



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LAURA GOMES DA COSTA

**GESTÃO DE LODOS DE ESGOTO SANITÁRIO: AVALIAÇÃO COMPARATIVA
DE VIABILIDADE ECONÔMICA ENTRE PROCESSO DE TRATAMENTO
CONVENCIONAL E COM APROVEITAMENTO DE BIOGÁS PARA GERAÇÃO DE
ENERGIA**

Recife

2022

LAURA GOMES DA COSTA

**GESTÃO DE LODOS DE ESGOTO SANITÁRIO: AVALIAÇÃO COMPARATIVA
DE VIABILIDADE ECONÔMICA ENTRE PROCESSO DE TRATAMENTO
CONVENCIONAL E COM APROVEITAMENTO DE BIOGÁS PARA GERAÇÃO DE
ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. D.Sc. Wanderli Rogério Moreira Leite.

Coorientador: MSc. João Joaquim Guimarães Recena.

Recife

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Costa, Laura Gomes da.

Gestão de lodos de esgoto sanitário: avaliação comparativa de viabilidade
econômica entre processo convencional e com aproveitamento de biogás para
geração de energia / Laura Gomes da Costa. - Recife, 2022.

93 : il., tab.

Orientador(a): Wanderli Rogério Moreira Leite

Coorientador(a): João Joaquim Guimarães Recena

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, , 2022.

Inclui referências, apêndices.

1. Lodo. 2. Esgoto. 3. Viabilidade. 4. Biogás. 5. Energia. I. Leite, Wanderli
Rogério Moreira. (Orientação). II. Recena, João Joaquim Guimarães.
(Coorientação). III. Título.

620 CDD (22.ed.)

LAURA GOMES DA COSTA

**GESTÃO DE LODOS DE ESGOTO SANITÁRIO: AVALIAÇÃO COMPARATIVA
DE VIABILIDADE ECONÔMICA ENTRE PROCESSO CONVENCIONAL E COM
APROVEITAMENTO DE BIOGÁS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 03 / 11 / 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. D.Sc. Wanderli Rogério Moreira Leite (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

M.Sc. João Joaquim Guimarães Recena (Co-Orientador)
TPF Engenharia Ltda

Prof. D.Sc. Fabrício Motteran (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Ainoan do Nascimento Pereira Diniz (Examinadora Externa)
TPF Engenharia Ltda

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, por tudo.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais, Valnei e Ana Cláudia, por me apoiarem em todos os momentos e em todas as minhas escolhas. Obrigada por me concederem o suporte que precisei durante todo o caminho até a minha graduação. Obrigada por me acalentar, por me guiar e por me ensinar tudo que eu sei (sou) hoje. A eles, serei eternamente grata.

Agradeço às minhas irmãs, Clara e Maria Rita, por serem compreensivas e por estarem sempre presentes na minha vida. Aos meus familiares, obrigada pelos aconselhamentos e apoio durante a minha jornada. Aos meus amigos e colegas, agradeço a simples presença em todos os momentos e pelos incentivos que me fizeram chegar até aqui. Agradeço aos colegas Gabriel Tiberius e André Mendonça pelas oportunidades concedidas e aprendizagem conjunta durante meu processo de crescimento profissional.

Agradeço, também, a Deus por colocar em meu caminho as oportunidades e pessoas que me permitiram alcançar os meus objetivos.

Agradeço à Universidade Federal de Pernambuco e aos professores integrantes da graduação de Engenharia Civil. Agradeço ao conhecimento que me foi transmitido, pela minha formação acadêmica e profissional e às oportunidades de aprendizado que me foram dadas. Em especial, agradeço ao meu orientador, Prof. D.Sc. Wanderli Leite, por me incentivar e encaminhar durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço, também, ao meu co-orientador, M.Sc. João Recena, pela apresentação ao tema escolhido e pela confiança que me foi concedida. Obrigada pelas conversas, conselhos e pela sabedoria que foi transmitida no decorrer do processo de orientação.

Agradeço à TPF Engenharia pela oportunidade de aprendizagem e de convivência com profissionais que me fazem aprender mais a cada dia. Agradeço a Ainoan Diniz pela assistência e conhecimento indispensáveis para a evolução deste trabalho. Agradeço, ainda, a Ana Carolina Bomfim, Elaine Gurgel e Andresa Dornelas pelo interesse e apoio.

Por fim, agradeço aos integrantes da banca, por aceitarem a participação na análise deste trabalho e por estarem presentes nesse momento marcante que, sem dúvidas, será decisivo e inesquecível. Obrigada!

RESUMO

O lodo de esgoto é um dos resíduos sólidos resultantes do tratamento do esgoto sanitário. Por possuir uma grande quantidade de umidade, matéria orgânica e organismos patogênicos, deve ser tratado e destinado adequadamente. A disposição final mais convencionalmente utilizada é a destinação para aterros sanitários. Entretanto, existem outras opções de disposição final que podem trazer um retorno econômico e ambiental maior para a ETE. Uma dessas alternativas é o uso do biogás produzido pela digestão anaeróbia do lodo para a geração de energia elétrica. A fim de verificar a efetividade dessa alternativa, desenvolveu-se um estudo de viabilidade econômica comparando o tratamento de lodo convencional, com destinação final em aterro sanitário, e o tratamento com digestão anaeróbia e aproveitamento do biogás para recuperação energética na ETE. Com esse intuito, estruturou-se um fluxo de caixa e calculou-se o Valor Presente Líquido (VPL), demonstrando que a alternativa com aproveitamento do lodo para produção de energia é viável economicamente.

Palavras-chave: Lodo, Esgoto, Viabilidade, Biogás, Energia.

ABSTRACT

Sewage sludge is one of the solid waste resulted from the sanitary sewage treatment. Due to its large amount of moisture, organic matter and pathogenic organisms, it must be treated and disposed properly. The final disposal most conventionally used is the destination for sanitary landfills. However, there are other final disposal options that can bring the sewage treatment station a greater economic and environmental return. One of these alternatives is the use of biogas produced by sludge anaerobic digestion to generate energy. In order to verify the alternative effectiveness, an economic viability study was developed comparing the conventional sludge treatment, considering final destination in a sanitary landfill, and the treatment with anaerobic digestion and use of biogas for energy recovery in the sewage treatment station. For this purpose, a cash flow was structured and the Net Present Value (NPV) was calculated, demonstrating that the alternative using sludge for energy production is economically viable.

Keywords: Sludge, Sewage, Viability, Biogas, Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Porcentagem do destino final de lodo proveniente de estações de tratamento de efluentes domésticos em 2015.	24
Figura 2 -	Opções para a utilização de biogás de ETEs.	28
Figura 3 -	Sistema de lodos ativados.	35
Figura 4 -	Alternativa 1 – Convencional.	36
Figura 5 -	Alternativa 2 – Biogás.	37
Figura 6 -	Esquema de unidade de recuperação energética utilizando biogás.	38
Figura 7 -	Resultado da projeção populacional.	58
Figura 8 -	Composição dos custos operacionais em 2056	63
Figura 9 -	Custos operacionais em 2056.	64
Figura 10 -	Valor líquido do fluxo de caixa.	65
Figura 11 -	Valor líquido descontado.	65
Figura 12 -	Fluxograma da estação de tratamento de lodo para a Alternativa 2 em 2056.	
		70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Indicadores de esgotamento sanitário no Brasil em 2020.	17
Tabela 2 -	Principais características do lodo da Estação de Tratamento de Esgoto Brasília Norte.	20
Tabela 3 -	Concentração de bactérias no lodo bruto, observadas nos Estados Unidos, em número/g de peso seco.	21
Tabela 4 -	Métodos de estabilização de lodos de esgoto.	22
Tabela 5 -	Composição típica de biogás gerado em digestores de lodo.	26
Tabela 6 -	Combustíveis utilizados nos dias de hoje, e sua equivalência ao biogás.	27
Tabela 7 -	Produção e massa específica dos lodos primário e secundário de sistemas de lodos ativados.	39
Tabela 8 -	Parâmetros para a Alternativa 1: Captura de sólidos, teor de sólidos e massa específica.	40
Tabela 9 -	Dosagem de polímero.	40
Tabela 10 -	Dosagem de cal para a Alternativa 1.	41
Tabela 11 -	Parâmetros para a Alternativa 2: Captura de sólidos, teor de sólidos e massa específica.	43
Tabela 12 -	Dosagem de cal para a Alternativa 2.	43
Tabela 13 -	Relação DQO/SV no lodo.	47
Tabela 14 -	População de Recife de 1970 a 2021.	50
Tabela 15 -	Número de operadores.	52
Tabela 16 -	Tarifa verde de energia para saneamento.	54
Tabela 17 -	Custos dos produtos químicos.	54
Tabela 18 -	Custo de disposição de lodo por faixa de teor de sólidos.	54
Tabela 19 -	Condições financeiras.	57
Tabela 20 -	Volume de lodo produzido diariamente por etapa de tratamento.	59
Tabela 21 -	Resultados da produção de biogás e energia.	59
Tabela 22 -	Custos unitários para equipamentos do tratamento do lodo.	60
Tabela 23 -	Custos de implantação do tratamento do lodo.	60
Tabela 24 -	Revisão dos custos de implantação da unidade de recuperação energética.	61
Tabela 25 -	Custos de implantação da unidade de recuperação energética.	61
Tabela 26 -	Resultados dos custos de implantação (CAPEX).	62

Tabela 27 -	Resumo dos custos operacionais.	62
Tabela 28 -	Custos operacionais por categoria.	62
Tabela 29 -	Resumo das condições.	64
Tabela 30 -	Fluxo de caixa da Alternativa 1.	66
Tabela 31 -	Fluxo de caixa da Alternativa 2.	66
Tabela 32 -	Valor presente líquido.	68
Tabela 33 -	Receita anual para anular VPL.	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	15
3	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	16
4	REFERENCIAL TEÓRICO	17
4.1	Gestão de lodo de esgoto	17
4.1.1	Legislação e metas	18
4.1.2	Composição do lodo de esgoto	19
4.1.3	Tratamento do lodo de esgoto	21
4.2	Destinação final do lodo de esgoto	25
4.2.1	Método convencional	25
4.2.2	Métodos alternativos de uso de lodos de esgoto	25
4.3	Estudo de viabilidade	32
5	METODOLOGIA	34
5.1	Delineamento do estudo	34
5.2	Produção de lodo de esgoto	38
5.2.1	Alternativa 1 - Convencional	38
5.2.2	Alternativa 2 - Biogás	42
5.3	Produção de biogás e energia elétrica	47
5.4	Projeção populacional	50
5.5	Investimentos - CAPEX	51
5.6	Despesas operacionais - OPEX	52
5.6.1	Pessoal próprio	52
5.6.2	Manutenção	53
5.6.3	Energia elétrica	53

5.6.4	Produtos químicos	54
5.6.5	Transporte e disposição de lodo	54
5.7	Estudo de viabilidade econômica	55
5.7.1	Inflação	55
5.7.2	Impostos	56
5.7.3	Taxa de desconto	56
5.7.4	Depreciação	57
5.7.5	Financiamento	57
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
6.1	Custos de implantação e operação	58
6.2	Análise de viabilidade	64
6.3	Pré-projeto	69
7	CONCLUSÕES	71
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
REFERÊNCIAS		74
APÊNDICE A – Projeção populacional		81
APÊNDICE B – Produção e projeção anual de lodo		84
APÊNDICE C – Produção de energia elétrica		91

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a vida. O ser humano utiliza a água tratada e depois a devolve na forma de esgoto pela rede coletora. Teoricamente, o esgoto deve ser tratado antes de ser lançado de volta no meio ambiente, de forma a reduzir os impactos nos seres vivos ali presentes e para preservar esse bem tão importante. No Brasil, a situação ainda é longe da ideal. Segundo o diagnóstico realizado no ano de 2021, cerca de 60% do esgoto gerado no país é coletado e apenas 51% é tratado de forma apropriada. Em Pernambuco, a situação é ainda pior, apenas 33% do esgoto é coletado, sendo que 27% do esgoto coletado não é tratado adequadamente (SNIS, 2021).

Durante o tratamento, é gerado um subproduto sólido, o lodo de esgoto, com composição semelhante à do seu esgoto gerador. A existência de nutrientes, matéria orgânica e outros elementos essenciais para formação e desenvolvimento de plantas e do solo, somado ao alto poder calorífico da fração sólida volátil do lodo, evidencia o seu valor para uso como matéria-prima em diversos processos integrados ao saneamento (ANDREOLI, 2006).

Os tratamentos mais convencionalmente utilizados no Brasil para esgoto doméstico são biológicos, sempre gerando lodo como resultado do processo. A disposição final ambiental e economicamente adequada, representa uma grande parcela dos custos do tratamento do esgoto, aproximadamente 60% (ANDREOLI, 2001). Entre esses custos, incluem-se todo o equipamento e energia utilizada na preparação do lodo para a destinação, juntamente com o transporte para a movimentação dentro da estação e para o local de disposição final, em geral, aterros sanitários.

São diversas as alternativas de aproveitamento do lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto, podendo ser utilizado como condicionante e fertilizante para o solo, devido à concentração de diferentes nutrientes; como fonte de energia gerada por processos térmicos; como elemento estruturante de argamassas e concreto e até como material para fabricação de cerâmicas.

Uma opção viável que tem ganhado visibilidade é o aproveitamento do lodo para produção de biogás. Uma vez que o lodo de esgoto é gerado no processo de tratamento, constituído por uma grande quantidade de matéria orgânica, ele é direcionado para um biodigestor para sua estabilização. Nesse procedimento, a matéria orgânica presente no lodo é convertida em biogás, uma mistura de gases, principalmente gás metano e carbônico, a qual pode ser convertida em energia térmica e elétrica (GARCIA; HOFFMANN; MAYER, 2015).

Como resultado das exigências promovidas pela atualização do Marco do Saneamento, da lei nº 14.026 de 2020, que dispõe a universalização dos serviços de saneamento no Brasil, há tendência de transformação do atual cenário do saneamento no país. Com mais esgoto coletado e tratado, consequentemente, haverá maior produção de lodo, que pode ser aproveitado de forma a reduzir impactos ambientais e ainda servir de insumo para outros processos. Exposto o panorama geral, o objetivo geral do presente trabalho é realizar a análise econômica e ambiental de diferentes alternativas de aproveitamento do lodo de forma a mostrar a viabilidade das opções.

2 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

O tratamento de esgoto no Brasil gera uma grande quantidade de lodo que é descartado em aterros sanitários. Esse material é responsável pela maior parte dos custos operacionais de uma ETE, por isso, a justificativa para o presente trabalho é a existência de um material cujo potencial pode ser mais bem aproveitado para benefício econômico e ambiental.

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, lei nº 12.305 de 2010, considera-se resíduo perigoso todo aquele que apresentar, entre outras características, patogenicidade e toxicidade com risco ao meio ambiente e à saúde pública. Em razão da presença de micro-organismos patogênicos e metais pesados no lodo de esgoto, ele classifica-se como resíduo perigoso, não podendo ser descartado da mesma forma que qualquer outro tipo de resíduo. Dessa forma, o gerador desse resíduo, em geral, adota medidas para tratamento, reduzindo o seu volume e periculosidade, sendo também motivados por razões econômicas para redução dos custos de gestão.

No Brasil, a lei nº 11.445 de 2007 estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico. Segundo o seu artigo 49, é objetivo da Política Federal de Saneamento Básico minimizar os impactos ambientais causados pela implantação e desenvolvimento dos serviços de saneamento e promover alternativas de gestão para viabilizar a autossustentação de tais serviços.

A Agenda 2030, estabelecida pela Organização das Nações Unidas (ONU), é formada por 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), que indicam as metas que devem ser alcançadas para estabelecer o desenvolvimento sustentável nas esferas econômica, social e ambiental. Os ODS's 7 – energia limpa e acessível, e 11 – cidade e comunidades sustentáveis, estão diretamente ligados aos temas apresentados, como geração de energia limpa com biogás, e redução de impacto ambiental negativo nas cidades. Coincidente com a Agenda 2030, o Brasil atualizou o marco legal do saneamento básico, através da lei nº 14.026 de 2020, tendo em vista promover a universalização dos serviços de saneamento até o ano de 2033.

Portanto, a motivação para a análise econômica e ambiental das opções de gestão do lodo de esgoto é verificar a existência de alternativas para atendimento das legislações citadas, com o objetivo de promover maior sustentabilidade ambiental e econômica do sistema de gestão de lodo em ETE.

3 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O objetivo geral do presente trabalho é fazer o estudo de processos alternativos de disposição final de lodos de esgoto.

Como objetivos específicos, pode-se listar:

- 1) Estimar os custos de implantação e operação de diferentes alternativas de tratamento e aproveitamento do lodo em estações de tratamento de esgoto;
- 2) Analisar comparativamente a viabilidade econômica das alternativas de disposição final de lodos de esgoto;
- 3) Elaborar pré-projeto de método de disposição final mais viável ambiental e economicamente.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Gestão de lodo de esgoto

Denomina-se como esgoto, águas servidas, despejos líquidos, águas residuárias ou mesmo efluentes líquidos, as águas que apresentam as suas características naturais alteradas após a utilização humana (TRATA BRASIL, 2012). Devido à presença de grande quantidade de matéria orgânica, substâncias tóxicas e organismos patogênicos, o seu lançamento in natura causa graves consequências ao ambiente e à saúde pública.

A importância de um bom sistema de esgotamento sanitário é garantida através da Lei nº 11.445 de 2007, que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico no Brasil. Apesar da legislação, a situação do Brasil ainda permanece estagnada quanto à cobertura do sistema de esgotamento sanitário. Segundo dados levantados pelo Sistema Nacional de Saneamento (SNIS, 2021), apenas 54,95% da população é atendida por sistema de esgotamento sanitário. Ainda de acordo com a mesma pesquisa, apenas 60,27% do esgoto é coletado e 79,84% desse esgoto é tratado adequadamente antes de lançado. Em relação à água consumida, o índice de esgoto tratado é de 50,75%. Para o Nordeste e para o estado de Pernambuco, os índices diminuem, como mostrado na Tabela 1. Quanto aos tratamentos mais utilizados por população atendida, o mais evidente é tratamento com lodo ativado, convencional ou deep shaft, com alta eficiência de remoção de matéria orgânica, como divulga o Atlas Esgotos (ANA, 2017).

Tabela 1 - Indicadores de esgotamento sanitário no Brasil em 2020.

Região	Índice de atendimento total de esgoto	Índice de coleta de esgoto	Índice de tratamento de esgoto	Índice de esgoto tratado referido à água consumida
Pernambuco	30,80 %	32,81 %	72,32 %	32,42 %
Nordeste	30,29 %	38,02 %	76,02 %	34,14 %
Brasil	54,95 %	60,27 %	79,84 %	50,75 %

Fonte: SNIS (2021).

Nos processos de tratamento de esgoto, a primeira etapa geralmente é o tratamento preliminar, onde os sólidos mais grosseiros, areia e excesso de gordura são retirados por gradeamento, desarenamento e desengorduramento (TRATA BRASIL, 2012). Após isso, o esgoto passa para o tratamento primário, onde 30% a 50% da DBO pode ser reduzida. Nessa etapa, a matéria orgânica é retirada por meio do processo físico de decantação simples, que é o tipo de operação mais utilizada normalmente, em que os sólidos em suspensão são removidos, com a adição de coagulantes ou polieletrólitos. Depois da decantação, a matéria orgânica depositada no fundo,

chamada de lodo primário, é retirada para posterior destinação, por meio de dispositivos mecânicos ou hidrostática simples (SENAI, 2008).

O tratamento secundário é, na maior parte das vezes, um processo biológico, principalmente do tipo lodo ativado, filtro biológico, digestor anaeróbio ou lagoa de estabilização. Nessa fase, a matéria orgânica é retirada por meio do processo biológico, através da decomposição por bactérias aeróbias ou anaeróbias. Esse processo, também resulta na produção de lodo, chamado lodo secundário, sendo este juntado ao lodo primário para o tratamento e destinação final. Nessa etapa, a eficiência pode ultrapassar os 95% (SENAI, 2008). Ainda, o efluente pode passar por tratamento terciário, filtração e remoção de nutrientes, além da desinfecção, antes de ser destinado ao corpo de água mais próximo, ou mesmo, lançado no solo (TRATA BRASIL, 2012).

O lodo formado no tratamento primário e secundário é o material de estudo do presente trabalho. Esse subproduto possui aspectos indesejáveis, como a instabilidade biológica, devido à alta fração de material biodegradável, o que causa mau cheiro; a baixa qualidade higiênica por causa da grande variedade de vírus, bactérias e outros organismos patogênicos; e a baixa concentração de sólidos suspensos, o que provoca um grande volume de lodo produzido (ANDREOLI, 2006).

Com o objetivo de reduzir algumas dessas características do lodo de esgoto bruto, deve ser realizado o tratamento adequado, com redução da umidade, estabilização do lodo e higienização para redução do potencial contaminante. Esse processo pode se tornar bastante dispendioso, representando, aproximadamente, 40% dos custos de implantação, 50% dos custos de operação e 90% dos problemas operacionais, de acordo com Khiari *et al.*, (2004 *apud* PEDROZA *et al.*, 2010). Os principais custos operacionais relacionados ao tratamento de esgoto e, consequentemente, ao tratamento do lodo de esgoto são mão de obra interna, serviços de terceiros, produtos químicos, energia elétrica, manutenção e transporte e disposição final de lodo de esgoto (CANZIANI *et al.*, 1999, JORDÃO; PESSÔA, 2017 *apud* CERQUEIRA, 2019).

4.1.1 Legislação e metas

No panorama internacional, os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) são diretrizes propostas pela Organização das Nações Unidas (ONU) para orientação do desenvolvimento nas esferas econômica, social e ambiental, com o objetivo de promover a sustentabilidade em escala global. Entre os 17 objetivos propostos, são relacionados diretamente ao tema de esgotamento sanitário e aproveitamento de resíduos os objetivos 6 – Assegurar a disponibilidade e gestão

sustentável da água e saneamento para todas e todos, e 12 – Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis. Algumas das metas são a universalização do acesso ao saneamento e higiene, ampliar apoio a atividades de tratamento de efluentes, reciclagem e tecnologias de reuso, alcançar a gestão sustentável e uso eficiente dos recursos naturais, reduzir a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso (IPEA, 2018).

No Brasil, a legislação estabelece diretrizes para a prestação dos serviços de saneamento básico, regidas principalmente pela Lei nº 11.445, de 2007, e pela atualização do marco legal do saneamento, Lei nº 14.026, de 2020. De acordo com a primeira, os serviços de saneamento devem ser prestados com base nos princípios de adequação à saúde, proteção ao meio ambiente, eficiência e sustentabilidade econômica. De acordo com o marco legal do saneamento, é necessário garantir o atendimento de 90% da população com coleta e tratamento de esgotos até o dia 31 de dezembro de 2033. Com a determinação dessa lei, a tendência é que aumente o número de estações de tratamento de esgoto, provavelmente seguindo os tipos de tratamento mais utilizados atualmente, supracitados, aumentando, consequentemente, a quantidade de lodo produzido em todo o país. O lodo, ora descartado de forma inadequada, ora com destinação final única a disposição em aterros sanitários, pode ter diversas alternativas de aproveitamento, anteriores à disposição final.

Neste mesmo contexto, a Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), dispõe sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos. No que tange à gestão de lodos de esgoto sanitário, esta legislação inclui a intenção de reduzir a quantidade de resíduos com disposição final e aumentar a inserção na economia circular, de forma diminuir o uso de novas matérias-primas e aumentar a reutilização de recursos. O lodo, como sendo um material com características aplicáveis a diversas áreas, pode ter diferentes alternativas de reúso ou mesmo redução de volume e quantidade direcionada à disposição final, como o uso em fertilização do solo, produção de materiais para construção civil ou mesmo produção de energia.

4.1.2 Composição do lodo de esgoto

Após o tratamento, o esgoto gera vários subprodutos, entre eles, o lodo de esgoto. Denomina-se lodo, ou biossólido, o sólido formado durante o processo de tratamento de esgoto (ANDREOLI, 2006). Como apresentado, existem dois principais tipos de lodo produzidos em uma ETE, o lodo primário, constituído por sólidos resultantes do processo físico de sedimentação do esgoto bruto, e o lodo secundário, proveniente de tratamento biológico,

composto principalmente de sólidos não biodegradáveis e de microrganismos que fazer a degradação da matéria orgânica no tratamento secundário. Por ser um resultante do tratamento do esgoto, o lodo tem as características de seu esgoto gerador, podendo essas serem muito variáveis a depender das características do efluente, sua origem e o próprio processo de formação do lodo. Para a caracterização do lodo, observa-se parâmetros como teor de umidade, densidade, concentração de carbono, nitrogênio, fósforo e metais pesados (CORRÊA; FONSECA; CORRÊA, 2007). Também, é importante verificar a quantidade de microrganismos, como vírus, bactérias e protozoários.

