

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

**POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS ATRAVÉS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA
DO LODO DE ESGOTO NO MUNICÍPIO DE RIO CLARO - SP**

Ana Beatriz Cordeiro Vieira

Profa. Maria Luisa Nerys de Moraes Carneiro (orientador)

Rio Claro (SP)

2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

ANA BEATRIZ CORDEIRO VIEIRA

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS ATRAVÉS DA
DIGESTÃO ANAERÓBIA DO LODO DE ESGOTO NO
MUNICÍPIO DE RIO CLARO - SP

Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências
Exatas - Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Engenheiro Ambiental.

Rio Claro - SP

2025

V658p

Vieira, Ana Beatriz Cordeiro

Potencial de geração de biogás através da digestão anaeróbia de lodo de esgoto no município de Rio Claro - SP / Ana Beatriz Cordeiro Vieira. -- Rio Claro, 2025

63 f. : il., tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientadora: Maria Luisa Nerys De Moraes Carneiro

1. Biogás. 2. Digestão anaeróbia. 3. Lodo de esgoto. 4. Energia limpa. 5. Metano. I. Título.

ANA BEATRIZ CORDEIRO VIEIRA

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS ATRAVÉS DA
DIGESTÃO ANAERÓBIA DO LODO DE ESGOTO NO
MUNICÍPIO DE RIO CLARO - SP

Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências
Exatas - Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Engenheiro Ambiental.

Comissão Examinadora

Maria Luisa Nerys De Moraes Carneiro (orientador)

Marcelo Loureiro Garcia

Marcus Cesar Avezum Alves de Castro

Rio Claro, 17 de junho de 2025.

Ana Beatriz Cordeiro Vieira

Maria Luisa Nerys De Moraes Carneiro

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, aos meus pais, Ana e Ronaldo, por sempre me darem base, apoio e incentivo para correr atrás das oportunidades. Sou muito grata por tudo que construíram por mim e por acreditarem em cada passo que dei até aqui.

Estendo meu agradecimento a toda a minha família pelo apoio durante essa caminhada, e em especial à minha avó Elza, que sempre valorizou o conhecimento e me inspirou a fazer o mesmo.

Sou muito grata também pelas amigas que a graduação e o time de handebol me trouxeram. Obrigada em especial a Ana Paula e obrigada, Larissa, por ter estado ao meu lado em praticamente todas as aulas e momentos importantes. E muito obrigada, Giovanna, por ter se tornado minha melhor amiga nessa jornada.

Agradeço à minha orientadora, Prof^a Maria Luisa Nerys de Moraes Carneiro, pela paciência, orientação e disponibilidade ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também aos professores da UNESP que fizeram parte da minha formação. Em especial ao Prof. Marcus, por me desafiar mais do que eu achava que dava conta mas no fim, “coloquei mais melancias no caminhãozinho”.

Por fim, agradeço aos colegas da Matrix e à oportunidade de estágio, que me trouxe muito aprendizado prático e uma ótima companhia para encarar a rotina de trabalho.

A todos que fizeram parte dessa fase, meu sincero obrigado.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estimar o potencial de geração de biogás por meio da digestão anaeróbia do lodo de esgoto produzido nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) do município de Rio Claro, São Paulo. A metodologia adotada consistiu na caracterização das unidades operadas pela concessionária de saneamento de Rio Claro/SP, levantamento de dados sobre lodo produzido e consumo energético destas unidades, bem como a aplicação de modelos teóricos para estimar a produção de biogás e sua conversão em energia elétrica. O estudo considerou dois cenários de rendimento do processo de digestão anaeróbia, resultando em uma produção anual de biogás de aproximadamente 296.207 m³. A conversão desse biogás em energia elétrica permitiria gerar 753.320 kWh por ano, o que corresponde a uma potência média instalada de 0,09 MWm. Os resultados demonstram que, embora Rio Claro tenha um potencial para a geração de energia a partir do lodo de esgoto, esse potencial está concentrado em algumas poucas ETEs. Considerando a produção total de biogás e o consumo combinado das ETEs, seria possível atender até 11,6% da demanda energética dessas unidades (excluindo ETEs Ajapi e ETE Ferraz), o equivalente ao consumo médio anual de aproximadamente 273 residências. O estudo destaca a importância da valorização energética do lodo como estratégia de sustentabilidade e Economia Circular para o setor de saneamento, em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos e os compromissos para mitigação das mudanças climáticas. Os resultados obtidos evidenciam o potencial do lodo de esgoto como recurso energético e apontam caminhos para sua inserção como recurso na matriz energética local por meio de soluções pautadas na Economia Circular.

Palavras-chave: Transição energética; Metano verde; Energia renovável; Resíduos do saneamento.

ABSTRACT

This study aims to estimate the biogas generation potential through the anaerobic digestion of sewage sludge produced at the Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in the municipality of Rio Claro, São Paulo. The adopted methodology involved the characterization of the WWTP facilities in Rio Claro, data collection on sludge production and energy consumption, and the application of theoretical models to estimate the theoretical gas production and its conversion to electricity. The study considered two scenarios of anaerobic digestion efficiency, resulting in an annual biogas production of approximately 296,207 m³. The conversion of such gas into electricity would allow for the generation of 753,320 kWh per year, corresponding to an average installed capacity of 0.09 MW_e. The results show that although Rio Claro/SP presents some potential for energy generation from sewage sludge, it is concentrated in only a few WWTPs. Considering the total biogas production and the combined energy consumption of the WWTPs, it would be possible to meet up to 11.6% of their energy demand (excluding WWTPs “Ajapi” and “Ferraz”), which is equivalent to the average annual consumption of approximately 273 households. The study highlights the importance of energy recovery from sludge as a sustainability and Circular Economy strategy for the sanitation sector, in accordance with the National Solid Waste Policy and Brazil’s climate change mitigation commitments. This study demonstrates the potential of sewage sludge as an energy resource and indicates pathways for its integration into the local energy matrix through Circular Economy-based solutions.

Keywords: Energy transition; Green methane; Renewable energy; Sanitation waste.

Sumário

1. Introdução.....	9
2. Objetivos.....	13
3. Revisão bibliográfica.....	14
3.1. Potencial Energético e Emissões Evitadas.....	16
3.2. Viabilidade Econômica da Produção de Biogás.....	16
3.3. Análises Regionais e Modelagem Matemática.....	16
3.4. Aproveitamento do Lodo e Perspectivas Ambientais.....	17
4. Conceitos e Parâmetros do esgoto doméstico e da biodigestão anaeróbica.....	18
4.1 Esgoto sanitário.....	18
4.1.2 Demanda Bioquímica/Química de Oxigênio.....	19
4.1.3 Outros componentes.....	21
4.2 Etapas do tratamento de Esgoto.....	21
4.3 Lodo.....	23
4.4 Digestão anaeróbia.....	25
4.5. O potencial energético do biogás.....	30
4.6 Utilização do biogás em ETEs.....	33
4.6.1 Caldeira a Gás.....	33
4.6.2 Secagem de Lodo.....	34
4.6.3 Cogeração.....	34
4.6.4 Comercialização ou injeção na rede.....	34
5. Metodologia.....	36
5.1 Área de estudo.....	36
5.1.1 ETE Ajapi.....	37
5.1.2 ETE Assistência.....	38
5.1.3 ETE Batovi.....	39
5.1.4 ETE Jardim Conduta.....	39
5.1.5 ETE Ferraz.....	40
5.1.6 ETE Jardim Flores.....	41
5.1.7 ETE Jardim Novo.....	41
5.1.8 ETE Jardim Palmeiras.....	42
5.2 Potencial teórico de geração de metano.....	43
5.3 Estimativa da energia gerada a partir do biogás.....	45
5.3.1 Conversão do lodo em biogás.....	45
5.3.2 Conversão do biogás em energia elétrica.....	46
6. Resultados.....	47
6.1 Dados operacionais das ETEs.....	48
6.2 Produção de Biogás.....	49
6.3 Eficiência energética.....	51
6.3.1 Potencial de Abastecimento Energético.....	52

6.3.2 Autossuficiência Energética das ETEs.....	53
7. Conclusão.....	57
Referências Bibliográficas.....	59

1. Introdução

O tratamento de esgoto possui grande importância para a saúde pública, o meio ambiente e o saneamento urbano. No setor energético, a crescente demanda por soluções sustentáveis de origem renovável vem em linha com alternativas de tratamento de resíduos que possibilitem a geração de energia. Em particular, a produção de biogás através do processo de digestão anaeróbia de resíduos do saneamento parece uma alternativa bastante atraente para alinhar o tratamento de resíduos e a geração de energia renovável. O lodo é um resíduo rico em matéria orgânica gerado durante o processo de tratamento do esgoto nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). O seu aproveitamento como fonte de energia renovável desempenha um papel importante na redução de seu volume e patogenicidade, além de minimizar o descarte no meio ambiente, especialmente reduzindo a necessidade do uso de aterros sanitários. Como principal benefício, tem-se menos poluição gerada nos centros urbanos, contribuindo para implementação de cidades mais sustentáveis. Em particular, a redução da disposição de matéria orgânica em aterros é desejável para evitar a geração de metano, um gás de efeito estufa, que vaza em grandes quantidades dos aterros, contribuindo para a intensificação das mudanças climáticas.

Conforme indicado pelo Sistema Nacional de Informações em Saneamento (SNIS, 2022), 56% da população brasileira conta com rede de coleta e tratamento de esgoto, enquanto de forma que apenas 52,2% do esgoto produzido é devidamente tratado. O Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab) estima que um investimento de mais de R\$500 bilhões será necessário para expandir a cobertura de coleta e tratamento de esgoto no Brasil e manter as ofertas nos níveis atuais até 2033 (BRASIL, 2013). Apesar de essencial, a expansão da rede de coleta e tratamento de esgoto acarretará no aumento da geração de lodo nas ETEs do país, o que demandará ainda mais atenção aos procedimentos de destinação do lodo.

O lodo de esgoto sanitário é gerado nas fases primária e secundária do tratamento de esgoto nas ETEs. Ele é composto por matéria orgânica e inorgânica, sólidos suspensos e microrganismos potencialmente patogênicos. O lodo primário possui uma alta concentração de sólidos inorgânicos e matéria orgânica não biodegradada, enquanto o lodo secundário é rico em biomassa microbiana (SPERLING, 2014). Embora represente apenas 1% a 2% da massa total do esgoto tratado, o lodo contém cerca de 50% dos contaminantes removidos, destacando a necessidade do seu correto descarte (BRINGHENTI et al., 2014).

A digestão anaeróbia, também conhecida como biometanização, é um processo bioquímico de degradação de matéria orgânica por microrganismos em um ambiente sem oxigênio. Como resultado desse processo, é possível obter uma mistura gasosa, denominada biogás, rico em metano e gás carbônico. A Figura 1 mostra um esquema das concentrações dos gases componentes do biogás. Ele pode ser utilizado diretamente como fonte de energia ou pode ser purificado para a produção de biometano, reduzindo o percentual de CO_2 . O biometano é um substituto direto renovável do gás natural (LIMA, 2020), podendo ser usado em diversas aplicações industriais, residenciais e públicas, contribuindo com a Economia Circular e redução do uso de fósseis, proporcionando a diversificação da matriz energética renovável e contribuindo para a redução das emissões de carbono no setor de saneamento básico (SÃO PAULO, 2020).

Figura 1- Representação esquemática da composição do biogás



Fonte: Lima, 2023, Portal Energia e Biogás.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) preconiza a necessidade de aumentar o uso de tecnologias de recuperação energética dos resíduos como alternativa à destinação destes em aterros sanitários. A PNRS determina que a recuperação energética dos resíduos no Brasil pode ser realizada direta ou indiretamente, ou seja, através da geração de energia térmica/elétrica ou por meio da produção de combustíveis energéticos (PNRS, 2022). O Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), instrumento da PNRS legitimado por decreto em 13 de abril de 2022, estabelece metas progressivas de aumento das contribuições de tecnologias de valorização energética dos resíduos até 2040, com consequente declínio progressivo da dependência de aterros. O Planares estipula a necessidade de aplicação de tecnologias de

tratamento biológico (compostagem e digestão anaeróbia), bem como de tratamento térmico (incineração com geração de energia) para valorizar material e energeticamente os resíduos municipais. Além disso, em 22 de janeiro de 2025, a Lei 15.103 criou o Programa de Aceleração da Transição Energética (Paten), que pretende fomentar a geração e o uso eficiente de energia de baixo carbono por meio de empreendimentos sustentáveis que estejam em consonância com os compromissos do Brasil para limitar as emissões de gases de efeito estufa. O desenvolvimento de tecnologias e a produção de biogás e biometano, assim como a recuperação e valorização energética de resíduos sólidos, é um dos setores prioritários deste programa. Em nível estadual, o Plano Estadual de Energia de São Paulo (PPE) prevê que fontes alternativas são fundamentais para minimizar as emissões de carbono, bem como para aprimorar biocombustíveis na matriz energética do estado (SÃO PAULO, 2020).

Diante da crescente demanda energética e dos impactos ambientais associados ao uso intensivo de combustíveis fósseis, especialmente no que se refere às emissões de gases de efeito estufa (GEE), torna-se urgente a diversificação da matriz energética e a transição para fontes alternativas e de baixo carbono. A crise energética global está diretamente relacionada ao modelo de desenvolvimento adotado desde a Revolução Industrial, marcado pela dependência de fontes fósseis e pelas altas emissões de GEE, que têm promovido o aquecimento acelerado do planeta. Nesse contexto, soluções sustentáveis, como a valorização energética de resíduos e a substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis, apresentam-se como caminhos estratégicos para mitigar os impactos das mudanças climáticas e garantir a segurança energética em longo prazo (EPE, [s.d.]).

Atualmente, apenas 3% do lodo de saneamento no Brasil se origina de Sistemas de Tratamento de Esgoto (ETE), sendo a maioria proveniente de Estações de Tratamento de Água (ETA). É esperado que este percentual de lodo de ETE aumente consideravelmente, na medida em que seja ampliada a rede de coleta de esgoto, conforme estipulado pelo Plano Nacional de Saneamento (Plansab), que prevê que o percentual de domicílios urbanos e rurais abastecidos por rede coletora ou fossa séptica para os excretas ou esgotos sanitários deverá atingir 92% até o ano de 2033 (ANA, 2025). Esse desenvolvimento aumentará o potencial de produção de biogás a partir do lodo do tratamento de esgotos urbanos.

