

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

Estudo preliminar de biodigestores no Restaurante Universitário - UNESP Rio Claro

Vinicius Amadeu Zacatei

Prof. Dr. Marcus Cesar Avezum Alves de Castro

Rio Claro (SP)

2025

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

VINICIUS AMADEU ZACATEI

ESTUDO PRELIMINAR DE BIODIGESTORES NO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO - UNESP RIO CLARO

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

Z13e

Zacatei, Vinicius Amadeu

Estudo preliminar de biodigestores no Restaurante Universitário – UNESP Rio Claro

/ Vinicius Amadeu Zacatei. -- Rio Claro, 2025

52 p. : tabs., fotos

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

Orientador: Marcus Cesar Avezum Alves de Castro

1. Digestão anaeróbia. 2. Resíduos alimentares. 3. Resíduos orgânicos. 4. Metano. 5.
Cocção. I. Título.

VINICIUS AMADEU ZACATEI

ESTUDO PRELIMINAR DE BIODIGESTORES NO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO - UNESP RIO CLARO

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

Marcus Cesar Avezum Alves de Castro (Orientador)

Marcelo Loureiro Garcia

Ademir Abdala Prata Junior

.

.

Rio Claro, 25 de novembro de 2025.

Assinatura do(a) aluno(a)

Assinatura do(a) orientador(a)

RESUMO

A inexistência de uma rota de aproveitamento para a fração orgânica dos resíduos gerados no Restaurante Universitário da UNESP Rio Claro configura um problema relevante para a gestão ambiental do campus, ao manter a dependência de práticas convencionais de descarte e inviabilizar o processo de valoração energética desse material. Diante desse cenário, este estudo avaliou a aplicação da digestão anaeróbia como alternativa de tratamento para aproveitamento energético dos resíduos alimentares, via produção de biogás, e a viabilidade de uso para a cocção. O trabalho seguiu a metodologia estruturada em quatro etapas descritas como: caracterização dos resíduos orgânicos, estimativa da produção de metano, definição do arranjo operacional do sistema de bateladas seguido do estudo econômico preliminar. A caracterização foi realizada com base nos dados de geração do restaurante universitário do campus da UNESP de Rio Claro. Em seguida, a produção potencial de metano foi estimada por meio da cinética de Gompertz modificada. A produção de biogás modelada pela cinética química permitiu determinar o volume da mistura equivalente energeticamente de GLP, evidenciando a quantidade de biogás disponível para uso na cocção, que subsidiaram o estudo econômico. Os resultados demonstraram uma produção potencial de 974,06 m³/ano de biogás, o valor presente líquido (VPL) de aproximadamente R\$10 mil, taxa interna de retorno (TIR) próxima de 35% e *Payback* em torno de 2,75 anos, demonstrando o potencial de retorno financeiro do sistema. Portanto, a implantação de biodigestores apresenta-se como alternativa ambientalmente adequada e economicamente consistente para reorganizar a destinação dos resíduos orgânicos do RU, evidenciando sua relevância como tecnologia sustentável aplicável ao contexto universitário.

Palavras-chave: Digestão anaeróbia; Resíduos alimentares; Resíduos orgânicos; Metano; Cocção

ABSTRACT

The lack of a utilization route for the organic fraction of waste generated at the UNESP Rio Claro University Restaurant represents a significant problem for the campus's environmental management, as it maintains dependence on conventional disposal practices and hinders the energy recovery process of this material. Given this scenario, this study evaluated the application of anaerobic digestion as an alternative treatment for energy recovery from food waste, via biogas production, and the feasibility of its use for cooking. The work followed a methodology structured in four stages described as: characterization of organic waste, estimation of methane production, definition of the operational arrangement of the batch system followed by a preliminary economic study. The characterization was carried out based on the generation data from the university restaurant on the UNESP Rio Claro campus. Subsequently, the potential methane production was estimated using modified Gompertz kinetics. The production of biogas modeled by chemical kinetics allowed the determination of the volume of the mixture energetically equivalent to the volume of LPG, highlighting the amount of biogas available for use in cooking, which supported the economic study. The results demonstrated a potential production of 974,06 m³/year of biogas, a net present value (NPV) of approximately R\$10,000, an internal rate of return (IRR) close to 35%, and a payback period of around 2.75 years, demonstrating the potential for financial return of the system. Therefore, the implementation of biodigesters presents itself as an environmentally adequate and economically consistent alternative to reorganize the disposal of organic waste from the university restaurant, highlighting its relevance as a sustainable technology applicable to the university context.

Keywords: Anaerobic digestion; Food waste; Organic waste; Methane; Cooking

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Panorama dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.....	4
3.2 Cinética Química em Biodigestores.....	6
3.3 Modelos cinéticos.....	7
3.4 Modelos de reatores e parâmetros operacionais.....	9
3.4.1 Diluição.....	11
3.4.3 Vazão de entrada.....	11
3.4.3 Determinação do volume.....	12
3.5 Aproveitamento energético e adequação ao uso.....	12
3.6 Relevância social da aplicação de biodigestores.....	15
3.7 Análise de sustentabilidade financeira.....	16
3.7.1 Custo de implantação e Operação.....	17
3.7.2 Fluxo de caixa.....	18
3.7.3 Cálculo do Valor Presente Líquido (VPL).....	18
3.7.4. Cálculo da Taxa Interna de Retorno.....	19
3.7.5. Cálculo do Payback.....	20
4. METODOLOGIA.....	21
4.1 Concepção Geral.....	21
4.2 Caracterização Do Substrato.....	22
4.3 Dimensionamento Do Biodigestor.....	23
4.4 Cinética Química.....	24
4.5 Definição Do Sistema Bateladas Em Paralelo.....	25
4.6 Utilização Do Biogás.....	26
4.7 Composição Física Dos Biodigestores.....	27
4.8 Análise de sustentabilidade financeira.....	28
4.8.1 Custo de implantação e Operação.....	29
4.8.2 Receitas projetadas.....	29
4.8.3 Fluxo de caixa.....	29
4.8.4 Cálculo do Valor Presente Líquido (VPL).....	29
4.8.5 Cálculo da Taxa Interna de Retorno.....	30
4.8.6 Cálculo do Payback.....	30
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
5.1 Caracterização do Substrato.....	31
5.2 Dimensionamento do Biodigestor.....	31
5.3 Cinética química e seus parâmetros.....	33
5.4 Definição Do Sistema De Bateladas.....	33
5.5 Uso do Biogás.....	35
5.6 Composição física dos biodigestores.....	36
5.7 Análise de viabilidade econômica.....	39
6. CONCLUSÃO.....	42
7. REFERÊNCIAS.....	44

1. INTRODUÇÃO

Ao longo do século XIX e XX, a humanidade presenciou um processo de crescimento populacional nunca visto antes. Induzido por processos históricos como a revolução industrial e a revolução verde, combinados com aspectos como o aumento da expectativa de vida, a redução da mortalidade infantil possibilitou que o crescimento humano, que antes descrevia seu aumento como uma curva estável, assumisse uma postura exponencial. A população que no começo do século XX era de 1,6 bilhões de habitantes saltou para cerca de 6,1 bilhões de habitantes no começo do século XXI. Porém, este crescimento trouxe consigo consequências que reverberam até os dias atuais (DURÃO, 2021).

O crescimento urbano acelerado e sem planejamento, desencadeado dentre muitos fatores pelo crescimento populacional, ocasionou um crescimento proporcional da quantidade de resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados pela população humana. Esta dinâmica evidenciou o colapso do sistema de gestão de resíduos sólidos da época, que não conseguia lidar com os novos tipos, volume e a logística que envolvia a geração de resíduos sólidos urbanos, ocasionando descartes inadequados, ausência de aproveitamentos energéticos e tratamento dos resíduos.

Dessa forma, tanto os fatores quanto às consequências mencionadas anteriormente foram observados no Brasil. A população que no começo do século XX era de 17,5 milhões (IBGE, 2000), saltou para 193,7 milhões em 2010 (IBGE, 2010). O crescimento populacional somado a fatores como estabilidade, crescimento do PIB e aumento da expectativa de vida colocaram o Brasil entre os 5 maiores geradores de Resíduos Sólidos Urbanos (AGÊNCIA BRASIL, 2019). Com cerca de 77,1 milhões de toneladas geradas no ano de 2022, sua gestão ainda não atingiu a totalidade, principalmente quando direcionada aos resíduos sólidos orgânicos, por desfrutar de um potencial energético. A fração orgânica no RSU brasileiro é de cerca de 51%, sendo igual a 39,3 milhões de toneladas.

Os resíduos orgânicos são gerados desde residências, indústrias, empresas e até em instituições de ensino. Seu tratamento energético, a partir do processo bioquímico de digestão anaeróbica, gera como produto além de matéria residual usada como biofertilizante, uma mistura de gases metano, carbônico e sulfídrico, sendo conhecido como biogás. Seu potencial energético se reserva apenas ao gás metano, podendo o biogás ser manipulado para alcançar um estado de pureza energética elevada. Dessa forma, seu aproveitamento energético se torna viável para diferentes aplicações, desde a substituição do GLP, utilização como combustível veicular, utilização para geração de eletricidade e para geração de calor. Com isso, fica evidente a falha da gestão dos resíduos sólidos urbanos quanto ao tratamento e destinação dos resíduos orgânicos, que possuem por natureza possibilidade de uso sustentável e rentável deste resíduo.

Tendo em vista o contexto da tendência do crescimento exponencial da população juntamente com o crescimento proporcional da geração de volumes elevados de Resíduos sólidos urbanos, é de extrema importância adotar um manejo correto dos resíduos orgânicos, explorando o potencial energético existente na matéria orgânica. Dessa forma, o presente trabalho tem como foco principal desenvolver uma análise técnico-energética do aproveitamento de resíduos orgânicos do Restaurante Universitário da UNESP Campus Rio Claro.

Segundo exposto por Medeiros *et al.* (2019), a gestão de resíduos sólidos dentro de uma comunidade universitária transcende a simples operação administrativa e se configura como uma oportunidade educacional e de inovação. Isso porque as universidades têm a capacidade de atuar como laboratórios vivos, onde se experimentam e implementam soluções inovadoras para problemas ambientais, servindo assim de modelo para a sociedade em geral. Desse modo, o desenvolvimento e manejo correto de um plano de gestão para os resíduos orgânicos em ambientes universitários possui diferentes virtudes. Logo, discutir sobre os impactos provenientes do aproveitamento energético dos resíduos orgânicos do Restaurante Universitário da UNESP Campus Rio Claro justifica-se a partir do desenvolvimento de sistema de tratamento dos resíduos sólidos orgânicos, com posterior aproveitamento econômico e energético do produto da valorização do resíduo, principalmente do biogás.