Na Tabela 2, observa-se intervalos de concentração de alguns dos parâmetros de caracterização do lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE).

Tabela 2 - Principais características do lodo da Estação de Tratamento de Esgoto Brasília Norte.

Parâmetro	Lodo de esgoto	Unidade
Umidade	86-88	%
Densidade	1,1-1,2	mg/m ³
Carbono total	310-330	g/Kg
Nitrogênio total	51-59	g/Kg
Relação C/N	5,8-1	-
Fósforo total	31-60	g/Kg
Alumínio	2,3-3,7	g/Kg
Potássio	2-6	g/Kg
Arsênio	<0,6	g/Kg
Cádmio	4-6	g/Kg
Chumbo	10-11	g/Kg
Cobre	87-104	g/Kg
Cromo	18-21	g/Kg
Mercúrio	<4	g/Kg
Molibdênio	<7	g/Kg
Níquel	5-6	g/Kg
Selênio	<1,3	g/Kg
Zinco	159-169	g/Kg

Fonte: Corrêa (2007), adaptado pela autora (2022).

Ainda, além das características físico-químicas apresentadas na Tabela 2, o lodo de esgoto também possui uma grande quantidade de organismos patogênicos, transmitido durante o tratamento do esgoto para o lodo formado. A Tabela 3 apresenta os valores de concentração alguns grupos de bactérias existentes no lodo de esgoto, podendo ser reduzidas nos processos de estabilização e higienização (ANDREOLI, 2001).

Tabela 3 - Concentração de bactérias no lodo bruto, observadas nos Estados Unidos, em número/g de peso seco.

Bactéria	Lodo primário bruto	Lodo secundário bruto
Coliformes totais	$1,2 \times 10^8$	$7,0 \times 10^8$
Coliformes fecais	$2,0 \times 10^7$	$8,3 \times 10^6$
Estreptococos	$8,9 \times 10^5$	$1,7 \times 10^6$
Salmonella	$4,1 \times 10^2$	$8,8 \times 10^2$

Fonte: Andreoli (2001).

4.1.3 Tratamento do lodo de esgoto

As características físicas do lodo de esgoto, juntamente com suas características orgânicas, fazem a necessidade de que seja submetido a um processo de tratamento, cujas etapas objetivam reduzir o volume, umidade e estabilizar a matéria orgânica, para, então, ser levado a sua destinação final. O processo de tratamento pode ser formado por cinco etapas: adensamento, estabilização, condicionamento, desaguamento e higienização. Cada uma delas será detalhada a seguir.

I. Adensamento

O adensamento é a etapa em que se propõe reduzir o volume. No tratamento do lodo, esse processo é associado à redução de umidade, aumentando a concentração de sólidos. Assim, é possível reduzir a capacidade volumétrica das unidades tratamento subsequentes, como volume dos digestores e tamanho de bombas. Outros benefícios incluem a redução de consumo de produtos químicos no desaguamento e menor consumo de energia no aquecimento dos digestores (MIKI *et al.*, 2006 *apud* PEDROZA *et al.*, 2010).

De acordo com Piveli (2007), os lodos de decantadores secundários de sistemas de lodos ativados com aeração prolonga possuem teor de sólidos inferior a 1% e, com um adensador, o eleva para 2%, havendo uma redução de volume de lodo de 100% a ser desidratado. Em um sistema de lodos ativados convencional ou de filtros biológicos aeróbios, o lodo misto, formado por lodo primário e secundário, é gerado com teor de sólidos entre 1,0 e 1,5% e sua elevação para cerca de 4% permite uma redução de volume ainda maior.

Essas informações evidenciam a importância da fase de adensamento, facilitando a gestão do lodo dentro da ETE e nas fases posteriores do tratamento, em vista do menor volume. Essa etapa reduz a umidade e volume, aumentando a concentração de sólidos para até 12% (BITTON, 2001 *apud* PEDROZA *et al.*, 2010).

Entre os principais tipos de adensamento, os processos mais comuns são por gravidade, centrífuga, flotação com ar dissolvido, adensador de esteira e tambor rotativo (METCALF; EDDY, 2002).

II. Estabilização

Os processos de estabilização do lodo têm sido desenvolvidos com o objetivo de mineralizar a fração biodegradável da matéria orgânica presente no lodo, reduzindo o risco de apodrecimento e a concentração de patógenos (METCALF; EDDY, 2002).

As principais formas de realizar a estabilização do lodo de esgoto são através da redução biológica de sólidos voláteis, da oxidação química da matéria orgânica, da adição de produtos químicos no lodo para impedir a sobrevivências dos microrganismos e da aplicação de calor para a desinfecção ou esterilização do lodo (ANDREOLI, 2006).

A estabilização do lodo inclui os processos de digestão aeróbia, digestão anaeróbia, estabilização química, principalmente com cal, estabilização térmica e compostagem (LUDUVICE, 2001 *apud* PEDROZA *et al.*, 2010). O processo mais comum para ETEs de médio a grande porte é a digestão anaeróbia (ANDREOLI, 2006).

A Tabela 4 apresenta algumas vantagens dos principais métodos de estabilização utilizados em ETEs.

Tabela 4 - Métodos de estabilização de lodos de esgoto.

Método de tratamento	Função	Vantagem
Calagem (adição de cal)		-
Tratamento térmico		-
Digestão anaeróbia	Estabilização	Redução de massa
Digestão aeróbia		Redução de massa
Compostagem		Recuperação de produtos

Fonte: Leite (2011).

III. Condicionamento

O condicionamento é a fase do tratamento do lodo cujo objetivo é melhorar as características de separação das fases sólido-líquida do lodo quando se aplica métodos mecanizados de desaguamento. Esse processo pode ser realizado por meios físicos ou químicos (ALÉM SOBRINHO, 2006 *apud* PEDROZA *et al.*, 2010). Nele, há a neutralização ou desabilitação das forças químicas ou físicas atuantes nas partículas coloidais e no material particulado em

suspensão imersos no líquido, de forma que permita a formação de flocos a partir de partículas menores (ANDREOLI, 2006).

Os coagulantes mais utilizados são cloreto férrico e cal, além de polímeros orgânicos e outros coagulantes inorgânicos, como sulfato de alumínio e sulfato férrico (ANDREOLI, 2001). Conforme o Water Pollution Control Federation (1988 *apud* PEDROZA *et al.*, 2010), o condicionamento químico, seguido do desaguamento, auxilia na redução de umidade do lodo de 90 a 99 % para 65 a 80%, dependendo das características do lodo. Outras etapas do tratamento também são beneficiadas pelo processo de condicionamento, como o adensamento e o desaguamento mecânico (ANDREOLI, 2006).

IV. Desaguamento

O objetivo do desaguamento é a remoção de água para atingir teores de sólidos superiores a 20%, reduzindo-se consideravelmente o volume de lodo a ser transportado e facilitando as destinações posteriores, como disposição em aterro e na agricultura (PIVELI, 2007). Apesar de ser sólido, o lodo possui um teor de umidade de 95% a 97%, no caso do lodo primário, o que provoca um aumento de peso e volume no material (SENAI, 2008). Portanto, as principais razões para a aplicação da etapa de desaguamento são redução do volume, redução do custo de transporte e disposição final, facilitação do manejo do lodo e aumento do poder calorífico devido à redução de umidade (ANDREOLI, 2001).

Os processos de desaguamento podem ser divididos entre métodos de secagem natural ou mecânicos. Entre os métodos naturais, os mais comuns são os leitos de secagem e as lagoas de lodo. Entre os mecânicos, pode-se citar os filtros prensa, centrífugas e prensas parafuso (ANDREOLI, 2006; PEDROZA *et al.*, 2010; VAN HAANDEL, 2006 *apud* PEDROZA *et al.*, 2010).

A escolha do processo de desidratação decorre do tipo de biossólido, da área disponível nas ETEs, do destino posterior e das condições econômicas. O teor de umidade do biossólido está ligado ao tipo de estabilização e desaguamento utilizados (SAYEG *et al.*, 2005 *apud* PEDROZA, 2010).

V. Higienização

A higienização é a etapa que tem como objetivo principal a redução do potencial contaminante do lodo. A sanidade do lodo é caracterizada pela ausência de agentes patogênicos como ovos de helmintos, cistos de protozoários, colônias de bactérias, hifas de fungos e alguns vírus. Dessa

forma, há a redução do risco de infecção nos seres humanos e em animais, podendo esse material ser utilizado como adubo orgânico (ANDREOLI, 2001).

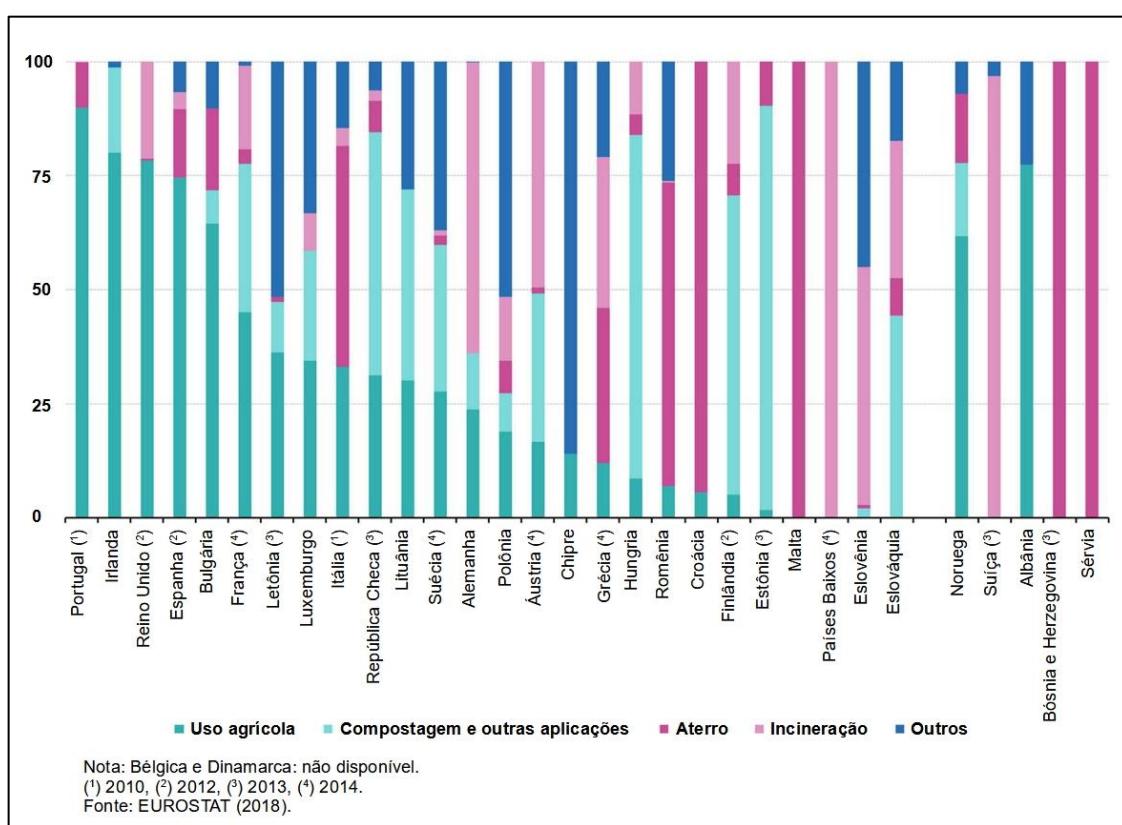
Os métodos mais difundidos são a compostagem e caleação, por serem mais baratos e práticos, porém, resultam num maior volume final de material. Outra alternativa para a higienização é a secagem térmica, que, além de descontaminar o lodo de forma eficiente, ainda contribui para a redução da umidade e do volume, sem a necessidade do uso de cal, que aumenta o pH e causa restrições de uso na agricultura (ANDREOLI, 2001).

A digestão anaeróbia quando realizada em temperatura termofílica também agrega capacidade de higienização.

VI. Disposição final

Após as etapas de tratamento do lodo na ETE, o lodo é encaminhado para sua disposição final. São variadas as possibilidades de aproveitamento e disposição final do lodo de esgoto. A Figura 1 apresenta alguns percentuais dos tipos de descarte do lodo de esgoto em vários países do mundo.

Figura 1 - Porcentagem do destino final de lodo proveniente de estações de tratamento de efluentes domésticos em 2015.



Fonte: Eurosat (2018 *apud* AMARAL, 2018), adaptado pela autora (2022).

A seguir, serão discutidas as principais alternativas de destinação de lodo existentes.

4.2 Destinação final do lodo de esgoto

4.2.1 Método convencional

A alternativa de disposição em aterro sanitário consiste na deposição de resíduos em trincheiras, que são compactados e recobertos com solo ou materiais inertes, com controle de variáveis técnicas e ambientais (BATISTA, 2015). Nesse processo, não há aproveitamento dos nutrientes do lodo, o qual é confinado em células, sofre processo de biodegradação anaeróbia e gera vários subprodutos, como o metano e o chorume (SANTOS, 2003). Existem duas modalidades de disposição, podendo ser em aterro exclusivo para lodo, cujo teor de sólidos deve ser superior a 30%, e a opção de co-disposição com resíduos sólidos urbanos. Essa última, tende a acelerar o processo de biodegradação e reduz a vida útil do aterro, dependendo da quantidade disposta (SANTOS, 2003).

Para a implantação de um aterro sanitário, são necessários estudos ambientais e o planejamento de controle ambiental detalhado, pois o lixiviado produzido, ou chorume, contém altas concentrações de contaminantes, entre eles os metais pesados e poluentes orgânicos (BATISTA, 2015). Quando o aterro chega ao fim de sua vida útil, é permitido a instalação de parques, áreas verdes e campos esportivos. Todavia, deve-se evitar construções, visto que os resíduos orgânicos continuarão sua decomposição por muitos anos, ocasionando recalques diferenciais (SANTOS, 2003).

Segundo Vieira (2011), há uma tendência mundial no sentido de proibir a disposição de biossólidos em aterros sanitários. Essa orientação é fundamentada por estudos recentes que indicam a possibilidade de seu reuso em outras atividades. Com isso, reduziria a pressão por recursos extraídos da natureza, por exemplo, os fertilizantes minerais, e diminuiria a necessidade da construção de novos aterros.

4.2.2 Métodos alternativos de uso de lodos de esgoto

4.2.2.1 *Produção de biogás*

A digestão anaeróbia é um dos processos mais antigos empregados para estabilização de lodos. Esse processo envolve a decomposição da matéria orgânica e a redução da fração inorgânica (principalmente o sulfato) na ausência de oxigênio (METCALF & EDDY, 2013 *apud*

PEREIRA, 2016), ocorrendo em três etapas, segundo Andreoli *et al.* (2001 *apud* PEREIRA, 2016):

- Produção de enzimas por microrganismos, quebrando compostos orgânicos complexos (celulose, proteína e lipídios) em compostos orgânicos solúveis (ácidos graxos, álcoois, dióxido de carbono e amônia);
- Conversões dos produtos do primeiro estágio, por microrganismos, em ácido acético, ácido propiônico, hidrogênio, dióxido de carbono, além de outros ácidos orgânicos de baixamassa molecular;
- Formação do metano a partir de dois grupos diferentes grupos de Archaeas: um grupo utiliza o gás carbônico e o hidrogênio, enquanto o outro realiza a conversão do acetato.

O subproduto da digestão anaeróbia é o biogás, composto, em grande parte, pelo gás metano. No processo de tratamento de esgoto, ainda pode ser gerado biogás a partir do tratamento anaeróbio do esgoto. Todavia, ressalta-se que os substratos são diferentes para os processos mencionados. Enquanto os reatores anaeróbios são utilizados para tratar o esgoto doméstico, os digestores de lodo são aplicados nas linhas de tratamento da fase sólida das ETE e utilizam o lodo não estabilizado de processos aeróbios como matéria-prima (PEREIRA, 2016).

Em decorrência da característica biológica do processo, as variáveis que influenciam a produção de biogás são muitas, entre elas a impermeabilidade do ar, a temperatura, o pH, a quantidade de água e os nutrientes. Apesar disso, devem ser avaliadas e controladas as condições para minimizar o impacto sobre a produção de biogás (HEBERLE, 2013).

Devido à instabilidade das variáveis, a quantidade produzida e sua composição pode ser alterada de caso em caso. Em geral, os valores de composição do biogás gerado oscilam dentro das faixas mostradas na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição típica de biogás gerado em digestores de lodo.

Parâmetro	Unidade	Composição volumétrica Digestores de lodo
Metano – CH ₄	%	60 a 70
Gás carbônico CO ₂	%	20 a 40
Monóxido de carbono - CO	%	-
Nitrogênio – N ₂	%	< 2
Hidrogênio – H ₂	%	-
Sulfeto de hidrogênio – H ₂ S	ppmv	até 1000

Parâmetro	Unidade	Composição volumétrica
		Digestores de lodo
Oxigênio – O ₂	%	-

Fonte: Lobato (2011).

O biogás pode ter diversas aplicações dentro da ETE. A recuperação de biogás mais utilizada é para o aproveitamento térmico a partir da geração de calor por combustão, podendo ser utilizada para aquecimento do digestor, dos prédios, em países frios, e ainda para desidratação do lodo em secadores térmicos. A Tabela 6 apresenta a equivalência do biogás em relação a outros combustíveis tipicamente utilizados para as mesmas finalidades. Segundo Lobato (2011), esse é o método mais simples e eficiente de recuperação de energia contida no biogás, visto que 80% do valor calorífico do metano pode ser recuperado como energia útil (BIELSCHOWSKY, 2014).

Tabela 6 - Combustíveis utilizados nos dias de hoje, e sua equivalência ao biogás.

Combustível	Quantidade equivalente a 1m ³ de biogás
Lenha	1,450 kg
Querosene	0,342 L
Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)	0,396 L
Óleo diesel	0,358 L
Gasolina	0,312 L

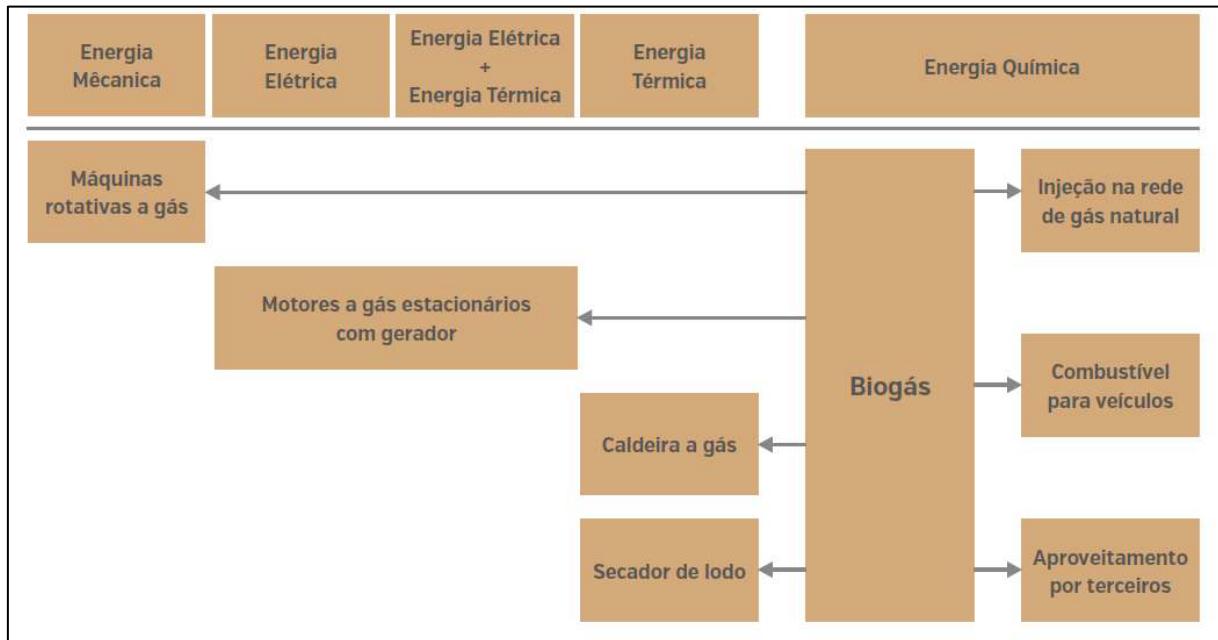
Fonte: Heberle (2013).

Ainda, o biogás pode ser aproveitado para produção de energia elétrica ou cogeração de energia com o uso de equipamentos geradores de energia elétrica, como motores a combustão interna e turbinas. Entre as principais vantagens do uso da cogeração, de acordo com a EPA (2011 *apud* BIELSCHOWSKY, 2014), destacam-se a produção de energia a custo inferior ao varejo. A substituição de combustíveis externos, possibilidade de qualificar a ETE para programas de energia verde de serviços públicos, melhoria na confiabilidade da energia para a ETE, produção de energia mais útil e redução das emissões gasosas que contribuem para o efeito estufa.

Tal geração de energia pode ser aproveitada dentro da própria estação de tratamento. De acordo com Deublein e Steinhauser (2008 *apud* LEITE, 2011), a energia consumida por uma planta de biogás, nas etapas de aquecimento do substrato, agitadores, bombeamento, entre outras, corresponde entre 20 e 30% da energia produzida pela planta por meio da queima do biogás.

A Figura 2 apresenta um esquema mostrando as diversas opções de aproveitamento do biogás.

Figura 2 - Opções par a utilização de biogás de ETEs.



Fonte: Probiogás (2015 *apud* AMARAL, 2018).

De acordo com Pavićić *et al.* (2022), na última década, houve um aumento de 90% na indústria do biogás mundial, passando de 65GW em 2010 para 120GW em 2019, em que cerca de 70% da produção global pertence à Europa. O uso de lodo de esgoto e esterco para a produção de biogás representam 80% dos materiais utilizados. Em torno de 2/3 do biogás produzido globalmente é direcionado para geração de calor ou energia, numa proporção de 50% de instalações de cada tipo.

Alemanha, França e Itália produzem a maior parte do biogás por processo de digestão anaeróbia, somando 98%, 79% e 62% respectivamente. As instalações de biogás com lodo de esgoto participam em 14% da União Europeia, mais aplicado na Suécia, país que possui 37% das unidades do bloco econômico (PAVIĆIĆ *et al.*, 2022).

No Brasil, a produção de biogás vem crescendo gradualmente, passando de um total de 39 plantas de produção de biogás em 2010 para 755 em 2021, de acordo com o CIBiogás (2021). Atualmente, apenas 65 plantas estão voltadas para o uso de resíduos sólidos ou esgoto, dessas a grande maioria, 56 unidades, usam para a produção de energia elétrica. O estado de Pernambuco teve sua primeira planta em 2015, detendo 6 plantas em 2021, todas com uso de resíduos sólidos ou esgoto para geração de eletricidade.

4.2.2.2 *Produção de biofertilizante*

Segundo Guedes (2005 *apud* ANDREOLI, 2006), a utilização de dejetos humanos na agricultura para melhorar a fertilidade do solo remonta à China antiga, quando os orientais utilizavam in natura e praticamente sem nenhum tratamento. Essa utilização foi incentivada também pela proibição do lançamento de lodo de esgoto em águas marinhas. A aplicação como fertilizante é justificada pelas uma grande quantidade de nutrientes, como nitrogênio (N) e fósforo (P), além de uma grande quantidade de carbono (C), presentes no lodo de esgoto.

O uso de lodo de esgotos na agricultura tem crescido ao longo dos últimos anos em todo o mundo. Esse incremento tem se disseminado tanto por aproveitar os efeitos benéficos dos componentes presentes no lodo, como também por ser uma alternativa de baixo custo, quando comparada às demais. Alguns autores indicam que o lodo de esgoto não seja utilizado como fertilizante orgânico substituto da adubação convencional, mas sim como um complemento desta adubação (BATISTA, 2015).

Apesar do valor econômico inquestionável, a utilização de lodos na agricultura deve ser feita de maneira cuidadosa de modo a não provocar danos ao solo, à cultura ou a quem aplica, respeitando-se os limites de utilização (DAVIS, 1989 *apud* GEYER, 2001) Existem diversos riscos em sua aplicação relacionados à sua qualidade. Há uma alta concentração de poluentes, incluindo metais pesados e compostos orgânicos, além de uma grande variedade de patógenos (vírus, bactérias, protozoários, entre outros) (BATISTA, 2015).

O uso como fertilizante não se limita apenas a áreas agrícolas. Também é bastante estudado o seu uso em áreas de reflorestamento e recuperação de áreas degradadas. Tsutya (2001 *apud* BATISTA, 2015) salienta que a aplicação do lodo em plantações florestais deve ser considerada à parte do uso agrícola. Isso porque os produtos das culturas florestais normalmente não são comestíveis, reduzindo riscos de contaminação pela entrada na cadeia alimentar e existe a capacidade de imobilizar grandes quantidades de nutrientes e metais pesados pela grande produção e distribuição de carbono orgânico.