O presente trabalho propõe avaliar o potencial de geração de biogás por meio da digestão anaeróbia do lodo das ETES do município de Rio Claro, São Paulo. A metodologia busca quantificar o volume de biogás que poderia ser produzido se todo o lodo gerado nas ETES do município fosse biometanizado em reatores anaeróbios. Além disso, visa-se estimar

a quantidade de energia elétrica que poderia ser gerada queimando este biogás em motogeradores, servindo de fonte renovável de geração de eletricidade para a cidade. Desta forma, busca-se contribuir com o desenvolvimento de soluções científicas que propiciem benefícios ambientais, sociais e econômicos ao setor de saneamento, além de oferecer novas alternativas para o setor energético local, garantindo a implementação da Economia Circular por meio do aproveitamento adequado e destinação sustentável do lodo das ETEs no município de Rio Claro/SP. O estudo servirá como base para apoio das etapas de planejamento e tomada de decisão na gestão de tratamento de esgoto na cidade.

2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral estimar o potencial teórico de geração de energia elétrica a partir da conversão do biogás obtido por meio da digestão anaeróbia do lodo de esgoto produzido nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) localizadas no município de Rio Claro, no estado de São Paulo. Para atingir tal finalidade, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

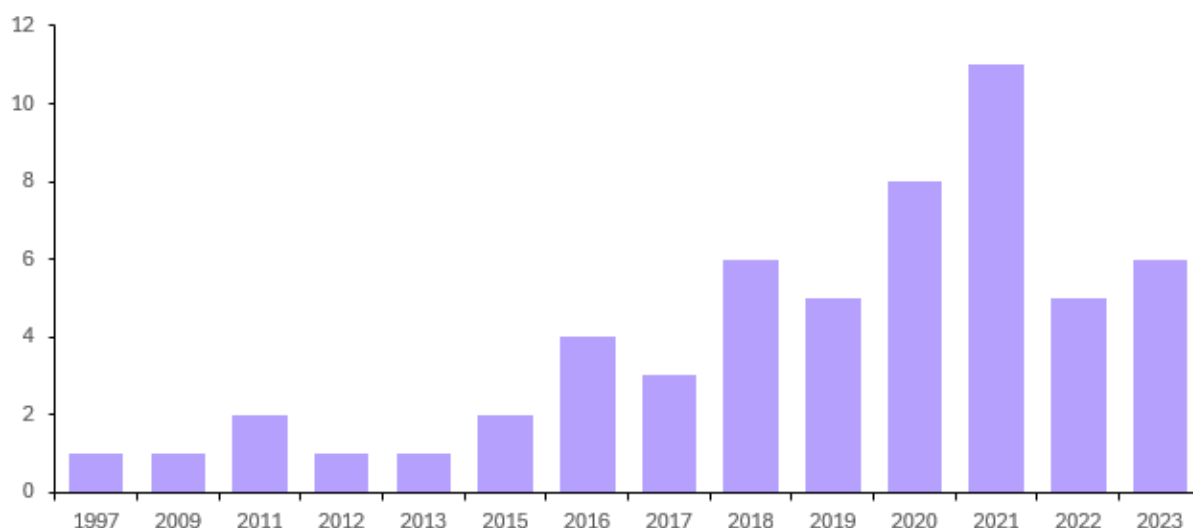
- Identificar as Estações de Tratamento de Esgoto atualmente operadas no município pela concessionária BRK Ambiental;
- Levantar as quantidades e principais características do lodo gerado nessas unidades;
- Estimar, de forma teórica, o volume de biogás potencialmente gerado por meio do processo de biometanização do lodo;
- Determinar a potência elétrica correspondente à queima do biogás estimado em motogeradores;
- Avaliar o grau de autossuficiência energética de cada ETE, considerando o balanço entre a energia elétrica potencialmente gerada e o consumo energético atual das próprias unidades operacionais.

3. Revisão bibliográfica

Como primeiro passo da revisão bibliográfica necessária ao estudo, foram realizadas buscas em duas bases de dados de artigos científicos internacionais: “Web of Science” e Scielo, visando selecionar publicações de interesse na temática biometanização / biodigestão anaeróbia de lodo de esgoto e potencial de geração de biogás, excluindo-se a co-digestão (foco é biodigestão somente do lodo e não de mais de um substrato).

A Web of Science foi escolhida por ser uma das mais importantes plataformas internacionais de referências no conhecimento das ciências exatas e engenharia, especialmente engenharia mecânica e ambiental. Para a pesquisa, foram mapeadas as palavras-chave: “(sewage OR wastewater) AND sludge AND (biomethan* OR biodigestion OR anaerobic) AND (biogas AND potential) AND brazil NOT co-digestion”, limitando-se a região geográfica de interesse ao Brasil, mas não limitando os anos de publicação. Como resultado, foram obtidos 56 artigos desde 1997. Destes, 46,3% foram classificados como pertencentes à área de Ciência Ambiental e 26,8% à Engenharia Ambiental. A Figura 2 mostra o incremento do número de publicações ao longo do tempo, revelando um aumento progressivo de interesse no assunto. O pico de publicações ocorreu em 2021, quando foram publicados 11 artigos sobre o tema.

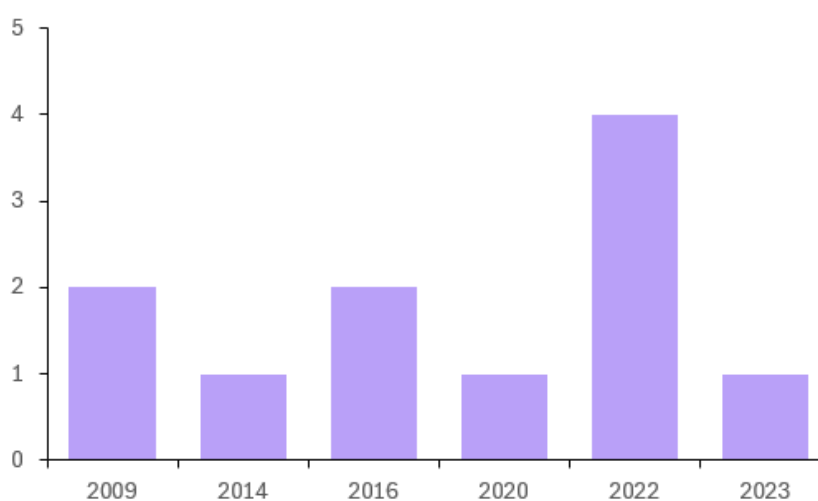
Figura 2 - Número de publicações sobre digestão anaeróbia de lodo de esgoto, excluindo co-digestão, publicadas na Web of Science no Brasil



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Também foi realizada uma busca na plataforma SciELO com o objetivo de encontrar artigos em português. O algoritmo booleano incluiu as seguintes palavras-chave: “(lodo OR esgoto) AND (tratamento biol* OR biodigestão) AND energia AND (biogás OR biometaniz*)”. Foram encontrados 11 artigos, dos quais 9 pertencem à área de Engenharias e dois à área de Ciências Biológicas. A Figura 3 mostra a quantidade de artigos publicados ao longo do tempo, revelando que o número de artigos dobrou no período de 2009 a 2022, chegando a um pico de 4 artigos publicados em 2022.

Figura 3 - Número de publicações sobre digestão anaeróbia de lodo de esgoto, excluindo co-digestão publicadas no SciELO, no Brasil



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A pesquisa bibliográfica desenvolvida nas duas bases de dados resultou em um total de 65 artigos, dos quais 8 foram destacados como mais aderentes ao escopo e divididos em quatro temas:

- Potencial Energético e Emissões Evitadas;
- Viabilidade Econômica da Produção de Biogás;
- Análises Regionais e Modelagem Matemática;
- Uso Benéfico do Lodo e Perspectivas Ambientais.

A seguir, discorre-se brevemente sobre os principais achados e contribuições de cada uma destas publicações.

3.1. Potencial Energético e Emissões Evitadas

O estudo de Bilotta e Ross (2016) quantificou a energia gerada a partir do biogás na ETA Santa Quitéria, localizada na região metropolitana de Curitiba, com destaque para a recuperação do metano e a emissão evitada de gases de efeito estufa (GEEs). A pesquisa estimou parâmetros importantes como a demanda química de oxigênio (DQO) convertida em biomassa e as perdas de metano, fornecendo uma análise detalhada do potencial energético disponível.

Gomes et al. (2023) analisaram o potencial técnico e econômico da geração de energia a partir do biogás proveniente de aterros sanitários em Extrema, MG. Utilizando algoritmos computacionais, o estudo mostrou que há um grande potencial para o aproveitamento do biogás em aterros como fonte de energia renovável, o que reforça a relevância de estratégias de gestão de resíduos sólidos para a matriz energética.

3.2. Viabilidade Econômica da Produção de Biogás

Cañote et al. (2021) apresentaram a avaliação econômica e energética da produção de biogás a partir de lodos em reatores anaeróbios e aeróbios no Brasil. Um protótipo experimental de digestor anaeróbio foi utilizado para monitorar a descarga de biogás e metano, seguido de uma análise de viabilidade econômica. A pesquisa demonstrou a viabilidade do uso do biogás como fonte de energia renovável, enfatizando os benefícios econômicos e ambientais.

De forma similar, Dionisi et al. (2018) calcularam a produção potencial de metano a partir da digestão anaeróbia de lodo de esgoto. A pesquisa mostrou que 80% da DQO biodegradável pode ser convertida em metano, sugerindo um alto rendimento energético do processo.

Felca et al. (2018) abordaram a digestão anaeróbia de lodo de ETEs no sul de Minas Gerais, com o objetivo de avaliar a viabilidade econômica de usinas termelétricas movidas a biogás. A pesquisa incluiu a análise das características físico-químicas do lodo e a capacidade de produção de biogás, fornecendo informações relevantes para a implementação de projetos energéticos sustentáveis na região.

3.3. Análises Regionais e Modelagem Matemática

Lopes et al. (2020) realizaram um estudo no estado do Paraná, com foco nos reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) e na geração de biogás como subproduto do

tratamento de esgoto. A pesquisa utilizou o software ArcGIS® para classificar espacialmente os dados e identificar cenários de potencial energético. Este estudo é relevante por destacar a variação de potencial entre diferentes tamanhos de ETEs e métodos de desidratação do lodo.

Silva et al. (2023) desenvolveram um modelo matemático baseado em simulação de Monte Carlo para estimar o potencial de geração de metano e recuperação de energia elétrica em sistemas UASB tratando efluentes suínos do departamento de zootecnia da Universidade Federal do Ceará. O modelo apresentou uma alternativa promissora para a previsão do potencial energético em cenários específicos, evidenciando o papel das ferramentas de modelagem para otimizar processos de geração de energia em ETEs.

3.4. Aproveitamento do Lodo e Perspectivas Ambientais

Urban, Isaac e Morita (2019) exploraram o uso benéfico dos lodos de ETE e ETA. O estudo comparou as diferentes realidades de países desenvolvidos e em desenvolvimento. A pesquisa concluiu que, embora a maioria dos estudos seja realizada em laboratório, há um grande potencial para o uso benéfico do lodo em escala comercial no Brasil.

4. Conceitos e Parâmetros do esgoto doméstico e da biodigestão anaeróbica

4.1 Esgoto sanitário

Os efluentes que chegam às unidades de tratamento denominadas Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) podem ser de origem doméstica, proveniente de drenagem urbana ou industrial. Os esgotos domésticos englobam resíduos de residências, instituições e estabelecimentos comerciais. As águas de infiltração são coletadas pelos sistemas urbanos de drenagem de águas pluviais. Já os efluentes industriais são provenientes de atividades diversas de diferentes tipos de indústrias. No Brasil, o sistema separador absoluto é amplamente adotado de forma que as águas pluviais são destinadas a redes de drenagem independentes, evitando sua contribuição direta às ETEs.

Os esgotos domésticos, principal componente dos efluentes sanitários, inclui os despejos originados em domicílios e comércio. Essa fração é geralmente estimada com base no consumo médio de água da população atendida, conhecido como Quota Per Capita (QPC) (VON SPERLING, 1996). No entanto, a relação entre o consumo de água e a produção de esgoto não é completamente direta. Fatores como infiltração no sistema, ligações clandestinas e uso da água em atividades que não resultam em contribuição à rede coletora, como irrigação de jardins, podem influenciar o volume de esgoto gerado.

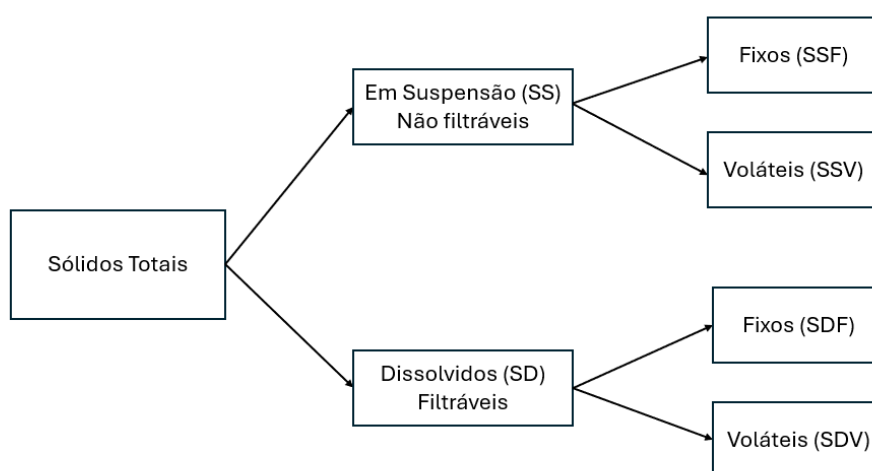
Os esgotos domésticos são compostos por aproximadamente 99,9% de água e 0,1% de sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos ou dissolvidos, além de microrganismos (VON SPERLING, 1996). Apesar de pequeno, o percentual de sólidos totais confere ao esgoto doméstico seu potencial patogênico e a necessidade de tratamento. As características dos esgotos são diretamente influenciadas pelos padrões populacionais de uso da água, os quais variam conforme o clima, hábitos e a situação socioeconômica da população local.

4.1.1 Sólidos no Esgoto Doméstico

Os principais parâmetros físico-químicos utilizados para caracterização dos esgotos domésticos incluem teor de sólidos, quantidade de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e indicadores de contaminação fecal. Dentre os parâmetros relacionados à presença de sólidos, destacam-se os Sólidos Dissolvidos e os Sólidos em Suspensão, que também podem ser subclassificados como fixos ou voláteis. Os Sólidos Voláteis, representam a matéria orgânica,

e os Sólidos Fixos, representam a matéria inorgânica ou mineral, são os principais parâmetros de classificação por características químicas. Da mesma forma, a capacidade de sedimentação é utilizada para avaliar a decantabilidade (SPERLING, 1996). A Figura 4 mostra um esquema das análises para determinação dos parâmetros relacionados à distribuição de sólidos na amostra de esgoto bruto.

Figura 4 - Distribuição dos sólidos do esgoto bruto



Fonte: Adaptado de SPERLING, 1996.