Além destes aspectos, temos a criação de laços entre os alunos com práticas reais da engenharia ambiental, com enfoque na construção e operação de uma economia circular dentro do campus. Dessa forma, serão analisados no presente trabalho os aspectos positivos do desenvolvimento do sistema de gestão dos resíduos orgânicos a partir da implantação de biodigestores em paralelo e da análise das viabilidades que compõem o modelo.

Com isso, os impactos desenvolvidos pelos aspectos que constroem o sistema variam desde a destinação e tratamento correto do resíduo sólido orgânico gerado no RU, geração de economia no RU a partir da substituição do uso térmico do biogás com a opção de uso como gás de cozinha, integração do sistema com o público universitário a partir de projetos de extensão e programas promovidos pela UNESP, análise da geração e do possível aproveitamento do biofertilizante, e a construção de um modelo sustentável e autossuficiente.

Desse modo, o sistema visa impactar diretamente na dinâmica atual da gestão de resíduos sólidos orgânicos no campus. Sendo assim, o presente trabalho estabeleceu como problema de pesquisa: como dimensionar e modelar, de forma técnico-econômica, um sistema de digestão anaeróbica aplicado ao tratamento de resíduos orgânicos do Restaurante Universitário da UNESP Campus Rio Claro, capaz de quantificar a valoração energética e sua transformação em biogás, explorando a viabilidade econômica do uso térmico e as demais viabilidade que cercam o sistema.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral modelar, sob os aspectos técnicos e econômicos, um sistema de digestão anaeróbia aplicado ao tratamento e ao aproveitamento energético dos resíduos orgânicos gerados no Restaurante Universitário da UNESP Campus Rio Claro.

Os objetivos específicos que serão empregados para que a finalidade de pesquisa seja alcançada foram:

- Dimensionar e modelar o volume do biodigestor para o cenário analisado;
- Determinar o potencial de geração de biogás e metano;
- Estimar o potencial de aproveitamento energético do metano para a cocção de alimentos (geração de calor);
- Estudo preliminar dos custos e receitas do aproveitamento do biogás para cocção.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Panorama dos resíduos sólidos urbanos no Brasil

A gestão dos resíduos sólidos representa um dos eixos para a consagração do saneamento básico desejado para o Brasil, conforme apresentado pela Lei nº 11.445/2007, também conhecida como Política Federal do Saneamento Básico. Tal implicação encontra dificuldades de ser alcançada, conforme os fatores listados por Nascimento *et al.* (2015). A destinação final inadequada direciona o resíduo coletado em partes para lixões e aterros controlados, com baixo nível de tratamento, enquanto as frações orgânicas e recicláveis possuem capacidade de serem reaproveitadas inexploradas, e a falta de conscientização ambiental, dada a baixa adesão da população a práticas sustentáveis. Desse modo, para que a gestão eficiente dos resíduos sólidos ultrapasse seus entraves para alcançar as condições essenciais de avanço das metas de saneamento básico e sustentabilidade no país, exige-se mudanças bruscas no paradigma atual.

O marco legal que regulamentou a gestão de resíduos no Brasil foi a política nacional de resíduos sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010. Dentre as contribuições, a norma estabeleceu a ordem de prioridade no manejo dos RSU, baseadas na ordenação de não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final adequada, além de introduzir instrumentos inovadores, como a logística reversa e a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida útil do produto. Porém, mesmo com arcabouço legal robusto existente para a gestão de resíduos sólidos, quando observada a realidade suas aplicações continuam enfrentando empecilhos.

Conforme abordado por Silva *et al.* (2020), entre os principais desafios, destacam-se a ausência de infraestrutura adequada, a insuficiência de recursos técnicos e financeiros e a carência de planejamento de longo prazo, especialmente em municípios de pequeno e médio porte, evidenciando um valor de disposição inadequada de RSU de 40,5% do total encaminhado para a destinação final no país para o ano de 2018, revelado no panorama de 2023 elaborado por ABREMA (2024).

Em consonância, Nascimento *et al.* (2015) ressaltam que a adesão social reduzida quanto ao manejo dos RSU observado em sua gestão retrata um modelo resumido em ações corretivas de curto prazo, essencialmente a coleta e disposição final. Essa postura conserva a dependência de métodos convencionais para a gestão, prolongando a sobrecarga dos aterros sanitários e dos impactos pela disposição final inadequada. Com isso, o desafio atual não reside na ausência de políticas, mas na sua efetiva execução e integração aos contextos locais e sociais, para que assim, ao reduzir a dependência por soluções corretivas e consolidar práticas de gestão sustentáveis, se possa incorporar a valorização das frações orgânicas.

Além disso, outro fator limitante da aplicação eficiente da gestão dos resíduos sólidos urbanos, alinhada aos requisitos da PNRS, é a ausência de diagnósticos gravimétricos

consistentes sobre a própria geração de resíduos nos centros urbanos. Freitas *et al.* (2024) reforçam a ausência de diagnóstico sobre a geração, composição e destinação de resíduos como uma das fraquezas observadas para a gestão dos resíduos sólidos urbanos em grande parte dos municípios, porém manifestada principalmente em pequeno a médio porte. Tal conjuntura fragiliza o planejamento, impede a adoção de soluções alinhadas às diretrizes da PNRS e ao cumprimento dos requisitos e metas estabelecidos por esta.

De acordo com ABREMA (2024), a geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil para o ano de 2023 apresentou valor de 80,95 milhões de toneladas, com uma taxa média de 1,047 kg por habitante ao dia. Além disso, as frações que compreende o RSU são decompostas em 45,7% de resíduos orgânicos, como perdas de alimentos, resíduos verdes e madeiras; 33,6%, sendo compostos principalmente por plásticos; 16,8% de papel e papelão; 10,4% vidros; 2,7%, metais; 2,3%, e 1,4% embalagens laminadas. Outros resíduos somam 21,1%, dentre os quais resíduos têxteis, couros e borrachas representam 5,6% e rejeitos, estes, compostos principalmente por resíduos sanitários, somam 15,5%. A gravimetria nacional foi estimada com base na média ponderada, a partir da geração total de RSU por faixa de renda dos municípios e respectivas composições, levando-se em consideração a população e geração per capita ABREMA (2020).

Essa circunstância compromete a eficiência da gestão, já que a fração orgânica responsável por 45,3% da massa na composição de dos resíduos urbanos permanece subaproveitada. A continuidade desse modelo tende a intensificar problemas como o esgotamento das áreas de disposição, a emissão de gases de efeito estufa e o desperdício de potencial energético. Dessa maneira, os dados reforçam que a estrutura atual de gerenciamento não atende plenamente aos princípios da sustentabilidade, evidenciando a necessidade de incorporar soluções tecnológicas locais que permitam tratar e aproveitar a matéria orgânica de forma ambientalmente adequada.

Diante disso, os restaurantes universitários se destacam como fontes geradoras constantes de resíduos alimentares, uma vez que lidam diariamente com grandes volumes de alimento preparado e descartado. Nesse sentido, estudos nacionais mostram que esses estabelecimentos apresentam índices per capita entre 0,113 e 0,281 kg/refeição, conforme descrito no estado da arte elaborado por Moura (2017), a partir da avaliação de nove restaurantes universitários. Esses dados confirmam que o RU é uma fonte relevante de matéria orgânica e um local estratégico para aplicação de tecnologias de aproveitamento, como a digestão anaeróbia. A literatura expõe que resíduos alimentares possuem a razão de SV/ST entre 85 – 100%, caracterizando um substrato altamente biodegradável e adequado à digestão anaeróbia (Zhang *et al.*, 2007; Zhang *et al.* 2011; Zhang *et al.* 2013). Desse modo, torna-se evidente que a valorização da fração orgânica é um ponto crítico e os restaurantes universitários despontam

como espaços estratégicos para avançar esse potencial, justificando a análise aprofundada de sua geração e tratamento.

3.2 Cinética Química em Biodigestores

A cinética química consiste na área da química que busca compreender as velocidades das reações, considerando os fatores que influenciam a taxa de conversão do substrato em produto. Teve seu primeiro marco estabelecido na pesquisa conduzida por Wilhelmy (1850), que na busca de compreender a hidrólise da sacarose em meio ácido, desenvolveu uma lei de velocidade experimental específica para o seu caso. Posteriormente, os autores Guldberg e Waage (1864), desenvolveram a primeira lei da cinética química empírica, que correlaciona a concentração de reagentes com a velocidade de reação química (Souza, 2022). Tal fato modificou a abordagem da cinética química, que antes era empírica e descritiva, em uma ferramenta quantitativa, que permite a compreensão dos processos reacionais, disseminando sua aplicação em diferentes áreas, entre elas, a engenharia química, a bioquímica e a engenharia ambiental (Aguiar, 2010).

Dentro do contexto da engenharia ambiental, a cinética química é empregada na avaliação e prevenção do comportamento das reações que ocorrem nos sistemas ambientais, sendo eles naturais ou artificiais. Sua aplicação se manifesta em áreas como tratamento de efluentes, remediação de solos e águas contaminadas, controle de emissões e aproveitamento de resíduos orgânicos. Os estudos cinéticos para a abordagem bioquímica permitem assimilar o comportamento dos reagentes, evidenciando substratos preferenciais e sua competição, a elaboração de procedimentos sintéticos e eficientes, com o controle dos parâmetros que afetam a reação em sistemas bioquímicos, e os fatores que influenciam sua velocidade, favorecendo o desenvolvimento de processos mais eficientes.

Dentre as aplicações que utilizam a cinética química na engenharia ambiental, destaca-se a digestão anaeróbica, processo que é responsável por representar a dinâmica bioquímica existente na conversão da matéria orgânica em biogás pela ação de microrganismos.

Desse modo, o emprego da cinética bioquímica para a digestão anaeróbica consiste nas quatro etapas de conversão de resíduos orgânicos em biogás e biofertilizantes caracterizadas abaixo:

- **Hidrólise:** Etapa inicial, responsável por converter proteínas, lipídios e carboidratos em moléculas menores e solúveis como aminoácidos, açúcares e ácidos graxos. Essa fase é geralmente a etapa limitante do processo, por depender da ação enzimática extracelular.
- **Acidogênese:** Fase em que os produtos formados na hidrólise são transformados em

ácidos graxos voláteis (AGVs), álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono, conduzida por bactérias fermentativas.