No Brasil, essa prática está regulamentada pela Resolução CONAMA nº 375, de 29 de agosto de 2006, que define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Ainda, mais recentemente, aprovou-se a Resolução do CONAMA nº 498, de agosto de 2020. Essa resolução estabelece critérios e procedimentos para produção e aplicação de biofertilizantes em solos. Nela, biofertilizante é definido como “produto do tratamento do lodo de esgoto sanitário que atende aos

critérios microbiológicos e químicos estabelecidos nesta Resolução, estando, dessa forma, apto a ser aplicado em solos”.

A resolução impõe restrições quando ao lodo utilizado para a produção de biossólidos. É vetado o uso de:

- Lodo de estações de tratamento de efluentes de estabelecimentos de saúde, deportos e aeroportos;
- Lodos de sistema de tratamento individual, coletados por veículos antes de seu tratamento por uma unidade de gerenciamento de lodo (UGL);
- Lodo classificado como perigoso, de acordo com as normas brasileiras vigentes.

4.2.2.3 Aproveitamento em processos térmicos

O uso de processos térmicos para aproveitamento do potencial energético do lodo de esgoto também é uma opção viável comumente utilizada. Diversos estudos e a prática mostram que o lodo de esgoto possui um alto poder calorífico, principalmente quando possui menores teores de umidade, ou seja, passa por um processo mais intenso de desidratação ou secagem.

A incineração é um processo que implica na destruição das substâncias orgânicas presentes no lodo através de combustão controlada de resíduos. Ele pode ser aplicável a lodos de esgotos adensados e desaguados a um teor de sólidos mínimo de 25%. Normalmente, o volume de cinza residual é inferior a 4% do volume de lodo desaguado alimentado ao incinerador, denotando sua principal vantagem (LUDUVICE; FERNANDES, 2001 *apud* BATISTA, 2015).

Em geral, a incineração é empregada quando a contaminação do biossólido é muito alta ou quando não há possibilidade de implementação de outras alternativas (VIEIRA *et al.*, 2011).

Juntamente à considerável redução de volume, Lundin *et al.* (2004 *apud* VIEIRA *et al.*, 2011) afirmam que um dos aspectos favoráveis da incineração é a possibilidade de aproveitamento da energia contida no biossólido. A energia produzida durante o processo pode ser utilizada para a produção de calor ou eletricidade, em substituição a outras fontes energéticas, como óleo combustível ou gás natural.

Assim, a energia produzida é empregada no próprio processo de tratamento de lodo e esgoto, reduzindo o custo operacional da atividade. Segundo os autores, a receita proporcionada por esse aproveitamento de energia pode representar o equivalente a 11% dos custos operacionais totais dessa opção (VIEIRA *et al.*, 2011). Apesar dos ganhos, deve-se analisar a viabilidade,

visto que é uma alternativa que exige alto investimento inicial e apresenta custo elevado de operação (BATISTA, 2015).

4.2.2.4 Aproveitamento na construção civil

A construção civil é uma grande consumidora de matérias primas naturais, extraídas por mineração. Com o grande uso desses recursos naturais e os impactos ambientais causados pelo processo, têm sido realizados estudos acerca da viabilidade da substituição dos materiais convencionais e uso de resíduos de origens diversas (BRAGA; SANTOS, 2016 *apud* CHAVES, 2019).

Atualmente, vários resíduos já são utilizados comumente na indústria da construção civil, como é o caso da escória de alto forno, sílica ativa, casca de arroz, cinza da casca de arros, cinzas volantes fibra de coco e fibra de sisal. Os primeiros estudos para a utilização de lodos de esgoto na construção civil foram quanto ao aproveitamento como insumo para a produção de materiais cerâmicos (ALLEMAN e BERMAN, 1984 *apud* GEYER, 2001).

Os estudos realizados por Costa e Ferreira (1986 *apud* GEYER, 2001), com o uso de lodos de esgotos industriais com metais pesados, apontaram a viabilidade da introdução desses resíduos na fabricação de tijolos cerâmicos.

Mais recentemente, têm-se estudado a possibilidade do uso da cinza do lodo de esgoto como adição em argamassas e concreto. O estudo realizado por Basto (2018) indicou que a calcinação do lodo a uma temperatura de 600°C é adequado para a obtenção de material pozolânico. Costa (2014) demonstrou, em seu trabalho, que a cinza de lodo de esgoto não é um resíduo perigoso e não compromete as propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido, com teor de adição de 20%. Ainda, os estudos de Lima (2013) indicaram que há uma melhora na resistência mecânica à compressão em relação ao concreto com materiais convencionais. Porém, observou-se uma redução na resistência aos 91 dias, podendo ser atribuída a possíveis reações de degradação das matrizes cimentícias com cinza de lodo de esgoto.

Observaram-se também o uso para produção de agregados leves para o concreto nos estudos de Brosch *et al.* (1975 *apud* GEYER, 2001), obtendo-se resultados satisfatórios, mas com inviabilidade econômica, devido aos elevados custos da produção e poucos consumidores do material. Da mesma forma, o uso na fabricação de tijolos ecológicos mostrou-se tecnicamente viável, com obtenção de características técnicas segundo normas da ABNT (SOARES JÚNIOR *et al.*, 2016).

Ainda assim, são necessários mais estudos técnicos a respeito da viabilidade do uso do lodo de esgoto na construção civil, juntamente à aplicação de normas para essa prática.

4.3 Estudo de viabilidade

Os estudos de viabilidade são necessários para análise de um projeto, de forma a verificar a sua exequibilidade e efetividade. Eles podem ser classificados em estudos de viabilidade técnica, ambiental e econômica. A viabilidade técnica tem o objetivo de principal de analisar as soluções técnicas adotadas no projeto e se estas são aplicadas de forma correta e coerente com a realidade do local. Nesse caso, o estudo inclui também o levantamento das necessidades durante a execução, operação e manutenção do projeto (BETA, 2020). Já a viabilidade ambiental tem o objetivo de analisar os possíveis impactos de um empreendimento, que podem ter efeitos ambientais e sociais na vizinhança e até mesmo na região. Assim sendo, esse estudo maximiza os impactos positivos e busca soluções de mitigação dos impactos negativos (BETA, 2020). Ambos são muito importantes, visto que todos os investimentos de grande porte requerem uma avaliação técnica-ambiental (SENAI, 2003).

Já a avaliação econômica, ou econômico-financeira, geralmente, é o ponto mais importante do trabalho, em virtude da valorização desse aspecto por parte dos empresários, que normalmente aceitam projetos quando estes demonstram ser atraentes financeiramente (SENAI, 2003). Para esse estudo, são utilizadas medidas ou indicadores de lucratividade, como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno e o Período de Recuperação do Capital (*Payback*).

O VPL consiste em avaliar a lucratividade de determinada alternativa de investimento, em valores da data 0 (zero). Dessa forma, o VPL é calculado transferindo para a data 0 (zero) todos os desembolsos e recebimentos da alternativa de investimento descontados a uma determinada taxa de juros (NOGUEIRA, 2013). Essa taxa de juros é a Taxa Mínima de Atratividade. (TMA) é definida como parâmetro para a avaliação e varia com o tipo de projeto. Ela é “parte de uma política estabelecida pela alta administração da empresa e sujeita a modificações ou ajustes ao longo do tempo, uma vez que será utilizada em diferentes situações para projetos distintos e por pessoas pertencentes a diversos níveis da organização” (NOGUEIRA, 2013, p. 55).

A TIR corresponde à taxa de juros que torna o valor presente dos recebimentos igual ao valor presente dos desembolsos de um fluxo de caixa, ou seja, torna o VPL igual a 0 (zero).

Para o processo de determinação de tais indicadores, é necessário estruturar um fluxo de caixa, que corresponde à organização e ao controle dos momentos de entrada e saída do dinheiro do

caixa de uma empresa (NOGUEIRA, 2013). Nesse fluxo de caixa, são considerados também a inflação, a depreciação, a taxa de juros do investimento e a amortização

A inflação representa a desvalorização da moeda ou a perda de poder de compra da moeda em um determinado período (NOGUEIRA (2013). Por outro lado, a depreciação está associada à perda de valor dos ativos permanentes imobilizados de uma empresa e que não pode ser recuperada, geralmente devido ao desgaste físico e obsolescência tecnológica (NOGUEIRA, 2013)

A taxa de juros e a amortização estão relacionadas ao empréstimo realizado para o investimento no projeto. A taxa de juros considera a remuneração do dinheiro e os riscos associados à recuperação do capital investido. Já a amortização corresponde ao pagamento do empréstimo para investimento (NOGUEIRA, 2013).

5 METODOLOGIA

O presente trabalho objetiva a análise de diferentes alternativas para tratamento e aproveitamento do lodo de esgoto, de forma a indicar a alternativa mais viável economicamente. Para isso, foram estimados custos de operação, de investimento e receitas, baseadas em premissas e resultados de outros estudos sobre tratamento de lodo e disposição final. Foram considerados os seguintes cenários: a gestão convencional com destinação final em aterro sanitário e a gestão alternativa, considerando a geração de biogás a partir de digestão anaeróbia e produção de energia elétrica.

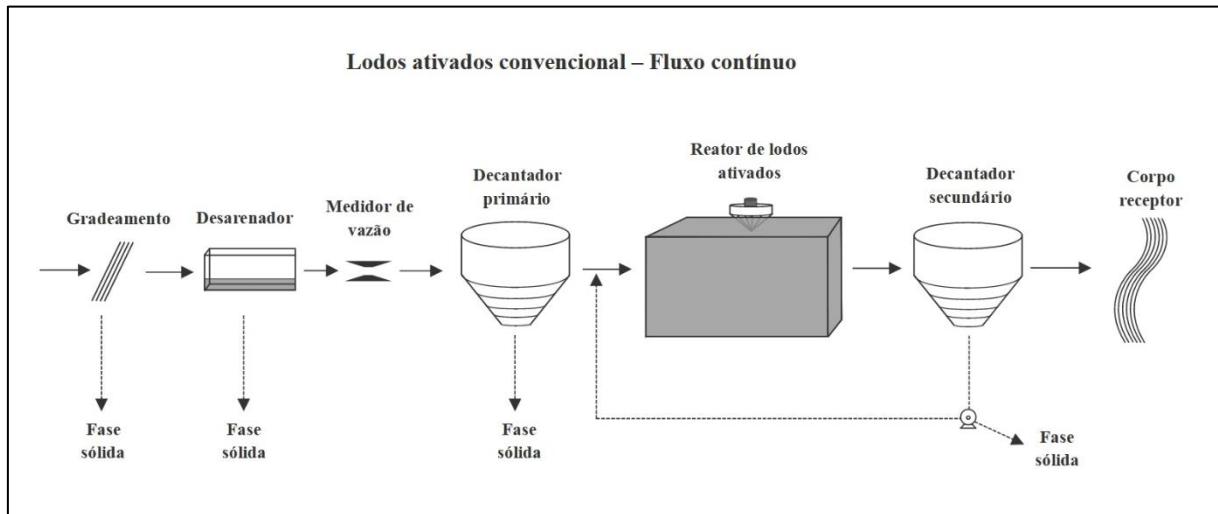
5.1 Delineamento do estudo

Pressupõe-se uma estação de tratamento de esgoto do tipo lodos ativados convencional a ser implantada na cidade do Recife, Pernambuco. A área de abrangência adotada para esse trabalho considera a população hipotética de um possível bairro no município, igual a 160.00 habitantes no ano de 2022. Considera-se que o horizonte de projeto é 2056, totalizando um prazo de 35 anos para construção e operação da estação de tratamento responsável por atender aos residentes da região.

A população de 160.00 habitantes baseou-se no estudo realizado por Valente (2015), realizado para verificar a viabilidade e escala mínima de uso de biogás de reatores anaeróbios. Nele, é demonstrado que a escala mínima para que o empreendimento seja considerado viável, em número de habitantes, para o arranjo de produção de biogás e geração de energia durante todo o dia é de 162.666. Apesar de ser voltado para tratamento anaeróbio de esgoto, e não digestão de lodo, o trabalho é focado na infraestrutura da linha de biogás, sendo, assim, aproveitável para o presente estudo.

O sistema da ETE é composto por gradeamento de sólidos grosseiros, desarenador, decantador primário, reator aeróbio e decantador secundário, como apresentado no esquema da Figura 3.

Figura 3 - Sistema de lodos ativados.



Fonte: Von Sperling (1996), adaptado pela autora (2022).

Durante o processo de tratamento, o lodo gerado é decantado e retirado para o seu devido tratamento e destinação final. Para a etapa de tratamento dos sólidos, ou lodo de esgoto, foram planejadas duas alternativas: a alternativa convencional, em que o lodo gerado é disposto em aterro sanitário sem nenhum aproveitamento na ETE (Alternativa 1), e a alternativa com geração de biogás e aproveitamento para geração de energia elétrica (Alternativa 2). O lodo que será avaliado para o estudo se refere à fase sólida gerada pelo decantador primário e decantador secundário, apenas. O material sólido retido no gradeamento e no desarenador deve ter sua destinação convencional, em ambas as alternativas.

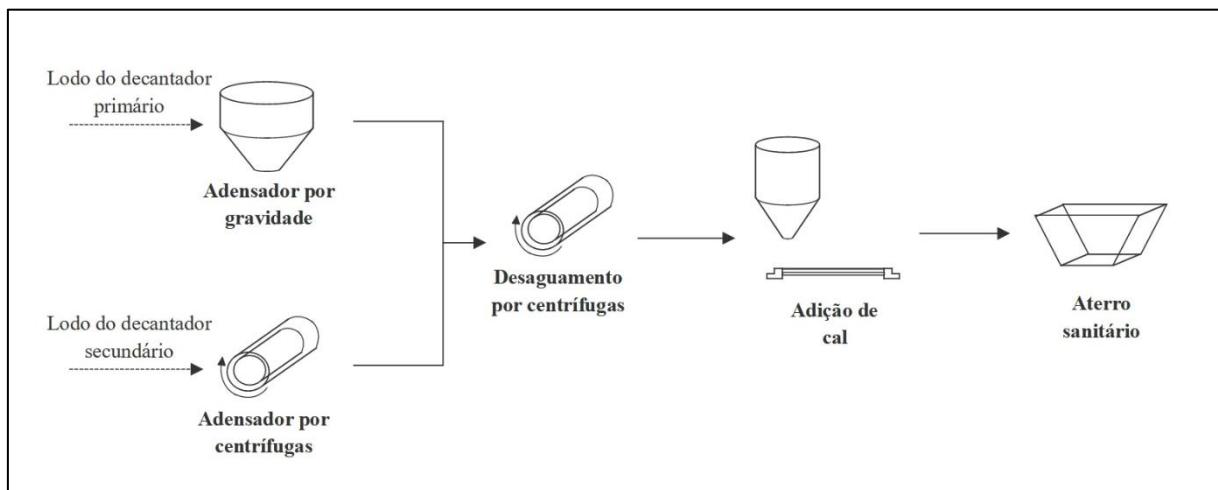
A escolha dos processos de adensamento do lodo, assim como das outras etapas do tratamento, seguiu as recomendações da NBR 12209 – Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários, a qual indica que os adensadores por gravidade sejam destinados, preferencialmente, a lodo primário e os adensadores por centrifugação, a lodo secundário. Quanto ao desaguamento, as centrífugas podem ser empregadas tanto para lodo cru, caso da alternativa convencional, como para lodo digerido, caso da alternativa com geração de biogás. Observa-se que, muitas vezes, a estabilização é feita durante o próprio processo de higienização. Em relação à estabilização química, foi selecionada como substituição à digestão biológica, também promovendo a higienização, com o uso de cal. A disposição final é o aterro sanitário, para ambas as alternativas.

À vista disso, a Alternativa 1 – Convencional foi projetada com base em sistemas de tratamento comumente aplicado em ETEs brasileiras. O processo é simplificado, composto pelas seguintes etapas:

- Adensamento por gravidade para o lodo primário e adensamento por centrífugas para o lodo secundário;
- Desaguamento por centrífugas;
- Estabilização e higienização por adição de cal.

A Figura 4 apresenta um esquema simplificado da Alternativa 1 – Convencional.

Figura 4 - Alternativa 1 – Convencional.



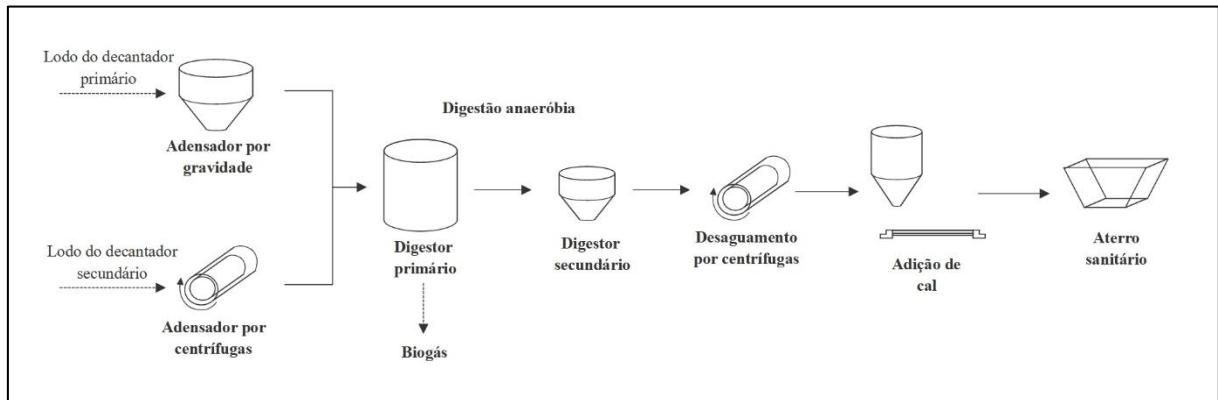
Fonte: Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), adaptado pela autora (2022).

Para a Alternativa 2 – Biogás, em que há aproveitamento do lodo de esgoto, foi incluído um digestor anaeróbio após a etapa de adensamento, como processo de estabilização do lodo e para possibilitar a geração de biogás. Tal digestor é separado em duas etapas: digestor primário e digestor secundário. O digestor primário é o reator onde ocorre o processo anaeróbio de decomposição e, depois, direciona os seus efluentes ao digestor secundário, um tanque tipo pulmão, com o objetivo de estocagem, adensamento e separação do sobredrenante (ABNT, 2011). O processo completo é composto pelas seguintes etapas:

- Adensamento por gravidade para o lodo primário e adensamento por centrífugas para o lodo secundário;
- Estabilização por digestão anaeróbia;
- Desaguamento por centrífugas;
- Higienização por adição de cal.

A Figura 5 apresenta um esquema simplificado da Alternativa 2 – Biogás.

Figura 5 - Alternativa 2 – Biogás.



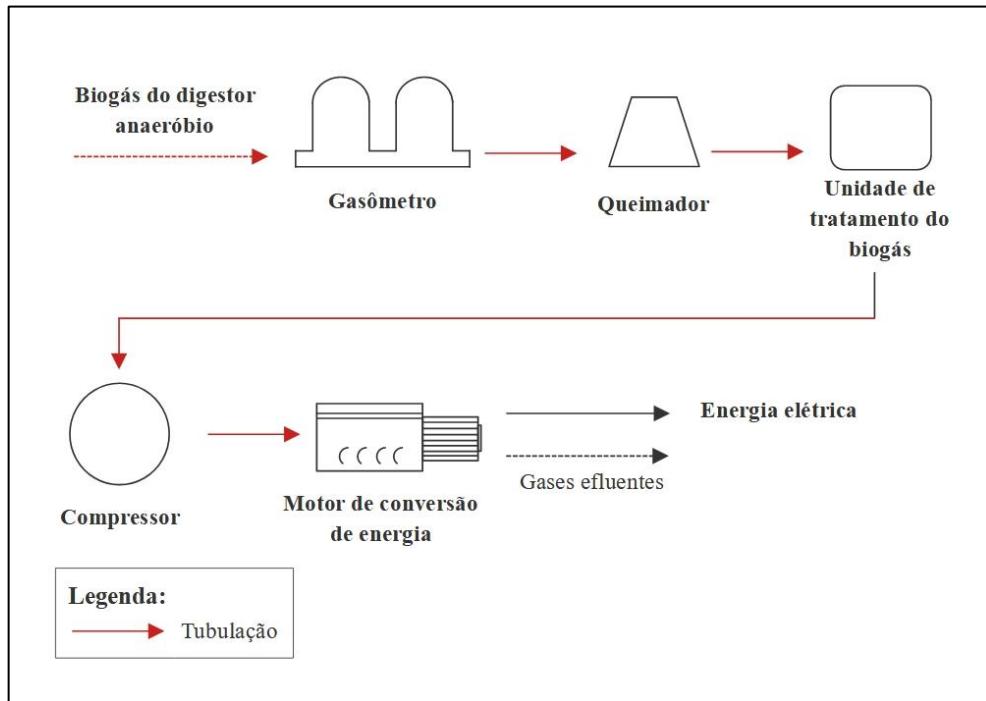
Fonte: Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), adaptado pela autora (2022).

Além da diferença nas etapas de tratamento de lodo, também deve ser projetada uma usina de energia para a Alternativa 2, para conversão do biogás gerado em energia elétrica. Com base em trabalhos relacionados ao tema de aproveitamento energético do biogás, a usina é normalmente composta por:

- Gasômetro;
- Queimador;
- Unidade de tratamento de biogás;
- Compressor;
- Motor de conversão de energia;
- Tubulação.

A Figura 6 apresenta um esquema da unidade de recuperação de energia elétrica.

Figura 6 - Esquema de unidade de recuperação energética utilizando biogás.



Fonte: A autora (2022).

5.2 Produção de lodo de esgoto

A estimativa de lodo produzido durante o processo de tratamento de esgoto e a vazão em cada uma das etapas do tratamento foi realizada a partir da metodologia desenvolvida por Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001).

Devido à diferença de tratamento entre as duas alternativas selecionadas para a análise, a quantidade de lodo tratado encaminhado ao aterro será diferente. Evidentemente, antecipa-se que o volume de lodo resultante do tratamento convencional é menor que no tratamento com digestão anaeróbia, devido à decomposição dos sólidos voláteis no digestor anaeróbio.

5.2.1 Alternativa 1 - Convencional

Supondo a população inicial de 160.000 habitante atendidos pela ETE, é possível estimar a quantidade retirada dos decantadores primário e secundário. A Tabela 7 indica os valores usuais e adotados para a carga per capita de sólidos (gSS/hab.dia) e o volume per capita de lodo (L/hab.dia) recolhido dos decantadores de esgoto. Quanto aos valores adotados nos cálculos dessa e das etapas seguintes, considerou-se valores médios das faixas usuais, balizados pelas normas vigentes e ponderados, eventualmente, a partir do conhecimento prático de consultores especialistas.

Tabela 7 - Produção e massa específica dos lodos primário e secundário de sistemas de lodos ativados.

Tipo de lodo	Carga per capita (gSS/hab.dia)		Volume per capita (L/hab.dia)	
	Usual	Adotado	Usual	Adotado
Primário	0,35-0,45	0,40	0,6-2,2	1,4
Secundário	0,25-0,35	0,30	2,5-6,0	4,25

Fonte: Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), adaptado pela autora (2022).

O cálculo do volume e da carga de lodo produzida foi calculada a partir das seguintes equações:

$$C_{SS\ PRIMÁRIO} = \frac{C_{SS\ PRIM.\ UNIT.} \times POPULAÇÃO}{1000}$$

Onde:

$C_{SS\ PRIMÁRIO}$: Carga de sólidos produzida no decantador primário (kgSS/dia);

$C_{SS\ PRIM.\ UNIT.}$: Carga de sólidos per capita produzida no decantador primário (gSS/hab.dia).

$$V_{PRIMÁRIO} = \frac{V_{PRIM.\ UNIT.} \times POPULAÇÃO}{1000}$$

Onde:

$V_{PRIMÁRIO}$: Volume de lodo produzido no decantador primário (m³/dia);

$V_{PRIM.\ UNIT.}$: Volume de lodo per capita produzida no decantador primário (L/hab.dia).

$$C_{SS\ SECUNDÁRIO} = \frac{C_{SS\ SEC.\ UNIT.} \times POPULAÇÃO}{1000}$$

Onde:

$C_{SS\ SECUNDÁRIO}$: Carga produzida no decantador secundário (kgSS/dia);

$C_{SS\ SEC.\ UNIT.}$: Carga per capita produzida no decantador secundário (gSS/hab.dia).

$$V_{SECUNDÁRIO} = \frac{V_{SEC.\ UNIT.} \times POPULAÇÃO}{1000}$$

Onde:

$V_{SECUNDÁRIO}$: Volume de lodo produzido no decantador secundário (m³/dia);

$V_{SEC.\ UNIT.}$: Volume de lodo per capita produzida no decantador secundário (L/hab.dia).

Após a retirada do lodo dos decantadores, inicia-se o processo de tratamento. A Tabela 8 apresenta os valores de captura de sólidos, teor de sólidos e massa específica nos processos selecionados para cada etapa.

