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

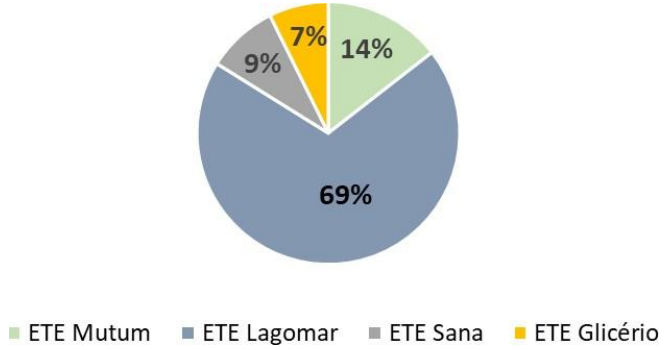
Distâncias/Valor da ViagemETE Centro	**ETE Mutum**	**ETE Lagomar**	**ETE Sana**	**ETE Glicério**
Distância média entre a ETE de destino e ETE geradora do lodo - km	7,0	17,3	86,2	58,4
Distância média entre a ETE geradora de lodo e a ETE de destino - km	7,0	17,3	86,2	58,4
Volume mensal de lodo transportado (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}) – Distâncias50km< x <75km - IDA	N/A	N/A	N/A	68,75
Custo para transporte (R$.m^{-3}) – Distâncias75km< x <100km - IDA	N/A	N/A	82,50	N/A
Custo para total para transporte de lodo úmidoR$.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 a Tabela 21 foi possível observar que grande parte do custo referente ao transporte de lodo, é proveniente da ETE Lagomar. Tal fato pode ser observado por 2 diferentes fatores. O primeiro deles, é que a tecnologia de tratamento existente nesta ETE apresenta um maior coeficiente de produção de sólidos (Y). 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.

Na Figura 15 foi possível constatar 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 15 – Distribuição do custo com transporte de lodo por ETE



Fonte: O autor (2023)

A Tabela 25 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, calculado na 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 Salário Base (R$.mês^{-1})	Encargos - % Salário base (%)	% tempo dedicado atividade (%)	Custo Total (R$.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$.kg^{-1} de polímero	Produção de lodot.SS.mês^{-1}	Custo mês deproduto químico (R$.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. A Tabela 25 apresenta os dados consolidados 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, no qual 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, foi possível obter o 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.

Já na Tabela 26 são apresentados os valores da 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 dos valores obtidos, e considerando a produção total de lodo é encaminhada para a ETE Centro, chega-se a um valor de custo total reais por tonelada. para transporte e destinação de lodo seco igual a R$ 322,68.

Portanto, a um custo final de gerenciamento de lodo, no qual foi considerado o 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, conforme os dados da Tabela 27, 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)

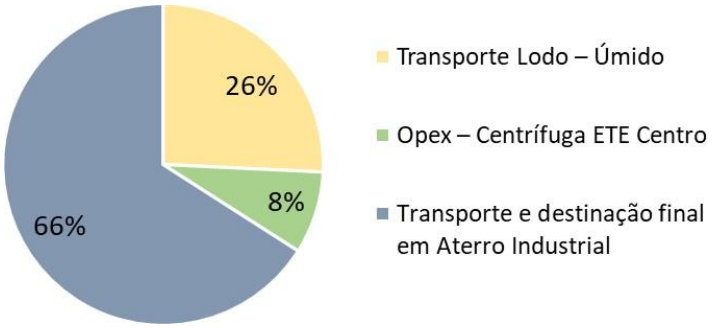
Analisando especificamente o valor para destinação final de lodo foi observado que é bem superior aos valores

encontrados nos estudos de VALENTE (2015) e BIELSCHOWSKY (2014) que foram R$ 120.t^{-1} e R$ 160,00.t^{-1}, respectivamente.

No estudo apresentado por CECATO (2018), o valor obtido foi de R$260,00 por tonelada encontrado em Macaé, e continua acima dos valores encontrados nas ETEs Canasvieiras e Lagoa da Conceição, em Santa Catarina. O valor encontrado nestas ETE no estado de Santa Catarina foi de R$ 218,64 por tonelada de lodo destinado.