- **Acetogênese:** Etapa intermediária, em que os AGVs e álcoois produzidos no passo anterior são oxidados em acetato, hidrogênio e CO_2 , compostos que servem de substrato direto para a microbiota de arqueias metanogênicas.
- **Metanogênese:** Etapa final, na qual o acetato e o hidrogênio são convertidos em metano (CH_4), fechando o ciclo biogeoquímico da matéria orgânica.

3.3 Modelos cinéticos

A cinética bioquímica para os processos de degradação anaeróbica da matéria orgânica possui seu comportamento definido por diferentes modelos cinéticos, desenvolvidos sob distintas condições experimentais e com diferentes graus de simplificação, que em conjunto buscam representar a dinâmica global de conversão da matéria orgânica em biogás. Os modelos bioquímicos, conforme Queen (2006) podem ser classificados em dois grupos:

- **Modelos mecanísticos**, como o Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1), que descrevem detalhadamente as reações bioquímicas, a dinâmicas físico-químicas e as inibições microbianas, a partir de equações diferenciais complexas, exigindo calibração de dezenas de parâmetros experimentais Batstone *et al.* (2002).
- **Modelos empíricos**, que buscam representar o comportamento observado dos sistemas de forma simplificada, a partir da relação encontrada experimentalmente da produção de biogás ao tempo ou à carga orgânica aplicada.

Entre eles, destacam-se os modelos de primeira ordem, Monod, Contois, Grau, Stover–Kincannon e a cinética de Gompertz modificada, amplamente utilizada em sistemas em batelada Maleki *et al.* (2018).

Esses modelos se caracterizam por representar o comportamento global do processo a partir de ajustes experimentais, dispensando a descrição detalhada das reações bioquímicas internas e reduzindo a complexidade matemática envolvida. Essa postura oferece estruturas matemáticas mais simples e adequadas para estudos preliminares e aplicações em pequena escala, conforme discutido por Maleki *et al.* (2018).

Dentro dos modelos cinéticos empíricos, destacam-se três aplicações amplamente reconhecidas, as quais possuem suas particularidades. A cinética de primeira ordem tem sua relevância pela sua simplicidade ao representar tanto a degradação da matéria orgânica, quanto a produção de biogás. No entanto, suas vantagens tornam-se suas fraquezas quando o cenário exige precisão nas estimativas. Desta forma, como descrito por Maleki *et al.* (2018), o modelo cinético possui como limitação a descrição de processos que utilizam de composições do substrato baseado em frações heterogêneas.

Já o modelo de Monod, cuja característica é dada por descrever como a taxa de crescimento microbiano, se comporta em função da concentração do substrato. Porém, conforme destaca Moreira (2021), a capacidade do modelo de prever a produção acumulada de metano é limitada, pelo fato de que o modelo prioriza compreender o metabolismo celular no lugar da evolução do volume de biogás.

Por fim, a cinética química de Gompertz modificada tem sua significação dada por representar com precisão a produção acumulada de metano ao longo do tempo. Conforme exposto Maleki *et al.* (2018), o modelo captura de maneira consistente o formato sigmoidal típico das curvas experimentais em batelada, ilustrando as fases de latência, crescimento exponencial, seguido pela estabilização, sendo esta relação exposta pela figura 1 a seguir:

Figura 1: Modelo cinético de Gompertz Modificado

$$B(t) = B_0 \cdot \exp \left\{ - \exp \left[\frac{R_m \cdot e}{B_0} \cdot (\lambda - t) + 1 \right] \right\}$$

Fonte: Zwietering et al. (1990); Lay et al. (1997)

Sendo que:

$B(t)$ = produção acumulada de metano no tempo t (mL CH₄ gSV⁻¹)

B_0 = potencial máximo de produção específica de metano (mL CH₄ gSV⁻¹)

R_m = taxa máxima de produção de metano (mL CH₄ gSV⁻¹ d⁻¹)

λ = tempo de latência em dias (d).

t = tempo de reação em dias (d).

e = número de Euler

Entre as formulações empíricas existentes, o modelo de Gompertz apresenta melhor adequação ao comportamento experimental de digestores em batelada, enquanto os modelos de Monod e suas derivações descrevem prioritariamente o crescimento microbiano. Gompertz permite representar de forma fiel a produção acumulada de metano ao longo do tempo, considerando as fases de latência, crescimento exponencial e estabilização. Com isso, a

aplicação desse modelo fundamenta-se em sua capacidade de ajuste, simplicidade operacional e adequação às características cinéticas e experimentais do sistema avaliado.

Cabe destacar que a aplicação dos modelos empíricos na digestão anaeróbia pode representar, de modo geral, dois cenários distintos determinados pela presença ou ausência de fatores inibitórios no substrato. No cenário ideal, representado por resíduos homogêneos e livres de compostos inibidores, os ensaios tendem a registrar potenciais metanogênicos elevados, conforme observado por Blasius (2019), que em seu estudo utiliza como substratos do teste de potencial bioquímico de metano (BMP) frações estáveis e mais facilmente degradáveis. Desta forma, o autor obteve valores elevados correspondendo a $869 \text{ mL CH}_4 \cdot \text{gSV}^{-1}$, refletindo uma condição de degradação e de alta disponibilidade de substrato.

Em contraste, o cenário realista abrange resíduos alimentares totais, característicos de restaurantes institucionais, cuja heterogeneidade estrutural e a presença de lipídios, proteínas complexas e até a presença de saliva reduzem o desempenho cinético. Estudos que investigaram a biodegradação de resíduos alimentares mistos descrevem faixas típicas entre 350 e 600 $\text{mL CH}_4 \cdot \text{gSV}^{-1}$. Os fatores de conversão que compõem este intervalo, para os resíduos alimentares, correspondem aos valores de 363 $\text{mL CH}_4 \cdot \text{gSV}^{-1}$ reportados por Neves *et al.* (2006), 410 $\text{mL CH}_4 \cdot \text{gSV}^{-1}$ exposto por Zhang *et al.* (2013) e por 525 $\text{mL CH}_4 \cdot \text{gSV}^{-1}$ descrito por Lissens *et al.* (2004), evidenciando a redução do potencial de metano quando todo o resíduo é considerado.

Essa distinção entre condições ideais de laboratório e a complexidade dos resíduos reais fornece a base para a interpretação dos parâmetros cinéticos aplicados posteriormente na modelagem. Em síntese, a literatura evidencia que os modelos e parâmetros cinéticos refletem as particularidades do substrato e o comportamento global da digestão, constituindo a base teórica para as análises seguintes.

3.4 Modelos de reatores e parâmetros operacionais

Os sistemas de biodigestão anaeróbia podem ser classificados a partir do seu regime de alimentação, sendo divididos em dois diferentes grupos, os reatores de fluxo contínuo e descontínuo. Nos sistemas contínuos, a alimentação do substrato e a retirada do digestato ocorrem simultaneamente, permitindo operação permanente e produção constante de biogás. Essa configuração é típica de reatores como o UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) e o CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor), amplamente aplicados em efluentes líquidos de baixa carga orgânica (Chernicharo, 2019; Cibiogás, Unido, 2022).

Em contrapartida, os reatores de fluxo descontínuo, como o reator batelada, recebem o

substrato em uma única etapa, permanecendo fechados durante o período de digestão. Após a estabilização da matéria orgânica, o reator é descarregado e preparado para o próximo ciclo.

Essa operação simplificada dispensa sistemas de agitação e bombeamento contínuo, reduzindo significativamente os custos construtivos e operacionais (Angelidaki; Sanders, 2004). O reator batelada também permite o monitoramento completo da curva de produção de biogás, característica essencial para a calibração de modelos cinéticos empíricos, como o de Gompertz Blasius (2018).

A operação de sistema em batelada tradicional apresenta irregularidades na concentração de biogás produzida, existindo picos de produção após a partida do reator, graças a entrada do substrato com presença de inóculo. Seguida por uma queda e estabilização em baixas proporções de metano, estas alterações foram desencadeadas pelo fato de que a alimentação do biodigestor é realizada de maneira periódica, havendo assim pulsos de produção de biogás que se sobrepõem às partidas dos reatores, conforme descrito por Marcucci (2018) .

A adoção de múltiplos reatores do tipo batelada, operando em paralelo ao mesmo tempo que supre as deficiências de produções irregulares de biogás, possui menor complexidade construtiva e operacional quando comparadas com modelos de biodigestores de alimentação contínua, como o CSTR e do tipo Plug Flow.

Tal fato é evidenciado no estudo de Santos (2021), uma pesquisa comparativa entre o desempenho da produção de biogás de um biodigestor tipo batelada e um sistema de 5 biodigestores do tipo batelada em paralelo. A coleta e análise dos dados gerados por ambas circunstâncias evidenciam que o sistema em paralelo possui aspectos vantajosos como uma produção maior e mais estável, além de baixo custo para construção e manutenção do sistema.

Além disso, os principais parâmetros de dimensionamento e estabilidade desses sistemas são variáveis, essenciais para a operação estável do processo de biodigestão. O TDH expressa o tempo médio de permanência do substrato no interior do reator, influenciando o grau de degradação e a eficiência da metanogênese. Em reatores operando sob condições mesofílicas, a literatura recomenda faixas entre 15 e 40 dias, enquanto em regime termofílico esse valor pode ser reduzido para 10 a 25 dias, devido à maior taxa metabólica das arqueias metanogênicas Schmeier (2017). Já a COV, que representa a quantidade de sólidos voláteis aplicados por volume útil e por dia, é normalmente mantida entre 3,5 e 6,0 kgSV·m⁻³·d⁻¹ para resíduos alimentares (Schmeier, 2017; Zaiat, 2005).

A operação fora dessas faixas compromete a estabilidade do sistema. Ao mesmo tempo que os valores excessivos de COV tendem a causar acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs) e consequente inibição da metanogênese, tempos de retenção hidráulica (TRH) muito longos reduzem a produtividade volumétrica e o rendimento energético do reator. Dessa forma, o equilíbrio entre esses parâmetros é determinante para o desempenho global da digestão

anaeróbia, (Blasius, 2018; Cibiogás e Unido, 2021). Nesse contexto, o dimensionamento do volume do biodigestor é possível graças ao tempo de retenção hidráulica e a carga orgânica volumétrica. Com esses elementos bem determinados, a literatura expõe as relações matemáticas que conectam a carga aplicada, a vazão de alimentação e o volume necessário para garantir estabilidade e desempenho do sistema, listados pelas seções a seguir.