Tabela 8 - Parâmetros para a Alternativa 1: Captura de sólidos, teor de sólidos e massa específica.

Processo	Adensamento por gravidade		Adensamento por centrifugação		Desaguamento por centrifugação	
	Usual	82-92	80-95	90-95	Adotado	90
Captura de sólidos (%)	Adotado	85	90	90		
	Usual	4-8	3-7	20-30		
Teor de sólidos (%)	Adotado	4	4	20		
	Usual	1020-1030	1020-1030	1050-1080		
Massa específica (kg/m ³)	Adotado	1025	1025	1065		
	Usual					

Fonte: Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), adaptado pela autora (2022).

De acordo com a NBR 12209, a recuperação máxima de sólidos em suspensão do lodo efluente em adensamento por gravidade é 85%, com teor de sólidos máximo de 8% no lodo primário bruto. Já no adensamento por centrifugação, a recuperação máxima de sólidos é de 95%, com teor de sólidos de 3% a 6% no lodo adensado.

Na etapa de desaguamento, ainda segundo a norma, admite-se obter um teor de sólidos entre 15% e 20% para lodo misto sem estabilização biológica. A captura de sólidos prevista está entre 90 e 95%. Esse tipo de desaguamento necessita da adição de polímeros para condicionamento do lodo, de forma a obter adequada eficiência. A Tabela 9 apresenta a dosagem aproximada de polímero seco e o valor adotado para o estudo, em conformidade com a norma, que recomenda o uso de polímero em pó numa proporção em massa de 0,1% a 0,3%.

Tabela 9 - Dosagem de polímero.

Densidade relativa (catiônico)	Dosagem aproximada (kg de polímero/ton. de lodo)	
	Usual	Adotada
Baixa	0,25-5,00	
Média	1,00-5,00	3,00
Alta	1,00-5,00	

Fonte: Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), adaptado pela autora (2022).

Observa-se, portanto, que os valores adotados se situam dentro dos limites estabelecidos por norma.

A norma, porém, não limita a quantidade de cal a ser utilizada para higienização ou estabilização. A quantidade deve ser suficiente para elevar o pH do lodo até 12, por pelo menos 2h, a fim de inibir as atividades microbianas. A Tabela 10 apresenta a quantidade de cal requerida para elevar o pH em lodos ativados.

Tabela 10 - Dosagem de cal para a Alternativa 1.

Tipo de lodo	pH final	Dosagem aproximada (kg de cal/ton. de lodo)	
		Usual	Adotada
Lodo ativado	12,6	190-350	270

Fonte: Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), adaptado pela autora (2022).

I. Adensamento

Para os dois tipos de adensamento, utilizou-se a mesma equação, com alteração das informações específicas para cada processo. É importante salientar que, para o adensamento por gravidade, aplica-se o lodo primário, e para o adensamento por centrifugação, aplica-se o lodo secundário.

$$C_{SS\ ADEN.} = \frac{C_{SS} \times CAP.\ SÓLIDOS\ ADEN.}{100}$$

Onde:

$C_{SS\ ADEN.}$: Carga do lodo adensado (kgSS/dia);

C_{SS} : Carga de sólidos do decantador primário ou secundário (kgSS/dia);

$CAP.\ SÓLIDOS\ ADEN.$: Captura de sólidos para o adensamento (%).

$$V_{ADEN.} = \frac{C_{SS\ ADEN.}}{\left(\frac{T.\ SÓL.\ ADEN.}{100} \right) \times M.\ ADENS.}$$

Onde:

$V_{ADEN.}$: Volume de lodo adensado (m³/dia);

$T.\ SÓL.\ ADEN.$: Teor de sólidos para o adensamento (%);

$M.\ ADENS.$: Massa específica do lodo adensado (kg/m³).

O lodo misto total adensado é formado pela soma do lodo primário e secundário adensados.

II. Desaguamento

$$M_{POL.} = \frac{C_{SS\ ADEN.} \times DOSAG.\ POL.}{1000}$$

Onde:

$M_{POL.}$: Massa de polímero (kgPolímero/dia);

$DOSAG.\ POL.$: Dosagem de polímero (kgPolímero/tonSS).

$$C_{SS\ DESAG.} = \frac{C_{SS\ ADEN.} \times CAP.\ SÓLIDOS\ DESAG.}{100}$$

Onde:

$C_{SS\ DESAG.}$: Carga do lodo desaguado (kgSS/dia);

$C_{SS\ ADEN.}$: Carga de lodo misto adensado (kgSS/dia);

$CAP.\ SÓLIDOS\ DESAG.$: Captura de sólidos para o desaguamento (%).

$$V_{DESAG.} = \frac{C_{SS\ DESAG.}}{\left(\frac{T.\ SÓL.\ DESAG.}{100} \right) \times M.\ DESAG.}$$

Onde:

$V_{DESAG.}$: Volume de lodo desaguado (m^3 /dia);

$T.\ SÓL.\ DESAG.$: Teor de sólidos para o desaguamento (%);

$M.\ DESAG.$: Massa específica do lodo desaguado (kg/ m^3).

III. Estabilização e higienização

$$M_{CAL} = \frac{C_{SS\ DESAG.} \times DOSAG.\ CAL}{1000}$$

Onde:

M_{CAL} : Massa de cal necessária para estabilização (kgCal/dia);

$DOSAG.\ CAL$: Dosagem de cal para $pH=12$ no lodo excedente (kgCal/tonSS).

IV. Lodo para disposição final em aterro sanitário

$$M_{TORTA} = \frac{C_{SS\ DESAG.}}{\frac{T.\ SÓL.\ DESAG.}{100}} + M_{POL.} + M_{CAL}$$

Onde:

M_{TORTA} : Massa final da torta de lodo (kgSS/dia);

V_{TORTA} : Volume final da torta de lodo (kgSS/dia).

5.2.2 Alternativa 2 - Biogás

A alternativa 2, com produção de biogás, possui processos semelhantes ao cálculo desenvolvido para a alternativa 1. As equações, e mesmo os resultados, são iguais na etapa de adensamento

do lodo. Após o adensamento, porém, o lodo segue para a etapa de estabilização por digestão anaeróbia. A partir disso, o lodo terá características diferentes do lodo analisado na alternativa 1.

Os valores adotados nos cálculos dessa e das etapas seguintes foram obtidos da mesma forma como mostrado anteriormente. A Tabela 11 apresenta os valores adotados para lodo misto digerido.

Tabela 11 - Parâmetros para a Alternativa 2: Captura de sólidos, teor de sólidos e massa específica.

Processo	Adensamento por gravidade		Adensamento por centrifugação	Estabilização por digestão anaeróbia	Desaguamento por centrifugação
	Usual	Adotado	80-95	90-95	90-95
Captura de sólidos (%)	Adotado	85	90	90	90
Teor de sólidos (%)	Usual	4-8	3-7	3-6	20-30
Massa específica (kg/m³)	Adotado	4	4	4	25
Relação SV/ST (%)	Usual	1020-1030	1020-1030	1007-1020	1050-1080
	Adotado	1025	1025	1013,5	1065
Eficiência de remoção de SV (%)	Usual	-	-	75-80	-
	Adotado	-	-	77,5	-
	Adotado	-	-	40	-

Fonte: Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), adaptado pela autora (2022).

Segundo a NBR 12209, nos digestores, obtém-se uma destruição típica de até 50% de SSV. No caso de temperatura não controlada, admitem-se valores da ordem de 30% a 40%. Dessa forma, os valores adotados enquadram-se nas indicações da norma.

A dosagem adotada para o polímero condicionante no desaguamento será a mesma para a Alternativa 2, mostrado na Tabela 9. Porém, a dosagem de cal será diferente, devido ao diferente tipo de lodo. A Tabela 12 apresenta a quantidade de cal requerida para elevar o pH em lodo anaeróbio.

Tabela 12 - Dosagem de cal para a Alternativa 2.

Tipo de lodo	pH final	Dosagem aproximada (kg de cal/ton. de lodo)	
		Usual	Adotada
Lodo anaeróbio	12,4	125-225	175

Fonte: Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), adaptado pela autora (2022).

I. Digestor primário

A digestão primária é a etapa onde ocorre a digestão aneróbia dos sólidos voláteis. Nesse caso, a metodologia de cálculo compreende as seguintes equações:

$$SV_{AFLUENTE} = \frac{SV}{ST} \times C_{SS\ ADEN.}$$

Onde:

$SV_{AFLUENTE}$: Carga de sólidos voláteis afluentes no digestor (kgSV/dia);

$\frac{SV}{ST}$: Relação sólidos voláteis/sólidos totais;

$C_{SS\ ADEN.}$: Carga de lodo misto adensado (kgSS/dia).

$$SF_{AFLUENTE} = \left(1 - \frac{SV}{ST}\right) \times C_{SS\ ADEN.}$$

Onde:

$SF_{AFLUENTE}$: Carga de sólidos fixos afluentes no digestor (kgSF/dia);

$\frac{SV}{ST}$: Relação sólidos voláteis/sólidos totais;

$C_{SS\ ADEN.}$: Carga de lodo misto adensado (kgSS/dia).

A carga de sólidos fixos não é alterada no processo de digestão. Dessa forma, os sólidos fixos afluentes são iguais aos sólidos fixos efluentes, assim como o volume de lodo permanece inalterado. Já os sólidos voláteis são digeridos segundo a eficiência do processo, como mostra a equação:

$$SV_{EFLUENTE} = \frac{(100 - E) \times SV_{AFLUENTE}}{100}$$

Onde:

$SV_{EFLUENTE}$: Carga de sólidos voláteis efluentes do digestor primário (kgSV/dia);

$SV_{AFLUENTE}$: Carga de sólidos voláteis afluentes no digestor primário (kgSV/dia);

E : Eficiência de remoção de sólidos voláteis (%).

A carga de sólidos totais efluentes do digestor secundário é igual à soma dos sólidos efluentes fixos e voláteis.

II. Digestor secundário

O digestor secundário, conforme mencionado, não tem função de digestão, mas tem o objetivo de armazenar o lodo efluente do digestor primário, funcionando, consequentemente, de maneira semelhante a um adensador. Nesse caso, o cálculo é dado pelas seguintes equações:

$$C_{SS\ D.\ SEC.} = \frac{C_{SS\ D.\ PRIM.} \times CAP.\ SÓLIDOS\ DIG.}{100}$$

Onde:

$C_{SS\ D.\ SEC.}$: Carga do lodo digerido após a digestão secundária (kgSS/dia);

$C_{SS\ D.\ PRIM.}$: Carga de lodo efluente do digestor primário (kgSS/dia);

$CAP.\ SÓLIDOS\ DIG.$: Captura de sólidos para o digestor secundário (%).

$$V_{DIG.} = \frac{C_{SS\ D.\ SEC.}}{\left(\frac{T.\ SÓL.\ DIG.}{100}\right) \times M.\ DIG.}$$

Onde:

$V_{DIG.}$: Volume de lodo digerido após a digestão secundária (m^3 /dia);

$T.\ SÓLIDOS\ DIG.$: Teor de sólidos para a digestão secundária (%);

$M.\ DIG.$: Massa específica do lodo digerido (kg/ m^3).

III. Desaguamento

$$M_{POL.} = \frac{C_{SS\ D.\ SEC.} \times DOSAG.\ POL.}{1000}$$

Onde:

$M_{POL.}$: Massa de polímero (kgPolímero/dia);

$DOSAG.\ POL.$: Dosagem de polímero (kgPolímero/tonSS).

$$C_{SS\ DESAG.} = \frac{C_{SS\ D.\ SEC.} \times CAP.\ SÓLIDOS\ DESAG.}{100}$$

Onde:

$C_{SS\ DESAG.}$: Carga do lodo desaguado (kgSS/dia);

$CAP.\ SÓLIDOS\ DESAG.$: Captura de sólidos para o desaguamento (%).

$$V_{DESAG.} = \frac{C_{SS\ DESAG.}}{\left(\frac{T_{SOL.\ DESAG.}}{100}\right) \times M_{DESAG.}}$$

Onde:

$V_{DESAG.}$: Volume de lodo desaguado (m^3/dia);

$T_{SOL.\ DESAG.}$: Teor de sólidos para o desaguamento (%);

$M_{DESAG.}$: Massa específica do lodo desaguado (kg/m^3).

Os cálculos das etapas de higienização e disposição final, assim como a etapa de adensamento, são iguais aos apresentados para a Alternativa 1, alterando-se a dosagem de cal.

Ao fim dos cálculos das quantidades de lodo de cada alternativa, o valor encontrado de lodo em cada etapa foi dividido pela quantidade de habitantes. Dessa forma, obtém-se o valor unitário em função da população, sendo possível a projeção ao longo dos anos do horizonte de projeto.

$$C_{SS\ UNIT.} = \frac{C_{SS}}{160.000}$$

Onde:

$C_{SS\ UNIT.}$: Carga unitária do lodo misto bruto, adensado, digerido, desaguado ou disposto em aterro sanitário ($\text{kgSS}/\text{hab.dia}$);

C_{SS} : Carga do lodo misto bruto, adensado, digerido, desaguado ou disposto em aterro sanitário (kgSS/dia).

$$V_{UNIT.} = \frac{V}{160.000}$$

Onde:

$V_{UNIT.}$: Volume unitário do lodo misto bruto, adensado, digerido, desaguado ou disposto em aterro sanitário ($m^3/\text{hab.dia}$);

V : Volume do lodo misto bruto, adensado, digerido, desaguado ou disposto em aterro sanitário (m^3/dia).

Quanto à quantidade dos produtos químicos polímero e cal, o consumo unitário foi obtido em função do volume de lodo adensado e desaguado, respectivamente, para cada uma das alternativas.

$$M_{POL.\ UNIT} = \frac{M_{POL.}}{V_{ADEN.}}$$

Onde:

M_{POL_UNIT} : Massa unitária de polímero (kgPolímero/m³Lodo);

M_{POL} : Massa de polímero (kgPolímero/dia);

V_{ADEN} : Volume de lodo adensado (m³/dia).

$$M_{CAL_UNIT} = \frac{M_{CAL}}{V_{DESAG}}$$

Onde:

M_{CAL_UNIT} : Massa unitária de cal (kgCal/m³Lodo);

M_{CAL} : Massa de polímero (kgCal/dia);

V_{DESAG} : Volume de lodo desaguado (m³/dia).

5.3 Produção de biogás e energia elétrica

A metodologia utilizada para a estimativa da produção de biogás foi baseada nos cálculos realizados nos estudos de Lima e Passamani (2012). Em relação à produção de energia, empregou-se os procedimentos de Valente (2015).

I. Produção de metano

A produção de biogás a partir da digestão anaeróbia está relacionada à quantidade de matéria orgânica removida durante o processo no reator, nesse caso, estimada a partir da DQO (Demanda química de oxigênio). Teoricamente, a produção de 1 mol de metano corresponde, estequiométricamente, à remoção de 2 moles de gás oxigênio (64 g). Porém, para estimar corretamente o volume na situação do presente trabalho, é necessário corrigir, a partir de um fator de correção K(T), as condições de temperatura e pressão.

Sendo assim, é possível usar uma correlação entre a quantidade de sólidos voláteis removidos e a quantidade de DQO, necessária para o cálculo. Para isso, utilizou-se a razão DQO/SV obtida no estudo realizado por Leite (2015), apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 - Relação DQO/SV no lodo.

Variáveis analisadas	Valor médio
DQO (g O ₂ /L)	23,4
SV (g/L)	14,7
DQO/SV	1,59

Fonte: Leite (2015), adaptado pela autora (2022).

Assim, a DQO removida pode ser encontrada através da seguinte equação:

$$DQO \text{ REMOVIDA} = \frac{DQO}{SV} \times SV \text{ REMOVIDA} \times 1000$$

Onde:

DQO REMOVIDA: DQO removida durante o processo de digestão anaeróbia (gDQO/dia);

SV REMOVIDA: Sólidos voláteis removidos durante o processo de digestão anaeróbia (kgSV/dia).

$$V_{CH4} = \frac{DQO \text{ REMOVIDA}}{K(T)}$$

Onde:

V_{CH4} : Volume de metano produzido (L/dia);

$K(T)$: Fator de correção para temperatura de operação do reator (gDQO/L).

O fator de correção pode ser obtido através da equação:

$$K(T) = \frac{P \times K}{R \times (273 + T)}$$

Onde:

P: pressão atmosférica (atm);

K: DQO correspondente a 1 mol de metano (64 gDQO/mol);

R: Constante universal dos gases (0,08206 atm.L/mol.K);

T: Temperatura de operação do reator (Temperatura média anual compensada de 1991 a 2022 = 26°C, segundo o INMET (2020)).

Quanto ao volume total de biogás produzido, utilizou-se a proporção de 60%, valor apresentado por Lobato (2011), na Tabela 5. Dessa forma, é possível calcular o volume de biogás a partir da equação:

$$V_{BIOGAS} = \frac{V_{CH4}}{\% CH4} \times \frac{100}{60}$$

Onde:

V_{BIOGAS} : Volume de biogás produzido (L/dia);

$\% CH4$: Percentual correspondente de metano no biogás (%).

II. Produção de energia elétrica

Para a estimativa da energia elétrica produzida a partir do biogás, é necessário conhecer o potencial calorífico inferior do metano (PCI). Para o presente estudo, será adotado o valor de 9,96 kWh/m³ (SANTOS, 2000 *apud* PEREIRA, 2016). Além disso, também é necessário conhecer o rendimento do motor de combustão interna utilizado. Segundo Pecora (2006 *apud* SANTOS *et al.*, 2014), o rendimento de motores a gás se situa entre 30% e 34%. Adotou-se, então, o valor de rendimento igual a 30%.

$$E. PROD. = \frac{V_{CH4} \times PCI \times N}{100000}$$

Onde:

E. PROD.: Energia produzida a partir do metano (kWh/dia);

V_{CH4}: Volume de metano (L/dia);

PCI: Potencial calorífico inferior do metano (kWh/m³);

N: Rendimento do motor (%).

Dessa forma, considerando uma operação durante 24h do dia, a potência de geração de energia é obtida a partir da seguinte equação:

$$POT. = \frac{E. PROD.}{24}$$

Onde:

POT.: Potência gerada (kW);

E. PROD.: Energia produzida a partir do metano (kWh/dia).

Assim como foi realizado para a produção de lodo, também será calculado um valor unitário para volume de biogás e energia gerada per capita, com o objetivo de projetar no horizonte de projeto em função da quantidade de habitantes. Os valores unitários podem ser obtidos a partir das seguintes equações:

$$V_{BIOGÁS\ UNIT.} = \frac{V_{BIOGÁS}}{160.000}$$

Onde:

V_{BIOGÁS UNIT.}: Volume unitário de biogás gerado (L/hab.dia);

V_{BIOGÁS}: Volume de biogás gerado (Ldia).

$$E. UNIT. = \frac{E. PROD.}{160.000}$$

Onde:

E. UNIT.: Energia unitária produzida a partir do metano (kWh/hab.dia);

E. PROD.: Energia produzida a partir do metano (kWh/dia).

5.4 Projeção populacional

Com o objetivo de estimar a população no final do horizonte de projeto para permitir, posteriormente, o levantamento dos custos, analisou-se o crescimento populacional da cidade de Recife. Segundo o IBGE, existem dados da população do município nos anos de 1970, 1980, 1991, 2000, 2010, além da estimativa do próprio IBGE para o ano de 2021, segundo métodos estatísticos. A Tabela 14 apresenta os dados de população residente nos anos mencionados.

Tabela 14 - População de Recife de 1970 a 2021.

População	1970	1980	1991	2000	2010	2021
Recife (PE)	1.060.701	1.203.887	1.298.229	1.422.905	1.537.704	1.661.017

Nota: o valor para o ano de 2021 foi obtido pela estimativa do próprio IBGE (2022b).

Fonte: IBGE (2022a, 2022b).

A partir dos dados da Tabela 14, explorou-se as diversas funções no Microsoft Excel para seleção da linha de tendência mais adequada ao crescimento que o município tem demonstrado nos anos anteriores.

Entre as opções de linha de tendência, é possível escolher entre as curvas das funções exponencial, linear, logarítmica, polinomial ou função potência. Para selecionar a função apropriada, observa-se o coeficiente de determinação (R^2) de cada opção. Esse coeficiente corresponde ao grau de ajuste da função em relação aos dados. Quanto mais próximo do valor 1, mais ajustada estaria a função em relação às informações de referência.

Além do coeficiente de determinação, é importante observar se os valores projetados com função selecionada se assemelham às curvas de crescimento populacional, seguindo padrões de crescimento ou estagnação no ponto de saturação. Dessa forma, em situações normais, os valores não devem decrescer consideravelmente ao longo do tempo, como é o caso de uma função polinomial de segundo grau, que pode decrescer após o ponto de inflexão.

5.5 Investimentos - CAPEX

A aferição dos custos para investimento em equipamentos e obras para a implantação dos sistemas de tratamento de lodo baseou-se nos estudos de Peleteiro e Almeida (2014) devido à semelhança entre os tipos de tratamento de esgoto e de lodo adotados, além de atender à uma população semelhante. Apenas para a etapa de higienização foi utilizado o estudo de Cerqueira (2019).

Quanto ao aproveitamento de biogás para produção de energia elétrica, foi realizado uma revisão dos valores utilizados em diferentes trabalhos, como forma de selecionar o mais adequado.

- Viabilidade técnica e econômica de estações de tratamento de esgoto com cogeração com biogás em diferentes escalas de suprimento de energia (PEREIRA, 2016);
- Geração de eletricidade a partir do biogás da ETE São José em Varginha-MG: Análise do potencial e a viabilidade do aproveitamento (NOGUEIRA; GOMES, 2020);
- Análise da Viabilidade técnica e econômica de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na estação de tratamento de esgoto Serraria, em Porto Alegre (RS) (GARCIA, HOFFMAN, MAYER, 2015);
- Um estudo dos custos de implantação de empreendimento de aproveitamento energético do biogás de estações de tratamento de esgoto (SANTOS *et al.*, 2014);
- Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso de biogás de reatores anaeróbios em estações de tratamento de esgoto no Brasil (VALENTE, 2015).

A fim de estimar o custo para o presente trabalho, utilizou-se custos unitários, em função da capacidade de cada equipamento. Os equipamentos de lodo foram calculados em função da vazão de lodo por hora, ou sua capacidade em cada etapa, enquanto os equipamentos de biogás, foram referidos à vazão diária de biogás referido nos seus respectivos estudos. No caso do motor utilizado para a conversão em energia elétrica, utilizou-se custos unitários em função da potência operacional. Para estimar o investimento para o presente trabalho, utilizou-se as vazões de lodo em cada etapa e de biogás no final do plano (2056).

Em consequência das diferentes datas de elaboração dos trabalhos utilizados, todos os custos foram atualizados para o ano de 2022 com base no Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) (VON SPERLING, 2007 *apud* PACHECO, 2011). Para isso, utilizou-se a

Calculadora do Cidadão, disponibilizada pelo Banco Central do Brasil no *website* do Governo Federal (BCB, 2022).

Em relação aos custos de Benefícios de Despesas Indiretas (BDI) e obras civis de adaptação, assumiu-se 30% do investimento total em equipamentos (VALENTE, 2015).

5.6 Despesas operacionais - OPEX

As despesas operacionais foram separadas em: pessoal próprio, manutenção, energia elétrica, produtos químicos e transporte e disposição de lodo de esgoto. Cada um será definida a seguir.

É importante ressaltar que, assim como os custos de CAPEX, todos os custos de OPEX foram atualizados para o ano de 2022 com base no Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) (VON SPERLING, 2007 *apud* PACHECO, 2011).

5.6.1 Pessoal próprio

As despesas de pessoal próprio se referem aos custos relacionados à contratação de operadores e colaboradores para o tratamento de lodo de esgoto. A quantidade de operadores foi ponderada com base em diferentes estudos. Cerqueira (2019), em seu trabalho, faz a avaliação dos custos operacionais, inclusive pessoal, em diferentes etapas de tratamento de lodo. Valente (2015), estima um aumento no quadro de funcionários para controle e manutenção dos equipamentos da unidade de recuperação energética. Dessa forma, a Tabela 15 apresenta a quantidade de operadores para operação durante 24 h, assumida constante no horizonte de projeto.

Tabela 15 - Número de operadores.

Alternativa	Número de operadores
Alternativa 1	4
Alternativa 2	8

Fonte: A autora.

Em relação aos custos para mão de obra operacional, considerou-se o valor de R\$ 58.932,31/ano para cada operador, apresentado no Plano de Negócios Referenciais para concessão de serviços públicos de esgotamento sanitário na cidade do Crato – CE (CRATO, 2020). Inclusos a esse valor, estão os encargos, benefícios e outras despesas indiretas com a mão de obra.

Como o município do Crato é de porte menor que o de Recife, cidade em que será implantado o projeto, considerou-se um aumento de 20% no salário anual, adotando-se, portanto, o valor de R\$ 70.718,77/ano para cada operador.