Além disso, foi observado que os percentuais de composição do OPEX de gestão de lodo foi que próximo de 70% deste valor é direcionado para transporte e destinação de lodo seco, seguido de transporte de lodo úmido (26%) e operação de centrífugas (8%), conforme Figura 16.

Figura 16 – Distribuição do OPEX – Objetivo 1



Fonte: O autor (2023)

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

- 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 17, é representado o fluxograma deste cenário.

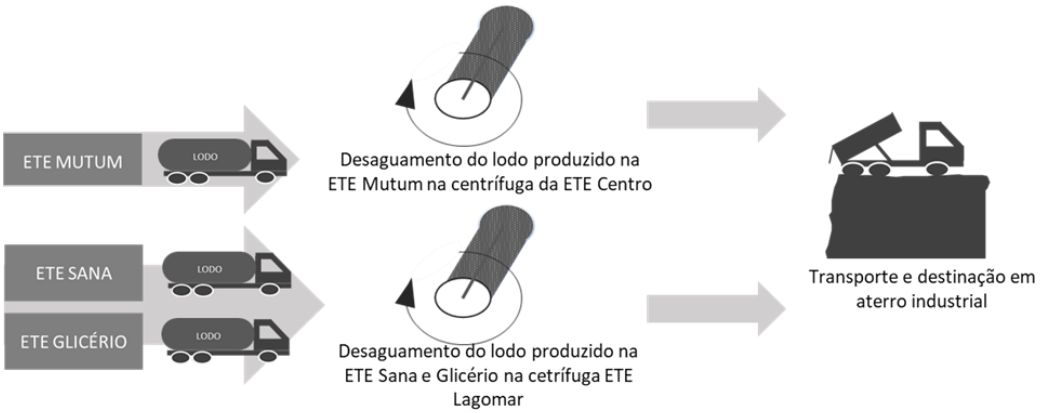


Figura 17 – Fluxograma de rota, tratamento e destinação do lodo – Objetivo 2 – Cenário 1
Fonte: O autor (2023)

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, pois passarão a ser 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. Na Tabela 28 sao apresentadas a 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 ViagemETE Centro	**ETE Mutum**	**ETE Lagomar**	**ETE Sana**	**ETE Glicério**
Distância média entre a ETE de destino e ETE geradora dolodo - km	7,0	N/A	86,2	58,4
Distância média entre a ETE geradora de lodo e a ETE dedestino - km	7,0	N/A	86,2	58,4
Produção mensal de lodo ($m^3.mês^{-1}$)	135,0	N/A	54,0	54,0
Capacidade de transporte – Caminhão tanque (m^3)	20	20	20	20
Custo para transporte ($R\$.m^{-3}$) – Distâncias até 50 km - IDA	55	55	N/A	N/A
Custo para transporte ($R\$.m^{-3}$) – Distâncias50km< x <75km - IDA	N/A	N/A	N/A	68,75
Custo para transporte ($R\$.m^{-3}$) – Distâncias75km< x <100km - IDA	N/A	N/A	82,50	N/A
Custo para total para transporte de lodo úmidoR$.mês^{-1}	7.425,00	0,00	4.455,00	3.712,50
Custo Total com transporte de lodo úmido – R$.mês^{-1}				**15.592,50**

Fonte: O autor (2023)

Em relação à centrífuga da ETE Centro, também oservou-se uma redução de custo em relação ao valor apresentado no Objetivo 1, uma vez que menos lodo seria direcionado para a Estação, reduzindo assim, o tempo médio de funcionamento. O custo mensal com operação das centrífugas seria reduzido de R$ 16.529,47 para R$ 13.264,50, conforme apresentados nas Tabelas 29 e 30. Esta redução seria possível em função do menor consumo de energia e produto químico empregados no tratamento. 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, um custo operacional relacionado à esta atividade seria considerado, conforme os custos de energia elétrica apresentados na Tabela 31.

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, foi considerada a necessidade da inclusão de gastos associados a mão de obra, e o consumo de polímero referente a parcela de lodo que será desaguada nesta planta.

A Tabela 32 representa 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 lodot.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)

O custo anual com manutenção teve com referência uma centrífuga com vazão nominal de 6 $m^3.hora^{-1}$, tal valor também está incluso, os gastos OPEX desse insumos estão na Tabela 33.