3.4.1 Diluição

Os manuais de engenharia aplicados ao setor evidenciam que a concentração de sólidos voláteis no afluente (S_v) é função direta da carga orgânica volumétrica admissível (COV) e do tempo de retenção hidráulica (TRH), variável fundamental para garantir estabilidade microbiana (Schmeier, 2017; Gueri et al., 2018). Essa relação é expressa pela Equação 1:

$$S_v = COV \times TRH \quad (1)$$

Sendo que:

S_v = concentração de sólidos voláteis no afluente (kgSV/m³)

COV = carga orgânica volumétrica (kgSV/m³·d)

TRH = tempo de retenção hidráulica (d)

Com a concentração ideal de sólidos definida, estima-se o volume total da mistura alimentada ao sistema, determinado a partir da massa de sólidos voláteis biodegradáveis disponível, conforme exposto por Do Amaral et al. (2016) e por diretrizes do CIBiogás; Unido (2022), expresso pela equação 2 a seguir

$$V_T = \frac{M_{sv}}{S_v} \quad (2)$$

Dado que:

V_T : volume total da mistura (m³);

M_{sv} : massa de sólidos voláteis biodegradáveis da batelada (kgSV);

S_v : concentração de SV no afluente (kgSV/m³).

3.4.3 Vazão de entrada

A alimentação do biodigestor é representada por esta etapa. O volume dado após a diluição total é convertido em vazão diária equivalente, procedimento necessário para compatibilizar o modelo bateladas com equações de projeto baseadas em alimentação contínua (CIBiogás; Unido, 2022). A relação é apresentada pela Equação 3:

$$Q = \frac{V_T}{N} \quad (3)$$

Sendo que:

Q = vazão de substrato (m^3/dia)

V_T = volume total alimentado por batelada (m^3/bat),

N = intervalo entre cargas (dias)

3.4.3 Determinação do volume

A partir da vazão e da concentração de sólidos voláteis, o volume útil do reator é estimado utilizando-se a equação clássica de dimensionamento que relaciona alimentação, concentração e carga admissível.

Essa forma de cálculo aparece em manuais setoriais e publicações de referência sobre reatores anaeróbios (Do Amaral *et al.*, 2016; Embrapa, 2019; Probiogás, 2015). A Equação 4 sintetiza essa relação

$$V = \frac{(Q \times S_v)}{COV} \quad (4)$$

Onde:

V = Volume Útil Do Biodigestor (m^3)

Q = Vazão de alimentação do substrato ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)

S_v = Concentração de sólidos voláteis (SV) no afluente ($\text{kg SV} \cdot \text{m}^{-3}$)

COV = Carga orgânica volumétrica de projeto ($\text{kg SV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)

Além disso, recomenda-se a incorporação de um volume adicional de headspace, entre 20% e 30% do volume útil, para amortecer variações de pressão, evitar distúrbios microbiológicos e preservar a estabilidade operacional ao longo da digestão (Probiogás, 2015; Embrapa, 2019). Dessa forma, as equações e parâmetros apresentados compõem a estrutura teórica usada no dimensionamento de biodigestores, fornecendo base conceitual para a aplicação metodológica realizada em estudos de escala institucional.

O controle térmico é outro fator determinante para o equilíbrio microbiológico. A faixa mesofílica (30–40 °C) é a mais utilizada em sistemas descentralizados, por garantir estabilidade e boa taxa de conversão sem necessidade de aquecimento artificial. Já o regime termofílico (50–55 °C), embora proporcione reações mais rápidas, é sensível à variação de pH e à inibição por amônia, exigindo maior controle energético (Gueri, 2017; Martins; Costa, 2022). Com isso, o regime mesofílico se destaca por apresentar melhor relação entre eficiência, custo energético e estabilidade microbiológica, sendo o mais indicado para reatores em escala institucional.

3.5 Aproveitamento energético e adequação ao uso

A digestão anaeróbia tem como principal produto energético o biogás, mistura gasosa

formada pela decomposição da matéria orgânica em ambiente ausente de oxigênio. Sua composição média é de 55% a 70% de metano (CH_4) e 30% a 45% de dióxido de carbono (CO_2), com pequenas frações de sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3) e vapor d'água (Cibiogás; Unido, 2022).

Dentre os componentes que compõem a mistura gasosa, o metano é a única fração responsável pelo poder energético, cujo valor calorífico se situa entre 20 e 25 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$, conferindo-lhe grande potencial para uso térmico e energético em pequena e média escala.

O aproveitamento energético do biogás pode ocorrer por diferentes rotas tecnológicas, a qual a seleção depende do grau de adequação requerido, do volume disponível e da finalidade da aplicação. As principais modalidades incluem o uso térmico direto, a geração elétrica, a cogeração e a produção de biometano, com níveis crescentes de complexidade técnica e de exigência em tratamento do combustível listados na tabela abaixo com base na literatura da instituição Probiogás (2015).

Tabela 1: Caracterização dos métodos de aproveitamento do biogás

Método de Aproveitamento	Aplicação Principal	Adequação necessária	Custos e Complexidade Operacional
Queima direta em caldeiras	Geração de energia térmica para aquecimento de água, digestores ou secagem de alimentos.	Tratamento de H_2S e remoção de umidade por condensação natural.	Baixo. Equipamento simples, controle manual e baixa exigência de manutenção. Ideal para sistemas descentralizados e institucionais.
Uso térmico em fogões	Cocção de alimentos e substituição direta do GLP em cozinhas industriais.	Dessulfurização e condensação básica. Biogás deve estar seco e com baixo teor de H_2S .	Baixo. Requer apenas regulador de pressão e adaptação de bicos injetores. Aplicação direta e segura.
Motores a gás (geração elétrica)	Geração de energia elétrica local, acoplamento a geradores ou sistemas híbridos.	Dessulfurização rigorosa (remoção >95% de H_2S) Secagem completa. H_2S causa corrosão e incrustação nos pistões e válvulas.	Médio. Exige motor estacionário, alternador e controle de mistura ar/combustível. Manutenção mecânica periódica.
Cogeração (CHP – calor + eletricidade)	Produção simultânea de eletricidade e calor útil (aquecimento de água ou processos industriais).	Dessulfurização completa, remoção de condensado e controle preciso de mistura e exaustão.	Médio-Alto. Requer sistema integrado com trocadores de calor, isolamento térmico e controle automatizado.
Produção de biometano para veículos	Uso como combustível veicular, substituindo GNV ou diesel em frotas leves.	Purificação avançada de CO_2 , H_2S e vapor d'água. Etapas de separação por membranas, absorção química ou water scrubbing.	Alto. Necessita compressão, purificação contínua e tanques de armazenamento pressurizados. Elevada demanda energética.
Injeção de biometano na rede	Substituição ou complementação do gás natural em gasodutos.	Purificação total (CO_2 , H_2S , O_2 , H_2O) e controle de qualidade para atender normas de composição e pressão.	Muito alto. Envolve múltiplos estágios de compressão, controle automatizado e monitoramento de pureza. Destinado a plantas industriais de grande porte.

Fonte: adaptado de Cibiogás; UNIDO (2022) e Probiogás (2015).

A literatura evidencia que o aproveitamento energético do biogás deve priorizar a

adequação entre a escala de produção e a demanda energética local, de modo a otimizar o rendimento e reduzir a complexidade operacional.

Nos sistemas de pequeno porte, como os biodigestores em batelada aplicados ao tratamento de resíduos alimentares, o uso térmico direto é amplamente reconhecido como a alternativa mais eficiente e compatível com a natureza de pequena escala de geração de metano Probiogás (2015).

O uso térmico baseia-se na combustão controlada do metano para fornecimento de calor, seja para aquecimento de água, cocção de alimentos ou processos internos do próprio reator. Segundo CIBiogás e UNIDO (2022), essa rota apresenta eficiência energética global superior a 85%, uma vez que a conversão da energia química em calor ocorre de forma imediata, sem perdas associadas a transformações eletromecânicas. Essa característica confere ao uso térmico uma vantagem termodinâmica e operacional, especialmente em aplicações descentralizadas.

Além da alta eficiência, o uso térmico apresenta simplicidade estrutural e baixa exigência de purificação do biogás. O tratamento restringe-se, em geral, à dessulfurização simples e à remoção do condensado, medidas suficientes para evitar corrosão em queimadores e tubulações.

Do ponto de vista da engenharia ambiental, a escolha pelo uso térmico também se justifica pelo princípio da proporcionalidade tecnológica, segundo o qual o nível de complexidade deve ser compatível com a escala de geração e a finalidade energética. Enquanto sistemas de cogeração ou produção de biometano demandam tratamentos avançados de remoção de CO_2 e H_2S , além de equipamentos de alto custo e controle automatizado, o uso térmico mantém o foco na conversão direta e eficiente do metano em energia útil, sem comprometer a estabilidade operacional (Probiogás, 2015; Cibiogás, 2022; UNIDO, 2022).

Por essas razões, a literatura aponta o uso térmico direto como a opção mais racional e sustentável para unidades de pequeno porte, nas quais o biogás pode ser empregado de forma contínua e segura para substituição parcial do gás liquefeito de petróleo (GLP). Essa abordagem permite o fechamento do ciclo energético local, reduz a dependência de combustíveis fósseis e fortalece a integração entre tratamento de resíduos e eficiência energética.

A equivalência energética entre biogás e GLP é determinada essencialmente pela comparação entre os poderes caloríficos inferiores (PCI) e as densidades dos combustíveis. Essa relação permite expressar o volume de biogás produzido em massa equivalente à GLP. De acordo com Bezerra (2019) e De Mattia (2017), a conversão assume o intervalo de 0,40 a 1,43 kg de GLP por metro cúbico de biogás, variando de acordo com a composição e pureza do biogás, além da densidade do gás.

O Guia Prático para Projetos de Biogás (UNIDO; CIBiogás, 2022) expôs que, para situações sem dados laboratoriais, a adoção de valores médios de referência para o biogás com 60% de CH_4 com PCI típico de $4.200 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-3}$ e densidade aproximada de $1,024 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Esses parâmetros possibilitam estimar que 1 m³ de biogás corresponde aproximadamente a 0,38 kg de GLP.