5.6.2 Manutenção

As despesas de manutenção se referem aos custos relacionados à revisão e conserto dos equipamentos. Os custos de manutenção foram estimados como um percentual do custo do CAPEX dos equipamentos. Bielschowsky (2014) utilizou o valor de 1,5%, enquanto Valente (2015) utiliza 2%. Finalmente, o valor considerado para este trabalho foi de 2% do CAPEX.

5.6.3 Energia elétrica

A energia elétrica é a despesa referente ao consumo dos equipamentos utilizados para tratamento do lodo de esgoto. É um dos custos mais importantes a ser analisado nesse trabalho, pois contribui consideravelmente para a diferença entre os custos da ETE, devido à produção de energia na Alternativa 2.

Como os equipamentos de tratamento de lodo de esgoto foram estimados com base em custos unitários, o mesmo foi realizado para calcular a potência de cada equipamento. Considerou-se funcionamento durante 24h. Ainda, como forma de estimar a energia consumida em toda a ETE, utilizou-se o valor médio de consumo de energia per capita para aeração de esgoto em estações de tratamento de lodos ativados convencional, igual a 22 kWh/hab.ano (VON SPERLING, 2005 *apud* VALENTE, 2015).

Para a produção de energia, a metodologia será baseada no estudo realizado por Valente (2015). Em seu trabalho, ele realizou uma avaliação entre cinco diferentes arranjos de aproveitamento de biogás, dois deles com recuperação de energia elétrica. No arranjo 1, conversão é realizada durante todo o dia e a energia é consumida integralmente pela ETE. Em contrapartida, o arranjo 2 consiste na produção de energia durante o horário de ponta, 3 horas do dia em que há acréscimo na demanda e aumento da tarifa; nesse caso, a energia excedente não consumida nesse horário é injetada na rede. Verificou-se que a escala mínima de viabilidade da ETE é menor para o arranjo 1, metodologia que será aplicada a este trabalho. Dessa forma, a energia produzida é abatida da energia consumida durante os horários de ponta e fora de ponta, conforme é produzida.

Quanto ao custo da energia, adotou-se a Tarifa Verde para saneamento na ponta e fora de ponta, aplicada atualmente pela Neoenergia Pernambuco, apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 - Tarifa verde de energia para saneamento.

	Preço de consumo na ponta	Preço de consumo fora da ponta
Tarifa verde para saneamento (R\$/kWh)	1,83134060	0,39236500

Nota: Preço da tarifa não inclui valor dos impostos.

Fonte: Neoenergia (2022), adaptado pela autora (2022).

5.6.4 Produtos químicos

As despesas de produtos químicos estão relacionadas aos custos de cal e polímero utilizados durante o tratamento do lodo de esgoto. Os valores da Tabela 17, assumidos para esse trabalho, foram baseados nos custos apresentados no Plano de Negócios Referenciais para concessão de serviços públicos de esgotamento sanitário na cidade do Crato - CE.

Tabela 17 - Custos dos produtos químicos.

Alternativa	Custo (R\$/kg)
Polímero para lodo	15,85
Cal	2,07

Fonte: Crato (2020), adaptado pela autora (2022).

5.6.5 Transporte e disposição de lodo

As despesas de transporte e disposição de lodo foram calculadas com base na quantidade de lodo a ser transportado e disposto em aterro sanitário. Os valores assumidos para esse trabalho foram baseados nos custos apresentados por Bielschowsky (2014). Para o transporte de lodo, adotou-se R\$ 0,74/ton.km, para transporte da ETE ao aterro. A Tabela 18 apresenta os valores para disposição do lodo em aterro. Observa-se que há distinção no valor de disposição em aterro em função do teor de sólidos contido no lodo de esgoto. Como o lodo foi desaguado por centrifugação, adotou-se o valor correspondente a T.S.≥ 30%.

Tabela 18 - Custo de disposição de lodo por faixa de teor de sólidos.

Faixa de teor de sólidos (%)	Custo (R\$/ton.)
T.S. > 60	152,29
30 > T.S. > 60	186,13
T.S. < 30	270,73

Fonte: Bielschowsky (2014), adaptado pela autora (2022).

5.7 Estudo de viabilidade econômica

O presente trabalho aplicou como indicador o Valor Presente Líquido (VPL), devendo então ser estruturado um fluxo de caixa, composto pela subtração entre receitas e custos. O VPL é calculado segundo a equação:

$$VPL = \sum_{n=1}^{n=N} \frac{FC(n)}{(1+i)^n}$$

Onde:

$FC(n)$: Valor do fluxo de caixa no ano n ;

i : Taxa de desconto;

N : Vida útil do projeto.

O resultado do VPL é o primeiro indicador de viabilidade. Caso o valor seja positivo, significa que retorno é maior que o investimento realizado. Dessa forma, o projeto é viável. Caso seja negativo, os investimentos são maiores que o retorno, o que significa que o valor aplicado não foi recuperado totalmente, tornado o projeto inviável economicamente.

Para este trabalho, não foram consideradas as receitas, sendo o fluxo de caixa composto somente pelos custos, ou seja, totalmente negativo. Optou-se por essa consideração devido à ausência de informações sobre a parcela das receitas do sistema de esgotamento sanitário (SES) que é direcionada ao tratamento de esgoto. Ao considerar a receita total do SES, proveniente das tarifas pagas pela população, o valor é muito maior do que os custos do tratamento e disposição do lodo, já que ela deve cobrir os custos de operação e manutenção de toda a rede coleta de esgoto, além do próprio tratamento de esgoto. Assim, o fluxo de caixa resultaria somente em valores positivos. Como forma de evitar resultados enviesados ao incorporar essa receita, optou-se por desconsiderar as receitas para esse estudo.

Ainda, não foi possível calcular a Taxa Interna de Retorno (TIR), pois a mesma necessita de valores positivos e negativos no fluxo de caixa. Como o fluxo de caixa considera apenas os custos, não há variação do sinal do fluxo de caixa.

5.7.1 Inflação

Para a estruturação do fluxo de caixa, os custos operacionais foram capitalizados segundo a média anual do IPCA dos últimos 10 anos, igual a 6,2% a.a., calculados através dos valores

fornecidos pelo IBGE (2022c). A seguinte equação demonstra o cálculo dos valores após a inflação.

$$C_n = C_{n-1} \times (1 + i)^n$$

Onde:

C_n : Valor do custo no ano n;

C_{n-1} : Valor do custo no ano n-1 (anterior);

i : Taxa de inflação;

n : Ano n do fluxo de caixa.

5.7.2 Impostos

Alguns impostos podem incidir sobre o projeto. O Programa de Integração Social (PIS) e a Contribuição Social para Financiamento da Seguridade Social (COFINS) são alíquotas que incidem sobre as receitas, no valor de 0,65% e 7,6% mensalmente, respectivamente. Tais impostos são voltados para a seguridade e previdência dos trabalhadores. Outro imposto bastante importante é o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços (ICMS). Esse tributo estadual tem o objetivo taxar produtos de diferentes tipos e possui alíquota variável em função do tipo de produto.

Todos esses impostos citados são não-cumulativos, ou seja, não incidem sobre o mesmo imposto pago em etapas anteriores, evitando, dessa forma, tributação em cascata. Nesse caso, a incorporação desses impostos gera um crédito tributário, que pode compensar o valor de pagamento desses impostos pela empresa de saneamento.

Dessa forma, optou-se por não considerar esses impostos no cálculo de viabilidade, assim como não foram utilizados para o cálculo do preço final da tarifa de energia elétrica utilizada. Uma vez que o trabalho avaliou os custos relacionados à energia elétrica e à economia devido à geração na própria ETE, esses impostos, que não incidem sobre a energia produzida, foram desconsiderados, com o objetivo de anular essa variável na viabilidade.

5.7.3 Taxa de desconto

A taxa de desconto considerada para o cálculo do VPL foi de 12% a.a., valor usualmente utilizado para estudos de viabilidade na área do saneamento. Valores iguais ou semelhantes a essa taxa de desconto pode ser observada nos trabalhos de Peleteiro e Almeida (2014), Moraes

e Souza (2021) e Mendonça (2021). Valente (2015), por outro lado, utilizou uma taxa de desconto de 8% a.a., em se tratando de projetos da área energética, porém, o presente trabalho utilizou a taxa referente ao saneamento, devido à inclusão, também, dos custos de todas as etapas da cadeia de tratamento de lodo.

5.7.4 Depreciação

A depreciação considerada para os investimentos feitos nos equipamentos de tratamento de lodo e geração de energia foi calculada linearmente ao longo dos 35 anos de operação da estação de tratamento do estudo. O valor encontrado foi de 2,86% a.a.

5.7.5 Financiamento

O valor financiado para a implantação do sistema de tratamento de lodo e aproveitamento energético do biogás foi considerado 100% de capital de terceiros. Para isso, utilizou-se as condições financeiras praticadas no programa do Governo Federal Saneamento Para Todos, cujo objetivo é promover a melhoria das condições de saúde e da qualidade de vida da população urbana e rural por meio de investimentos em saneamento. Os recursos de empréstimo são provenientes do Fundo de Garantia do Tempo de Serviço (FGTS).

A Tabela 19 apresenta as condições financeiras, prazos de carência e amortização estabelecidos para o programa.

Tabela 19 - Condições financeiras.

Linha de financiamento	Condições
Taxa de juros	6%
Carência	4 anos
Amortização	20 anos

Fonte: Brasil (2012), adaptado pela autora (2022).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Custos de implantação e operação

Este capítulo apresenta os resultados dos cálculos demonstrados no capítulo METODOLOGIA. A linha de tendência que mais se adequa ao crescimento populacional de Recife e seguem as indicações especificadas é a função logarítmica, com coeficiente de determinação $R^2=0,9973$.

$$\text{POPULAÇÃO} = 23.246.189,8963512 \times \ln \text{ANO} - 175.272.772,015393$$

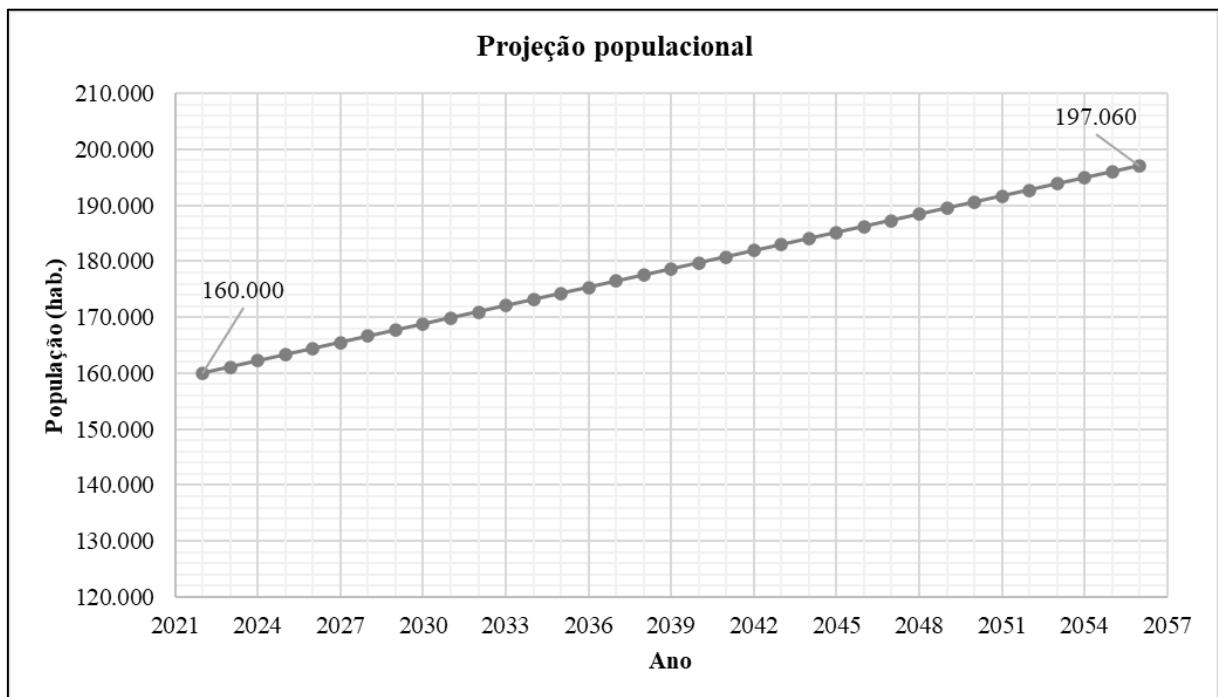
Onde:

POPULAÇÃO: População no ano calculado (habitantes);

ANO: Ano calculado para a projeção.

A projeção populacional resultou em 197.060 habitantes para o ano de 2056, maior população dentro do horizonte de projeto, conforme apresentado na Figura 7. O Apêndice A apresenta a linha de tendência e o valor da população projetada anualmente.

Figura 7 - Resultado da projeção populacional.



Fonte: A autora (2022).

Devido à produção de lodo estar diretamente relacionada à população atendida pela ETE, o ano de maior volume de lodo produzido, é no ano de 2056. A Tabela 20 apresenta o resultado do

volume diário de lodo produzido na Alternativa 1 – Convencional e na Alternativa 2 – Biogás, no início e final de plano. O Apêndice B detalha a projeção do volume diário para cada ano de projeto.

Tabela 20 - Volume de lodo produzido diariamente por etapa de tratamento.

Lodo por etapa de tratamento	Alternativa 1		Alternativa 2	
	2022	2056	2022	2056
Lodo bruto primário (m³/dia)	224,00	275,88	224,00	275,88
Lodo bruto secundário (m³/dia)	680,00	837,50	680,00	837,50
Lodo primário adensado (m³/dia)	132,68	163,42	132,68	163,42
Lodo secundário adensado (m³/dia)	105,37	129,77	105,37	129,77
Lodo misto adensado (m³/dia)	238,05	293,19	238,05	293,19
Lodo digerido (m³/dia)	-	-	149,51	184,13
Lodo desaguado (m³/dia)	41,27	50,83	20,50	25,25
Lodo higienizado (m³/dia)	43,49	53,57	21,40	26,36

Fonte: A autora (2022).

Observa-se que a etapa de digestão anaeróbia reduz o volume de lodo em 37% em relação ao lodo misto adensado, resultado da soma do lodo primário e lodo secundário adensados. Além disso, o volume de lodo diminui consideravelmente ao fim do tratamento, com um decréscimo de, aproximadamente, 60% do volume de lodo higienizado na Alternativa 2, em relação à Alternativa 1.

Por sua vez, o biogás produzido a partir do processo de digestão (Alternativa 2), assim como a energia elétrica produzida a partir da conversão, está apresentado na Tabela 21. O Apêndice C apresenta o resultado da projeção anual de produção de biogás e energia elétrica. Verifica-se um acréscimo de 23% no ano de 2056 em relação ao ano de 2022 na produção de biogás e na produção de energia, diretamente correlacionada.

Tabela 21 - Resultados da produção de biogás e energia.

Alternativa 2	2022	2056
Produção de Metano (m³/dia)	1.846,43	2.274,11
Produção de Biogás (m³/dia)	3.077,38	3.790,18
Potência (kW)	229,88	283,13
Produção de Energia (kWh/dia)	5.517,13	6.795,03

Fonte: A autora (2022).

Para a estimativa dos custos dos equipamentos de tratamento de lodo, utilizou-se as vazões por hora em cada equipamento, a partir dos custos unitários obtidos como explicitado no Capítulo

5.5. A Tabela 22 demonstra os custos unitários obtidos a partir dos valores utilizados nos trabalhos de Peleteiro e Almeida (2014) e Cerqueira (2019).

Tabela 22 - Custos unitários para equipamentos do tratamento do lodo.

Equipamentos do tratamento de lodo	Capacidade do equipamento	Custo de implantação (R\$) ⁽¹⁾	Custo unitário (R\$/m ³ /h) ⁽²⁾
Adensamento por gravidade (m³/h)	32,42	661.475,65	26.527,04
Adensamento por centrífuga (m³/h)	25	900.174,06	46.809,05
Biodigestor (m³/dia)	10,25	655.342,04	83.116,55
Desaguamento por centrífuga (m³/h)	25	900.174,06	46.809,05
Higienização por caleação (ton./h)	1,10	635.260,43	750.762,33 ⁽³⁾

Nota: ⁽¹⁾ Custos atualizados para 06/2022, segundo o IPCA (BCB, 2022);

⁽²⁾ Custos considerando 30% de BDI e obras civis de adaptação;

⁽³⁾ Em R\$/ton./h.

Fonte: A autora (2022).

Dessa forma, utilizando as vazões de lodo produzidas em cada uma das etapas de tratamento, obteve-se o custo de implantação para o presente projeto. A Tabela 23 apresenta o valor final de implantação para as duas alternativas de tratamento de lodo.

Tabela 23 - Custos de implantação do tratamento do lodo.

Equipamento	Vazão		Custo de implantação (R\$)	
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 1	Alternativa 2
Adensamento por gravidade (m³/h)	11,50	11,50	304.932,31	304.932,31
Adensamento por centrífuga (m³/h)	34,90	34,90	1.633.448,00	1.633.448,00
Biodigestor (m³/h)	-	12,22		1.015.359,98
Desaguamento por centrífuga (m³/h)	12,22	7,67	571.823,98	359.131,98
Higienização por caleação (ton./h)	2,38	1,17	1.784.623,42	878.124,40
Total			4.294.827,71	4.190.996,67

Fonte: A autora (2022).

O maior custo de implantação para o tratamento do lodo é referente à Alternativa 1. Apesar da inclusão de mais um equipamento, o digestor anaeróbio, os custos para a implantação dos equipamentos de desaguamento e higienização foram reduzidos, visto que a vazão afluente nessas etapas é menor na Alternativa 2. Assim, o aumento do custo com o digestor anaeróbio foi superado pela redução nos custos dos equipamentos nos processos posteriores. Salienta-se que ainda não se encontram incluídos nessa estimativa os valores relativos ao transporte, tratamento e conversão do biogás, apenas em relação ao tratamento do lodo.

No tocante à implantação da unidade de recuperação energética do biogás, realizou-se uma revisão de literatura acerca dos custos. O resultado da pesquisa pode ser observado na Tabela 24. É evidente que há uma grande variabilidade nos custos de implantação da unidade para

conversão do biogás em energia elétrica, principalmente em função de seu porte. Observa-se uma diferença de aproximadamente 66% entre a menor potência instalada – Pereira (2016) e a maior potência – Garcia, Hoffman e Mayer (2015). Também, é possível verificar que quanto maior a dimensão da unidade de recuperação de energia, menor o custo unitário para sua implantação, que pode ser verificado pelo custo/potência. Logo, os custos são mais diluídos em função da escala de potência.

Tabela 24 - Revisão dos custos de implantação da unidade de recuperação energética.

Custos geração de energia	Pereira (2016)	Nogueira e Gomes (2020)	Garcia, Hoffman e Mayer (2015)	Santos <i>et al.</i> (2014) ⁽²⁾	Valente (2015)
Potência (kW)	26,00	98,94	396,32	-	101 - 250
Vazão de biogás (m³/dia)	752,00	1.216,17	5.874,98	-	2.800,00
Comprimento tubulação (m)	-	500,00	-	-	-
Tratamento (R\$) ⁽¹⁾	521.394,38	-	181.596,80	0,05	616.983,98
Gasômetro (R\$) ⁽¹⁾	411.709,95	611.571,60	1.697.590,37	152,29	834.836,57
Compressor (R\$) ⁽¹⁾	93.217,18	119.978,44	206.108,27	35,25	152.655,83
Motor (R\$) ⁽¹⁾	1.896.585,64	211.454,07	2.764.873,67	70,50	8.586,89 ⁽²⁾
Tubulação (R\$) ⁽¹⁾	-	450.487,19	-	423,01	-
Queimador (R\$) ⁽¹⁾	-	419.057,85	-	16.920,56	-
Custo total (R\$)	2.922.907,15	1.812.549,15	4.850.169,11	-	1.613.063,27
Custo total / potência (R\$/kW)	112.419,51	18.319,68	12.238,01	-	9.191,24

Nota: ⁽¹⁾ Custos atualizados para 06/2022, segundo o IPCA (BCB, 2022);

⁽²⁾ Custos unitários;

Fonte: A autora (2022).

Para o presente trabalho, optou-se pelo uso dos custos de Valente (2015) para o cálculo dos custos unitários em razão da semelhança da população atendida, da vazão de biogás produzida e do próprio objetivo do trabalho em relação ao do projeto em questão, além de ter bastante credibilidade, com citações em diversos estudos. Os custos para tubulação e para o queimador foram utilizados a partir do trabalho de Santos *et al.* (2014). A Tabela 25 apresenta o valor final de implantação, a ser somado ao custo da Alternativa 2.

Tabela 25 - Custos de implantação da unidade de recuperação energética.

Geração de energia	Capacidade	Custo Unitário (R\$/m ³ /dia) ⁽¹⁾	Custo (R\$)
Tratamento (m³/dia)	3.790,18	286,46	1.085.721,72
Gasômetro (m³/dia)	3.790,18	387,60	1.469.082,22
Compressor (m³/dia)	3.790,18	70,88	268.632,18
Motor (kW)	283,13	11.162,96 ⁽²⁾	3.160.524,57
Tubulação (m)	50,00	549,91 ⁽³⁾	27.495,65
Queimador	-	21.996,73 ⁽⁴⁾	21.996,73
Total			6.033.453,06

Nota: ⁽¹⁾ Custos considerando 30% de BDI e obras civis de adaptação;

⁽²⁾ Custo por kW de potência;

⁽³⁾ Custo por metro de tubulação;

Geração de energia	Capacidade	Custo Unitário (R\$/m ³ /dia) ⁽¹⁾	Custo (R\$)
⁽⁴⁾ Custo por unidade de queimador.			

Fonte: A autora (2022).

Por fim, a Tabela 26 apresenta o custo exclusivamente para implantação (CAPEX) de cada alternativa de tratamento e disposição final de lodo de esgoto. Os custos de operação serão avaliados no capítulo 0.

Tabela 26 - Resultados dos custos de implantação (CAPEX).

Custo de implantação (R\$)	
Alternativa 1 – Convencional	4.294.827,71
Alternativa 2 – Biogás	10.224.449,73

Fonte: A autora (2022).

É evidente a diferença entre os custos de implantação da alternativa convencional para a alternativa de biogás. O valor considerado para a alternativa 2 é, aproximadamente, 2,4 vezes maior que o custo da alternativa 1. Para justificar a escolha, devem ser avaliado os possíveis benefícios do uso de cada uma das alternativas, como a redução nos custos de operação (OPEX).

A Tabela 27 apresenta um resumo dos custos operacionais apresentados na METODOLOGIA. Na Fonte: A autora (2022).

Tabela 28, pode-se observar a composição do custo operacional em cada uma das alternativas, em relação ao custo total de operação.

Tabela 27 - Resumo dos custos operacionais.

Custos de operação		
Pessoal próprio	Pessoal próprio	R\$ 70.718,77/operador.ano
Manutenção	Manutenção	% do CAPEX
Energia elétrica	Energia elétrica – Tarifa na ponta	R\$ 1,83/kWh
	Energia elétrica – Tarifa fora da ponta	R\$ 0,39/kWh
Produtos químicos	Cal	R\$ 2,07/kg
	Polímero para lodo	R\$ 15,85/kg
Transporte e disposição de lodo	Transporte de lodo	R\$ 270,73/ton.
	Disposição de lodo	R\$ 0,74/ton.km

Fonte: A autora (2022).

Tabela 28 - Custos operacionais por categoria.