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 ao tratamento de lodo seco, também seria possível obter uma pequena redução no custo de transporte em relação ao Objetivo 1, conforme Tabela 34, já que a ETE Lagomar está instaladaa uma distância menor do local de destinação final do lodo, quando comparado com a ETE Centro.

Ainda na Tabela 34, é possível constatar que os custos com essa atividade apresentado no Objetivo 1, chegava a R$ 131.655,00. Enquanto que, neste cenário apresentou uma redução de R$ 3.120,00, ficando em R$ 128.535,00 por mês

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, de acordo com a Tabela 35, é possível verificar que a principal redução percebida entre os cenários 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, foi constatado 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.

- Objetivo 2 - Cenário 2

Neste cenário foi avaliada a descentralização do sistema dedesaguamento de lodo, considerando a implantação de leitos de secagem nas três ETEs que não possuem centrífuga, conforme modelo ilustrativo da Figura 18.
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). Os dimensionamentos dos leitos estão apresentados nas Tabelas 36 e 37.

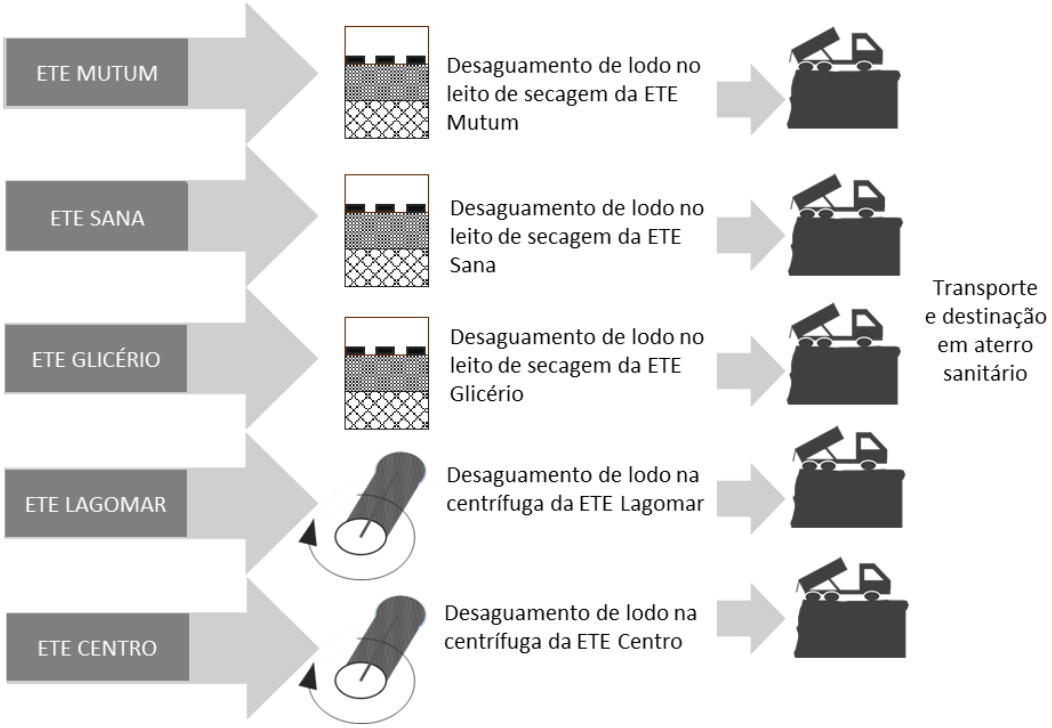


Figura 18 – Fluxograma de rota, tratamento e destinação do lodo – Objetivo 2 – Cenário 2
Fonte: O autor (2023)

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 (m²)	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 foi considerado para as ETE Sana e Glicério, totalizando as duas em R$ 4.636,33.

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 deixaria 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 do lodo. 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 apresentada 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 seria extravasado o rejeito. As distâncias estão 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)

A Tabela 40 apresenta um comparativo dos 3 cenários analisados até o momento. É possível perceber que, os dois cenários estudados, em alternativa ao cenário atual, atingem menores valores consolidados de custo mensal com gerenciamento de lodo. Apresentaram reduções mensais, respectivamente, 17,2% e 16,2% ou R$ 34.242,54 e R$ 32.345,73.