3.6 Relevância social da aplicação de biodigestores

A viabilidade social dos biodigestores é destacada por organismos internacionais como a Organização das Nações Unidas (ONU) e pela sua respectiva agência, a Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (UNIDO). Essas instituições reconhecem a aplicação dos retores como meio de inclusão, melhoria de serviços e fortalecimento comunitário em sistemas de gestão de resíduos, pelo fato de possuírem sinergia direta com parte dos Objetivos De Desenvolvimento Sustentável (ODS) apresentados pela Agenda 2030 (ONU).

Nesse contexto, o trabalho apresentado pela EMBRAPA identifica, por meio de uma revisão bibliográfica, os ODS relacionados diretamente com a utilização de biodigestores para a gestão dos resíduos orgânicos. Neste trabalho, Soares *et al.* (2022) destaca a aderência da cadeia do biogás aos ODS 2 (Fome zero e agricultura sustentável), 3 (Saúde e bem-estar), 7 (Energia limpa e acessível), 8 (Trabalho decente e crescimento econômico), 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) e 13 (Ação contra a mudança global do clima). Dessa forma, a relação exposta evidencia que os biodigestores configuram uma tecnologia com potencial de gerar benefícios ambientais, econômicos e sociais. Esse alinhamento também se manifesta em contextos institucionais que são submetidos a regimes contínuos de alimentação, e por consequência, de geração de resíduos orgânicos, entre os quais se destacam as universidades, onde os efeitos sociais da tecnologia são potencializados pela integração do biodigestor a rotina da instituição.

Com isso, o recorte dos aspectos sociais originados pelo emprego de biodigestores para o tratamento energético de resíduos orgânicos no contexto universitário encontra respaldo na literatura quando a solução deixa apenas de visar o impacto econômico e passa a integrar ensino, extensão e formação prática dos futuros profissionais. Lima *et al.* (2010) apontam que para a comunidade da universidade a tecnologia funciona como instrumento de formação ética e socioambiental por meio de atividades de extensão e envolvimento direto dos estudantes no manejo dos resíduos. Além disso, os autores evidenciam que a operação de biodigestores favorece a aproximação entre universidade e comunidade externas, ampliando o acesso a práticas de gestão ambiental e disseminando aplicações sustentáveis sobre o destino adequado dos resíduos.

Em consonância, o trabalho realizado por Medeiros *et al.* (2020) reforça essa perspectiva ao caracterizar o biodigestor como tecnologia social, capaz de organizar programas de educação ambiental. Os autores identificam que o sistema possibilita a integração de oficinas, visitas, materiais didáticos e atividades de extensão, criando um processo que une a gestão dos resíduos orgânicos com aplicações práticas e pedagógicas. Além disso, Medeiros *et al.* (2020), mostram

que a implantação do biodigestor transforma a universidade em uma vitrine tecnológica, pelo fato de possuir um exemplo concreto da destinação ideal da fração orgânicas dos RSU. Essa condição demonstrativa amplia significativamente o alcance do projeto, permitindo o envolvimento de diferentes públicos e a realização contínua de ações educativas.

Além disso, Sena *et al.* (2019) complementa essa discussão ao identificar que o uso do biodigestor torna o processo de valoração dos resíduos orgânicos evidente para os usuários do RU. A percepção dos membros da comunidade se dá pelo fato de que estes são responsáveis por toda a cadeia do biogás, desde a geração e descarte dos RO até a produção do biogás e sua utilização na cozinha. Para os autores, essa visibilidade melhora a organização da rotina de separação dos resíduos, facilita a adesão dos usuários às práticas corretas de descarte e reforça a percepção de utilidade da tecnologia, fortalecendo a confiança da comunidade nas ações ambientais do campus.

3.7 Análise de sustentabilidade financeira

O estudo de viabilidade econômica consiste no processo responsável por traduzir os aspectos técnicos e financeiros que caracterizam o modelo em indicadores de desempenho. O trabalho das informações é realizado a fim de avaliar o potencial do projeto, gerando valor líquido positivo ao longo da sua vida útil, sendo possível assim verificar se os benefícios projetados superam os custos de implantação e operação. Nessa conjuntura, o estudo de Silva (2021) mostra que projetos de cunho ambiental só podem ser considerados tecnicamente executáveis quando sustentados por uma avaliação econômica estruturada e baseada em indicadores financeiros consolidados, uma vez que esta etapa assegura as condições necessárias para manter o projeto em funcionamento e permitir que seus benefícios ambientais se efetivem ao longo do tempo.

Para tanto, a compreensão da viabilidade econômica em projetos é aprofundada pelas contribuições de diferentes autores que estruturam seus métodos de avaliação. Gitman (2010) destaca em sua obra que a tomada de decisão para a concepção do projeto é orientada a partir da aplicação de métricas como Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno e *Payback* como instrumentos para avaliar o retorno financeiro de um empreendimento.

Portanto, tais parâmetros são tratados pelo autor como ferramentas capazes de medir a atratividade financeira de um projeto considerando o risco, o custo de capital e a capacidade de geração de benefícios ao longo do tempo.

No campo aplicado, Silva (2021) demonstra que iniciativas voltadas à biodigestão em ambiente universitário possuem, para sua concepção, a necessidade de uma avaliação econômica que explicita custos, retornos e condições operacionais necessárias ao funcionamento contínuo do projeto ambiental desenvolvido. Além disso, Alcântara (2022)

reforça essa perspectiva ao identificar que processos sustentáveis possuem como requisito a comprovação econômica para assegurar o funcionamento eficiente durante o ciclo de vida da tecnologia.

Nesse sentido, Leites (2017) evidencia que a aplicação da cadeia do biogás demanda análise financeira estruturada, com identificação dos custos de implantação e operação, além de indicadores de retorno, com finalidade de avaliar se a proposta se sustenta após sua implementação. Por fim, estudos recentes publicados na Sustainability por Roa *et al.* (2024) reforçam essa convergência, ao demonstrar que projetos ambientais baseados em bioenergia dependem da quantificação clara dos benefícios econômicos e do desempenho financeiro para avaliar sua escolha e possibilitar a manifestação dos benefícios ambientais possa ser alcançada.

Desse modo, a literatura expõe que, para que um estudo de viabilidade econômica seja utilizado como uma ferramenta de decisão, deve desenvolver-se a partir de um encadeamento lógico que integra caracterização de custos e receitas. Essa cadeia pode ser identificada nos estudos aplicados à implantação de biodigestores, que funcionam como base para avaliar a eficácia da concepção do projeto.

Inicialmente, os estudos econômicos partem da caracterização técnica do projeto que constituem os parâmetros necessários para integrar a determinação dos indicadores de viabilidade. Nesse contexto, conforme apresentado por Alcântara *et al.* (2022) em sua publicação, a Tabela 1 adaptada do levantamento de Qu *et al.* (2013) descreve os principais componentes que integram estudos econômicos para biodigestores. Tais elementos incluem o tipo de digestor, escala estimada, capacidade produtiva, demanda de biomassa e água, além da vida útil esperada. Esses parâmetros funcionam como dados de entrada para estabelecer o escopo do projeto e orientar o desenvolvimento dos indicadores de viabilidade. A partir dessa caracterização inicial, torna-se possível avançar para o processo de quantificação dos custos e, posteriormente, dos indicadores que definem a viabilidade do sistema.

3.7.1 Custo de implantação e Operação

Segundo definido por Leites (2017), o custo de implantação (CAPEX) consiste em todos os gastos de projetar, construir e instalar uma planta, além das modificações necessárias para preparar o local da planta para concepção do projeto. Além disso, Gitman (2010) ressalta que os custos devem ser considerados com precisão, pois a quantidade de detalhe disponível do projeto influencia diretamente o comportamento dos indicadores subsequentes.

Já o custo de operação (OPEX) representa o levantamento dos gastos necessários para o funcionamento do empreendimento e manutenção durante sua vida útil, analisando aspectos técnicos e socioeconômicos que cercam o projeto. Essa organização de custos forma a base financeira necessária para projetar o fluxo de caixa do sistema.

3.7.2 Fluxo de caixa

O fluxo de caixa exposto por Gitman (2010) consiste na etapa responsável por conciliar as entradas e saídas do projeto. Sua aplicação permite avaliar a rentabilidade entre custos e receitas e a sustentabilidade econômica de um empreendimento. Além disso, segundo o autor, o fluxo de caixa é composto por um desembolso inicial concentrado no ano zero, correspondente integralmente ao CAPEX, seguido pelos valores recorrentes associados à operação e manutenção ao longo dos anos subsequentes.

Com isso, o desempenho financeiro anual é estimado pela diferença entre os valores economizados ou recebidos e as despesas necessárias para manter o sistema em funcionamento. Essa relação é apresentada por Alcântara (2022) analisando o fluxo de caixa mensal, porém para o presente trabalho esta relação é utilizada para avaliação anual, que resulta na expressão 5 apresentada a seguir

$$F_{cm} = Receita\ Anual - Custo\ Anual \quad (5)$$

Sendo:

F_{cm} : Fluxo de caixa em um ano “n”;

Receita Anual: corresponde ao total de benefícios econômicos, economias obtidas ou valores recebidos pela operação do projeto durante o ano;

Custo Anual: Despesas necessárias para manter o sistema em funcionamento, incluindo gastos operacionais, manutenção e demais obrigações financeiras recorrentes.

Portanto, o fluxo de caixa sintetiza o desempenho financeiro do sistema, servindo de base para o cálculo dos indicadores de viabilidade econômica.

3.7.3 Cálculo do Valor Presente Líquido (VPL)

Dentre os indicadores financeiros aplicados à análise da viabilidade econômica de projetos, o Valor Presente Líquido (VPL) tem sua relevância ditada por mensurar o retorno financeiro que um empreendimento vem a gerar, a partir da conversão dos fluxos de caixa futuros em valores para a data zero. Este indicador revela, de forma direta, o ganho ou a perda econômica do projeto, conforme exposto por Gitman (2010) em sua obra intitulada na obra *Princípios de Administração Financeira*.