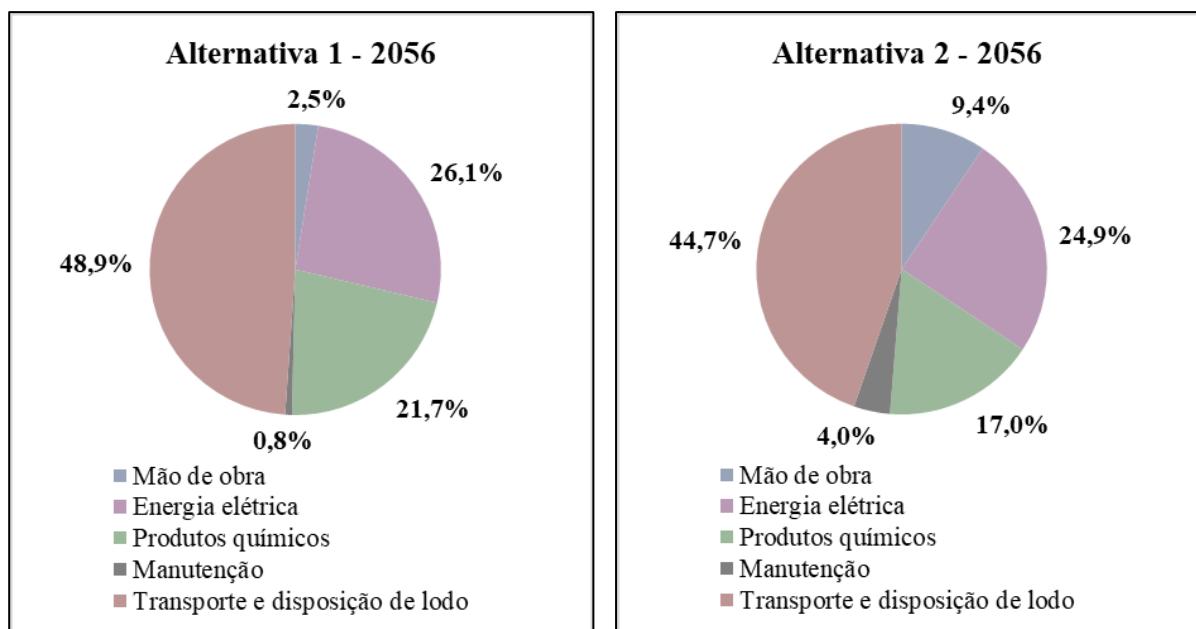
	2022	2056		
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 1	Alternativa 2
Pessoal próprio	282.875,08	565.750,16	288.902,12	577.804,24

Energia elétrica	2.447.110,52	1.293.709,62	2.975.742,35	1.525.170,40
Produtos químicos	1.961.314,94	826.441,44	2.467.068,33	1.039.551,31
Manutenção	84.069,06	241.345,20	85.860,27	246.487,39
Transporte e disposição de lodo	4.423.021,67	2.176.348,93	5.563.561,70	2.737.551,94
Custo operacional total	9.198.391,28	5.103.595,36	11.381.134,77	6.126.565,28

Fonte: A autora (2022).

Como observa-se na Figura 8, verifica-se que a maior despesa é referente ao transporte e disposição de lodo, responsável por 48,9% dos custos operacionais na Alternativa 1 e 44,7% na Alternativa 2, seguido da energia elétrica e dos produtos químicos, na faixa dos 20%. Utilizando os custos estruturados nesse trabalho, o pessoal próprio e manutenção representaram apenas uma pequena porcentagem do total dos custos considerados.

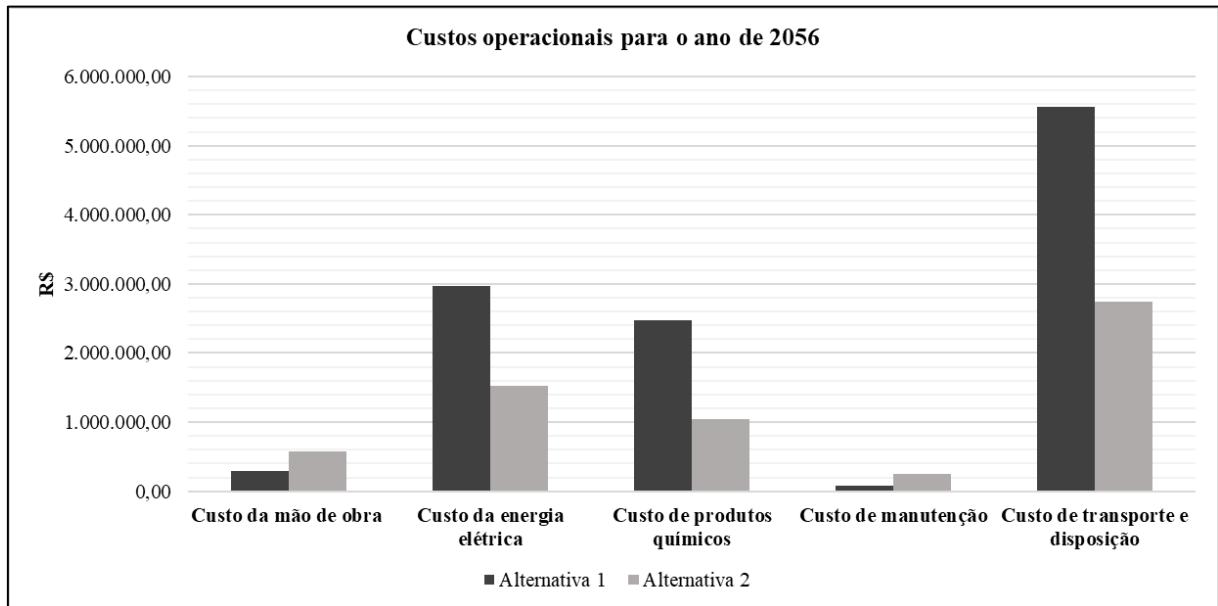
Figura 8 - Composição dos custos operacionais em 2056



Fonte: A autora (2022).

A comparação dos custos operacionais no ano de 2056 são apresentados resumidamente para ambas as alternativas na Figura 9. É possível observar que houve uma considerável redução nos custos citados, de 50,79%, 48,75% e 57,86%, respectivamente. Essa diminuição ocorreu como consequência, principalmente, do volume de lodo ao final do tratamento, sendo muito menor na alternativa 2 devido à digestão anaeróbia. A redução no custo de energia elétrica deve-se, especialmente, ao aproveitamento da energia produzida a partir do biogás na própria ETE.

Figura 9 - Custos operacionais em 2056.



Fonte: A autora (2022).

6.2 Análise de viabilidade

Baseado nas informações de CAPEX e de OPEX, é possível verificar a viabilidade comparando-se o indicador de viabilidade VPL para ambas as alternativas. A Tabela 29 resume as informações necessárias para a elaboração do fluxo de caixa.

Tabela 29 - Resumo das condições.

Tabela resumo	
Custo de implantação	
CAPEX - Alternativa 1	R\$ 4.294.827,71
CAPEX - Alternativa 2	R\$ 10.224.449,73
Condições financeiras	
Taxa de desconto	12%
Descapitalização	6,2%
Depreciação	2,86%
Taxa de juros	6%
Carência	4 anos
Amortização	20 anos

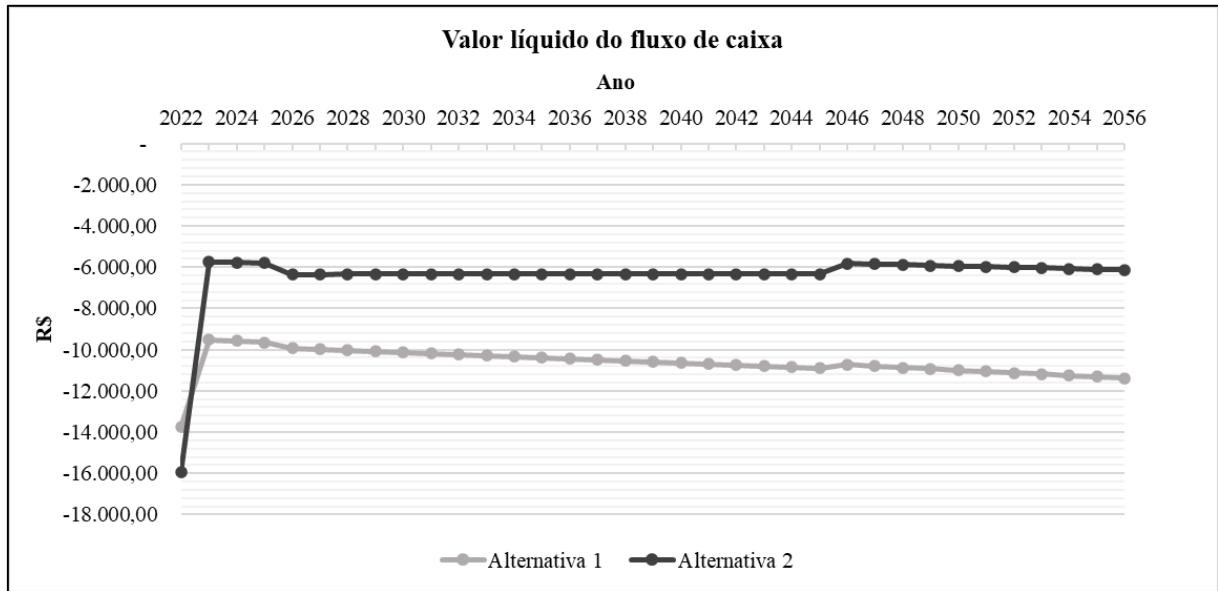
Fonte: A autora (2022).

Estruturou-se um fluxo de caixa utilizando as informações disponibilizadas na Tabela 29. A Tabela 30 e a Fonte: A autora (2022).

Tabela 31 apresentam o resultado do fluxo de caixa para a Alternativa 1 e Alternativa 2, respectivamente. A Figura 10 e a Fonte: A autora (2022).

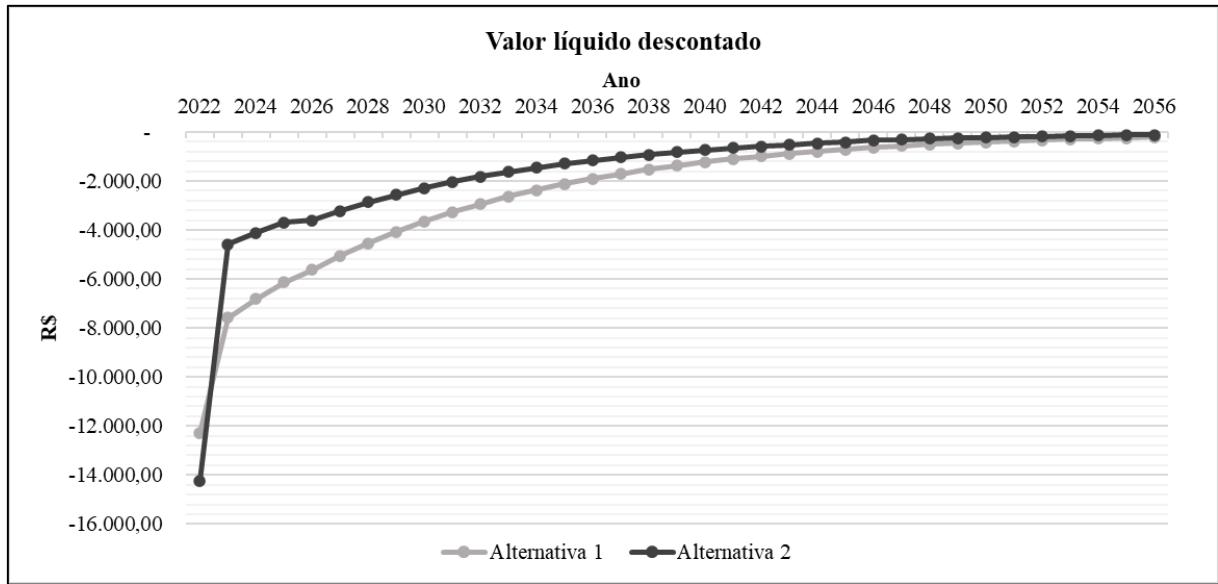
Figura 11 apresentam os resultados em forma de gráficos.

Figura 10 - Valor líquido do fluxo de caixa.



Fonte: A autora (2022).

Figura 11 - Valor líquido descontado.



Fonte: A autora (2022).

Tabela 30 - Fluxo de caixa da Alternativa 1.

Alternativa 1 (ano 1 ao ano 18)	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Custo da mão de obra	-282,88	-283,05	-283,23	-283,40	-283,58	-283,75	-283,93	-284,11	-284,28	-284,46	-284,63	-284,81	-284,99	-285,16	-285,34	-285,52	-285,70	-285,87
Custo da energia elétrica	-2.447,11	-2.462,47	-2.477,84	-2.493,22	-2.508,62	-2.524,02	-2.539,44	-2.554,87	-2.570,31	-2.585,76	-2.601,22	-2.616,69	-2.632,18	-2.647,68	-2.663,18	-2.678,70	-2.694,23	-2.709,77
Custo de produtos químicos	-1.961,31	-1.976,01	-1.990,72	-2.005,43	-2.020,16	-2.034,90	-2.049,65	-2.064,41	-2.079,18	-2.093,96	-2.108,75	-2.123,56	-2.138,37	-2.153,20	-2.168,03	-2.182,88	-2.197,74	-2.212,61
Custo de manutenção	-84,07	-84,12	-84,17	-84,23	-84,28	-84,33	-84,38	-84,43	-84,49	-84,54	-84,59	-84,64	-84,70	-84,75	-84,80	-84,85	-84,91	-84,96
Custo de transporte e disposição	-4.423,02	-4.456,16	-4.489,32	-4.522,51	-4.555,72	-4.588,96	-4.622,22	-4.655,51	-4.688,82	-4.722,15	-4.755,51	-4.788,90	-4.822,30	-4.855,74	-4.889,19	-4.922,68	-4.956,18	-4.989,72
Custo operacional total	-9.198,39	-9.261,81	-9.325,28	-9.388,80	-9.452,36	-9.515,97	-9.579,62	-9.643,32	-9.707,07	-9.770,87	-9.834,71	-9.898,60	-9.962,54	-10.026,52	-10.090,55	-10.154,63	-10.218,76	-10.282,93
(-) Depreciação dos Investimentos	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	
(-) Despesa Financeira	-257,69	-257,69	-257,69	-257,69	-257,69	-244,81	-231,92	-219,04	-206,15	-193,27	-180,38	-167,50	-154,61	-141,73	-128,84	-115,96	-103,08	-90,19
Resultado líquido do exercício	-9.578,79	-9.642,21	-9.705,68	-9.769,20	-9.832,76	-9.883,48	-9.934,25	-9.985,07	-10.035,93	-10.086,84	-10.137,80	-10.188,81	-10.239,86	-10.290,96	-10.342,11	-10.393,30	-10.444,54	-10.495,83
(+) Depreciação	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	
Fluxo de caixa operacional	-9.456,08	-9.519,50	-9.582,97	-9.646,49	-9.710,05	-9.760,77	-9.811,54	-9.862,36	-9.913,22	-9.964,14	-10.015,09	-10.066,10	-10.117,15	-10.168,25	-10.219,40	-10.270,59	-10.321,83	-10.373,12
Investimento	-4.294,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Valor líquido do fluxo de caixa	-13.750,91	-9.519,50	-9.582,97	-9.646,49	-9.924,79	-9.975,51	-10.026,28	-10.077,10	-10.127,97	-10.178,88	-10.229,83	-10.280,84	-10.331,89	-10.382,99	-10.434,14	-10.485,33	-10.536,57	-10.587,86
Valor líquido descontado	-12.277,60	-7.588,89	-6.820,97	-6.130,52	-5.631,59	-5.053,91	-4.535,38	-4.069,97	-3.652,25	-3.277,33	-2.940,83	-2.638,84	-2.367,80	-2.124,57	-1.906,28	-1.710,38	-1.534,59	-1.376,84
Valor líquido descontado acumulado	-12.277,60	-19.866,49	-26.687,46	-32.817,97	-38.449,56	-43.503,47	-48.038,85	-52.108,82	-55.761,07	-59.038,39	-61.979,23	-64.618,06	-66.985,87	-69.110,43	-71.016,71	-72.727,09	-74.261,69	-75.638,53

Alternativa 1 (ano 19 ao ano 35)	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052	2053	2054	2055	2056
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
Custo da mão de obra	-286,05	-286,23	-286,40	-286,58	-286,76	-286,94	-287,12	-287,29	-287,47	-287,65	-287,83	-288,01	-288,19	-288,37	-288,54	-288,72	-288,90
Custo da energia elétrica	-2.725,33	-2.740,89	-2.756,47	-2.772,06	-2.787,65	-2.803,26	-2.818,89	-2.834,52	-2.850,17	-2.865,82	-2.881,49	-2.897,17	-2.912,86	-2.928,56	-2.944,28	-2.960,00	-2.975,74
Custo de produtos químicos	-2.227,49	-2.242,38	-2.257,28	-2.272,19	-2.287,12	-2.302,05	-2.317,00	-2.331,95	-2.346,92	-2.361,90	-2.376,89	-2.391,89	-2.406,91	-2.421,93	-2.436,97	-2.452,01	-2.467,07
Custo de manutenção	-85,01	-85,07	-85,12	-85,17	-85,22	-85,28	-85,33	-85,38	-85,44	-85,49	-85,54	-85,59	-85,65	-85,70	-85,75	-85,81	-85,86
Custo de transporte e disposição	-5.023,27	-5.056,85	-5.090,46	-5.124,09	-5.157,75	-5.191,43	-5.225,13	-5.258,86	-5.292,62	-5.326,40	-5.360,20	-5.394,03	-5.427,89	-5.461,77	-5.495,68	-5.529,61	-5.563,56
Custo operacional total	-10.347,15	-10.411,41	-10.475,73	-10.540,09	-10.604,50	-10.668,96	-10.733,46	-10.798,01	-10.862,61	-10.927,26	-10.991,96	-11.056,70	-11.121,49	-11.186,33	-11.251,22	-11.316,15	-11.381,13
(-) Depreciação dos Investimentos	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	-122,71	
(-) Despesa Financeira	-77,31	-64,42	-51,54	-38,65	-25,77	-12,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Resultado líquido do exercício	-10.547,16	-10.598,55	-10.649,98	-10.701,45	-10.752,98	-10.804,55	-10.856,17	-10.920,72	-10.985,32	-11.049,97	-11.114,67	-11.179,41	-11.244,20	-11.309,04	-11.373,93	-11.438,86	-11.503,84
(+) Depreciação	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	122,71	
Fluxo de caixa operacional	-10.424,45	-10.475,84	-10.527,27	-10.578,74	-10.630,27	-10.681,84	-10.733,46	-10.798,01	-10.862,61	-10.927,26	-10.991,96	-11.056,70	-11.121,49	-11.186,33	-11.251,22	-11.316,15</td	

Tabela 31 - Fluxo de caixa da Alternativa 2.

Alternativa 2 (ano 1 ao ano 18)	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Custo da mão de obra	-565,75	-566,10	-566,45	-566,80	-567,16	-567,51	-567,86	-568,21	-568,56	-568,92	-569,27	-569,62	-569,98	-570,33	-570,68	-571,04	-571,39	-571,75
Custo da energia elétrica	-1.293,71	-1.300,44	-1.307,17	-1.313,90	-1.320,64	-1.327,39	-1.334,14	-1.340,89	-1.347,65	-1.354,42	-1.361,19	-1.367,96	-1.374,74	-1.381,53	-1.388,32	-1.395,11	-1.401,91	-1.408,72
Custo de produtos químicos	-826,44	-832,63	-838,83	-845,03	-851,24	-857,45	-863,66	-869,88	-876,11	-882,33	-888,57	-894,80	-901,05	-907,29	-913,55	-919,80	-926,06	-932,33
Custo de manutenção	-241,35	-241,49	-241,64	-241,79	-241,94	-242,09	-242,24	-242,40	-242,55	-242,70	-242,85	-243,00	-243,15	-243,30	-243,45	-243,60	-243,75	-243,90
Custo de transporte e disposição	-2.176,35	-2.192,65	-2.208,97	-2.225,30	-2.241,65	-2.258,00	-2.274,37	-2.290,74	-2.307,13	-2.323,54	-2.339,95	-2.356,38	-2.372,82	-2.389,27	-2.405,73	-2.422,20	-2.438,69	-2.455,19
Custo operacional total	-5.103,60	-5.133,32	-5.163,07	-5.192,83	-5.222,62	-5.252,44	-5.282,27	-5.312,12	-5.342,00	-5.371,90	-5.401,82	-5.431,77	-5.461,73	-5.491,72	-5.521,73	-5.551,76	-5.581,81	-5.611,89
(-) Depreciação dos Investimentos	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	
(-) Despesa Financeira	-613,47	-613,47	-613,47	-613,47	-613,47	-582,79	-552,12	-521,45	-490,77	-460,10	-429,43	-398,75	-368,08	-337,41	-306,73	-276,06	-245,39	-214,71
Resultado líquido do exercício	-6.009,19	-6.038,91	-6.068,66	-6.098,43	-6.128,22	-6.127,36	-6.126,52	-6.125,70	-6.124,90	-6.124,13	-6.123,38	-6.122,65	-6.121,94	-6.121,25	-6.120,59	-6.119,94	-6.119,32	-6.118,73
(+) Depreciação	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	
Fluxo de caixa operacional	-5.717,06	-5.746,79	-5.776,53	-5.806,30	-5.836,09	-5.835,23	-5.834,39	-5.833,57	-5.832,78	-5.832,00	-5.831,25	-5.830,52	-5.829,81	-5.829,12	-5.828,46	-5.827,82	-5.827,20	-5.826,60
Investimento	-10.224,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Valor líquido do fluxo de caixa	-15.941,51	-5.746,79	-5.776,53	-5.806,30	-6.347,31	-6.346,45	-6.345,61	-6.344,79	-6.344,00	-6.343,22	-6.342,47	-6.341,74	-6.341,03	-6.340,35	-6.339,68	-6.339,04	-6.338,42	-6.337,82
Valor líquido descontado	-14.233,49	-4.581,30	-4.111,62	-3.690,01	-3.601,64	-3.215,31	-2.870,43	-2.562,56	-2.287,71	-2.042,35	-1.823,31	-1.627,77	-1.453,20	-1.297,36	-1.158,24	-1.034,03	-923,16	-824,17
Valor líquido descontado acumulado	-14.233,49	-18.814,80	-22.926,42	-26.616,43	-30.218,06	-33.433,37	-36.303,81	-38.866,36	-41.154,07	-43.196,42	-45.019,73	-46.647,49	-48.100,70	-49.398,06	-50.556,29	-51.590,33	-52.513,48	-53.337,65

Alternativa 2 (ano 19 ao ano 35)	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052	2053	2054	2055	2056
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
Custo da mão de obra	-572,10	-572,45	-572,81	-573,17	-573,52	-573,88	-574,23	-574,59	-574,95	-575,30	-575,66	-576,02	-576,37	-576,73	-577,09	-577,45	-577,80
Custo da energia elétrica	-1.415,53	-1.422,34	-1.429,16	-1.435,99	-1.442,82	-1.449,65	-1.456,49	-1.463,34	-1.470,19	-1.477,04	-1.483,90	-1.490,77	-1.497,64	-1.504,51	-1.511,39	-1.518,28	-1.525,17
Custo de produtos químicos	-938,60	-944,87	-951,15	-957,44	-963,72	-970,02	-976,32	-982,62	-988,93	-995,24	-1.001,55	-1.007,88	-1.014,20	-1.020,53	-1.026,87	-1.033,21	-1.039,55
Custo de manutenção	-244,05	-244,21	-244,36	-244,51	-244,66	-244,81	-244,96	-245,12	-245,27	-245,42	-245,57	-245,72	-245,88	-246,03	-246,18	-246,33	-246,49
Custo de transporte e disposição	-2.471,70	-2.488,23	-2.504,76	-2.521,31	-2.537,87	-2.554,44	-2.571,03	-2.587,62	-2.604,23	-2.620,86	-2.637,49	-2.654,14	-2.670,79	-2.687,47	-2.704,15	-2.720,84	-2.737,55
Custo operacional total	-5.641,98	-5.672,10	-5.702,24	-5.732,41	-5.762,59	-5.792,80	-5.823,03	-5.853,29	-5.883,56	-5.913,86	-5.944,18	-5.974,52	-6.004,88	-6.035,27	-6.065,68	-6.096,11	-6.126,57
(-) Depreciação dos Investimentos	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13	-292,13
(-) Despesa Financeira	-184,04	-153,37	-122,69	-92,02	-61,35	-30,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Resultado líquido do exercício	-6.118,15	-6.117,60	-6.117,07	-6.116,56	-6.116,07	-6.115,60	-6.115,16	-6.145,41	-6.175,69	-6.205,99	-6.236,31	-6.266,65	-6.297,01	-6.327,40	-6.357,81	-6.388,24	-6.418,69
(+) Depreciação	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13	292,13
Fluxo de caixa operacional	-5.826,02	-5.825,47	-5.824,94	-5.824,43	-5.823,94	-5.823,48	-5.823,03	-5.853,29	-5.883,56	-5.913,86	-5.944,18	-5.974,52	-6.004,88	-6.035,27	-6.065,68	-6.096,11	-6.126,57
Investimento	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Valor líquido do fluxo de caixa	-6.337,25	-6.336,69	-6.336,16	-6.335,65	-6.335,16	-6.334,70	-5.823,03	-5.853,29	-5.883,56	-5.913,86	-5.944,18	-5.974,52	-6.004,88	-6.035,27	-6.065,68	-6.096,11	-6.126,57
Valor líquido descontado	-735,80	-656,90	-586,47	-523,59	-467,46	-417,34	-342,53	-307,42	-275,90	-247,61	-222,21	-199,42	-178,96	-160,59	-144,11	-129,31	-116,03
Valor líquido descontado acumulado	-54.073,45	-54.730,35	-55.316,82	-55.840,42	-56.307,88	-56.725,22	-57.067,75	-57.375,17	-57.651,07	-57.898,68	-58.120,89	-58.320,31	-58.499,27	-58.659,86	-58.803,96	-58.933,28	-59.049,31

Nota: Valores em R\$ 1.000.