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$.mês^{-1})	51.397,50	15.592,50	-
Consolidado - Opex – Centrífugas (R$.mês^{-1})	16.529,47	21.211,93	19.932,61
Consolidados – Opex – Leitos 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)

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

Nesse objetivo foi avaliada a alteração das formas de transporte e destinação final do lodo seco.

No que tange ao transporte, ele deixaria de ser realizado através de caminhão poliguindaste e passaria a ser executado por carretas basculantes, com maior capacidade mássica (18,8 t) de transporte (Figura 19). A destinação deixaria de ser realizada em aterro sanitário, localizado nos arredores de Macaé e passaria a ser feito em uma fazenda de compostagem em Cachoeira de Macacu.

Figura 19 – Modelo Carreta Basculante
Fonte: O autor (2023)

O valor total gasto com transporte de lodo, aparesentado na Tabela 41, teria 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 (VideVerde,2023) é muito inferior ao atual valor de destinação executado por tonelada (R$ 260,00).
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 foi verificada uma redução significativa entre a situação atual (Objetivo 1) e a proposta de alteração do Objetivo 3, conforme pode ser visualizado através da Figura 20.

O valor encontrado no cenário atual, encontra-se acima dos valores encontrados por Cecato (2018) e Martins et al. (2021). No primeiro trabalho (CECATO, 2018) ao analisar os custos com transporte e destinação de lodo de algumas ETEs do estado de Santa Catarina foi encontrado um valor médio de R$ 232,25 por tonelada. Já o segundo trabalho (Martins et all., 2021), ao analisar 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.

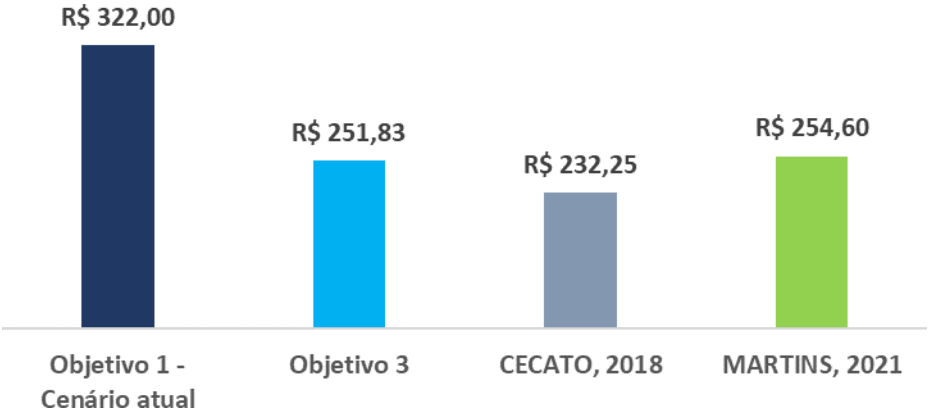


Figura 20 – Custo transporte e destinação do lodo seco por tonelada
Fonte: O autor (2023)

Ao se comparar os valores para transporte e destinação obtidos no Objetivo 3, com os mencionados no parágrafo anterior, é possível verificar que estão bem semelhantes, conforme pode ser visualizado na Figura 21. O valor encontrado por Martins et al (2021) foi de R$254,60 por tonelada de lodo transportado e destinado nas ETEs em Botucatu-SP, enquanto Cecato et al. (2018) obteve R$ 251,83.

Na Tabela 42 são apresentados os custos totais mensais com o gerenciamento de lodo para os 4 cenários analisados, bem como seus respectivos valores por tonelada.

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 – Leitos deSecagem (R$.mês^{-1})	-	-	10.143,64	-
Consolidado - Trans. e Destinaçãofinal (R$.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 em conjunto a Tabela 42 e a Figura 21, e comparando o melhor cenário do Objetivo 2 (Cenário 1), foi possível reduzir o custo médio mensal de gerenciamento de lodo de R$ 165.339,43 para R$ 139.552,43, equivalente a uma economia 15,5%, através da alteração do tipo de equipamento de transporte e o local para destinação final de resíduos.