4.1.2 Demanda Bioquímica/Química de Oxigênio

A matéria orgânica presente nos efluentes sanitários, causada principalmente pelo consumo de oxigênio dissolvido durante os processos metabólicos dos microrganismos, é de primordial importância na poluição das águas. Os esgotos contêm diversos compostos orgânicos tais como, proteínas, carboidratos, gorduras e óleos, além de outras substâncias em menor quantidade. A matéria orgânica pode ser classificada quanto à forma e tamanho, sendo em suspensão ou dissolvida, bem como quanto à biodegradabilidade, sendo inerte ou biodegradável. Métodos indiretos, como a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), e métodos diretos, como a medição do Carbono Orgânico Total (COT), são utilizados para avaliar a matéria orgânica nos esgotos (SPERLING, 1996).

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é um parâmetro fundamental para avaliar o impacto ambiental da matéria orgânica em corpos hídricos e para o planejamento do

tratamento de esgotos por processos aeróbios. Ela quantifica o oxigênio necessário para que microrganismos estabilizem a matéria orgânica carbonácea por meio de processos metabólicos. A ideia central do parâmetro DBO é medir de forma indireta a capacidade de poluição que um determinado despejo possui através da medida do consumo de oxigênio que seria necessário para degradar a sua matéria orgânica. Portanto, trata-se de uma estimativa que representa o potencial de ocasionar impacto ambiental negativo, sem medir diretamente o impacto em si. Embora teoricamente a demanda de oxigênio pudesse ser calculada estequiometricamente para compostos específicos, a heterogeneidade dos esgotos torna essa abordagem impraticável. Por isso, a solução adotada foi medir em laboratório o consumo de oxigênio de uma amostra padronizada em um período de tempo pré-fixado, introduzindo o conceito prático da DBO (SPERLING, 1996).

A estabilização completa da matéria orgânica em esgotos domésticos pode levar mais de 20 dias, correspondendo à chamada Demanda Última de Oxigênio (DUO). Contudo, para fins práticos e comparativos, convencionou-se medir a DBO em cinco dias, em uma temperatura controlada de 20°C, padronizando o teste como DBO₅. O procedimento consiste em medir o oxigênio dissolvido da amostra no momento da coleta e novamente após cinco dias, com a amostra incubada em condições controladas. A diferença entre esses valores representa o oxigênio consumido para a oxidação da matéria orgânica biodegradável durante o período, sendo este o valor da DBO₅ (SPERLING, 1996).

A Demanda Última de Oxigênio (DUO) permite avaliar diversos aspectos relacionados à estabilização biológica da matéria orgânica. Este parâmetro fornece uma indicação aproximada da fração biodegradável do despejo, da taxa de degradação da matéria orgânica, da taxa de consumo de oxigênio ao longo do tempo e da quantidade total de oxigênio necessário para estabilizar biologicamente os compostos presentes. A DUO, apesar de prática em termos laboratoriais, é um teste que reflete o comportamento a longo prazo da matéria orgânica em um sistema de tratamento aeróbio (SPERLING, 1996).

A Demanda Química de Oxigênio (DQO), por outro lado, mede o consumo de oxigênio durante a oxidação química da matéria orgânica, utilizando dicromato de potássio em meio ácido. Diferentemente da DBO, que avalia a oxidação bioquímica realizada por microrganismos, a DQO oferece resultados em poucas horas, sendo especialmente útil para obter uma estimativa rápida do oxigênio necessário para estabilizar a matéria orgânica. No entanto, o teste da DQO possui limitações tais como a superestimação do oxigênio consumido

devido à inclusão tanto da fração biodegradável quanto da inerte, além da possibilidade de interferência de certos compostos inorgânicos. Para esgoto doméstico bruto, a relação DQO/DBO₅ varia entre 1,7 e 2,4, enquanto para esgotos industriais essa relação pode variar amplamente, oferecendo informações valiosas sobre a biodegradabilidade dos despejos e o processo de tratamento mais adequado (BRAILE; CAVALCANTI, 1979; SPERLING, 1996).

4.1.3 Outros componentes

Os elementos como nitrogênio e fósforo, além dos que são indicadores de contaminação fecal, desempenham papéis cruciais no tratamento de esgotos e no impacto ambiental dos despejos. O nitrogênio, presente em formas como amônia, nitrito e nitrato, influencia os processos de eutrofização, consumo de oxigênio dissolvido e toxicidade. No processo de tratamento, o nitrogênio está associado à nitrificação e desnitrificação, afetando consumo de oxigênio e alcalinidade. (SPERLING, 1996)

O fósforo, essencial para o crescimento microbiano e de algas, está presente principalmente como os ortofosfatos, polifosfatos e fósforo orgânico, suas fontes incluem esgotos domésticos, fertilizantes e detergentes, com papel importante na eutrofização e na estabilização da matéria orgânica.(SPERLING, 1996)

Já os indicadores de contaminação fecal, como coliformes, são utilizados para inferir a presença de agentes patogênicos. Dada a dificuldade de detecção direta destes microrganismos em baixas concentrações, estes indicadores são considerados ferramentas eficazes para avaliar a contaminação por fezes humanas ou animais e os riscos associados. Essa abordagem integrada mostra a importância de compreender e gerenciar esses componentes no tratamento de esgotos (SPERLING, 1996).

4.2 Etapas do tratamento de Esgoto

O tratamento de esgotos é um processo essencial para reduzir os impactos ambientais causados pelo despejo de águas residuárias, garantindo que a matéria orgânica, os sólidos em suspensão, os patógenos e os nutrientes sejam removidos antes de serem lançados nos corpos hídricos receptores. Além disso, esse processo é imperativo para cumprimento das legislações ambientais, visando atender aos critérios legais e proteger a saúde pública e os ecossistemas (HAANDEL; LETTINGA, 1994).

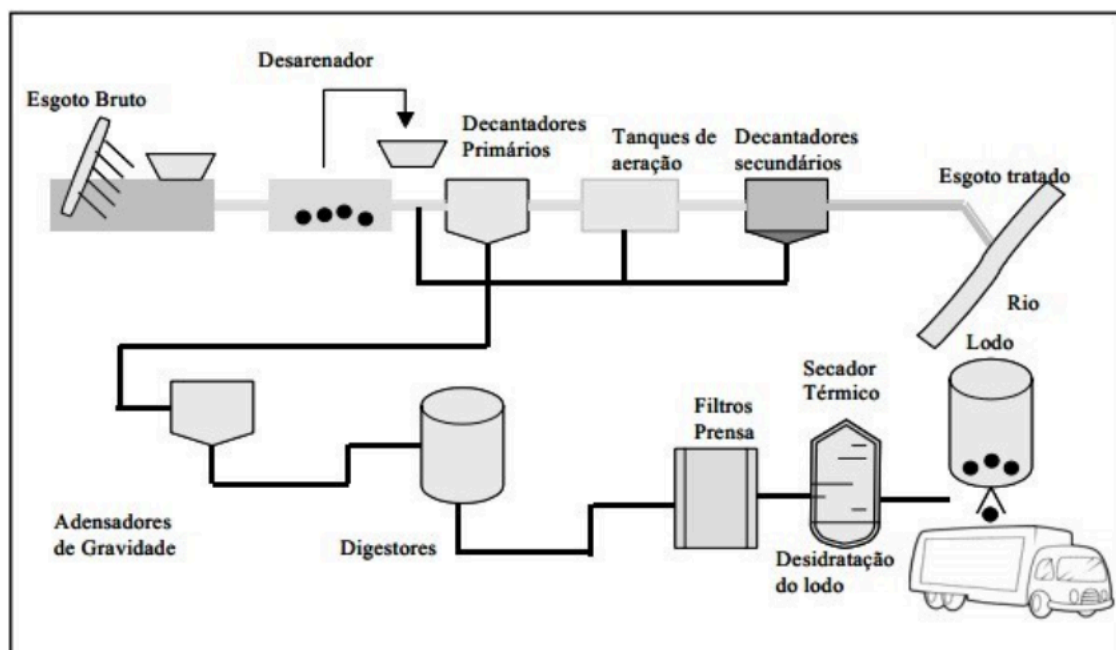
Os tratamentos utilizados nas ETEs consistem em uma combinação sequencial de processos físicos, químicos e biológicos, que se agrupam em diferentes níveis de tratamento com objetivos específicos distintos de remoção dos poluentes: preliminar, primário, secundário e às vezes terciário, como ilustrado na figura 5 (TELLES; COSTA, 2012).

O tratamento preliminar tem como principal foco remover materiais grosseiros, tais como pedras, areia e resíduos flutuantes, por meio da utilização de equipamentos, tais como grades e peneiras. Embora não haja remoção significativa de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) nesta etapa, trata-se de um processo crucial para prevenir danos e obstruções aos equipamentos, garantindo a qualidade dos processos subsequentes (VON SPERLING, 1996). O tratamento preliminar é considerado uma etapa preparatória, pois assegura que o esgoto esteja em condições adequadas para os tratamentos posteriores, minimizando problemas estruturais nas ETEs (DE MONTE, 2016).

O tratamento primário consiste na sedimentação dos sólidos em suspensão e na remoção parcial da matéria orgânica. Pode ser realizado com o uso de coagulantes e polímeros, caracterizando-se um tratamento físico-químico (NUNES, 2001). Durante essa etapa, os sólidos sedimentáveis formam o lodo primário bruto, enquanto óleos e graxas são removidos da superfície. Combinando-se as etapas dos tratamentos preliminar e primário, é possível remover até 70% dos sólidos em suspensão, além de reduzir boa parte da DBO e dos coliformes fecais (TELLES; COSTA, 2012).

O tratamento secundário, por sua vez, envolve processos biológicos para degradar a matéria orgânica ainda dissolvida e remover parte dos nutrientes, como nitrogênio e fósforo. Nesse estágio, microrganismos possuem um papel fundamental na estabilização da matéria orgânica, transformando-a em água, gás carbônico e outros gases, como o metano (biogás) (VON SPERLING, 1996). Dentre os sistemas utilizados, destacam-se os lodos ativados, lagoas de estabilização e filtros biológicos, que garantem alta eficiência na remoção de DBO e na redução de patógenos. Além da remoção de sólidos e matéria orgânica, o controle de nutrientes como nitrogênio e fósforo é fundamental para evitar a eutrofização de corpos d'água. (SPERLING, 1996).

Figura 5 - Etapas do funcionamento do tratamento convencional de esgoto.



Fonte: Oliveira, 2006.

4.3 Lodo

O lodo gerado em estações de tratamento de esgoto apresenta desafios como a instabilidade biológica, devido ao elevado teor de material biodegradável, o que pode torná-lo putreficado. Além dos riscos higiênicos, tais como, a presença de organismos patogênicos, vírus, bactérias e parasitas, o lodo apresenta outro aspecto problemático que é a baixa concentração de sólidos suspensos (5 a 50 g/L), o que resulta em grandes volumes de lodo produzidos nas etapas de tratamento de esgoto (ANDREOLI, 2006).

Para mitigar os impactos relacionados à destinação final do lodo de ETE podem ser aplicados métodos de estabilização e tratamento. Métodos físicos, tais como, adensamento, centrifugação e filtração, servem para diminuir o teor de água, e métodos de tratamento biológico, como a digestão anaeróbia ou aeróbia, servem para remover a toxicidade e reduzir o volume de sólidos.

Como dito anteriormente, o lodo produzido nas ETEs pode ser classificado de acordo com a sua origem nas diferentes etapas do tratamento. Isto é, o lodo primário é oriundo da sedimentação de sólidos do esgoto bruto durante as etapas de tratamento preliminar e primário. O lodo secundário é aquele proveniente das etapas de tratamento secundário, ou seja, do tratamento biológico. Ambos contêm altos teores de matéria orgânica, além de

nutrientes como nitrogênio e fósforo, o que os torna potencialmente atrativos para reutilização como fertilizantes/adubo, mediante tratamento adequado. A produção de lodo orgânico (sólidos voláteis) é de 0,1 a 0,3 kg por kg de DQO aplicada, dependendo do tipo de sistema (anaeróbio ou aeróbio), enquanto a fração inorgânica (sólidos fixos) equivale a 0,05 kg por kg de DQO (ANDREOLI, 2006). Propriedades típicas do lodo primário e secundário são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades típicas de lodos ativados primários e secundários de ETEs

<i>Parameter</i>	<i>Primary sludge</i>	<i>Secondary activated sludge</i>
pH	5.5–8.0	6.6–8.0
Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	600–1500	550–1200
Total solids % (TS)	4–9	0.6–1.2
Volatile solids (% of TS)	65–80	60–85
Protein (% of TS)	18–30	30–40
Fats and grease (% of TS)		
Ether soluble	5–30	—
Cellulose (% of TS)	8–16	—
Nitrogen (N, % of TS)	1.4–4.2	2.5–5.0
Phosphorus (P ₂ O ₅ , % of TS)	0.6–2.9	3–10
Organic acids (mg/L as HAc)	250–1800	1000–
Energy content, kJ/kg TS	24,000–28,000	18,000–23,000

Fonte: adaptado de U.S. EPA, 1975 e Metcalf and Eddy, Inc., 2003.

Nos sistemas biológicos de tratamento de esgoto, os microrganismos desempenham o importante papel de degradar e estabilizar matéria orgânica. As bactérias são os microrganismos predominantes, embora outros, como protozoários e vírus, também estejam presentes. As bactérias heterotróficas utilizam a matéria orgânica como fonte de energia e material para crescimento, transformando-a em massa celular no processo de anabolismo, que depende da energia liberada pelo catabolismo (ANDREOLI, 2006). O catabolismo, por sua vez, pode ocorrer de duas formas principais: oxidativa, onde compostos orgânicos são transformados em dióxido de carbono e água pela ação de oxidantes, e fermentativa, que resulta em produtos como metano e dióxido de carbono. Este último processo é especialmente

relevante para o contexto deste trabalho, devido à sua capacidade de estabilizar os resíduos e gerar biogás.

A digestão anaeróbia é uma forma de catabolismo fermentativo e representa a última etapa da decomposição de matéria orgânica, produzindo produtos finais estáveis e não sujeitos a novas fermentações, tais como o metano e dióxido de carbono (ANDREOLI, 2006). Sua fórmula geral evidencia a conversão de compostos orgânicos em biogás e água, destacando-se como um processo eficiente em termos de energia disponível para as bactérias. Comparativamente, o catabolismo oxidativo, mais expressivo em termos energéticos, libera a maior parte da energia contida na matéria orgânica, enquanto o fermentativo mantém maior proporção de energia retida nos resíduos, dessa forma, bactérias anaeróbias tendem a consumir mais material orgânico por unidade de biomassa formada (ANDREOLI, 2006).