A definição do valor presente líquido exposta por Gitman, estabelece que tal indicador é uma técnica sofisticada de orçamento de capital, o qual é calculado a partir da subtração entre o investimento inicial do valor presente e a soma das entradas de caixa, que por sua vez incorporam em seu uso a taxa de custo de oportunidade, uma vez que os fluxos de caixa futuros estão sujeitos à variação sofrida pelo dinheiro.

Com essa estrutura, o VPL se consolida como indicador nas análises financeiras por traduzir, em termos monetários, a capacidade de um projeto gerar valor além do investimento inicial, tornando-se compondo um dos instrumentos econômicos que auxiliam na tomada de decisão quanto a critério decisivo para a aceitação ou rejeição de propostas de investimento. Dessa forma, a avaliação do VPL é realizado a partir do condicionamento do fluxo de caixa anuais encontrado na etapa anterior , expresso na Equação 6 a seguir:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{Fc}{(1-r)^t} - Inv \quad (6)$$

Sendo:

Inv: corresponde ao investimento inicial;

F_c : representa o fluxo de caixa no ano t ;

r : representa a taxa mínima de atratividade, associada ao custo de oportunidade do capital;

n : indica a vida útil considerada para o projeto.

O resultado do VPL obtido evidencia a viabilidade econômica sendo interpretado considerando diferentes cenários que o VPL pode assumir: (i) valor positivo, o projeto agrega capital e demonstra potencial de retorno superior ao custo de implantação e operação; (ii) quando negativo, indica inviabilidade econômica, e (iii) quando se igualar a 0 indica neutralidade econômica do investimento. Dessa forma, consolida-se como um dos indicadores mais robustos para a análise de viabilidade econômica, sendo essencial sua análise para a tomada de decisão (Gitman, 2001).

3.7.4. Cálculo da Taxa Interna de Retorno

A taxa interna de retorno é o indicador responsável por representar o ponto de inflexão econômica, indicando a taxa de retorno correspondente em que o projeto deixa de ser inviável e passa a apresentar valor econômico positivo. Conforme descrito por Gitman (2001), a TIR é dada pela taxa de desconto que iguala o VPL de uma oportunidade de investimento a zero, obtida de acordo com a expressão 7

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{Fc}{(1-TIR)^t} - Inv$$

Os elementos F_c e inv seguem a mesma definição dos termos aplicados para o VPL, enquanto a TIR destaca-se por expressar o retorno percentual obtido ao longo do tempo e por permitir a comparação direta entre o desempenho econômico de um investimento e sua taxa mínima de atratividade.

A interpretação desse resultado é determinante para caracterizar a atratividade do projeto

e consolidar o diagnóstico de sua viabilidade econômica dentro do contexto institucional estudado.

3.7.5. Cálculo do *Payback*

O período de *payback* possui como aplicação a determinação do prazo exigido para que um projeto gere receita suficiente para a recuperação do capital direcionado ao investimento inicial. Tal indicador é estimado pela relação entre o investimento inicial pela entrada de caixa anual evidenciada no livro de Gitman (2001), sendo exposto pela expressão 8:

$$PlayBack = \frac{Inv}{Fcma} \quad (8)$$

Considera-se que *Inv* segue a mesma definição dos indicadores anteriores e *Fcma* é dado pela média dos fluxos de caixas anuais produzidos durante a vida útil do projeto. Desta maneira, em posse dos indicadores de viabilidade econômica VPL, TIR e *PayBack*, permitirá avaliar a sustentabilidade e a rentabilidade econômica, atuando como base direta para a tomada de decisão para a concepção de empreendimentos.

4. METODOLOGIA

4.1 Concepção Geral

O modelo desenvolvido consistiu em representar um sistema não paramétrico e empírico (caixa preta). Desta forma, foram analisadas apenas a entrada de substrato e a saída de produto, não detalhando as reações bioquímicas internas de contorno do sistema. Os resultados tanto do dimensionamento do sistema de biodigestores, quanto das análises de viabilidades serão apresentados de forma quantitativa.

Os objetivos foram alcançados inicialmente como levantamento dos dados secundários referente a caracterização do substrato do Restaurante Universitário da UNESP Rio Claro. Essas informações foram extraídas dos trabalhos realizados por Picciafuoco (2013) e Alves (2024), em que ambos abordam a caracterização do substrato orgânico da mesma fonte geradora. Posteriormente, o trabalho aplicou a relação da carga orgânica volumétrica (COV) em diferentes valores, com o intuito de dimensionar o biodigestor que teria o melhor equilíbrio entre eficiência do processo de digestão e a simplicidade construtiva do sistema.

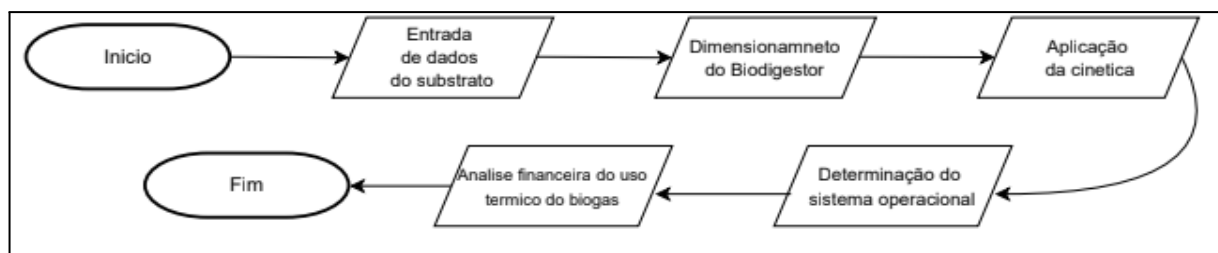
As etapas de caracterização e dimensionamento forneceram a estrutura necessária para a estimação subsequente da produção de metano. A cinética química por sua vez utilizou do trabalho de Blasius (2018), que conduziu a determinação do potencial metanogênicos utilizando as frações de substratos livres de inibidores gerados no Restaurante Universitário da UNESP Rio Claro, como cenário ideal de produção de biogás. Para fins de representar de maneira fidedigna a verdadeira dinâmica do substrato gerado no RU, adotou-se uma aproximação conservadora a fim de evitar superestimação dos parâmetros cinéticos. Tal processo utilizou dos fatores de conversão para resíduos alimentares expostos por diferentes autores, adequando os parâmetros cinéticos apresentados por Blasius (2019) a toda a dinâmica dos resíduos orgânicos do RU.

Assim, estes foram aplicados no modelo cinético de Gompertz modificado e do volume total de biogás correspondente a determinada porcentagem de metano (CH_4). Dessa forma, a definição do modelo de biodigestores que aplicou-se para o trabalho foi a etapa responsável por unir os parâmetros operacionais e cinéticos, para que fosse possível obter a melhor alternativa tecnológica e operacional necessários para atender a massa de resíduos alimentares do RU.

Por fim, os componentes físicos que o compõem, incluindo reatores e tubulações, foram definidos procedendo o estudo de custos e receitas, voltadas à avaliação do potencial de implantação do sistema proposto. De maneira contínua, utilizou-se dos indicadores de viabilidade econômica expostos na seção 3.7 deste trabalho para determinar a atratividade financeira do projeto proposto.

Com isso, o fluxo de trabalho representou a sequência metodológica para o projeto e avaliação financeira de um biodigestor, desde a caracterização do substrato até a análise econômica do biogás, ilustrado pela figura 2 apresentada a seguir:

Figura 2: Etapas do Projeto de Biodigestor



Fonte: Elaborado pelo autor

Para tanto, foram utilizados artigos e trabalhos acadêmicos, além de livros, manuais e guias de instituições de inovações relevantes como CIBIOGÁS e Embrapa. Com isso, o conjunto metodológico adotado permitiu integrar bases teóricas consolidadas e práticas de engenharia aplicadas à realidade institucional. O estudo apresenta, portanto, fundamentos consistentes para avaliar a eficiência e a viabilidade do sistema de biodigestores proposto.

4.2 Caracterização Do Substrato

A caracterização dos resíduos orgânicos gerados pelo restaurante universitário e a definição dos parâmetros operacionais do sistema foram conduzidas exclusivamente com dados secundários. As informações utilizadas possuem como origem os estudos de Picciafuoco (2013) e Alves (2024), ambos realizados no Restaurante Universitário da UNESP Rio Claro, que quantificaram e caracterizaram os resíduos orgânicos alimentares gerados na unidade. Segundo Tavares (2008), a primeira etapa para viabilizar o gerenciamento dos resíduos sólidos é o conhecimento detalhado da qualidade e quantidade dos resíduos que são produzidos diariamente.

Desse modo, o presente trabalho, para implantar o sistema de tratamento anaeróbios de resíduos orgânicos, aplicou como procedimento metodológico quatro etapas principais: (i) identificação dos valores de geração diária de resíduos a partir dos índices de resíduo por refeição; (ii) compilação dos parâmetros físico-químicos do substrato, incluindo umidade, fração de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV); (iii) determinação com base no número médio de refeições servidas em cada período e conversão para massa de resíduos por dia e por semana; e (iv) integração dos dados consolidados à modelagem da digestão anaeróbia, permitindo estimar a carga orgânica presente nas bateladas, a proporção de SV disponível para conversão em metano e a condição operacional do sistema.

Desse modo, com dados extraídos do estudo de Picciafuoco (2013) foram obtidos os valores de referência de 2.963 e 1.981 refeições em dois períodos distintos de cinco dias úteis, correspondendo a 435,2 kg e 278,8 kg de resíduos gerados respectivamente.

Com isso, o estudo evidenciou que o índice médio de geração de resíduos por refeição, definido pela autora em 0,135 kg/refeição e da densidade úmida média de 1,19 g/mL. Esses dados foram utilizados para estimar a geração diária e semanal de resíduos a partir da

conversão do número de refeições em massa de substrato fresco e determinar a composição setorial empregada na construção do substrato base do modelo.

Já com o estudo de Alves (2024) foram extraídos os valores de geração média atual de resíduos 23,2 kg/dia para 335 refeições. Porém, seu destaque cabe aos parâmetros físico-químicos, aspectos fundamentais para a modelagem. O autor determinou teor de umidade de 79,7%, sólidos totais equivalentes a 20,3% e fração de sólidos voláteis correspondente a 90,3% dos ST para o resíduo orgânico gerado in natura. Esses dados foram utilizados para determinar a fração seca do substrato, calcular a massa de sólidos voláteis disponível por batelada e definir os parâmetros de biodegradabilidade empregados na aplicação da cinética de Gompertz modificada.