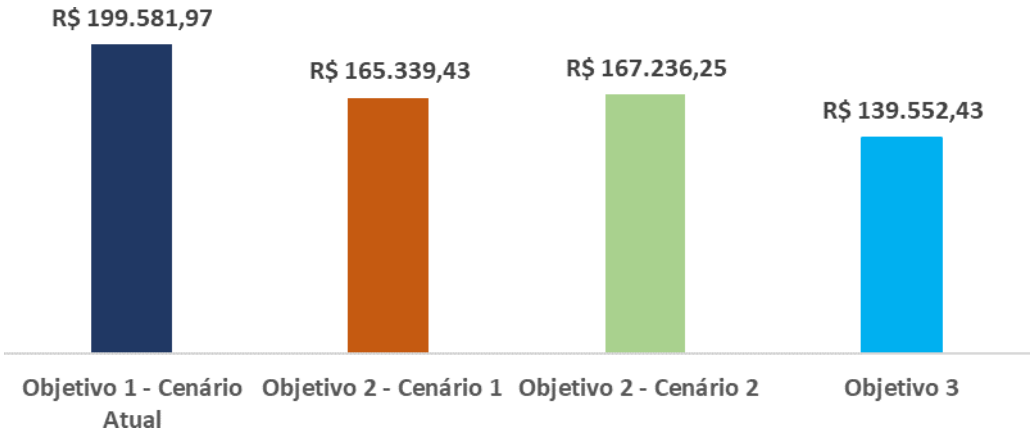


Figura 21 – Custo mensal gerenciamento de lodo
Fonte: O autor (2023)

Já analisando o ganho econômico do Objetivo 3 em relação ao Objetivo 1, foi verificada uma redução no custo médio mensal de gerenciamento de lodo de 30%, em relação ao que é praticado hoje.

Ampliando o período de avaliação para 12 meses, verifica-se que com as alterações propostas, é possível alcançar uma redução de mais de R$ 700.000,00. Essa redução é ainda mais impactante ao aumentar o período temporal para um horizonte de 30-35 anos, devido ao prazo dos períodos dos contratos de concessão observados em outras concessionárias de serviços de Saneamento, como CASAL (Alagoas) que é 35 anos (BRK, 2023).

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

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 afluente, 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, em função da localidade, das distâncias entre as unidades e a tecnologia de tratamento.

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 estudas foi de R$ 489,17 por tonelada, indicando 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, concluiu-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 foi que as centrífugas alteram muito pouco seu custo operacional em função de pequenas alterações no volume de lodo.

Sobre o Objetivo 3 foi 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 final 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, poderia promover uma redução do custo mensal com gerenciamento de lodo das unidades de Macaé de aproximadamente R$700.000,00 reais por 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, trariam 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.

Recomenda-se para futuros estudos, a análise dos custos para implantação e operação de sistema de compostagem e a viabilidade das próprias concessionárias de esgoto realizam esse tipo de atividade ao invés destinaram o lodo seco à fazendas de compostagem. Também recomenda-se melhorias nos índices de coleta e tratamento de esgoto previstos para os próximos anos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 10.004-2*: Resíduos sólidos – Classificação Parte 2. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024. 754p.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Ed.) *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014. 444p.

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 em 15 jan.2023.

BARROS, K., CHERNICHARO, C., ANDREOLI, C., SILVA, L., BITTENCOURT, S., KATO, M. 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.

BATSTONE, D.J; JANSEN, P.D.;GE,H. Biochemical Treatment of Biosolids – Emerging Technologies. *Water*, v.38,n.3, p 90-93, 2011.

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.

BRASIL. *Sistema Nacional de Informações sobre a gestão de resíduos sólidos*. 2021. Disponível em: https://sinir.gov.br/relatorios/nacional/. Acesso em: 20 abr. 2023.

BRASIL. *Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022*. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019 2022/2022/Decreto/D10936.htm#art91. Acesso em: 15 ago. 2022.

BRASIL. *Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010***.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras rovidências. Disponível em:

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 07 jan. 2021.

BRASIL. *Lei n°14.026, de 15 de julho de 2020*. Atualiza o marco legal do saneamento básico Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 15 jan. 2021.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidade e Estados - Macaé/RJ. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rj/macae.html. Acesso em 10 jan.2021.

BRASIL. *Resolução CONAMA nº 498, de 19 de agosto de 2020*. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=arquivo .download&id=797. Acesso em: 15 jan. 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. *Instrução Normativa n°61, de 08 de julho de 2020***.** Diário Oficial, Edição: 134, Seção 1, p.05.