Fonte: A autora (2022).

O fluxo de caixa operacional apresentou valores negativos em todos os anos. O maior débito encontra-se no ano 35 das duas alternativas, visto que as despesas aumentam com o tempo, em função do crescimento da população atendida e, consequentemente, do lodo gerado por ela.

O valor presente líquido (VPL), calculado para ambas as alternativas, encontra-se resumido na Tabela 32. Dessa forma, para analisar qual alternativa é mais viável, deve-se observar o VPL que apresenta menor valor em módulo. Nesse caso, a Alternativa 2, com aproveitamento de biogás para geração de energia, demonstra ser mais viável, com um VPL 36,1% maior que o resultado da Alternativa 1, convencional.

Tabela 32 - Valor presente líquido.

VPL		
Alternativa 1	Alternativa 2	%
-R\$ 85.683.824,29	-R\$ 59.049.310,15	36,1%

Fonte: A autora (2022).

Considerando-se que os maiores investimentos são para a Alternativa 2, é possível afirmar que os ganhos obtidos a partir da redução dos custos operacionais superam a diferença entre os custos de implantação, tornando a alternativa com aproveitamento de biogás mais viável. A Alternativa 1, apesar do menor investimento, possui grandes despesas operacionais ao longo dos anos.

Ainda, como forma de analisar mais uma variável, calculou-se o valor da receita anual para anular o VPL, ou seja, a receita que deve ser suficiente para compensar os custos de OPEX e CAPEX de tratamento de lodo. A Tabela 33 apresenta esse resultado.

Tabela 33 - Receita anual para anular VPL.

Receita anual para anular VPL		
Alternativa 1	Alternativa 2	%
R\$ 11.424.196,83	R\$ 7.333.612,82	-35,8%

Fonte: A autora (2022).

Nota-se que a receita necessária para anular o VPL é menor na Alternativa 2, uma redução de 35,8% em relação à Alternativa 1. Dessa forma, depreende-se que é necessária uma menor receita para remunerar o tratamento de lodo, ou seja, uma menor parcela do faturamento da ETE é destinado a essa etapa, possibilitando maior lucro ou investimento em outras áreas.

Finalmente, a partir das variáveis analisadas no presente trabalho, é possível afirmar que o uso de tecnologia para produção de biogás e geração de energia para aproveitamento na ETE é mais viável que a alternativa convencional analisada.

6.3 Pré-projeto

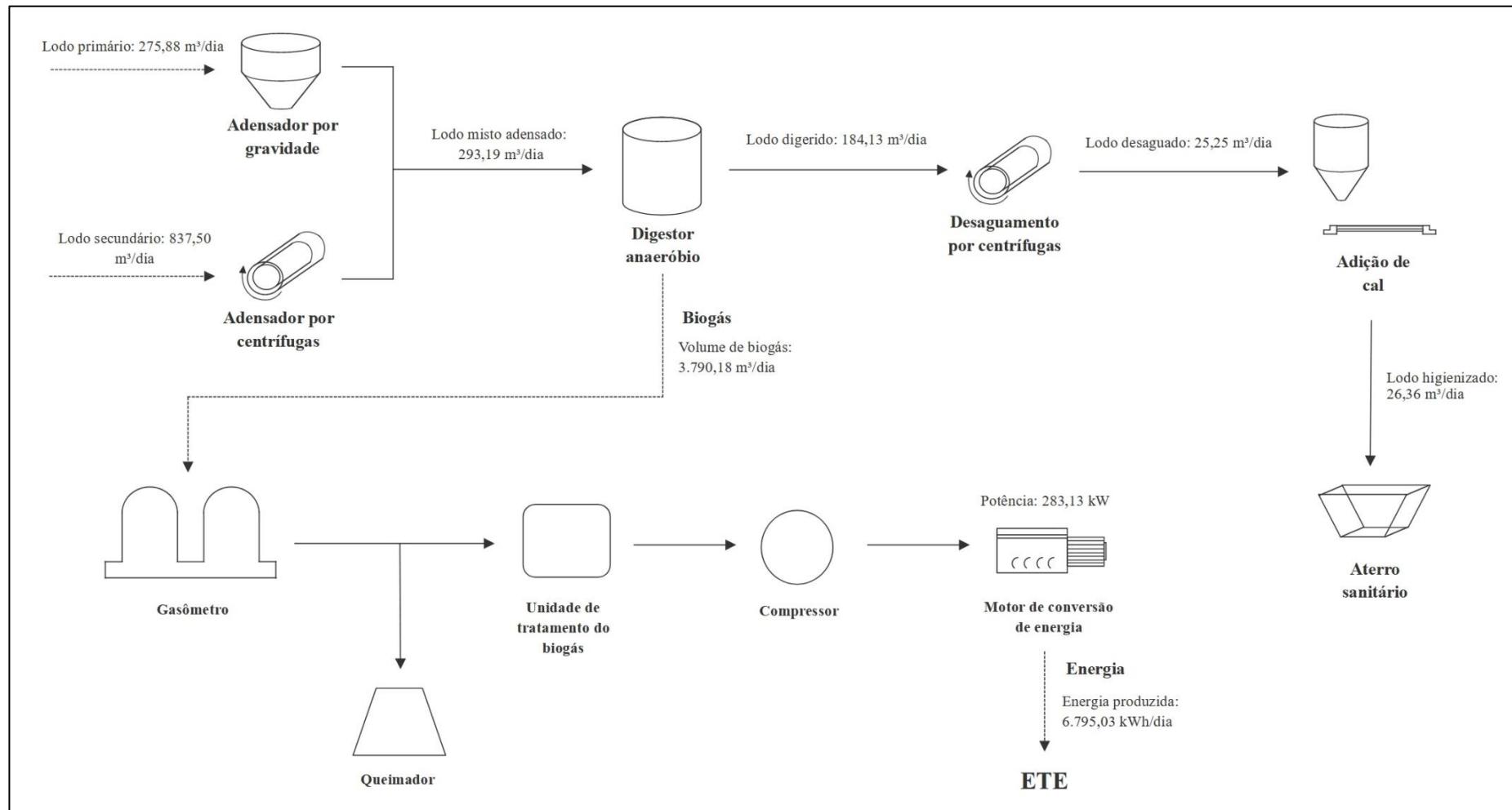
Como resultado dos estudos, a alternativa selecionada é a Alternativa 2 – Biogás. A Figura 12 apresenta o seu fluxograma com a capacidade máxima, dimensionada para o ano de 2056.

Considerando a aplicação em escala real, o tratamento biológico de esgoto para uma população inicial de 160.000 habitantes e final de 197.060 habitantes produzirá mais de 1.000 m³ de lodo por dia em 2056, dos quais cerca de 25% são lodo primário e 75%, lodo secundário.

Os lodos primário e secundário adensados são misturados, contabilizando 293,19 m³ de lodo misto, volume reduzido em 73% devido ao adensamento. Esse lodo é encaminhado ao digestor anaeróbio, reduzindo ainda mais o volume de lodo digerido que, por sua vez, é encaminhado para desaguamento em centrífugas, higienização, transporte e disposição final em aterro sanitário.

O biogás produzido é armazenado no gasômetro, incendiado no queimador, caso seja necessário, como em situações de paralização da produção de energia. Após o gasômetro, o biogás é tratado, encaminhado ao compressor para bombeamento do biogás para o motor de conversão em energia elétrica. A energia produzida é 6.795 kWh por dia, o que equivale à energia consumida por aproximadamente 2.000 residências (Utilizou-se a energia média consumida por residência no nordeste (FEDRIGO *et al*, 2009)).

Figura 12 - Fluxograma da estação de tratamento de lodo para a Alternativa 2 em 2056.



Fonte: A autora (2022).

7 CONCLUSÕES

O presente trabalho estimou o custo de implantação (CAPEX), os custos de operação (OPEX) e analisou a viabilidade econômica de diferentes alternativas de tratamento de lodo para uma ETE com tratamento de esgoto por lodos ativados. Para isso, foram elaboradas duas alternativas, a Alternativa 1, com estrutura convencionalmente utilizada e sem aproveitamento do lodo para ganhos da ETE, e a Alternativa 2, com digestão anaeróbia do lodo e aproveitamento energético do biogás. Foi possível demonstrar que os custos de implantação são bastante diferentes entre as alternativas, em decorrência, principalmente, da necessidade da instalação de uma unidade de recuperação energética para aproveitamento do biogás para geração de eletricidade. O CAPEX da Alternativa 2 resultou em um valor 2,4 vezes maior que o CAPEX da Alternativa 1.

Ainda, analisando-se os custos operacionais, observou-se uma redução na Alternativa 2, em relação à Alternativa 1. Em especial, as despesas relativas a transporte e disposição de lodo, energia elétrica e produtos químicos. O custo de transporte e disposição de lodo, responsável por mais de 40% dos custos desse processo, teve uma redução de cerca de 50% na Alternativa 2, em relação à Alternativa 1. O custo de produtos químicos teve a maior redução, de quase 60%.

Ao utilizar os custos para estruturar o fluxo de caixa e realizar a análise de viabilidade econômica, foi possível verificar o valor presente líquido. A partir do resultado, é possível inferir que a Alternativa 2 é mais viável que a Alternativa 1, com um VPL menos negativo, significando um retorno financeiro maior. Também, as receitas anuais calculadas para anular o VPL foram menores na alternativa 2, ou seja, é necessária uma menor receita para compensar os custos da Alternativa 2, quando comparada à Alternativa 1.

Do ponto de vista ambiental, é importante ressaltar que o uso de uma alternativa em que há geração de energia reduz a eletricidade consumida da concessionária, diminuindo a pressão sobre a rede de energia.

Além disso, a opção de disposição final escolhida foi o aterro sanitário para ambas as alternativas. Vale lembrar que o aterro é uma obra que precisa de um rígido licenciamento ambiental, principalmente quanto à área ocupada. No Brasil, os lodos de esgoto geralmente são direcionados aos mesmos aterros que os resíduos sólidos, que muitas vezes estão situados em locais mais distantes da ETE. Como a alternativa 2 reduz a quantidade de lodo produzido e direcionado ao aterro, tem-se uma redução na poluição atmosférica causada pelo transporte do

lodo até o local do aterro, além de reduzir o próprio volume de material disposto, o que libera espaço para outros tipos de resíduos e aumenta a vida útil do aterro.

Portanto, o presente trabalho demonstrou que a utilização de biogás para aproveitamento energético em uma ETE é a alternativa mais viável economicamente e ambientalmente, comparado à alternativa convencional.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar dos resultados, salienta-se que existem detalhes que foram desprezados para simplificação do estudo e podem ser melhorados em pesquisas futuras. Primeiramente, a projeção populacional utilizou uma metodologia simplificada, sem especificidade do local a ser atendido. Assim, em projetos reais, deve-se analisar as particularidades para estudo populacional adequado e utilizar metodologias adequadas à situação.

Outra simplificação foi a consideração dos custos unitários para estimativa do investimento a ser realizado. Como descrito, utilizou-se custos unitários de estudos desenvolvidos há mais de 5 anos, o que pode acarretar diferenças em relação aos custos dos equipamentos e tecnologias aplicadas atualmente. Ainda, os equipamentos de tratamento de lodo, especialmente as centrífugas desaguadoras e a estrutura para higienização, utilizam os mesmos custos unitários para ambas as alternativas, o que pode enviesar os resultados, visto que o custo unitário é diluído em função do porte do equipamento, assim como demonstrado neste trabalho para os equipamentos da unidade de recuperação de energia. Como o volume de lodo encaminhado para tais etapas é bastante diferente entre as duas alternativas, seria importante considerar essa variação nos custos avaliados.

No que se refere aos custos de operação, considerou-se de forma generalista, separando-os nas cinco categorias apresentadas (Pessoal próprio, manutenção, energia elétrica, produtos químicos e transporte e disposição de lodo). Apesar disso, existem outros custos associados à operação desse processo, como o maquinário e pessoal necessário para a movimentação de lodo dentro da ETE, que devem ser incluídos em estudos mais detalhados.

Por fim, é importante realizar o estudo considerando todos os custos envolvidos na estação de tratamento de esgoto, incluindo também as receitas e os impostos, como forma de avaliar a situação total da ETE ao considerar cada uma das alternativas. Deve-se incluir, também, os impactos ambientais e riscos associados.

Como sugestão para estudos futuros, seria pertinente avaliar outras situações de aproveitamento de lodo de esgoto, uma vez que são várias as alternativas disponíveis.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Atlas Esgotos: Despoluição de bacias hidrográficas.** Brasília: ANA, 2017. 88 p.
- AMARAL, K. G. C. **Avaliação da sustentabilidade no gerenciamento do lodo e biogás, em estação de tratamento de esgotos, utilizando a técnica de ACV,** 2018. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018. 168 p.
- ANDREOLLI, C. V. (coord.). Projeto PROSAB. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final.** Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. 282 p.
- ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.** 4. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. 484 p.
- ANDREOLLI, C. V. (coord.). Projeto PROSAB. **Alternativas de Uso de resíduos do saneamento.** Rio de Janeiro: ABES, 2006. 417 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12209: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 59 p.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Calculadora do Cidadão,** 2022. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAOPublico/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValores>. Acesso em: set. 2022.
- BASTO, P. E. A. **Determinação da pozolanicidade por condutividade elétrica do lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE) para adição ao cimento Portland,** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018. 99 p.
- BATISTA, L. F. **Lodos gerados nas estações de tratamento de esgotos no distrito federal: Um estudo de sua aptidão para condicionamento, utilização e disposição final,** 2015. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015. 197 p.

BETA Consultoria E Infraestrutura. **EVTEA – definição e principais questões relacionadas**. BETAINFRAESTRUTURA, 2020. Disponível em: <https://www.betainfraestrutura.com.br/2020/04/16/evtea/>. Acesso em: nov. 2022.

BIELSCHOWSKY, M., C. Modelo de gerenciamento de lodo de estação de tratamento de esgotos: Aplicação do caso da bacia da Baía de Guanabara, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. 165 p.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico, e dá outras providências. **Diário Oficial da União:** Brasília, 8 de janeiro de 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: maio 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 providências. 3. ed., reimpr. – Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2017. 80 p.

BRASIL. Instrução Normativa nº 39, de 24 de outubro de 2012. Regulamenta os procedimentos e as disposições relativos às operações de crédito no âmbito do Programa SANEAMENTO PARA TODOS – MUTUÁRIOS PÚBLICOS, e dá outras providências. **Diário Oficial da União:** Brasília, 16 de novembro de 2012. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/Instrucoes_Normativas/IN-39_2012_Publico_Consolidada_Julho_2017.pdf. Acesso em: out. 2022.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico, e dá outras providências. **Diário Oficial da União:** Brasília, 16 de julho de 2020. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm#:~:text=%E2%80%9CEstabelece%20as%20diretrizes%20nacionais%20para,Art. Acesso em: maio 2022.

BRASIL. Serviços e Informações do Brasil. **Obter apoio financeiro para projetos de saneamento básico por meio de Seleção Contínua - Mutuários Privados (SPT – Privado),** 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/servicos/obter-apoio-para-projetos-de-saneamento-basico-por-meio-de-selecao-continua-mutuarios-privados>. Acesso em: out. 2022.

CERQUEIRA, P. L. W. Custos de desaguamento e higienização de lodo em ETEs com reatores UASB seguidos de pós-tratamento aeróbio: Subsídios para estudos de concepção,

2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019. 191 p.

CHAVES, L. A. A. Estudo das propriedades de argamassas com a substituição parcial da areia pela cinza do lodo de ETE, 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2019. 20 p.

CIBiogás Energias Renováveis. **BIOGÁSMAP**. Foz do Iguaçu: CIBiogás, 2021. Microsoft Power BI. Disponível em: <https://cibiogas.org/blog/mapa-do-biogas-no-brasil-conheca-as-atualizacoes-do-biogasmap/>. Acesso em: out. 2022.

CONAMA. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: Brasília, 30 de agosto de 2006. Disponível em:

<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=5956>. Acesso em: out. 2022.

CONAMA. Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: Brasília, 21 de agosto de 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou-/resolucao-n-498-de-19-de-agosto-de-2020-273467970>. Acesso em: out. 2022.

CORRÊA, R. S.; FONSECA, Y. M. F.; CORRÊA, A. S. Produção de biossólido agrícola por meio da compostagem e vermicompostagem de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 420-426, 2007.

COSTA, F. M. S. Estudo da viabilidade da utilização de cinza de lodo de esgoto como adição em argamassa de cimento Portland, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014. 121 p.

CRATO. Plano de Negócios Referencial: Concessão do serviço público de coleta, transporte, tratamento e Destinação final de esgotos sanitários no município do Crato-CE, precedida de execução das obras de construção de redes coletoras de esgoto e respectivas ligações prediais, interceptores, linhas de recalque e emissários, estações elevatórias de esgoto e estações de tratamento de esgoto, e gestão comercial de todo sistema de saneamento. Crato: Prefeitura do Crato, 2020. 32 p. Disponível em:

http://servicos.crato.ce.gov.br/ses/include/documentos/estudos/Plano_de_Negocios_Referecial_28-01-2021.pdf. Acesso em: out. 2022.

FEDRIGO; N. S. et al. Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial

Brasileiro, 2009. Relatório de Iniciação Científica – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. 104 p.

FUNDO DE GARANTIA DO TEMPO DE SERVIÇO. Saneamento para todos, 2022.

Disponível em: https://www_fgts.gov.br/Pages/agente-financeiro/saneamento-para-todos.aspx. Acesso em: out. 2022.

GARCIA, I. G. B.; HOFFMANN, R.; MAYER, F. D. Análise da Viabilidade técnica e econômica de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na estação de tratamento de esgoto Serraria, em Porto Alegre (RS), 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos, EaD) – Universidade Federal de Santa Maria, Panambi, 2015.

GEYER, A. L. B. Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. 238 p.

HEBERLE, A. N. A. Biogás gerado a partir de lodo de estação de tratamento de efluentes suplementado com óleo vegetal residual, 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2013. 62.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Sistema IBGE de Recuperação Automática. Censo Demográfico, 2022a. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1211>. Acesso em: set. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE Cidades, 2022b. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/recife/panorama>. Acesso em: set. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IPCA - Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo, 2022c. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplo.html?=&t=series-historicas>. Acesso em: set. 2022.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Agenda 2030: ODS – Metas Nacionais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Brasília: IPEA, 2018. 546 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Normais Climatológicas do Brasil 1991 a 2020:** Temperatura média compensada mensal e anual. Brasília, 2020. Planilha do Microsoft Excel

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Manual do Saneamento Básico.** São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2012. 62 p.

LEITE, W. R. M. **Digestão anaeróbia mesofílica de lodo adensado de estação de tratamento de esgoto,** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. 143 p.

LEITE, W. R. M. **Digestão anaeróbia em temperaturas mesofílica e termofílica de lodo de ETE usando reatores de estágio único e dois estágios,** 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. 193 p.

LIMA, A. C. G; PASSAMANI, F. C. **Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES,** 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012. 106 p.

LIMA, J. F. **Avaliação da incorporação de cinzas de lodo de esgoto como adição mineral em concretos de cimento Portland,** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013. 121 p.

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico,** 2011. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. 184 p.

METCALF; EDDY, INC. **Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse.** New York: Ed. McGraw-Hill, 2002. 1334 p.

MORAES, K. H. K.; SOUZA, S. N. M. Geração de eletricidade com biogás: estudo de viabilidade em estação de tratamento de esgoto no Paraná. **Research, Society and Development,** v. 10, n. 17, 2021.

NEOENERGIA Pernambuco. **Tabela de tarifas de energia elétrica: Grupo A.**

NEOENERGIA, 2022. Disponível em:

<https://servicos.neoenergiapernambuco.com.br/comercial-industrial/Pages/Alta%20Tens%C3%A3o/tarifas-grupo-a.aspx>. Acesso em: out. 2022.

- NOGUEIRA; E. **Introdução à Engenharia Econômica**. São Carlos: EdUFSCar, 2011. 111p.
- NOGUEIRA, F. P.; GOMES, G. A. M. Geração de eletricidade a partir do biogás da ETE São José em Varginha-MG: Análise do potencial e a viabilidade do aproveitamento. **Fundação de Ensino e Pesquisa do Sul de Minas**, 2020. 16 p.
- PACHECO, R. P. **Custos para implantação de sistemas de esgotamento sanitário**, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011. 116 p.
- PAVIĆIĆ, J. *et al.* Biogas and Biomethane Production and Usage: Technology Development, Advantages and Challenges in Europe. **Energies**, 15, 2940, 2022.
- PEDROZA, M. M. *et al.* Produção e tratamento de lodo de esgoto: Uma revisão. **Revista Liberato**, v. 11, n. 16, p. 89-188, jul./dez. 2010.
- PELETEIRO, C. S.; ALMEIDA, M. L. R. **Dimensionamento, análise e comparação da viabilidade econômica de uma estação de tratamento de esgotos utilizando os processos de lodos ativados convencional e aeração prolongada**, 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. 100 p.
- PEREIRA, R. A. S. **Viabilidade técnica e econômica de estações de tratamento de esgoto com cogeração com biogás em diferentes escalas de suprimento de energia**, 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. 194.
- PIVELI, R. P. **Apostila:** Tratamento de Esgotos Sanitários. São Paulo, 2007. 71 p. Disponível em: <https://ctec.ufal.br/professor/elca/APOSTILA%20-20TRATAMENTO%20DE%20ESGOTOS.pdf>. Acesso em: out. 2022.
- SANTOS, A. D. **Estudo das possibilidades de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo**, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. 265 p.
- SANTOS, I. F. S. *et al.* Um estudo dos custos de implantação de empreendimento de aproveitamento energético do biogás de estações de tratamento de esgoto. **Revista Brasileira de Energia**, v. 20, n. 2, p. 145-155, 2º sem. 2014.

SANTOS, A. B. (coord.). **Caracterização, tratamento e gerenciamento de subprodutos de correntes de esgotos segregadas e não segregadas em empreendimentos habitacionais.**

Fortaleza: Imprece, 2019. 812 p.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. Sistema FIERGS. UNIDO. UNEP. **Estudo de Viabilidade Econômica.** Porto Alegre: SENAI-RS, 2003. 34 p.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. Sistema FIRJAN.

Tratamento de esgotos. Rio de Janeiro: SENAI-RJ, 2008. 252 p.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **SNIS 2021/2022** (ano de referência 2020), 2021. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnosticos>. Acesso em: maio 2022.

SOARES JÚNIOR, A. R. *et al.* Estudo da incorporação do lodo de esgoto gerado em estações de tratamento de esgotos na formulação de tijolos ecológicos de solo-cimento. In: **10º Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental - PUCRS/RS**, 2016, Porto Alegre. **Anais do 10º Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental.** Porto Alegre: PUC-RS, 2016. 15 p.

VALENTE, V. B. **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso de biogás de reatores anaeróbios em estações de tratamento de esgoto no Brasil**, 2015. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. 182 p.

VIANNA, R. S. C.; OLIVEIRA, F. C.; MORAIS, L. C. Recuperação de energia a partir da queima de lodo de esgoto. In: **9º Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica - FATEC/SP**, 2007, São Paulo. Anais do 9º Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica - 9ºSICT. São Paulo: FATEC-SP, 2007. v. BT/23. p. 24.

VIEIRA, G. E. G. *et al.* O processo de pirólise como alternativa para o aproveitamento do potencial energético de lodo de esgoto: Uma revisão. **Revista Liberato**, v. 12, n. 17, p. 01-106, jan./jun. 2011.