Dessa forma, os estudos foram utilizados de maneira complementar. Enquanto Picciafuoco (2013) descreveu com precisão a dinâmica quantitativa e a distribuição setorial dos resíduos, mas não incluiu parâmetros físico-químicos, Alves (2024) detalhou a composição e a fração orgânica do substrato, embora apresente menor abrangência amostral.

4.3 Dimensionamento Do Biodigestor

Os resultados das etapas de caracterização do substrato e modelagem cinética consolidaram a base técnica necessária ao dimensionamento do sistema de biodigestão. A integração desses dados garante que as decisões de projeto sejam fundamentadas no comportamento real do substrato e na eficiência do processo. Considerando que o biodigestor atua como reator biológico responsável pela conversão da matéria orgânica em biogás, é fundamental que o planejamento e o dimensionamento sejam conduzidos com base em parâmetros técnico-operacionais bem definidos (CIBiogás, 2022).

O dimensionamento foi desenvolvido a partir das relações de projeto que vinculam a carga orgânica volumétrica, a vazão média equivalente e a concentração ideal de sólidos voláteis (S_v), conforme metodologia proposta por Do Amaral *et al.* (2016) e diretrizes do CIBiogás (2022). O volume útil e o volume total do biodigestor foram determinados integralmente pelos procedimentos descritos pelas equações 1 a 4, expostas na revisão bibliográfica, aplicando as relações operacionais entre concentração de sólidos voláteis, carga orgânica volumétrica e tempo de retenção hidráulica previamente estabelecidos.

Para isso, utilizaram-se os dados de caracterização do substrato: massa média de 279,8 kg de resíduos por batelada, conforme Picciafuoco (2013), e fração de 18,33% de sólidos voláteis identificada por Alves (2024). Assim, em posse desses valores, estimou-se a concentração afluenta de SV , o volume da mistura alimentada e o volume total do reator, incluindo a fração destinada ao *headspace*.

Desse modo, o dimensionamento do biodigestor estabelecido nesta seção sintetizou a estrutura operacional que sustenta o modelo proposto, evidenciando a interação entre a

carga orgânica aplicada, o tempo de retenção e o volume efetivo do reator. A aplicação destas expressões que compõem o volume do biorreator servirá como base para a manipulação dos parâmetros de operação em diferentes faixas de carga orgânica volumétrica (COV), possibilitando avaliar o comportamento do sistema sob distintas condições de alimentação e estabilidade.

Com isso, a COV empregada no dimensionamento do biodigestor do tipo batelada para o presente estudo teve seu valor definido de $5,0 \text{ kgSV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, situado no limite superior do intervalo, conforme indicou Schmeier (2017), mas também abaixo do limite superior de operação de $5,95 \text{ kg SV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$.

Por fim, o critério de seleção do volume final de projeto considerará o valor da faixa que melhor equilibrar simplicidade construtiva com o rendimento na produção de biogás, garantindo operação estável em regime úmido, com a fração de sólidos voláteis no afluente necessariamente menor do que 5% do volume total do substrato. Portanto, o dimensionamento se consolida como a etapa que integra o desempenho cinético às condições práticas de projeto, estabelecendo a base física e operacional sobre a qual se apoiarão as análises de modelagem e viabilidade do sistema.

4.4 Cinética Química

O presente trabalho iniciou-se no Restaurante Universitário da UNESP Rio Claro com os parâmetros cinéticos definidos no estudo conduzido por Blasius (2018), como limite superior pelo fato de representar um cenário de degradação anaeróbica livre de inibidores. A amostra M1 de Blasius (2018), obtidos em condição mesofílica: $B(0) = 869 \text{ mLCH}_4 \cdot \text{gSV}^{-1}$; $R_m = 124,40 \text{ mL CH}_4 \cdot \text{gSVd}^{-1}$ e $\lambda = 0 \text{ d}$. Esses valores representam o Cenário 1, desempenho ideal, conforme descrito na revisão bibliográfica.

Para representar o desempenho realista que o tratamento de todo o resíduo orgânico do restaurante universitário dispõe, foi adotado o Cenário 2, obtido por meio de uma diluição comparativa. O procedimento consistiu em converter o potencial máximo do Cenário 1 para que os parâmetros cinéticos representem imprevisibilidade de substratos heterogêneos. Desse modo, a regressão comparativa utilizou como referência os potenciais metanogênicos médios para resíduos alimentares mistos reportados por Lissens *et al.* (2004), Neves *et al.* (2006) e Zhang *et al.* (2011, 2013), os quais variam entre $0,36$ e $0,52 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ SV}$. Vale ressaltar que o R_m foi ajustado para seguir proporcionalmente a redução supracitada, a fim de evitar superestimação da velocidade do processo.

Além disso, o modelo de Gompertz modificado foi escolhido por refletir, com precisão, a dinâmica da digestão anaeróbica (DA) em reatores de pequeno porte, permitindo que a modelagem aproveite o pulso biológico do sistema sem perder o rigor matemático Batstone

(2015).

Assim, os parâmetros ideais de Blasius (2018) foram usados apenas como referência inicial e convertidos ao Cenário 2, por meio de médias simples com valores da literatura para resíduos alimentares mistos. Diante do exposto, a determinação da cinética química, permitiu unificar as informações sobre a qualidade e quantidade de substrato com a dinâmica esperada do processo de DA. Esses resultados agregaram a base para o desenvolvimento do sistema de biodigestor e para as análises de viabilidade que o cercam, apresentados nas seções seguintes.

4.5 Definição Do Sistema Bateladas Em Paralelo

Tendo em vista que os resíduos alimentares gerados no restaurante universitário possuem como qualquer outro tipo de resíduo orgânico potencial energético a ser explorado, sua gestão deve ir além de se comprometer com a conversão energética do substrato, mas também definir o modelo de biodigestor que se adeque às necessidades do projeto, considerando aspectos como complexidade do projeto, volume de resíduos e destino final do uso do biogás ou biometano (Deganutti *et al.*, 2002).

Nesse contexto, operar o biodigestor em regimes de batelada aparece como alternativa, dado sua baixa complexidade técnica de construção e operação, além de ser ideal para atender o volume de geração de resíduos orgânicos do restaurante universitário.

Tendo em vista os aspectos sobre a irregularidade na produção de biogás do biodigestor de batelada secção, a elaboração do sistema em paralelo desenvolvido para pesquisa adotou como método inicial a determinação do número de biodigestores necessário para atender o volume de resíduos orgânicos gerados no RU.

Para tal, partiu-se da relação estabelecida entre o TRH e o intervalo entre cargas desejado, para conseguir alcançar o número de reatores ideal para o volume de RSU gerados. O tempo de operação será escolhido pela simulação da produção de biogás anual de biogás com base em diferentes intervalos entre cargas. Já para o intervalo entre as partidas das bateladas foi analisado para dois cenários sendo o de 5 e 10 dias úteis de defasagem entre as bateladas.

A escolha do TRH e intervalo entre as cargas considerou a situação que se adaptou melhor a rotina do RU, uma vez que os resultados desta etapa interferem tanto na economia do projeto quanto na análise de viabilidade econômica. Além disso, como critério adicional de seleção dos cenários, verificou-se o comportamento cinético das bateladas por meio da curva sigmoidal prevista pelo modelo de Gompertz modificado.

Nesse procedimento, considerou-se como ponto operacionalmente ótimo o estágio em que a batelada atinge aproximadamente 95% da conversão da matéria orgânica, indicando o esgotamento da fração biodegradável e a estabilização do processo. Com isso, o desenvolvimento do arranjo de biodigestores em paralelo deste trabalho foi empregado a fim de manter a simplicidade dos reatores tipo batelada e ao mesmo tempo mitigar as limitações deste

modelo tradicional, possuindo posteriormente seu resultado incorporado nas etapas seguintes da pesquisa.

4.6 Utilização Do Biogás

O aproveitamento energético do biogás produzido pelo sistema de 3 biodigestores empregados em paralelo indicou o momento em que o modelo deixou de considerar apenas o tratamento dos resíduos orgânicos e passou também a destinar o uso do biogás para fins energéticos, ou seja, nesta etapa os resultados converteram o potencial bioquímico dos resíduos alimentares em uma fonte de calor capaz de substituir, mesmo que parcialmente, o gás liquefeito de petróleo utilizado nas atividades diárias do restaurante universitário.

Portanto, o uso térmico do biogás, já adequado para este uso, considerou a composição de 65 % CH_4 , 33 % CO_2 e 2 % de outros gases como H_2S e vapor d'água, conforme a faixa das composições que foram expostas na revisão bibliográfica. Essa postura possibilitou a aplicação dos poderes caloríficos inferiores e a densidade tanto do biogás quanto do GLP, de modo a ajustar a conversão de entre as partes.

A determinação do uso do biogás a partir da matriz térmica exclusiva da cocção encontra amparo no estudo desenvolvido por Tian *et al.* (2021), que evidenciou que o uso térmico para cocção, principalmente descentralizado, apresentou vantagens como a redução significativa das emissões de GEE e o consumo de combustíveis fósseis. Tal rota se caracteriza pela simplicidade técnica, já que exige apenas adaptações mínimas e tratamento parcial do gás, sendo especialmente adequada para aplicações em pequena escala descentralizadas.

A equivalente energética do volume de biogás de GLP considerou o poder calorífico inferior do biogás, a partir das proporções indicadas por Leite, que reporta PCI aproximado de $5.300 \text{ kcal}\cdot\text{m}^{-3}$ para biogás, contendo 55% de metano (Leite, 2009). Desse modo, o PCI correspondente a 65% foi obtido a partir de uma extrapolação proporcional do valor fornecido pelo autor, respeitando a relação direta entre fração de metano e conteúdo energético. Para o GLP, utilizaram-se os parâmetros de referência consolidados pelo Guia Prático para Projetos de Biogás (UNIDO; CIBIOGÁS, 2022), que estabeleceu poder calorífico inferior de $11.100 \text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$ e densidade de $550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ como valores padrão para análises energéticas.

Posteriormente, os dados dessa etapa foram relacionados com os valores expostos no portal Preços de GLP ao consumidor consolidado, publicado mensalmente pela ANP, para gerar economia em reais da utilização do biogás.

Dessa forma, a equivalência energética entre os dois gases foi definida pela razão entre seus poderes caloríficos inferiores, sendo esse coeficiente adotado como fator único de conversão ao longo da avaliação, conforme procedimentos aplicados em estudos comparativos de aproveitamento térmico. Vale ressaltar que a etapa de análise da sustentabilidade financeira que compõe o sistema parte do uso destinado ao biogás.