BRASIL. *Resolução CONAMA n°430, de 13 de maio de 2011*. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Disponível em: conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=627. Acesso em: 12 dez. 2020.

BRASIL. *Resolução CONAMA n°481, de 3 de outubro de 2017*. Estabelece critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos, e dá outras providências.Disponível em: conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=702. Acesso em: 15 jan. 2021.

BRK. Nossa atuação em Alagoas. Disponível em: https://www.brkambiental.com.br/nossa- atuacao. Acesso em: 2 abr. 2023.

CECATO, L., BATTISTELLI, A., SCHNEIDER, E., HASSEMER, M., LAPOLLI, F. . Estimativa dos custos de operação de um biorreator com membrana. *RevistaDAE*. Vol.67. 2018.

CERQUEIRA, P. *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.

CERQUEIRA, P.LW; AISSE, M.M. Custos de desaguamento e higienização de lodo em ETEs com reatores UASB seguidos de pós-tratamento aeróbio: subsídios para estudos de concepção**.** *Eng. Sanit Ambiental*, v.26 n°2, p.251-262, 2021.

COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO - CASAN. *Ata de Registro de Preço N°1690/2021*. Florianópolis: Companhia de Catarinense de Águas e Saneamento – CASAN, 21 dez.2021. Disponível em: https://www.casan.com.br/menu-conteudo/index/url/resultados-das-licitacoes-e-contratos-assinados#0. Acesso em: 08 ago. 2022.

ECOLOGIKA. Informações Dissertação – Bernardo Melo [mensagem pessoal]. Mensagens recebidas por: <bmelo@poli.ufrj.br>. Acesso em: 9 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, Brasil. Dissertação de mestrado.Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020.

HASLINGER, J; KRAMPE, J; LINDTNER, S. Operating costs and energy demand of wastewater treatment plants in Austria: Benchmarking results of the last 10 years. *Water Science and Technology*, v.74, n. 11, p.2620-2626, 2016.

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, L, SUCIU, N., TREVISAN, M.. Sewage sludge for sustainable agriculture: contaminants contentes and potential use as fertilizer. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. Piacenza, Italy, 2018.

LMC. Dados Dissertação – Bernardo Melo [mensagem pessoal]. Mensagens recebidas por: <bmelo@poli.ufrj.br>. Acesso em: 9 jan. 2023.

LINDTNER, S;SCHAAR, H; KROISS, H. Benchmarking of large municipal wastewater treatment plants treating over 100,000 PE in Austria. *Water Science And Tecnology*, v.57, n.10, p.1487-1493, 2008.

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

MARTINS, S.,ESPERANCINI, M., QUINTANA, N., BARBOSA, F. Análise econômica da produção de lodo compostado para fins agrícolas na estação de tratamento de esgoto de Botucatu-SP.*Energia Agrícola*, v.36, p.218-219,2021.

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

SANEVIX. Dados Dissertação – Bernardo Melo [mensagem pessoal]. Mensagens recebidas por: <bmelo@poli.ufrj.br>. Acesso em: 20 jan. 2023.

TRANSPACHECO. Dados Dissertação – Bernardo Melo [mensagem pessoal]. Mensagens recebidas por: <bmelo@poli.ufrj.br>. Acesso em: 9 jan. 2023.

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 (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

VIDEVERDE COMPOSTAGEM. Dados Dissertação – Bernardo Melo [mensagem pessoal]. Mensagens recebidas por: <bmelo@poli.ufrj.br>. Acesso em: 16 jan. 2023.

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.

YANG, Y.; WANG, L.; XIANG, F.; ZHAO, L.; QIAO, Z. Activated Sludge Microbial Community and Treatment Performance of Wastewater Treatment Plants in Industrial and Municipal Zones. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2020.

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. GU, Y., YUAN, H., GONG, Y., WU, YUFENG.. Selecting sustainable technologies for disposal of municipal sewage slugde using a multi-criterion decision-making method: A case study from China. *Resources Conservation and Recycling***,** v.161, p. 104881, 2020.

YANG, Y., et al. Activated Sludge Microbial Community and Treatment Performance of Wastewater Treatment Plants in Industrial and Municipal Zones. Int. J. Environ. Res. Public Health, 2020.