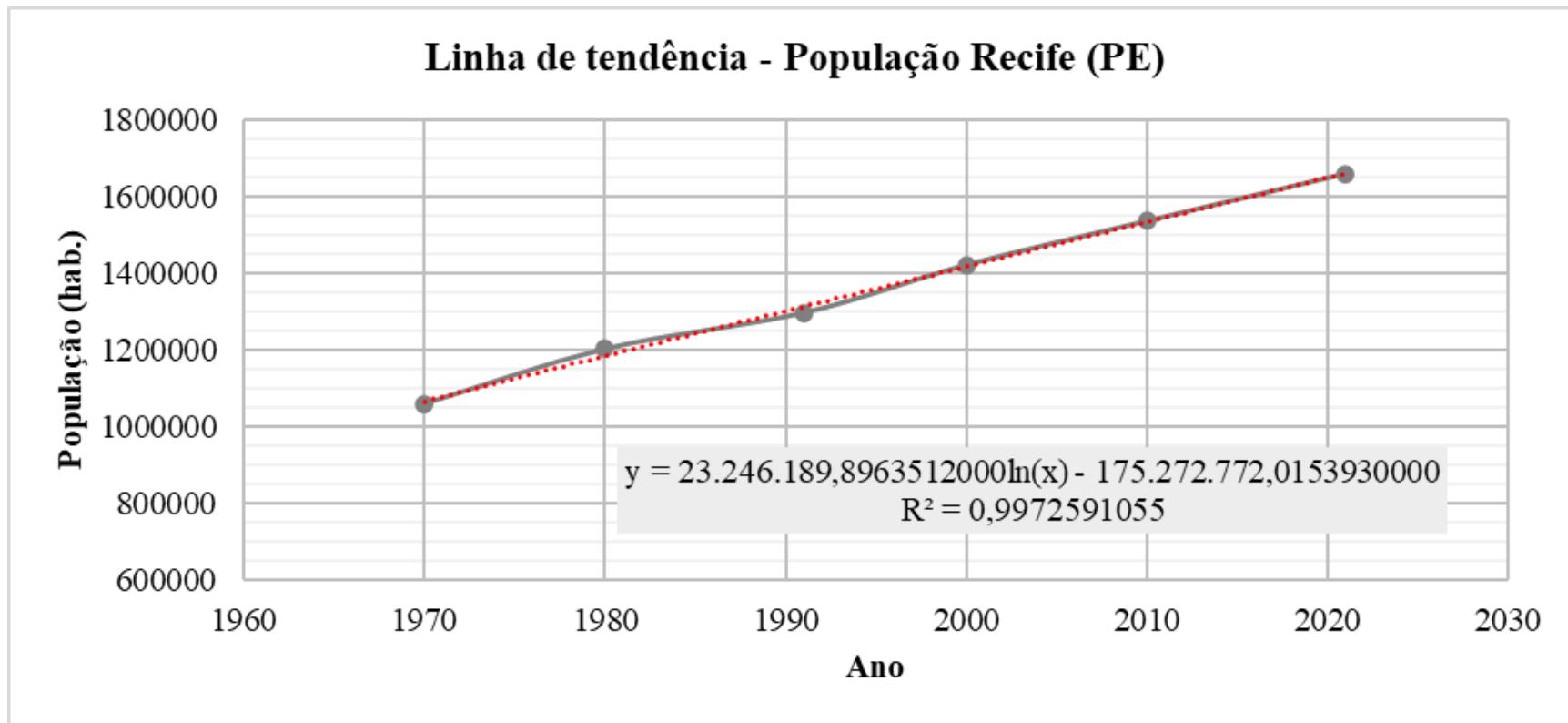
VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. 243 p.

APÊNDICE A – PROJEÇÃO POPULACIONAL

Projeção populacional	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
População Recife (hab.)	1.673.562	1.685.056	1.696.544	1.708.026	1.719.503	1.730.974	1.742.440	1.753.899	1.765.353	1.776.802	1.788.245	1.799.682
Taxa de crescimento (%)	-	0,69%	0,68%	0,68%	0,67%	0,67%	0,66%	0,66%	0,65%	0,65%	0,64%	0,64%
População (hab.)	160.000	161.099	162.197	163.295	164.392	165.489	166.585	167.681	168.776	169.870	170.964	172.058

Projeção populacional	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
População Recife (hab.)	1.811.114	1.822.540	1.833.960	1.845.375	1.856.784	1.868.188	1.879.586	1.890.978	1.902.365	1.913.746	1.925.122	1.936.492
Taxa de crescimento (%)	0,64%	0,63%	0,63%	0,62%	0,62%	0,61%	0,61%	0,61%	0,60%	0,60%	0,59%	0,59%
População (hab.)	173.151	174.243	175.335	176.426	177.517	178.607	179.697	180.786	181.875	182.963	184.050	185.137

Projeção populacional	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052	2053	2054	2055	2056
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
População Recife (hab.)	1.947.856	1.959.215	1.970.569	1.981.917	1.993.259	2.004.596	2.015.927	2.027.253	2.038.573	2.049.888	2.061.197
Taxa de crescimento (%)	0,59%	0,58%	0,58%	0,58%	0,57%	0,57%	0,57%	0,56%	0,56%	0,56%	0,55%
População (hab.)	186.224	187.310	188.395	189.480	190.564	191.648	192.732	193.814	194.897	195.978	197.060



APÊNDICE B – PRODUÇÃO E PROJEÇÃO ANUAL DE LODO

Os cálculos não levaram em consideração o retorno de sobredrenante.

Lodo removido da fase líquida	
Lodo removido do decantador primário	
Carga SS	6400 kgSS/dia
Volume	224 m ³ /dia
Lodo removido do decantador secundário	
Carga SS	4800 kgSS/dia
Volume	680 m ³ /dia
Lodo misto	
Carga SS	11200 kgSS/dia
Volume	904 m ³ /dia
Concentração de SS	1,24 %

Etapas de tratamento do lodo - Alternativa 1	
Adensamento por gravidade (Lodo primário)	
Lodo adensado	
Captura de sólidos (85-92)	85 %
Teor de sólidos (4-8)	4 %
Massa específica (1020-1030)	1025 kg/m ³
Carga SS efluente	5440 kgSS/dia
Vazão de lodo	133 m ³ /dia
Adensamento por centrífuga (Lodo secundário ativado)	
Captura de sólidos (80-95)	90 %
Teor de sólidos (3-7)	4 %
Massa específica (1020-1030)	1025 kg/m ³
Carga SS efluente	4320 kgSS/dia
Vazão de lodo	105 m ³ /dia
Lodo misto adensado	
Carga SS efluente	9760 kgSS/dia
Vazão de lodo misto adensado	238 m ³ /dia
Desaguamento por centrífuga (Lodo misto)	
Eficiência da captura (90-95)	90 %
Teor de sólidos (20-30)	20 %
Massa específica (1050-1080)	1065 kg/m ³
Carga efluente	8784,00 kgSS/dia
Vazão efluente	41,24 m ³ /dia
Massa da torta	43920,00 kg torta/dia
Dosagem de polímero seco (média 1-5)	3,00 kg/ton
Quantidade de polímero	29,28 kg/dia
Quantidade de polímero por volume de lodo	0,12300 kgpolímero/m ³ lodo
Massa da torta final	43949,28 kg/dia
Volume da torta	41,27 m ³ /dia
Higienização	
Dosagem de cal	27 %
Massa específica	1065 kg/m ³
Quantidade de cal	2371,68 kgCaO/dia
Quantidade de cal	57,4717 kgCaO/m ³ lodo
Massa de lodo para disposição	46320,96 kglodo/dia
Volume de lodo para disposição	43,49 m ³ /dia

Etapas de tratamento do lodo - Alternativa 2		
Adensamento por gravidade (Lodo primário)		
Lodo adensado		
Captura de sólidos (85-92)	85	%
Teor de sólidos (4-8)	4	%
Massa específica (1020-1030)	1025	kg/m ³
Carga SS efluente	5440	kgSS/dia
Vazão de lodo	133	m ³ /dia
Adensamento por centrífuga (Lodo secundário ativado)		
Captura de sólidos (80-95)	90	%
Teor de sólidos (3-7)	4	%
Massa específica (1020-1030)	1025	kg/m ³
Carga SS efluente	4320	kgSS/dia
Vazão de lodo	105	m ³ /dia
Lodo misto adensado		
Carga SS efluente	9760	kgSS/dia
Vazão de lodo misto adensado	238	m ³ /dia
Estabilização por digestão anaeróbia		
Lodo efluente do digestor primário		
SV/ST (75-80)	77,5	%
SV afluente	7564	kgSV/dia
SF afluente	2196	kgSF/dia
Eficiência remoção SV (40-55)	40	%
SF efluente	2196	kgSF/dia
SV efluente	4538,40	kgSV/dia
ST efluente	6734,40	kgSS/dia
SF/ST efluente	32,61	%
SV/ST efluente	67,39	%
Vazão efluente	238,05	m ³ /dia
Concentração SS efluente	2,83	%
Lodo efluente do digestor secundário		
Eficiência de captura (90-95)	90	%
Teor de sólidos (3-6)	4	%
Massa específica (1030)	1013,5	kg/m ³
Carga SS efluente	6061,0	kgSS/dia
SV efluente	4084,6	kgSV/dia
SF efluente	1976,4	kgSF/dia
Vazão efluente	149,5	m ³ /dia
Desaguamento por centrífuga		
Eficiência da captura (90-95)	90	%
Teor de sólidos (20-30)	25	%
Massa específica (1050-1080)	1065	kg/m ³
Carga efluente	5454,86	kgSS/dia
Vazão efluente	20,49	m ³ /dia
Massa da torta	21819,46	kg torta/dia
Dosagem de polímero seco (média 1-5)	3,00	kg/ton
Quantidade de polímero	18,18	kg/dia
Quantidade de polímero	0,12162	kgpolímero/m ³ lodo
Massa da torta final	21837,64	kg/dia
Volume da torta	20,50	m ³ /dia
Higienização		
Dosagem de cal	17,5	%

Etapas de tratamento do lodo - Alternativa 2		
Massa específica	1065	kg/m ³
Quantidade de cal	954,60	kgCaO/dia
Quantidade de cal	46,5550	kgCaO/m ³ lodo
Massa de lodo para disposição	22792,24	kglodo/dia
Volume de lodo para disposição	21,40	m ³ /dia

Produção per capita		
Alternativa 1	Massa (kg/hab.dia)	Vazão (L/hab.dia)
Lodo Primário ⁽¹⁾	0,04	1,40
Lodo Secundário ⁽¹⁾	0,03	4,25
Lodo Primário Adensado ⁽¹⁾	0,03	0,83
Lodo Secundário Adensado ⁽¹⁾	0,03	0,66
Lodo Desaguado	0,27	0,26
Lodo Higienizado	0,29	0,27

Nota: ⁽¹⁾ kg SS

Produção per capita		
Alternativa 2	Massa (kg/hab.dia)	Vazão (L/hab.dia)
Lodo Primário ⁽¹⁾	0,04	1,40
Lodo Secundário ⁽¹⁾	0,03	4,25
Lodo Primário Adensado ⁽¹⁾	0,03	0,83
Lodo Secundário Adensado ⁽¹⁾	0,03	0,66
Lodo Digerido ⁽¹⁾	0,04	0,93
Lodo Desaguado	0,14	0,13
Lodo Higienizado	0,14	0,13

Nota: ⁽¹⁾ kg SS

Projeção de Lodo	Total	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Lodo removido dos decantadores													
Lodo Primário (m³/dia)		224,00	225,54	227,08	228,61	230,15	231,68	233,22	234,75	236,29	237,82	239,35	240,88
Lodo Secundário (m³/dia)		680,00	684,67	689,34	694,00	698,67	703,33	707,99	712,64	717,30	721,95	726,60	731,25
Lodo Misto (m³/dia)		904,00	910,21	916,41	922,62	928,82	935,01	941,21	947,40	953,58	959,77	965,95	972,13
Convencional													
Lodo Primário Adensado (m³/dia)	5.183,17	132,68	133,59	134,50	135,42	136,33	137,23	138,14	139,05	139,96	140,87	141,78	142,68
Lodo Secundário Adensado (m³/dia)	4.116,05	105,37	106,09	106,81	107,54	108,26	108,98	109,70	110,42	111,14	111,87	112,59	113,31
Lodo Misto Adensado (m³/dia)	9.299,22	238,05	239,68	241,32	242,95	244,58	246,22	247,85	249,48	251,11	252,73	254,36	255,99
Lodo Desaguado (m³/dia)	1.612,07	41,27	41,55	41,83	42,12	42,40	42,68	42,97	43,25	43,53	43,81	44,09	44,38
Lodo Higienizado (m³/dia)	1.699,06	43,49	43,79	44,09	44,39	44,69	44,99	45,28	45,58	45,88	46,18	46,47	46,77
Lodo Disposto em Aterro (m³/ano)	620.156,45	15.875,26	15.984,29	16.093,26	16.202,18	16.311,05	16.419,87	16.528,63	16.637,33	16.745,99	16.854,58	16.963,13	17.071,62
Lodo Disposto em Aterro (ton./ano)	660.466,62	16.907,15	17.023,27	17.139,32	17.255,33	17.371,27	17.487,16	17.602,99	17.718,76	17.834,47	17.950,13	18.065,73	18.181,28
Alternativo													
Lodo Primário Adensado (m³/dia)	5.183,17	132,68	133,59	134,50	135,42	136,33	137,23	138,14	139,05	139,96	140,87	141,78	142,68
Lodo Secundário Adensado (m³/dia)	4.116,05	105,37	106,09	106,81	107,54	108,26	108,98	109,70	110,42	111,14	111,87	112,59	113,31
Lodo Misto Adensado (m³/dia)	9.299,22	238,05	239,68	241,32	242,95	244,58	246,22	247,85	249,48	251,11	252,73	254,36	255,99
Lodo Digerido (m³/dia)	5.840,34	149,51	150,53	151,56	152,58	153,61	154,63	155,66	156,68	157,71	158,73	159,75	160,77
Lodo Desaguado (m³/dia)	801,01	20,50	20,65	20,79	20,93	21,07	21,21	21,35	21,49	21,63	21,77	21,91	22,05
Lodo Higienizado (m³/dia)	836,02	21,40	21,55	21,70	21,84	21,99	22,14	22,28	22,43	22,57	22,72	22,87	23,01
Lodo Disposto em Aterro (m³/ano)	305.148,14	7.811,43	7.865,07	7.918,69	7.972,29	8.025,86	8.079,40	8.132,91	8.186,40	8.239,87	8.293,30	8.346,71	8.400,10
Lodo Disposto em Aterro (ton./ano)	324.982,77	8.319,17	8.376,30	8.433,41	8.490,49	8.547,54	8.604,56	8.661,55	8.718,52	8.775,46	8.832,37	8.889,25	8.946,10

Projeção de Lodo	Total	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045
		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Lodo removido dos decantadores													
Lodo Primário (m³/dia)	242,41	243,94	245,47	247,00	248,52	250,05	251,58	253,10	254,62	256,15	257,67	259,19	
Lodo Secundário (m³/dia)	735,89	740,53	745,17	749,81	754,45	759,08	763,71	768,34	772,97	777,59	782,21	786,83	
Lodo Misto (m³/dia)	978,30	984,47	990,64	996,81	1.002,97	1.009,13	1.015,29	1.021,44	1.027,59	1.033,74	1.039,88	1.046,03	
Convencional													
Lodo Primário Adensado (m³/dia)	5.183,17	143,59	144,49	145,40	146,30	147,21	148,11	149,02	149,92	150,82	151,73	152,63	153,53
Lodo Secundário Adensado (m³/dia)	4.116,05	114,03	114,75	115,46	116,18	116,90	117,62	118,34	119,05	119,77	120,49	121,20	121,92
Lodo Misto Adensado (m³/dia)	9.299,22	257,61	259,24	260,86	262,49	264,11	265,73	267,35	268,97	270,59	272,21	273,83	275,45
Lodo Desaguado (m³/dia)	1.612,07	44,66	44,94	45,22	45,50	45,78	46,07	46,35	46,63	46,91	47,19	47,47	47,75
Lodo Higienizado (m³/dia)	1.699,06	47,07	47,37	47,66	47,96	48,26	48,55	48,85	49,14	49,44	49,74	50,03	50,33
Lodo Disposto em Aterro (m³/ano)	620.156,45	17.180,06	17.288,45	17.396,78	17.505,06	17.613,29	17.721,46	17.829,58	17.937,65	18.045,66	18.153,62	18.261,53	18.369,39
Lodo Disposto em Aterro (ton./ano)	660.466,62	18.296,77	18.412,20	18.527,57	18.642,89	18.758,15	18.873,36	18.988,50	19.103,60	19.218,63	19.333,61	19.448,53	19.563,40
Alternativo													
Lodo Primário Adensado (m³/dia)	5.183,17	143,59	144,49	145,40	146,30	147,21	148,11	149,02	149,92	150,82	151,73	152,63	153,53
Lodo Secundário Adensado (m³/dia)	4.116,05	114,03	114,75	115,46	116,18	116,90	117,62	118,34	119,05	119,77	120,49	121,20	121,92
Lodo Misto Adensado (m³/dia)	9.299,22	257,61	259,24	260,86	262,49	264,11	265,73	267,35	268,97	270,59	272,21	273,83	275,45
Lodo Digerido (m³/dia)	5.840,34	161,79	162,81	163,83	164,85	165,87	166,89	167,91	168,93	169,95	170,96	171,98	172,99
Lodo Desaguado (m³/dia)	801,01	22,19	22,33	22,47	22,61	22,75	22,89	23,03	23,17	23,31	23,45	23,59	23,73
Lodo Higienizado (m³/dia)	836,02	23,16	23,31	23,45	23,60	23,74	23,89	24,04	24,18	24,33	24,47	24,62	24,76
Lodo Disposto em Aterro (m³/ano)	305.148,14	8.453,45	8.506,79	8.560,09	8.613,37	8.666,62	8.719,85	8.773,05	8.826,22	8.879,37	8.932,50	8.985,59	9.038,66
Lodo Disposto em Aterro (ton./ano)	324.982,77	9.002,93	9.059,73	9.116,50	9.173,24	9.229,95	9.286,64	9.343,30	9.399,93	9.456,53	9.513,11	9.569,66	9.626,18

Projeção de Lodo	Total	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052	2053	2054	2055	2056
		25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
Lodo removido dos decantadores												
Lodo Primário (m³/dia)		260,71	262,23	263,75	265,27	266,79	268,31	269,82	271,34	272,86	274,37	275,88
Lodo Secundário (m³/dia)		791,45	796,07	800,68	805,29	809,90	814,51	819,11	823,71	828,31	832,91	837,50
Lodo Misto (m³/dia)		1.052,16	1.058,30	1.064,43	1.070,56	1.076,69	1.082,81	1.088,93	1.095,05	1.101,17	1.107,28	1.113,39
Convencional												
Lodo Primário Adensado (m³/dia)	5.183,17	154,43	155,33	156,23	157,13	158,03	158,93	159,83	160,72	161,62	162,52	163,42
Lodo Secundário Adensado (m³/dia)	4.116,05	122,64	123,35	124,07	124,78	125,49	126,21	126,92	127,63	128,35	129,06	129,77
Lodo Misto Adensado (m³/dia)	9.299,22	277,06	278,68	280,30	281,91	283,52	285,14	286,75	288,36	289,97	291,58	293,19
Lodo Desaguado (m³/dia)	1.612,07	48,03	48,31	48,59	48,87	49,15	49,43	49,71	49,99	50,27	50,55	50,83
Lodo Higienizado (m³/dia)	1.699,06	50,62	50,92	51,21	51,51	51,80	52,10	52,39	52,69	52,98	53,27	53,57
Lodo Disposto em Aterro (m³/ano)	620.156,45	18.477,19	18.584,94	18.692,64	18.800,29	18.907,88	19.015,42	19.122,91	19.230,34	19.337,72	19.445,06	19.552,33
Lodo Disposto em Aterro (ton./ano)	660.466,62	19.678,21	19.792,96	19.907,66	20.022,30	20.136,89	20.251,42	20.365,90	20.480,31	20.594,68	20.708,98	20.823,24
Alternativo												
Lodo Primário Adensado (m³/dia)	5.183,17	154,43	155,33	156,23	157,13	158,03	158,93	159,83	160,72	161,62	162,52	163,42
Lodo Secundário Adensado (m³/dia)	4.116,05	122,64	123,35	124,07	124,78	125,49	126,21	126,92	127,63	128,35	129,06	129,77
Lodo Misto Adensado (m³/dia)	9.299,22	277,06	278,68	280,30	281,91	283,52	285,14	286,75	288,36	289,97	291,58	293,19
Lodo Digerido (m³/dia)	5.840,34	174,01	175,02	176,04	177,05	178,07	179,08	180,09	181,10	182,11	183,12	184,13
Lodo Desaguado (m³/dia)	801,01	23,87	24,00	24,14	24,28	24,42	24,56	24,70	24,84	24,98	25,12	25,25
Lodo Higienizado (m³/dia)	836,02	24,91	25,05	25,20	25,34	25,49	25,63	25,78	25,92	26,07	26,21	26,36
Lodo Disposto em Aterro (m³/ano)	305.148,14	9.091,71	9.144,73	9.197,72	9.250,69	9.303,63	9.356,54	9.409,43	9.462,29	9.515,13	9.567,94	9.620,73
Lodo Disposto em Aterro (ton./ano)	324.982,77	9.682,67	9.739,13	9.795,57	9.851,98	9.908,36	9.964,72	10.021,04	10.077,34	10.133,62	10.189,86	10.246,08

APÊNDICE C – PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Produção de Metano	
SSVremovido (kgSSV/dia)	3.025,60
gDQO/gSV	1,59
DQO(CH4) (gDQO/dia)	4.816.261,22
p (atm)	1,00
K (gDQO/mol)	64,00
R (atm.L/mol.K)	0,08
T (°C)	26,00
K(t)	2,61
Vmetano (L/dia)	1.846.429,63
Vmetano (L/hab.dia)	11,54
Vbiogás (L/dia)	3.077.382,72
Vbiogás (L/hab.dia)	19,23

Produção de Energia Elétrica - 2022	
Qmetano (m³/dia)	1.846,43
Potencial calorífico Inferior (kWh/m³)	9,96
Rendimento elétrico do motor	0,30
Potência (kW)	229,88
Energia (KWh/dia)	5.517,13
Energia <i>per capita</i> (KWh/hab.dia)	0,03

Produção de Energia Elétrica - 2056	
Qmetano (m³/dia)	2.274,11
Potencial calorífico Inferior (kWh/m³)	9,96
Rendimento elétrico do motor	0,30
Potência (kW)	283,13
Energia (KWh/dia)	6.795,03

Produção de Energia	Total	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Produção de Metano (m ³ /h)	3.005,40	76,93	77,46	77,99	78,52	79,05	79,57	80,10	80,63	81,15	81,68	82,21	82,73
Produção de Metano (m ³ /dia)	72.129,55	1.846,43	1.859,11	1.871,79	1.884,45	1.897,12	1.909,77	1.922,42	1.935,07	1.947,70	1.960,33	1.972,96	1.985,58
Produção de Biogás (m ³ /dia)	120.215,92	3.077,38	3.098,52	3.119,64	3.140,76	3.161,86	3.182,95	3.204,04	3.225,11	3.246,17	3.267,22	3.288,26	3.309,30
Produção de Energia (kWh/dia)	215.523,09	5.517,13	5.555,02	5.592,89	5.630,75	5.668,58	5.706,40	5.744,20	5.781,98	5.819,74	5.857,48	5.895,20	5.932,90
Produção de Energia (kWh/ano)	78.665.929,39	2.013.753,08	2.027.583,26	2.041.406,60	2.055.223,12	2.069.032,81	2.082.835,68	2.096.631,75	2.110.421,02	2.124.203,50	2.137.979,18	2.151.748,09	2.165.510,22

Produção de Energia	Total	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045
		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Produção de Metano (m ³ /h)	3.005,40	83,26	83,78	84,31	84,83	85,36	85,88	86,41	86,93	87,45	87,98	88,50	89,02
Produção de Metano (m ³ /dia)	72.129,55	1.998,19	2.010,80	2.023,40	2.035,99	2.048,58	2.061,16	2.073,73	2.086,30	2.098,87	2.111,42	2.123,97	2.136,52
Produção de Biogás (m ³ /dia)	120.215,92	3.330,32	3.351,33	3.372,33	3.393,32	3.414,30	3.435,26	3.456,22	3.477,17	3.498,11	3.519,04	3.539,96	3.560,86
Produção de Energia (kWh/dia)	215.523,09	5.970,59	6.008,26	6.045,91	6.083,54	6.121,15	6.158,74	6.196,32	6.233,87	6.271,41	6.308,93	6.346,43	6.383,92
Produção de Energia (kWh/ano)	78.665.929,39	2.179.265,58	2.193.014,18	2.206.756,03	2.220.491,13	2.234.219,49	2.247.941,11	2.261.656,01	2.275.364,19	2.289.065,65	2.302.760,40	2.316.448,45	2.330.129,80

Produção de Energia	Total	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052	2053	2054	2055	2056
		25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
Produção de Metano (m ³ /h)	3.005,40	89,54	90,07	90,59	91,11	91,63	92,15	92,67	93,19	93,71	94,23	94,75
Produção de Metano (m ³ /dia)	72.129,55	2.149,06	2.161,59	2.174,12	2.186,64	2.199,15	2.211,66	2.224,16	2.236,65	2.249,14	2.261,63	2.274,11
Produção de Biogás (m ³ /dia)	120.215,92	3.581,76	3.602,65	3.623,53	3.644,39	3.665,25	3.686,10	3.706,93	3.727,76	3.748,57	3.769,38	3.790,18
Produção de Energia (kWh/dia)	215.523,09	6.421,38	6.458,83	6.496,26	6.533,67	6.571,06	6.608,43	6.645,79	6.683,12	6.720,44	6.757,74	6.795,03
Produção de Energia (kWh/ano)	78.665.929,39	2.343.804,47	2.357.472,46	2.371.133,76	2.384.788,41	2.398.436,38	2.412.077,71	2.425.712,38	2.439.340,41	2.452.961,80	2.466.576,56	2.480.184,70