4.4 Digestão anaeróbia

Como já mencionado, a digestão anaeróbia é um processo biológico de decomposição da matéria orgânica na ausência de oxigênio realizado por uma comunidade de microrganismos específicos. Este processo ocorre naturalmente em ambientes como sedimentos aquáticos e solos encharcados, mas também pode ser conduzido de forma controlada em estações de tratamento de esgoto e biodigestores. O principal produto da digestão anaeróbia é o biogás, um gás composto majoritariamente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de pequenas quantidades de outros gases (CHERNICHARO, 1997).

Dentre os modelos matemáticos utilizados para estimar a produção de biogás nos biodigestores anaeróbios estão abordagens empíricas, tais como a baseada na carga orgânica aplicada, mostrada na Figura 6. Neste modelo é usado o fator de eficiência (α) definido empiricamente para correlacionar a quantidade de matéria orgânica disponível (expressa como DQO ou sólidos voláteis) com o volume de biogás gerado. Devido à simplicidade de aplicação, esses modelos são amplamente empregados em avaliações preliminares, embora apresentem limitações por não considerarem variações nas taxas de degradação e nas condições ambientais do reator.

Figura 6 - Modelo empírico para estimativa do volume de biogás a partir da carga orgânica aplicada

$$Q_{\text{biogás}} = \alpha \cdot (\text{Carga Orgânica Aplicada})$$

Onde:

- α : Fator de eficiência do sistema (m^3 de biogás/ kg de DQO);
- **Carga Orgânica Aplicada**: Quantidade de demanda química de oxigênio (DQO) ou sólidos voláteis aplicados (kg /dia).

Fonte: Metcalf and Eddy, Inc., 2003.

Os modelos baseados na remoção de sólidos voláteis utilizam uma abordagem semelhante, tais como apresentado na Figura 7, mas se concentram na fração de sólidos voláteis removidos ao longo do tratamento. Esses modelos são vantajosos em cenários onde há um controle sobre a eficiência da remoção de matéria orgânica, sendo amplamente empregados em estudos teóricos de desempenho de reatores anaeróbios.

Figura 7 - Modelo baseado na remoção de sólidos voláteis

$$Q_{\text{biogás}} = Y_{\text{biogás}} \cdot V_{\text{Sremovidos}}$$

Onde:

- $Q_{\text{biogás}}$: Volume de biogás produzido (m^3 /dia);
- $Y_{\text{biogás}}$: Rendimento do biogás (m^3 de biogás/ kg de sólidos voláteis removidos);
- $V_{\text{Sremovidos}}$: Sólidos voláteis removidos no processo (kg /dia).

Fonte: Metcalf and Eddy, Inc., 2003.

Outros modelos são os chamados modelos cinéticos, tais como os mostrados nas Figuras 8 e 9. Esses modelos assumem que a taxa de produção de biogás ou a degradação dos sólidos voláteis segue uma cinética de primeira ordem, onde a velocidade de degradação da matéria orgânica diminui exponencialmente com o tempo de retenção hidráulica. O coeficiente de taxa de produção (k) é um parâmetro crítico, pois sua magnitude determina a rapidez da conversão dos sólidos voláteis em biogás, esse modelo é útil para prever a dinâmica da degradação anaeróbia e otimizar o tempo de retenção nos digestores (Metcalf and Eddy, Inc., 2003).

Figura 8 - Modelo cinético de primeira ordem para estimativa da produção de biogás no tempo

$$B_t = B_0 \cdot (1 - e^{-k \cdot t})$$

Onde:

- B_t : Volume acumulado de biogás no tempo t (m^3/g STV ou outro);
- B_0 : Produção potencial máxima de biogás (m^3/g STV);
- k : Constante de taxa de produção (d^{-1});
- t : Tempo de retenção hidráulica (dias).

Fonte: Metcalf and Eddy, Inc., 2003.

Figura 9 - Modelo cinético de primeira ordem para estimativa da degradação de sólidos no tempo

$$V_{\text{Sremovidos}} = V_{\text{Sinicial}} \cdot (1 - e^{-k \cdot t})$$

Onde:

- $V_{\text{Sremovidos}}$: Sólidos voláteis removidos;
- V_{Sinicial} : Sólidos voláteis iniciais;
- k : Constante de taxa de degradação (d^{-1});
- t : Tempo de retenção hidráulica (dias).

Fonte: Metcalf and Eddy, Inc., 2003.

Além de ser uma tecnologia eficiente para o tratamento de resíduos orgânicos, a digestão anaeróbia apresenta benefícios ambientais e energéticos. O biogás gerado pode ser utilizado para geração de energia elétrica, térmica ou purificado em biometano e usado em substituição ao gás natural, como um biocombustível. Desta forma, contribui para diminuição da dependência de combustíveis fósseis e oferece uma alternativa renovável para geração de energia. Além disso, o processo de digestão anaeróbia tem como subproduto um digestato, que pode ser utilizado como biofertilizante no solo, promovendo a reciclagem de nutrientes essenciais para a agricultura (CHERNICHARO, 1997). A tecnologia também se destaca por

sua eficiência na estabilização de resíduos orgânicos, reduzindo a carga poluente antes do descarte ou reaproveitamento. O tratamento anaeróbico de esgoto, por exemplo, contribui para a remoção de matéria orgânica e minimiza a emissão de gases de efeito estufa, tornando-se uma alternativa sustentável.

A conversão da matéria orgânica ocorre em quatro etapas principais, cada uma desempenhada por grupos específicos de microrganismos.

4.4.1 Hidrólise

A hidrólise é a primeira etapa do processo, na qual macromoléculas orgânicas complexas, como proteínas, carboidratos e lipídios são degradadas por enzimas liberadas por bactérias fermentativas. É nesta fase em que ocorre uma primeira quebra das macromoléculas, onde os polímeros são transformados em compostos menores: proteínas são quebradas em aminoácidos, carboidratos complexos são quebrados em açúcares simples e ácidos graxos de cadeia longa são quebrados em ácidos graxos de cadeia curta (CHERNICHARO, 1997). A eficiência dessa etapa depende da estrutura dos compostos presentes no substrato. As substâncias mais recalcitrantes, como a celulose e a lignina, apresentam uma degradação mais lenta ou não são degradadas de nenhuma forma.

4.4.2 Acidogênese

Na fase chamada acidogênese, os compostos gerados na etapa de hidrólise são metabolizados por bactérias fermentativas, resultando na formação de ácidos orgânicos voláteis, álcoois, hidrogênio (H_2) e gás carbônico (CO_2) (CHERNICHARO, 1997). Este estágio é crucial, pois fornece os intermediários necessários para as próximas etapas.

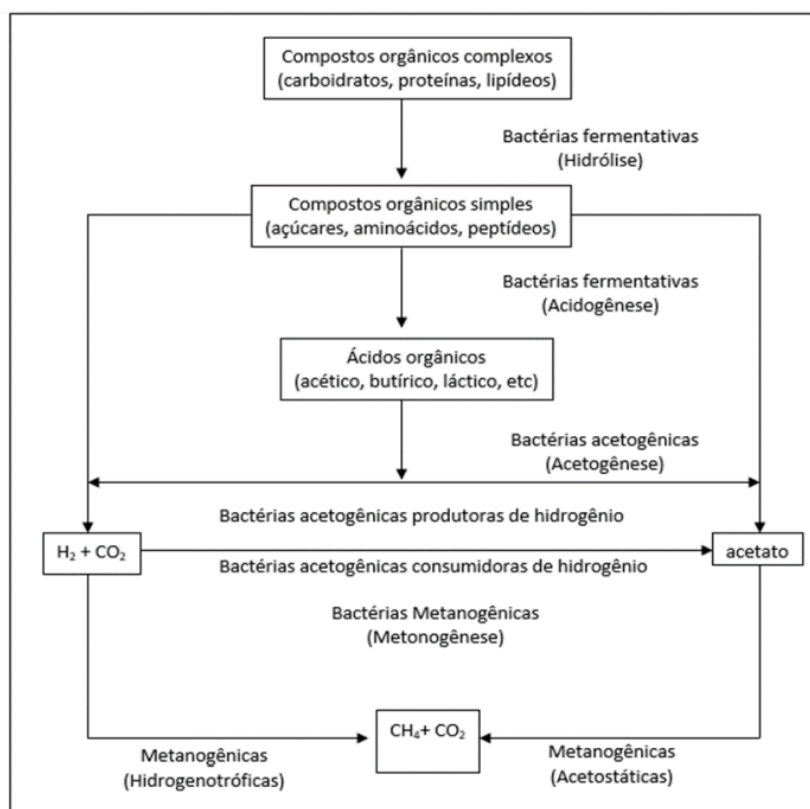
4.4.3 Acetogênese

A acetogênese é a etapa em que os ácidos orgânicos e o hidrogênio produzidos anteriormente são convertidos em ácido acético (CH_3COOH), além de mais gás carbônico e hidrogênio. As bactérias acetogênicas são responsáveis por esta etapa, garantindo a disponibilidade de substrato para as *arqueas metanogênicas* (CHERNICHARO, 1997).

4.4.4 Metanogênese

Na fase final do processo, as *arqueas metanogênicas* convertem os compostos formados na acetogênese em metano e dióxido de carbono, que constituem o biogás (CHERNICHARO, 1997). Essa etapa é realizada por dois tipos principais de microrganismos: *metanogênicas hidrogenotróficas*, que utilizam hidrogênio e gás carbônico para produzir metano e *metanogênicas acetoclásticas*, que convertem ácido acético diretamente em metano e dióxido de carbono. A eficiência desta etapa influencia diretamente a qualidade do biogás gerado, pois a remoção eficiente do hidrogênio favorece o equilíbrio do processo (CHERNICHARO, 1997).

Figura 10 - Representação esquemática das etapas do processo de biodigestão anaeróbia



Fonte: adaptado de BALDACIN e PINTO, 2015.

Para garantir o funcionamento adequado de um sistema de digestão anaeróbia, alguns fatores são determinantes. A composição do substrato influencia diretamente a taxa de degradação e a produção de biogás, sendo que materiais ricos em lipídios possuem alto potencial energético, mas podem dificultar a digestão devido à formação de espumas e ácidos graxos de cadeia longa. As condições ambientais, como temperatura e pH, devem ser

mantidas dentro de faixas adequadas para evitar a inibição dos microrganismos responsáveis pelo processo. A retenção da população microbiana também é essencial, pois garante a continuidade da digestão, além disso, uma boa mistura dentro do reator favorece o contato entre os microrganismos e a matéria orgânica, otimizando a degradação dos compostos. O tempo de retenção do substrato deve ser sempre ajustado conforme a taxa de degradação dos compostos presentes, garantindo assim a máxima conversão da matéria orgânica em biogás (HAANDEL; LETTINGA, 1994).

4.5. O potencial energético do biogás

As características do biogás dependem de diversos fatores ligados à conversão do substrato nos produtos metabólicos da ação microbiana, tais como, o tipo de reator, a relação substrato/microrganismo, as características da colônia de microrganismos e o tempo de retenção do substrato no reator anaeróbio. Além disso, as condições físico-químicas no interior do reator também são importantes parâmetros ligados à eficiência do processo, tais como, pH, alcalinidade, temperatura, presença de ânions como sulfato e nitrato (Noyola; Morgan-Sagastume & López-Hernández, 2006). A composição média dos gases componentes do biogás é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição média da mistura gasosa do biogás

COMPOSIÇÃO MÉDIA DA MISTURA GASOSA	
METANO	50 a 75 %
DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂)	25 a 40 %
HIDROGÊNIO (H ₂)	1 a 3 %
NITROGÊNIO (N ₂)	0,5 a 2,5 %
OXIGÊNIO (O ₂)	0,1 a 1 %
ÁCIDO SULFÍDRICO (H ₂ S)	0,1 a 0,5 %
AMÔNIA (N ₃)	0,1 a 0,5 %
MONÓXIDO DE CARBONO (CO)	0 a 0,1 %
ÁGUA (H ₂ O)	variável

Fonte: PACCO e CORTEZ, 2006.

No caso dos reatores anaeróbios do tipo UASB (sigla em inglês para Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente), o biogás gerado é predominantemente composto por CH₄ (70 a 80% v/v) e, em menor concentração, por CO₂, devido à alta solubilidade deste no líquido (Van Haandel & Lettinga, 1994). O menor teor de CO₂ no biogás produzido em

reatores UASB indica que a maior parte desse gás permanece no efluente na forma de íons bicarbonato. Esses reatores são mais apropriados para o tratamento de efluentes líquidos com baixa a moderada carga orgânica, como esgoto doméstico, pois operam de forma eficiente quando o afluente possui boa fluidez, o que favorece o contato entre os sólidos em suspensão e o lodo biológico no leito do reator (Van Haandel & Lettinga, 1994).

Para lodos com elevadas concentrações de matéria orgânica, o teor de CO_2 normalmente é mais alto (20 a 35%), enquanto a fração de nitrogênio é menor (cerca de 2%) (Agrawal; Harada & Okui, 1997).

O potencial energético do biogás é diretamente proporcional ao teor de CH_4 em sua composição, uma vez que o metano é o gás de maior poder calorífico (PCI) presente no biogás. O PCI médio do biogás é de $21,5 \text{ MJ/Nm}^3$, próximo ao do metano ($35,9 \text{ MJ/Nm}^3$) e do gás natural ($37,5 \text{ MJ/Nm}^3$) (FNR, 2012). O PCI do biogás com 60% de metano é de $21,5 \text{ MJ/Nm}^3$, correspondendo a 67% do PCI do gás natural (Probiogás, 2017). A Tabela 3 compara as características de alguns gases combustíveis: gás natural, gás de síntese e biogás com 60% de CH_4 . O gás de síntese, também chamado de “syngas”, é uma mistura de monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H_2), produzida principalmente por meio da gaseificação de materiais orgânicos ou combustíveis fósseis.

O biogás pode ser utilizado como substituto ao gás natural se purificado para remoção de parte do CO_2 , visando atender aos padrões de qualidade especificados pela Agência Nacional do Petróleo (ANP). Neste caso, o biogás passa a ser chamado biometano e pode ser injetado diretamente na rede distribuidora ou utilizado para os mesmos fins do gás natural, em fornos a gás, turbinas a gás, transformado em GNV para uso como combustível veicular, ou GNC - gás natural comprimido e transportado por longas distâncias em rodovias.

Tabela 3 - Características dos gases combustíveis: gás natural, syngas e biogás

PARÂMETRO	UNIDADE	GÁS NATURAL	GÁS DE SÍNTESE	BIOGÁS (60% CH ₄)
Poder calorífico inferior*	MJ.m ⁻³	31,8	16,1	21,5
	kcal.m ⁻³	7.600	3.846	5.134
Densidade	kg.m ⁻³	0,82	0,51	1,21
Índice de Wobbe [inferior]	MJ.m ⁻³	39,9	22,5	19,5
Velocidade máxima de chama	m.s ⁻¹	0,39	0,7	0,25
Requisito teórico de ar	m ³ ar. m ⁻³ gás	9,53	3,83	5,71
Concentração máxima de CO ₂ após combustão	% [v]	11,9	13,1	17,8
Ponto de condensação	°C	59	60	60-160

Fonte: Probiogás, 2017.

De forma resumida, o biogás pode ser empregado de diversas formas:

- Combustível em caldeiras, fornos e estufas, substituindo outros tipos de combustíveis;
- Geração de eletricidade para uso local ou venda para a rede da concessionária de energia;
- Cogeração (CHP - produção concomitante de eletricidade e calor).

No caso das estações de tratamento de esgoto no Brasil, é provável que a principal forma de aproveitamento do biogás seja a secagem de lodo (uso térmico, com baixa exigência de purificação) ou a geração de energia elétrica em sistemas de cogeração (CHP), que demandam maior grau de purificação do biogás, permitindo ainda o aproveitamento de parte da energia térmica gerada (Probiogás, 2017).

Independentemente da aplicação do biogás, recomenda-se seu beneficiamento para remoção de impurezas como umidade, CO₂, H₂S e siloxanos, a fim de evitar corrosão e incrustação nos equipamentos (Urban et al., 2009). As etapas sugeridas para esse beneficiamento incluem:

- Separação grosseira de sulfeto de hidrogênio, seja dentro do próprio digestor ou em sistema específico;
- Separação de dióxido de carbono e outros componentes indesejáveis do biogás;

- Remoção da umidade, especialmente antes da separação do CO₂ quando utilizada tecnologia a seco.

Para a queima do biogás com fins de geração de calor, como em caldeiras, é necessário que o teor de metano seja de pelo menos 50%. As caldeiras são geralmente compatíveis com o uso do biogás desde que algumas condições operacionais sejam observadas, como temperatura mínima de operação e temperatura de recirculação acima do ponto de orvalho. Ademais, o teor de compostos de enxofre no biogás deve ser inferior a 1.000 ppm, caso contrário, é necessário tratamento preliminar para redução desses contaminantes (Probiogás, 2017).

No caso da utilização do biogás em motores estacionários, é essencial observar requisitos específicos, que podem variar conforme o fabricante. Entre as exigências comuns estão, temperatura do biogás inferior a 40°C para evitar danos às membranas de controle e regulação de gás; PCI entre 4,5 kWh/Nm³ e 7 kWh/Nm³ (com teor de CH₄ entre 45% e 70% e o restante de CO₂); e umidade relativa do biogás inferior a 80% para prevenir condensação e corrosão nos equipamentos (Probiogás, 2017). Dessa forma, a adequação da composição do biogás é fundamental para viabilizar seu aproveitamento energético eficiente e seguro.

4.6 Utilização do biogás em ETEs

O biogás pode ser produzido nas ETEs pela degradação da matéria orgânica presente no próprio esgoto bruto durante as etapas de tratamento realizadas na ETE, mas também pode ser produzido pela degradação dos subprodutos gerados durante do tratamento do esgoto, isto é, pela decomposição microbiana dos lodos de esgoto. De qualquer forma, o descarte ou queima do biogás sem aproveitamento energético deve ser evitado, pois seu uso como combustível energético é muito benéfico do ponto de vista ambiental e pode ser atrativo do ponto de vista econômico.

4.6.1 Caldeira a Gás

A conversão de energia do biogás em calor pode ser realizada por meio de caldeiras a gás, produzindo fluido quente ou vapor. Estas caldeiras geralmente utilizam queimadores de combustível duplos, permitindo o uso de outros gases ou óleo combustível para complementar a escassez de biogás. A eficiência das caldeiras a gás pode superar 90% (Lobato, 2011).

4.6.2 Secagem de Lodo

O biogás pode ser empregado na secagem térmica do lodo, reduzindo seu volume e promovendo sua higienização. Isso impacta diretamente nos custos de transporte e disposição final, e, dependendo das condições, o lodo seco pode ser utilizado como combustível ou como adubo (FNR, 2012).

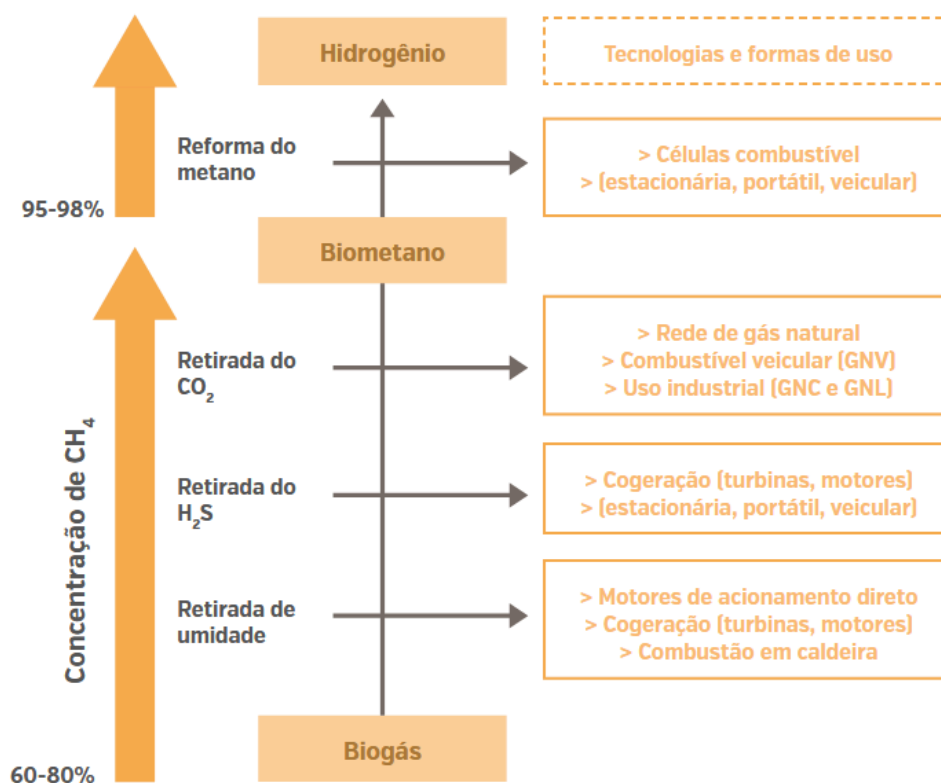
4.6.3 Cogeração

Os grupos motogeradores a gás podem gerar simultaneamente eletricidade e calor, garantindo uma mais alta eficiência do sistema, graças a uma melhor taxa de aproveitamento da energia primária. Motores de ciclo Otto são utilizados em diversas escalas, enquanto motores de ciclo Diesel predominam em plantas de grande porte (Urban et al., 2009). Motores diesel realizam a ignição da mistura de ar e biogás por meio de uma pequena quantidade de óleo diesel, que corresponde a cerca de 2 a 10% daquela necessária em motores convencionais, resultando em maior eficiência mecânica (Lobato, 2011).

4.6.4 Comercialização ou injeção na rede

Caso haja viabilidade, o biogás pode ser vendido a terceiros ou purificado e injetado na rede de gás natural, desde que as condições técnicas e econômicas sejam atendidas (FNR, 2012). A decisão de tratar ou não o biogás deve ser discutida com a parte que receberá o gás, considerando fatores como custos de purificação e logística de transporte. Para injeção na rede, todos os componentes gasosos restantes no biogás, principalmente o dióxido de carbono (CO_2), devem ser eliminados para se chegar a valores de 90% a 98% de CH_4 (Probiogás, 2017). Dependendo das características do biogás e das exigências tecnológicas de aproveitamento energético, são determinados os tipos de tratamento necessários para beneficiamento do biogás e conversão deste em outros gases combustíveis. A depender do tipo de uso do biogás, será selecionado o tipo de tratamento a ser realizado, podendo ser mais ou menos exigente, conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Esquema das etapas de purificação do biogás conforme o uso pretendido



Fonte: Probiogás, 2017.

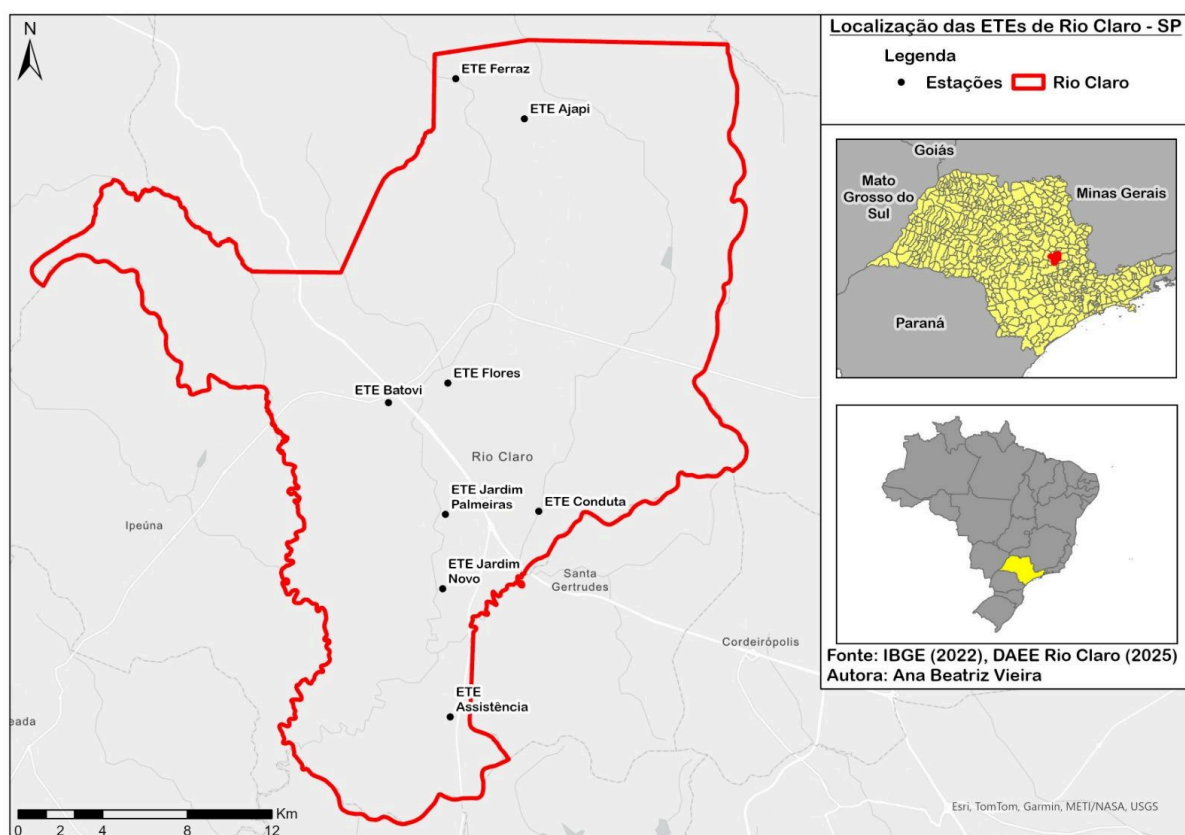
5. Metodologia

5.1 Área de estudo

O contexto geográfico do estudo foi o município de Rio Claro. Ele está localizado no interior do estado de São Paulo, na região central, a aproximadamente 180 km da capital paulista, o município possui uma área total de cerca de 498 km² e uma população estimada em 208 mil habitantes, segundo dados do IBGE (2023). Sua economia é diversificada, com destaque para os setores industrial, agrícola e de serviços, abrigando indústrias de cerâmica, metalurgia e autopeças, além de possuir uma forte tradição na produção de cana-de-açúcar e laranja. Além disso, Rio Claro, junto a outras seis cidades da região - Santa Gertrudes, Cordeirópolis, Limeira, Ipeúna, Iracemápolis e Piracicaba - constituem o maior polo cerâmico de revestimento das Américas e o segundo maior do mundo (ASPACER, 2016). A cidade é atravessada por importantes corpos hídricos, como o Ribeirão Claro e o Córrego da Servidão, que fazem parte da Bacia Hidrográfica do Médio Tietê.

Primeiramente, foram mapeadas todas as Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) existentes no município e seus distritos, como é possível ver no mapa abaixo. Os serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário são geridos pela concessionária BRK Ambiental, que opera 8 ETEs em Rio Claro e seus distritos: (1) ETE Ajapi, (2) ETE Assistência, (3) ETE Batovi e (4) ETE Ferraz, localizadas nos distritos, e (5) ETE Jardim Conduta, (6) ETE Jardim Flores, (7) ETE Jardim Novo e (8) ETE Jardim Palmeiras, situadas no município.

Figura 12 - Mapa da localização das ETEs de Rio Claro



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

As características das ETEs são descritas a seguir, sendo as mais recentes informações encontradas, obtidas a partir de publicações do Departamento Autônomo de Água e Esgoto (DAAE) de 2014.

5.1.1 ETE Ajapi

O sistema de tratamento de esgoto sanitário da ETE Ajapi está localizado na Rodovia Rio Claro – Ajapi, s/n, no Distrito de Ajapi. O tratamento ocorre em dois conjuntos paralelos de lagoas de estabilização, cada um composto por uma lagoa anaeróbia, uma lagoa facultativa e uma lagoa de maturação com cultivo de aguapés. Em 2014, a unidade atendia aproximadamente 2.000 habitantes, incluindo a Estação Elevatória de Esgoto Terras de Ajapi (DAAE, 2014). Atualmente, conforme a BRK Ambiental (2025), a capacidade de atendimento pode ter sido ampliada. O efluente tratado é lançado no Rio Corumbataí (ANA, 2017). A estação ocupa uma área total de 146.287 m², localizada fora do perímetro urbano do distrito, a cerca de 279 metros do corpo hídrico receptor.

Figura 13 - Estação de tratamento de esgoto de Ajapi



Fonte: DAAE, 2014.

5.1.2 ETE Assistência

A ETE Assistência, situada na Avenida 1 Assistência, 2200, é responsável pelo tratamento de esgoto do distrito, utilizando um sistema misto de fossa séptica e filtro anaeróbio. Em 2014, a unidade de Assistência Alta atendia aproximadamente 400 habitantes, enquanto a Assistência Baixa atendia cerca de 800 habitantes (DAAE, 2014). Atualmente, segundo a BRK Ambiental (2025), esses valores podem ter sido alterados. A estação encontra-se dentro do perímetro urbano e está localizada ao sul da cidade. O efluente tratado é lançado no Rio Corumbataí, a uma distância de 677 metros no caso da Assistência Alta e 188 metros no caso da Assistência Baixa (ANA, 2017).

Figura 14 - Vista do tratamento ETE Assistência Baixa



Fonte: DAAE, 2014.

5.1.3 ETE Batovi

Localizada na Avenida 05, no Distrito de Batovi, a ETE Batovi opera com um sistema de tratamento composto por fossa séptica, reator UASB e biofiltro aerado submerso. Em 2014, a unidade atendia aproximadamente 500 habitantes (DAAE, 2014), podendo ter sofrido alterações atualmente. O projeto previa uma eficiência de remoção de matéria orgânica de 90%. O efluente tratado é lançado no Córrego das Araras, situado a cerca de 20 metros da estação (DAAE, 2014). A área total da unidade é de aproximadamente 2.285 m², inserida dentro do perímetro urbano do distrito.

Figura 15 - Vista reator UASB e filtro aeróbio submerso ETE Batovi



Fonte: DAAE, 2014.

5.1.4 ETE Jardim Conduta

A ETE Jardim Conduta, localizada na Avenida P 43, nº 400, atende às sub-bacias 08, 09 e 10, com aproximadamente 59.000 habitantes, em 2014, o projeto havia sido dimensionado para atender 78.228 habitantes até 2018 (DAAE, 2014). O sistema adotado é um processo misto composto por reator UASB seguido por lodos ativados, com uma eficiência projetada de remoção de matéria orgânica de 96,7%. A estação está situada no perímetro urbano, ao norte da cidade, com o efluente tratado sendo lançado no Ribeirão Claro, a uma distância de 89 metros (ANA, 2017). A área total da instalação é de 48.401 m².

Figura 16 - Vista dos reatores UASB da ETE Jardim Conduta, Rio Claro



Fonte: DAAE, 2014.

5.1.5 ETE Ferraz

A ETE Ferraz, localizada na Rua 04, nº 610, no Distrito de Ferraz, adota um sistema de tratamento misto que combina fossa séptica, reator UASB e vala de infiltração. Em 2014, a unidade atendia aproximadamente 500 habitantes (DAAE, 2014). A estação está situada dentro do perímetro urbano, a cerca de 50 metros do Rio Corumbataí, que recebe o efluente tratado (ANA, 2017). A área total ocupada pela unidade é de aproximadamente 1.477 m².

Figura 17 - Vista do tratamento vala de Infiltração e Reator UASB da ETE Ferraz, Rio Claro



Fonte: DAAE, 2014.

5.1.6 ETE Jardim Flores

Situada na Rua Estrada de Jacutinga, nº 5246, no Jardim Portugal, a ETE Jardim Flores opera com um sistema de reator UASB seguido por lodos ativados. Em 2014, atendia aproximadamente 33.000 habitantes das sub-bacias 01 e 02 (DAAE, 2014). A estação ocupa uma área de 76.519,75 m² dentro do perímetro urbano, ao norte da cidade. O efluente tratado é lançado no Rio Corumbataí, que possui a maior vazão do município, a cerca de 700 metros da unidade (ANA, 2017).

Figura 18 - Estação de tratamento de esgoto Jardim das Flores



Fonte: DAAE, 2014.

5.1.7 ETE Jardim Novo

A ETE Jardim Novo, inaugurada em 2017, representa um marco na ampliação da capacidade de tratamento de esgoto de Rio Claro. Com sua implementação, o município atingiu 92% de cobertura de esgoto tratado (DAAE, 2021). A ETE está localizada na Rua 17 JN, nº 1262, atende aproximadamente 90.000 habitantes e possui capacidade para tratar até 23.000 m³ de esgoto por dia (Consórcio PCJ, 2017). Ela utiliza a tecnologia Nereda®, um processo biológico aeróbio baseado em lodo granular, no qual os micro-organismos formam grânulos compactos com excelente capacidade de sedimentação. Essa característica dispensa a necessidade de decantadores secundários, reduzindo significativamente a área ocupada pelo sistema. Além disso, os grânulos apresentam zonas aeróbias e anóxicas simultaneamente,

permitindo que processos como nitrificação, desnitrificação e remoção biológica de fósforo ocorram de forma integrada e eficiente (Nereda, [s.d.]).

Figura 19 - Estação de tratamento de esgoto Jardim das Flores



Fonte: Jornal da Cidade, 2025.

5.1.8 ETE Jardim Palmeiras

A ETE Jardim Palmeiras, situada na Rua 15 JP, nº 801, utiliza um processo misto composto por reator UASB seguido por lagoa de aeração e decantação. Em 2014, atendia cerca de 5.000 habitantes da sub-bacia 05 (DAAE, 2014). A eficiência projetada da remoção de matéria orgânica era de 90%. O efluente tratado é lançado no Rio Corumbataí, a aproximadamente 500 metros da estação (ANA, 2017). A unidade ocupa uma área de 1.200,00 m² dentro do perímetro urbano, ao sul da cidade.

Figura 20 - Estação de tratamento de esgoto Jardim Palmeiras



Fonte: DAAE, 2014.

5.2 Potencial teórico de geração de metano

A estimativa da produção de biogás a partir da digestão anaeróbia do lodo de esgoto pode ser realizada com base em variáveis chave do processo de degradação anaeróbia. Foram utilizadas as abordagens do livro “Wastewater Engineering: Treatment and Reuse”, de Metcalf and Eddy, Inc. (2003), da editora McGraw-Hill, 4ª edição.

A Demanda Bioquímica de Metano, representada pela variável B_0 (potencial bioquímico de metano) na Figura 21, pode ser quantificada em função da quantidade de Sólidos Totais Voláteis (STV) adicionados ao reator ($ST_{inicial}$) e sua eficiência de degradação. Visto que na prática somente uma fração dos sólidos voláteis adicionados será efetivamente degradada pelas bactérias, isto é, removida do substrato e convertida em biogás, diz-se que existe uma eficiência de conversão (E_f). Dependendo das condições operacionais, tais como temperatura e tempo de retenção, E_f varia entre 56-66% (Metcalf and Eddy, Inc., 2003), indicando que esse é o percentual dos sólidos voláteis removidos em relação aos sólidos voláteis adicionados ao reator (STV removido/STV adicionados). Neste modelo, pressupõe-se um fator de conversão teórico de 0,35 m³ de gás metano (0°C e 1 atm) gerados pela conversão de cada 1 kg de DQO biodegradável (DQO_b) a 0°C (Metcalf and Eddy, Inc., 2003, Eq. 14-12, pg. 1510). Este fator teórico seria de 0,40 caso a temperatura considerada fosse 35°C.

Figura 21 - Demanda Bioquímica de Metano

$$B_0 = 0,35 \cdot ST_{\text{inicial}} \cdot Ef$$

Onde:

- 0,35: Fator de conversão para metano ($m^3 \text{ CH}_4/\text{kg STV}$);
- ST_{inicial} : Sólidos Totais Voláteis iniciais no lodo (kg STV);
- Ef : Eficiência de conversão (fração, geralmente 0,4 a 0,6).

Fonte: Metcalf and Eddy, Inc., 2003.

O modelo utilizado no presente estudo segue a mesma lógica supracitada, mas para estimar a produção de biogás será utilizada a equação mostrada na Figura 22. Conforme se observa, o volume de biogás produzido na digestão anaeróbia do lodo ($V_{\text{biogás}}$) é estimado como função das seguintes variáveis: volume de lodo adicionado ao reator (V_{lodo} em m^3 ou ton), densidade de sólidos totais por unidade de volume lodo (TS em kg/m^3), fração de sólidos totais voláteis (STV) nos sólidos totais adicionados ($VS = \text{STV}/\text{ST}$), rendimento de biogás (Y , em m^3 de biogás gerado por kg de sólidos totais voláteis removidos) e a eficiência de remoção dos sólidos (TE , em % ou $\text{kg STV removidos}/\text{kg ST adicionados}$).

Figura 22 : Produção de Biogás com Base no Volume de Lodo

$$V_{\text{biogás}} = V_{\text{lodo}} \cdot TS \cdot VS \cdot Y \cdot TE$$

- $V_{\text{biogás}}$: Volume de biogás produzido (m^3);
- V_{lodo} : Volume de lodo tratado (m^3);
- TS : Sólidos totais no lodo (kg/m^3);
- VS : Fração de sólidos voláteis nos sólidos totais (kg/kg);
- Y : Rendimento de biogás ($m^3 \text{ STV removido}$);
- TE : Eficiência da remoção de sólidos voláteis (%).

Fonte: adaptado de Metcalf and Eddy, Inc., 2003.

O volume de biogás produzido anualmente e o teor de sólidos totais no lodo são as duas variáveis de entrada da equação, sendo levantadas junto à concessionária que opera das ETES analisadas. As demais variáveis (TE , Y e VS) são obtidas da literatura. Segundo Metcalf and

Eddy, Inc., 2003, eficiência de destruição dos sólidos voláteis na digestão anaeróbia mesofílica depende do tempo de digestão, variando entre 56% e 65,5%. Desta forma, adota-se $TE = 50\%$. Também segundo este autor, Y , que é o volume de biogás produzido na digestão anaeróbia do lodo por unidade de massa de sólidos voláteis removidos varia entre 0,75 e 1,12 m^3 biogás/kg SV removidos. Desta forma é adotado um valor conservador de 0,72 m^3 biogás/kg SV removidos. Por fim, VS , que é a razão STV/ST possui valores bastante variáveis na literatura, entre 52% e 82% (Blasius, 2019), sendo, portanto, adotado o valor conservador de $VS = 60\%$.

5.3 Estimativa da energia gerada a partir do biogás

Os dados utilizados neste estudo foram oficialmente cedidos pela concessionária BRK Ambiental em atendimento à solicitação realizada pela Universidade Estadual Paulista (Unesp) para realização do presente trabalho. O relatório disponibilizado continha informações detalhadas sobre a constituição química e biológica do lodo gerado nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) de Rio Claro, SP, com destaque para o tipo de tratamento empregado, a vazão afluyente de esgoto, a atual destinação do lodo, o pH, a temperatura, o volume ou massa anual de lodo produzido e o percentual de sólidos totais (ST).

Como as quantidades de lodo geradas nas ETEs são medidas tanto em volume quanto em massa, conforme informado pela BRK, foi necessário realizar a conversão para uma base mássica. Para isso, utilizou-se a densidade do lodo como aproximadamente igual a densidade da água, 1000 kg/m^3 , conforme indicado para lodos biológicos proveniente de digestão anaeróbia (Infobibos, 2011).

5.3.1 Conversão do lodo em biogás

A Equação 1 referente ao modelo mostrado na Figura 22 foi utilizada para a estimar o volume de biogás ($V_{biogás}$) que poderia ser produzido se o lodo coletado nas ETEs de Rio Claro fosse digerido em reator anaeróbio.

$$V_{biogás} = V_{lodo} \cdot TS \cdot VS \cdot Y_{biogás} \cdot TE \quad (1)$$

Onde, como dito, as variáveis diretamente obtidas das informações disponibilizadas pela concessionária foram: o volume de lodo gerado nas ETEs (V_{lodo} , m^3) e a taxa de Sólidos Totais no lodo (TS , kg/m^3). As demais variáveis foram obtidas da literatura: fração de Sólidos Voláteis nos sólidos totais do lodo (VS , em kg sólidos totais voláteis adicionados/kg sólidos

totais adicionados), o rendimento específico de biogás por unidade de massa de sólidos voláteis removidos ($Y_{biogás}$) e a eficiência de destruição de sólidos voláteis (TE) pelo processo de digestão anaeróbia.

Andreoli, Von Sperling & Fernandes (2010) indicam que lodos a serem digeridos possuem fração de Sólidos Voláteis nos sólidos totais (STV/ST ou VS) de 75 e 80% de sólidos voláteis nos sólidos totais, enquanto lodos digeridos apresentam entre 60 e 65% de sólidos voláteis nos sólidos totais. Como o lodo estudado já passa por etapas de estabilização e adensamento antes da digestão, foi adotado um valor conservador de $VS = 60\%$ de STV/ST .

A produção específica de metano a partir da digestão anaeróbia ($Y_{biogás}$) foi baseada nos intervalos fornecidos também pela Probiogás, que indicam valores entre 0,72 e 1,12 Nm^3/kg de SV removida e foi selecionando o valor conservador de 0,72 Nm^3/kg de SV removida. De forma semelhante, Metcalf and Eddy, Inc. (2003) estipulam que valores típicos do volume de biogás usualmente estimados a partir da fração de sólidos voláteis removidos são de 0,75 a 1,12 m^3/kg SV removidos. Além disso foi aplicada uma taxa de eficiência para o processo de remoção dos sólidos voláteis (TE) de 50% (Probiogás, 20017)

5.3.2 Conversão do biogás em energia elétrica

Nesta etapa foi estimada a energia que poderia ser gerada considerando que biogás produzido pela digestão anaeróbia do lodo das ETEs de Rio Claro tivesse 60% de metano (Probiogás, 2017) e fosse convertido em energia elétrica. Para isso, tomou-se como base o poder calorífico inferior (PCI) do biogás com 60% de metano, que, segundo a Probiogás (2017) é de 21,5 MJ/m^3 ou 5,97 kWh/m^3 .

A energia térmica gerada pode ser obtida através da Equação (2):

$$E_{termica} = V_{biogás} \cdot PCI_{biogás} \quad (2)$$

Onde $E_{termica}$ é a energia térmica presente no biogás em MJ ou kWh, $V_{biogás}$ é o volume de biogás em m^3 e $PCI_{biogás}$ é o poder calorífico inferior do biogás em MJ/m^3 .

A energia elétrica é gerada pela queima do biogás em um conjunto motogerador, que depende da eficiência do equipamento. Essa eficiência representa a fração da energia térmica

que pode ser efetivamente convertida em energia elétrica. Para isso, foi considerada a eficiência nominal elétrica de 42,6%, referente a uma máquina conhecida já utilizada na queima de biogás em aterros sanitários da fabricante GE (GE JENBACHER, 2011). Assim, a energia elétrica potencial foi calculada pela Equação (3):

$$E_{\text{elétrica}} = E_{\text{térmica}} \cdot Ef_{\text{máquina}} \quad (2)$$

Onde $Ef_{\text{máquina}} = 42.6\%$ é a eficiência do conjunto motogerador da GE Jenbacher (2011).

6. Resultados

A Tabela 4 resume as variáveis utilizadas no modelo matemático, onde as respectivas fontes de referência das variáveis de entrada são indicadas.

Tabela 4 - Variáveis matemáticas do modelo para estimativa da produção de biogás e energia elétrica

Variável	Significado	Valor	Fonte
V_{lodo}	Volume de lodo adicionado	37-8215 m ³ /ano	BRK Ambiental, 2025
TS	Densidade de Sólidos Totais (no lodo adicionado)	50-150 kg ST/m ³ lodo	BRK Ambiental, 2025
VS ou STV/TS	Fração de Sólidos Voláteis nos Sólidos Totais (no lodo adicionado)	60%	Andreoli, 2010 Metcalf & Eddy, 2003
STV	Sólidos Totais Voláteis adicionados (kg STV/ano)	TS . VS	-
TE	Taxa de destruição dos sólidos voláteis durante a digestão	50%	Probiogás, 2017
STV removidos	Sólidos Totais Voláteis removidos (kg STV /ano)	STV . TE	-
$Y_{\text{biogás}}$	Produção específica de biogás	0,72 m ³ biogás / kg STV removidos/ano	Probiogás, 2017 Metcalf & Eddy, 2003
$V_{\text{biogás}}$	Volume de biogás gerado por ano (m ³ biogás /ano)	$Y_{\text{biogás}} \cdot \text{STV removidos}$	-

$PCI_{\text{biogás}}$	Poder calorífico inferior do biogás com 60% de metano	21,5 MJ/m ³	Probiogás, 2017 Souza, 2019
E_{termica}	Energia térmica do biogás (MJ/ano)	$V_{\text{biogás}} \cdot PCI_{\text{biogás}}$	-
Ef_{maquina}	Eficiência elétrica motor a gás (ciclo Otto)	42,6%	GE Jenbacher, 2011
E_{eletrica}	Energia elétrica do biogás queimado em motogerador	$E_{\text{termica}} \cdot Ef_{\text{maquina}}$	-
Cobertura consumo	Consumo elétrico da ETE suprido pela autogeração elétrica do biogás (%)	$E_{\text{eletrica}} / E_{\text{consumida}}$	$E_{\text{consumida}}$ fornecido por BRK Ambiental, 2025

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

6.1 Dados operacionais das ETEs

As oito ETEs da cidade de Rio Claro, SP, possuem diferentes tecnologias de tratamento de esgoto, conforme apresentado na Tabela 5. Metade das ETEs destinam o lodo gerado para aterros sanitários e metade encaminham o lodo gerado para outras ETEs.

Tabela 5 - Tratamento e destinação do lodo das ETEs de Rio Claro.

Estação	Tratamento Principal	Tratamento Associado	Destinação
ETE Ajapi	Lagoas de estabilização	Lagoa anaeróbia, facultativa e maturação	Aterro Sanitário Rio Claro
ETE Assistência	Fossa Séptica	Filtro Aerado	Processo ETE Jardim Novo
ETE Batovi	UASB	Filtro Aerado	Processo ETE Flores
ETE Conduta	Lodos Ativados	Reator Aeróbio	Aterro Sanitário Rio Claro/ Orizon meio ambiente
ETE Ferraz	UASB	Vala de Filtração	Processo ETE Flores
ETE Flores	Lodos Ativados	Reator Aeróbio	Aterro Sanitário Rio Claro/ Orizon meio ambiente
ETE Jardim Novo	Nereda		Aterro Sanitário Rio Claro/ Orizon meio ambiente
ETE Palmeiras	Lagoas Aeradas	UASB	Processo ETE Jardim Novo

Fonte: Elaborado pela autora (2025) a partir de dados da BRK Ambiental (2025).

A Tabela 6 apresenta os valores de vazão operacional de esgoto processado, quantidade de lodo gerado anualmente e percentual de sólidos totais (% ST) para cada ETE analisada. Observa-se que, das oito ETEs de Rio Claro, apenas cinco contabilizaram a geração anual de lodo, pelo qual, somente estas puderam ser consideradas na metodologia deste estudo.

Tabela 6 - Vazão Operacional e quantidade de lodo anual das ETEs de Rio Claro

Estação	Vazão Operacional (L/s)	Quantidade de Lodo Gerada por ano	% Sólidos totais
ETE Ajapi	10	0	-
ETE Assistência	6,3	180 m ³	11%
ETE Batovi	2	50 m ³	11%
ETE Conduta	160,3	861 ton	13%
ETE Ferraz	3	0	-
ETE Flores	86	37 ton	5%
ETE Jardim Novo	237,7	8215 ton	15%
ETE Palmeiras	14,6	0	-

Fonte: Elaborado pela autora (2025) a partir de dados da BRK Ambiental (2025).

6.2 Produção de Biogás

A Tabela 7 apresenta a conversão do volume de lodo para massa de sólidos totais (ST) realizada com base no percentual de sólidos informado para cada ETE. No entanto, para as ETEs Assistência e Batovi, a BRK não forneceu a fração de sólidos totais presente no lodo. Para permitir a estimativa da produção de biogás nessas unidades, assumiu-se um valor médio de sólidos totais com base nos dados das três ETEs que tiveram essa informação reportada (Conduta, Flores e Jardim Novo). Os valores informados foram 13% para a ETE Conduta, 15% para a ETE Jardim Novo e 5% para a ETE Flores, resultando em uma média de 11% ST, que foi adotada para as ETEs de Assistência e Batovi.

A ETE Jardim Novo apresenta a maior geração de lodo, com 8215 toneladas (ou 8215 m³) por ano e 15% de sólidos totais, seguida pela ETE Conduta, com 861 toneladas (ou 861 m³) e 13% de ST. Já a ETE Flores, apesar de sua significativa vazão operacional, apresenta um percentual de sólidos totais baixo (5%) comparado com as demais, refletindo uma menor concentração de matéria orgânica no lodo produzido.

Tabela 7 - Quantidade de sólidos totais no lodo das ETEs de Rio Claro

Estação	Quantidade de Lodo Gerada (m³/ano)	Sólidos totais (kg/m³)	Sólidos Totais (Ton/ano)	Sólidos voláteis Totais (ton/ano)
ETE Assistência	180	110	19,80	11,88
ETE Batovi	50	110	5,50	3,30
ETE Conduta	861	130	111,93	67,16
ETE Flores	37	50	1.850,00	1.110,00
ETE Jardim Novo	8215	150	1.232,25	739,35

Fonte: Elaborado pela autora (2025) a partir de dados da BRK Ambiental (2025).

A partir dos valores de sólidos totais e assumindo que 60% dessa fração corresponde a sólidos voláteis (SV) (Probiogás,2017) e que o processo de remoção de sólidos voláteis tem 50% de eficiência (TE) (Probiogás,2017), foi possível estimar a produção de biogás para cada estação. A Tabela 8 apresenta os resultados dos volumes anuais de biogás estimados usando a metodologia e variáveis detalhadas na Tabela 4. Também foi calculado a produção específica de biogás por tonelada de lodo adicionado ao reator, obtendo-se **11 a 32 m³ biogás/ton lodo adicionado**, o que equivale a uma média de 24 m³ de biogás/ton lodo. De acordo com WEF – Water Environment Federation (2009). Design of Municipal Wastewater Treatment Plants – Manual of Practice No. 8 (MOP 8), 5th Edition. Alexandria, VA: Water Environment Federation, a faixa desta produção específica esperada é da ordem de 15 a 35 m³/ton lodo com teor de sólidos de 8–12%.

Tabela 8 - Volume biogás produzido nas ETEs de Rio Claro

Estação	Volume de Biogás (m³/ano)	Produção específica biogas (m³ biogas/ton lodo)
ETE Assistência	4.277	24
ETE Batovi	1.188	24
ETE Conduta	24.177	28
ETE Flores	400	11
ETE Jardim Novo	266.166	32
TOTAL	296.207	24

Fonte: Elaborado pela autora (2025) a partir de dados da BRK Ambiental (2025).

Pode-se destacar que a produção específica de biogás obtida dividindo-se o volume de biogás por unidade de massa de sólidos voláteis é de **0,36 m³ biogás/kg STV adicionados**, o

que está de acordo com a faixa estipulada por Metcalf & Eddy, 2003, de 0,2-0,45 m³ biogás/kg de sólidos voláteis (STV) adicionados.

Os resultados indicam que o potencial total de produção de biogás no município de Rio Claro é de aproximadamente 296.207 m³ por ano. A ETE Jardim Novo se destaca como a maior responsável por esse volume, contribuindo com cerca de 90% do total, com um volume anual estimado em 266.166 m³. Essa expressiva participação deve-se ao alto volume de lodo gerado nessa estação, além da maior concentração de sólidos totais em comparação às outras estações.

A segunda maior contribuição vem da ETE Conduta, com um volume anual de biogás estimado em 24.177 m³, enquanto as ETES Assistência, Batovi e Flores apresentam volumes significativamente menores, variando entre 400 e 4.277 m³ por ano.

Esses dados mostram que, embora Rio Claro tenha um potencial para a produção de biogás a partir do lodo de esgoto, a maior parte desse potencial está concentrada em poucas estações. Isso pode influenciar decisões futuras sobre a implantação de biodigestores no município, visto que estações de menor porte podem não gerar volume suficiente para justificar investimentos isolados em tecnologia de digestão anaeróbia. Além disso, é importante destacar que esses valores foram calculados considerando condições operacionais ideais, podendo variar na prática em função da eficiência do processo e das características do lodo ao longo do tempo.

6.3 Eficiência energética

Os resultados obtidos, a partir dos cálculos realizados para a energia térmica gerada nas ETES analisadas, são apresentados na Tabela 9. Observa-se que a ETE Jardim Novo possui o maior potencial energético, de 1,589.011 kWh, enquanto a ETE Flores apresenta o menor valor, de 2.386 kWh. No total, considerando todas as ETES, o potencial de energia térmica é de aproximadamente 1.758.357 kWh.

Tabela 9 - Energia térmica produzida nas ETES de Rio Claro

Estação	Energia Térmica (KWh/ano)
ETE Assistência	25.532
ETE Batovi	7.092
ETE Conduta	144.336
ETE Flores	2.386
ETE Jardim Novo	1.589.011
TOTAL	1.768.357

Fonte: Elaborado pela autora (2025) a partir de dados da BRK Ambiental (2025).

Já os valores resultantes da conversão energética, considerando 42,6% de eficiência da máquina térmica estão apresentados na Tabela 10. Com essa eficiência, a energia elétrica gerada pelas ETEs totaliza aproximadamente 753.320 kWh, o que considerando que essa quantidade é produzida anualmente se traduz em 0,09 MWm. Como esperado, a ETE Jardim Novo mantém a maior contribuição, com o valor de 676.919 kWh.

Tabela 10 - Energia elétrica produzida nas ETEs de Rio Claro

Estação	Energia Elétrica (KWh/ano)
ETE Assistência	10.877
ETE Batovi	3.021
ETE Conduta	61.487
ETE Flores	1.016
ETE Jardim Novo	676.919
TOTAL	753.320

Fonte: Elaborado pela autora (2025) a partir de dados da BRK Ambiental (2025).

6.3.1 Potencial de Abastecimento Energético

A energia elétrica gerada a partir do biogás pode ser comparada com a demanda média residencial para estimar o número de residências que poderiam ser abastecidas, segundo a EPE (Empresa de Pesquisa Energética), o consumo médio de energia elétrica por residência no Brasil é de 230 kWh/mês, ou seja uma média de 2.760 kWh/ano, considerando esse consumo, a quantidade de residências potencialmente atendidas seria de 273.

6.3.2 Autossuficiência Energética das ETEs

A BRK Ambiental forneceu dados sobre o consumo mensal de energia elétrica (em kWh) das seis principais estações de tratamento de esgoto (ETEs) do município, abrangendo o período de março de 2024 a fevereiro de 2025. A partir desses valores, foi calculado o consumo anual de cada ETE individualmente, bem como o total consolidado das seis unidades, que somam 6.487.277 kWh no período, equivalente a uma média de 0,74 MW médios (MWm). A Tabela 11 a seguir apresenta os dados fornecidos e os resultados obtidos com os cálculos.

Tabela 11 - Consumo energético mensal das ETEs (kWh)

	mar/24	abr/24	mai/24	jun/24	jul/24	ago/24	set/24	out/24	nov/24	dez/24	jan/25	fev/25	Consumo de cada ETE (kWh)
ETE Assistência	6340	5658	6191	6109	4346	6027	6047	6068	6088	640	4551	5140	63.205
ETE Batovi	2222	1886	1631	1528	1422	1438	1499	1223	1249	1677	2632	2960	21.367
ETE Conduta	187718	184586	142625	130876	155554	154892	159457	166199	146983	176956	178530	153485	1.937.861
ETE Flores	87965	86502	91590	91887	97936	81282	87245	95522	93534	107652	97412	95314	1.113.841
ETE Jardim Novo	274932	266552	268263	250669	249805	228643	214690	223942	235740	239087	241467	217264	2.911.054
ETE Palmeiras	35802	34540	37014	37202	38494	39562	38145	35963	36792	33202	36639	36594	439.949
Consumo Mensal (kWh)	594.979	579.724	547.314	518.271	547.557	511.844	507.083	528.917	520.386	559.214	561.231	510.757	6.487.277

Fonte: Elaborado pela autora (2025) a partir de dados da BRK Ambiental (2025).

A partir dos cálculos do potencial energético do biogás produzido nas ETEs, considerando o cenário de produção estimado anteriormente, e o respectivo consumo energético de cada ETE, foi estimado o percentual de autossuficiência energética de cada estação. A tabela abaixo apresenta os resultados dessa análise.

Tabela 12 - Potencial de autossuficiência energética das ETEs de Rio Claro

Estação	kWh produzidos por cada ETE	kWh consumidos por cada ETE	% cobertura
ETE Assistência	10.877	63.205	17,2%
ETE Batovi	3.021	21.367	14,1%
ETE Conduta	61.487	1.937.861	3,2%
ETE Flores	1.016	1.113.841	0,1%
ETE Jardim Novo	676.919	2.911.054	23,3%
ETE Palmeiras	0	439.949	0,0%
Total	753.320	6.487.277	11,6%

Fonte: Elaborado pela autora (2025) a partir de dados da BRK Ambiental (2025).

A ETE Jardim Novo continua sendo a estação com maior potencial de produção energética, podendo atender a 23,3% de sua demanda elétrica anual. Em seguida, destacam-se

as ETEs Assistência e Batovi, com coberturas de 17,2% e 14,1%, respectivamente, demonstrando alguma viabilidade de aproveitamento energético, ainda que limitada. Já as ETEs Conduta e Flores apresentam baixos índices de cobertura, de 3,2% e 0,1%, respectivamente, devido ao alto consumo energético frente à sua capacidade de geração. A ETE Palmeiras, por sua vez, não apresenta geração estimada, resultando em cobertura nula (0%), possivelmente por destinar seu lodo a outras unidades. De forma geral, a produção estimada de energia elétrica a partir do biogás gerado nas seis principais ETEs de Rio Claro seria capaz de suprir apenas 11,6% do consumo total dessas unidades, o que revela um aproveitamento energético ainda modesto, embora com margem para avanços

A Tabela 13 apresenta uma consolidação dos principais resultados obtidos neste estudo, reunindo dados de volume de lodo, produção de biogás, energia térmica e elétrica gerada, consumo energético e porcentagem de cobertura energética para cada uma das cinco ETEs analisadas. Esta compilação foi elaborada com o intuito de facilitar a comparação entre as diferentes unidades e evidenciar os fatores que influenciam a viabilidade do aproveitamento energético do biogás gerado a partir do lodo de esgoto.

Um dos destaques da tabela é a inclusão do índice de geração de biogás por volume ou massa de lodo tratado (m^3 de biogás/ m^3 ou t de lodo), que permite avaliar a eficiência do processo em termos de aproveitamento do lodo gerado. Observa-se que esse índice está fortemente relacionado com o percentual de sólidos totais presentes no lodo: unidades com maior concentração de sólidos tendem a apresentar maior produção específica de biogás. A ETE Jardim Novo, por exemplo, com 15% de sólidos totais, apresentou o maior índice ($32,4 \text{ m}^3$ de biogás/ m^3 de lodo), enquanto a ETE Flores, com apenas 5% de sólidos, obteve o menor valor ($10,8 \text{ m}^3/\text{m}^3$). Esse padrão reforça a importância da concentração de sólidos como um parâmetro determinante na geração de biogás.

Adicionalmente, calculou-se o índice médio de produção de biogás por quilo de sólido volátil adicionado, estimado em $0,36 \text{ m}^3$ de biogás/kgSV, valor coerente com o observado na literatura para digestão anaeróbia de lodo de esgoto em condições mesofílicas.

Por outro lado, não foi possível estabelecer uma correlação direta entre o tipo de sistema de tratamento adotado (como reatores UASB, NEREDA, filtros aerados ou reatores aeróbios) e a eficiência de produção de biogás. Isso se deve ao fato de algumas ETEs enviarem seus lodos para tratamento em outras unidades, o que interfere na origem e nas

características do material digerido, dificultando a associação direta entre processo de tratamento e produtividade.

Assim, a Tabela 13 sintetiza os principais resultados e limitações da análise, permitindo uma visão integrada da relação entre características do lodo, potencial energético do biogás e viabilidade de autossuficiência energética das ETEs avaliadas.

Tabela 13 - Consolidação dos dados de produção de lodo, geração de biogás e potencial energético nas ETEs de Rio Claro

Estação	Tratamento Principal	Tratamento Associado	% sólidos totais	m³ de lodo/ano	m³ de biogás/ano	Índice m³ de biogás/m³ ou ton de lodo	Energia Térmica (KWh/ano)	Energia Elétrica (KWh/ano)	% cobertura
ETE Assistência	Fossa Séptica	Filtro Aerado	11%	180	4.277	23,8	25.532	10.877	17,2%
ETE Batovi	UASB	Filtro Aerado	11%	50	1.188	23,8	7.092	3.021	14,1%
ETE Conduta	Lodos Ativados	Reator Aeróbio	13%	861	24.177	28,1	144.336	61.487	3,2%
ETE Flores	Lodos Ativados	Reator Aeróbio	5%	37	400	10,8	2.386	1.016	0,1%
ETE Jardim Novo	Nereida		15%	8.215	266.166	32,4	1.589.011	676.919	23,3%
TOTAL				9.343	296.207	31,7	1.768.357	753.320	11,6%

Fonte: Elaborado pela autora (2025) a partir de dados da BRK Ambiental (2025).

7. Conclusão

O presente trabalho avaliou o potencial de geração de biogás a partir da digestão anaeróbia do lodo de esgoto gerado nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) do município de Rio Claro, São Paulo. A análise teve como base as quantidades de lodo produzido nas unidades operadas pela concessionária BRK Ambiental e buscou quantificar teoricamente o potencial de geração de biogás em biodigestores e sua conversão em energia elétrica em motogeradores.

Os resultados indicam que o potencial total de produção de biogás no município varia de 296.207 m³/ano, a depender do rendimento do processo de digestão anaeróbia adotado. A conversão desse biogás em energia elétrica geraria 753.320 kWh por ano, o que corresponde a uma potência média instalada de 0,09 MWm, que é capaz de suprir parcialmente as necessidades energéticas das próprias ETEs. Esses valores mostram que, mesmo em um município de porte médio, como Rio Claro (população em 2024 de 209 mil habitantes), o aproveitamento energético do lodo pode representar uma importante fonte complementar de energia limpa e implementação de Economia Circular, evitando a disposição destes resíduos de aterros.

Verificou-se que esse potencial está concentrado em algumas poucas ETEs, sendo a ETE Jardim Novo o destaque, com capacidade de suprir 23,3% de sua demanda energética. Outras unidades também apresentaram bons índices de autossuficiência, como a ETE Assistência (17,2%) e a ETE Batovi (14,1%), evidenciando que, mesmo com produção moderada de biogás, o baixo consumo energético pode favorecer sua viabilidade. Em contrapartida, nas estações com baixa produção de lodo, como as ETEs Flores e Palmeiras, o aproveitamento energético do lodo é menos interessante. A ETE Flores teria apenas 0,1% de autossuficiência e a ETE Palmeiras não possui potencial de suprimento próprio (0%).

De forma geral, considerando a produção combinada de biogás e o consumo total das seis principais ETEs do município(excluindo ETE Ajapi e ETE Ferraz), o biogás teria o potencial de suprir até 11,6% da demanda energética das próprias ETEs ou ainda abastecer 273 residências de porte médio. Estes números expressivos evidenciam o papel estratégico da adoção de novas alternativas de tratamento e destinação dos resíduos do saneamento que contribuam com a diversificação da matriz energética municipal. Vale ressaltar que os cálculos realizados consideraram condições operacionais ideais. Assim os resultados podem

variar de acordo com as características específicas do lodo, a eficiência dos biodigestores, a sazonalidade da carga orgânica e a adequação da manutenção dos equipamentos utilizados no processo.

A relevância deste estudo se insere em um contexto mais amplo de incentivo à Economia Circular, à mitigação das mudanças climáticas, à transição energética e, principalmente, à hierarquia de tratamento e valorização de resíduos prevista na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). A adoção de tecnologias de conversão energética do lodo pode contribuir não apenas para diminuição da dependência de aterros, mas também para a sustentabilidade energética das concessionárias de saneamento, que passam a produzir sua própria energia, reduzindo a sua dependência da matriz energética nacional. Além disso, o aproveitamento do biogás elimina os riscos de vazamento deste nos aterros, contribuindo para a diminuição da emissão de gases de efeito estufa no setor de saneamento urbano, visto que o metano tem poder de aquecimento global ainda mais elevado do que do dióxido de carbono.

Por fim, recomenda-se que estudos futuros aprofundem a avaliação da viabilidade econômica da implantação de biodigestores nas ETEs de Rio Claro, considerando custos de implantação, operação e manutenção, bem como possíveis modelos de financiamento e parcerias público-privadas. Também seria interessante incorporar análises de ciclo de vida, estudos de emissões evitadas e alternativas de aproveitamento do biogás em frotas veiculares ou injeção na rede de gás. A consolidação de dados atualizados sobre o lodo gerado e as características específicas de cada estação é fundamental para embasar tomadas de decisão mais robustas e alinhadas com os princípios da economia circular.

Referências Bibliográficas

AGRAWAL, Lalit Kumar; HARADA, Hideki; OKUI, Hiroyuki. Treatment of Dilute Wastewater in a UASB Reactor at a Moderate Temperature: Performance Aspects. **Journal of Fermentation and Bioengineering**, v. 83, n. 2, p. 179–184, 1997.

ANA. **Atlas Esgotos**. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/atlasesgotos/>>. Acesso em: 14 jan. 2025.

ANDREOLI, Cleverson. **Usos Alternativos de Lodos de Estações de Tratamento de Água e Estações de Tratamento de Esgoto**. Curitiba - PR: [S.n.].

ANP, Ministério de Minas e Energia. **Resolução 852 2021 da ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis BR**. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-852-2021-regulamenta-o-exercicio-da-atividade-de-producao-de-derivados-de-petroleo-e-gas-natural-seu-armazenamento-sua-comercializacao-e-a-prestacao-de-servico-e-da-outras-providencias?origin=instituicao&q=852/2021>>. Acesso em: 4 out. 2024.

ARES PCJ. **Agenda Regulatória 2023**. Americana: ARES PCJ, [S.d.]. Disponível em: <www.arespcj.com.br>.

ASPACER. **Polo Cerâmico de Santa Gertrudes em pauta. Associação Paulista das Cerâmicas de Revestimento**, [S.d.]. Disponível em: <<http://www.aspacer.com.br/2016/06/01/polo-ceramico-de-santa-gertrudes-em-pauta/>>. Acesso em: 17 fev. 2025

BRAILE, P. M.; CAVALCANTI, J. E. A. W. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais**. São Paulo, CETESB: [S.n.].

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020**, 19 ago. 2020. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=797>. Acesso em: 4 out. 2024

BRASIL. **Ministério do Desenvolvimento Regional. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS)**. Portal Cidades, gov.br; Brasília, [ano]. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/es>>. Acesso em: 22 jun. 2025.

BRK AMBIENTAL. **Relatório técnico sobre o sistema de esgotamento sanitário de Rio Claro**. Relatório interno enviado por e-mail ao autor, Rio Claro, mar. 2025.

COELHO, Suani Teixeira. **Atlas de bioenergia do Estado de São Paulo**. São Paulo, SP: Iee-Usp, 2021.

COMITÊ PCJ. **Relatório da situação dos recursos hídricos 2017 UGRHI 05 - Bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí**. [S.l.: S.n.]. . Acesso em: 25 ago. 2024.

CONSÓRCIO PCJ. **Rio Claro investe em nova tecnologia para tratamento de esgoto**. Disponível em: <<https://agua.org.br/noticias/rio-claro-investe-em-nova-tecnologia-para-tratamento-de-esgoto/>>. Acesso em: 17 fev. 2025.

DAAE. **Daae visita Estações de Tratamento de Esgoto do município | Prefeitura Municipal de Rio Claro**. Disponível em: <https://rioclaro.sp.gov.br/daae/daae-visita-estacoes-de-tratamento-de-esgoto-do-municipio/?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 17 fev. 2025.

EPE, Empresa de Pesquisa Energetica. **Mercado de energia elétrica**. , 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Clima e energia**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/clima-e-energia>>. Acesso em: 22 jun. 2025.

FNR. Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung. **Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Leipzig**, 2012.

GE JENBACHER. **Technical description: cogeneration unit JMS 616 GS-N.L – J616**. Jenbach, Austria, 2011.

HAANDEL, Adrianus C. van; LETTINGA, Gatze. **Tratamento anaerobio de esgotos: um manual para regiões de clima quente**. Campina Grande: PB, 1994. v. 1

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

HEADCAST. **Como o biogás e o biometano podem contribuir para a transição energética brasileira?**, [S.d.]. Disponível em:

<<https://open.spotify.com/episode/2ApazY9fEif8nFtInlgQuL?si=sMooaor4QN-l32tV8KaMlw>>. Acesso em: 24 fev. 2025

IBGE. **Rio Claro (SP) | Cidades e Estados | IBGE**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/rio-claro.html>>. Acesso em: 17 fev. 2025.

JORNAL CIDADE RC. **ETE Jardim Novo se torna referência em tecnologia - Jornal Cidade RC**. Disponível em: <https://www.jornalcidade.net/rc/ete-jardim-novo-se-torna-referencia-em-tecnologia/238845/?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 17 fev. 2025.

LIMA, Heleno Quevedo de. **Mapa do biogás no Brasil e no mundo - Portal Energia e Biogás**. Disponível em: <<https://energiaebiogas.com.br/>>. Acesso em: 11 set. 2024a.

LIMA, Heleno. **Biogás - Portal Energia e Biogás**. Disponível em: <<https://energiaebiogas.com.br/>>. Acesso em: 11 set. 2024b.

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgotos domésticos**. Tese de Doutorado—Belo Horizonte - MG: UFMG – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 2011.

NEREDA. **Nereda® technology**. Royal HaskoningDHV. Disponível em: <<https://www.nereda.com/en/nereda-technology/>>. Acesso em: 22 jun. 2025.

NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J. E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour control and energy/resource recovery. **Reviews in Environmental Sciences and Bio/ Technology**, v. 5, p. 93–114, 2006.

NUNES, Jose Alves. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais**. 3. ed. Aracaju: Triunfo, 2001.

OLIVEIRA, A. D. S. **Tratamento de esgoto pelo sistema de lodos ativados no Município de Ribeirão Preto, SP: Avaliação da remoção de metais pesados**. Mestrado—Ribeirão Preto: Escola de Enfermagem de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, 2006.

PACCO, Honorato Ccalli; CORTEZ, Luís Augusto Barbosa. **UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS PARA RESFRIAMENTO E SECAGEM DE HORTALIÇAS**. 2006.

PLANSAB. **Painel Indicadores de Acesso ao Saneamento Básico**. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/plano>>

-nacional-de-saneamento-basico-plansab/painel-indicadores-de-acesso-ao-saneamento-basico
>. Acesso em: 9 set. 2024.

PNRS. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2022.

PROBIOGÁS. **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás**. [S.l.]: Ministério das Cidades, 2015.

PROBIOGÁS. **Guia Técnico de Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto**. 2a. edição ed. Brasília: Ministério das Cidades, 2017.

SÃO PAULO. **Plano Paulista de Energia**. , 2020. . Acesso em: 7 out. 2024

SILVA, Giovanna Santana Oliveira. **Estimativa da produção de biogás a partir da digestão anaeróbia do lodo gerado nas principais estações de tratamento de esgoto da região metropolitana de Aracaju**. 2022.

SOUZA, A. R. de et al. **Análise do potencial de aproveitamento energético de biogás de aterro e simulação de emissões de gases do efeito estufa em diferentes cenários de gestão de resíduos sólidos urbanos em Varginha (MG)**. Engenharia Sanitaria e Ambiental, [s. l.], v. 24, p. 887–896, 2019.

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F.; STENSEL, H. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4. ed. New York: McGraw-Hill: Metcalf & Eddy, Inc, 2003.

TELLES, Dirceu D’Alkmin; COSTA, Regina Helena Pacca Guimarães. **Reúso da água: conceitos, teorias e práticas**. 2. ed. São Paulo, SP: E. Blucher, 2010.

TISI, Yuri Schmitke Almeida Belchior; MATOS, Flavio Arantes; CARNEIRO, Maria Luisa Nerys de Moraes. **Guia nacional de valorização energética de resíduos sólidos no contexto da gestão integrada e sustentável**. Brasília: [S.n.].

URBAN. Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz. **Resultados do estudo de mercado 2007 – 2008**, Oberhausen 2009.

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

VAN HAANDEL, A.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbico de esgoto. Um manual para regiões de clima quente**. Campina Grande, Brasil: Universidade Federal da Paraíba, 1994.

VON SPERLING, Marcos. **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: *[S.n.]*. v. 1

WEF – Water Environment Federation (2009). Design of Municipal Wastewater Treatment Plants – Manual of Practice No. 8 (MOP 8), 5th Edition. Alexandria, VA: Water Environment Federation