4.7 Composição Física Dos Biodigestores.

A determinação dos componentes que compuseram os biodigestores foi definida a partir da adaptação dos materiais e conexões expostos por Marchi (2013) em seu modelo de biodigestor de pequeno porte. A determinação da estrutura necessária para a elaboração de um sistema de reatores do tipo batelada empregados em paralelo baseou-se na replicação dos componentes hidráulicos e de gás descritos por esse autor.

Dessa forma, a construção do sistema de biodigestor para o presente trabalho adaptou a divisão entre as partes dados March (2013), as quais foram definidas representando a cadeia lógica de operação dos biodigestores. Iniciou-se a determinação dos componentes pela linha hidráulica de alimentação e descarga, composta por tubos, válvulas e uniões e pela linha de gás, responsável pela coleta e condução do biogás. Essa configuração foi mantida como referência estrutural neste trabalho, servindo de guia para o levantamento de materiais e elaboração da estimativa de custos. A Tabela 2 a seguir apresenta a composição física consolidada para o sistema proposto, composto por três reatores utilizando cisternas operando em paralelo:

Tabela 2: Estrutura funcional e componentes do sistema de biodigestores

Categoria	Componente	Função principal	Observações
Estrutura principal	Cisternas plásticas verticais de 3.000 L	Servem como câmaras de digestão anaeróbia em bateladas paralelas	Fabricadas em PEAD reforçado, oferecem alta durabilidade, boa vedação e baixo custo de manutenção.
	Adaptadores e flanges (2" e 20 mm)	Realizam as conexões de carga, descarga e gás	Ajustados às dimensões das cisternas, asseguram estanqueidade e facilidade de montagem.
Linha de alimentação e descarga	Tubos PVC DN 160 mm + conexões (T, joelho, união)	Conduzem o substrato e o digestato entre os reservatórios e os reatores	Materiais padronizados de esgoto, resistentes e facilmente substituíveis, adequados para volumes ampliados.
	Válvulas esfera PVC 1"	Controlam a entrada e a saída de substrato	Permitem operação alternada entre os reatores, com isolamento hidráulico simples e confiável.
Linha de biogás individual	Tubos PEAD DN20 mm + mangueiras 25 mm	Coletam e conduzem o biogás até o manifold principal	Conduzem o gás com segurança e baixa perda de carga; o PEAD garante resistência ao H ₂ S e radiação UV
	Válvulas esfera e retenção ½"	Controlam o fluxo e impedem refluxos de gás	Mantêm o equilíbrio de pressão entre os reatores e protegem o sistema contra os retrofluxos.
Manifold e interligação	Tubo PEAD DN25 mm + T's de derivação	Atuam como coletor principal do biogás	Unificam o gás gerado pelos reatores e direcionam à linha de consumo, com até 30 m de extensão.
	Válvula geral DN25 mm	Regula e bloqueia o fluxo total do biogás	Facilita a manutenção e o controle operacional do sistema.
Instrumentação e preparo	Medidor de pH e temperatura	Monitora as condições operacionais do processo	Permite controle da estabilidade biológica, favorecendo o desempenho da digestão.

	Triturador TR200	Tritura e homogeneiza os resíduos alimentares antes da alimentação	Favorece a biodisponibilidade da matéria orgânica e a regularidade do processo de digestão.
Fixação e montagem	Cola PVC, fita veda-rosca e abraçadeiras metálicas	Realizam a vedação e a fixação das conexões	Garantem estanqueidade e resistência mecânica, prevenindo vazamentos.
	Suportes e bases niveladoras metálicas	Sustentam e estabilizam as linhas de tubulação	Mantêm o alinhamento estrutural e a segurança do conjunto em operação.

Fonte: Adaptado de Marchi (2013) e elaborado pelo autor (2025).

4.8 Análise de sustentabilidade financeira

Para fins de metodológicos, foi utilizado como base para a execução do estudo de viabilidade econômica o trabalho de Alcântara, Zang e Fonseca-Zang (2022), estudo esse desenvolvido com objetivo central de analisar a viabilidade econômica de modelos de biodigestores voltados à produção de biogás, para avaliar a escolha do modelo e escala de biodigestor, e as delimitações dos pontos de inflexão que refletem o sucesso econômico do modelo.

Nesta perspectiva, a abordagem metodológica empregada para a análise de viabilidade econômica do sistema de bateladas projetado para atender o restaurante universitário, tomará como eixo central a o levantamento de dados iniciais exposto no trabalho de Alcântara, et al. (2022) de maneira adaptada ao contexto da presente pesquisa. As informações necessárias para obtenção dos aspectos para execução da viabilidade serão expostas na tabela 3 abaixo, sendo adaptadas de Alcântara, Zang e Fonseca-Zang (2022), elaboradas a partir de Qu *et al.* (2013), Wahyuni *et al.* (2018) e Wamwea (2017).

Tabela 3: Parâmetros iniciais para análise de viabilidade econômica de biodigestores

Parâmetro Inicial	Descrição adaptada ao RU
Investimento Inicial	Valor necessário para a implantação do biodigestor, abrangendo materiais, mão de obra e instalação do sistema no RU.
Produtividade Média	Volume estimado de biogás (m³/dia) produzido a partir da digestão dos resíduos alimentares gerados no RU.
Demanda de Biomassa Seca	Fração de sólidos totais (kg/dia ou m³/dia) necessária para manter constante a produtividade média do biodigestor.
Demanda de Água	Volume de água requerido para diluição e operação do sistema em condições adequadas, em (m³/bat) dado alimentação periódica.
Vida Útil	Tempo de operação em anos que o biodigestor suporta, considerando a durabilidade da estrutura e longevidade.
Volume	Capacidade total do biodigestor (m³), determinada pela quantidade de resíduos e água a serem tratados.
Tipo de Biomassa	Caracterização e quantificação dos resíduos alimentares provenientes do preparo e devolução de refeições no RU.
Complexidade de Construção	Grau de dificuldade na execução da obra civil e instalação do biodigestor no contexto do restaurante.

Complexidade de Operação	Nível de exigência técnica e de manutenção para o funcionamento contínuo do biodigestor.
--------------------------	--

Fonte : elaborado por Qu et al. (2013); Wahyuni et al. (2018); Wamwea (2017) e adaptado pelo autor.

A tabela 3 expõe as principais componentes que integram o sistema, porém para que seja possível utilizar as informações como instrumentos para a tomada de decisão, aplicou-se-a aos indicadores de viabilidade econômica descritos na revisão bibliográfica.

4.8.1 Custo de implantação e Operação

Essa etapa é responsável por mapear os custos necessários para a realização longínqua do projeto, buscando avaliar o custo necessário para a execução e desenvolvimento do projeto de biodigestores em paralelo.

O custo de implantação (CAPEX) para o presente trabalho consiste no somatório dos elementos físicos que compõem o sistema, que foram expostos na seção 4.8 Componentes do sistema, juntamente com a mão de obra necessária para a instalação.

Já o custo de operação (OPEX) foi quantificado como 6% do CAPEX, conforme exposto por Alcântara (2022), para análises de biodigestores de pequeno porte, enquadrando a faixa de uma faixa de OPEX de de 5 a 10 % do CAPEX para essa tipologia de projeto.

4.8.2 Receitas projetadas

Para o caso de reatores de pequeno porte considerou-se como receita exclusivamente sobre a substituição do gás de cozinha pelo biogás tratado. A avaliação da receita projetada do sistema de biodigestores de bateladas defasadas para estudo adotou como aspectos geradores de receita a aplicação térmica deste produto, que foi destinada para atender a demanda interna de gás liquefeito de petróleo na cozinha do restaurante universitário.

Desse modo, é possível avaliar a receita gerada pela substituição do uso de GLP por biogás, sendo esse parâmetro utilizado nas etapas seguintes para convergir a análise de viabilidade econômica do sistema.

4.8.3 Fluxo de caixa

O fluxo de caixa será definido conforme exposto na revisão bibliográfica. Considerou-se como receita o valor em reais da economia de gás liquefeito de petróleo para a cozinha do restaurante universitário. Já para os custos, resumiu-se ao CAPEX e OPEX necessários para a concepção do modelo.

4.8.4 Cálculo do Valor Presente Líquido (VPL)

A aplicação do VLP seguiu a estrutura exposta na revisão bibliográfica. Foi considerado como TMA o parâmetro de referência da taxa básica de juros da economia brasileira - Selic, por representar o rendimento médio de aplicações seguras no mercado financeiro.

Cabe mencionar que os fluxos de caixa que compõem a vida útil do sistema tiverem seus valores expressos em termos reais desconsiderando a inflação projetada, com o intuito de que os resultados representem o poder de compra sem a interferência de fatores monetários externos e voláteis. Dessa forma, a aplicação do VPL permitirá avaliar a atratividade econômica do sistema de biodigestores em relação ao custo de oportunidade definido.

4.8.5 Cálculo da Taxa Interna de Retorno

A taxa interna de retorno foi obtida diretamente a partir da série de fluxos de caixa projetados para o sistema, aplicando-se a ferramenta TIR do Microsoft Excel sobre os mesmos valores utilizados no cálculo do VPL. O procedimento restringiu-se a identificar a taxa que zera o saldo acumulado do investimento e em seguida compará-la à TMA adotada no estudo, permitindo verificar se o retorno percentual do projeto supera o limite mínimo de atratividade e, portanto, sustenta sua viabilidade econômica.

4.8.6 Cálculo do *Payback*

O período de *payback* possui como aplicação a determinação do prazo exigido para que um projeto gere receita suficiente para a recuperação do capital direcionado ao investimento inicial.

Tal indicador é estimado pela relação entre o investimento inicial pela entrada de caixa anual evidenciada no livro de Gitman (2001), como já exposto pela expressão 8 anteriormente, considerando que Inv segue a mesma definição dos indicadores anteriores e F_{cma} é dado pela média dos fluxos de caixas anuais produzidos durante a vida útil do projeto. Após isso, o *payback* é submetido aos critérios de decisão apresentados na revisão bibliográfica.

Assim, em posse dos indicadores de viabilidade econômica VPL, TIR e *PayBack*, permitirá avaliar a sustentabilidade e a rentabilidade econômica, atuando como base direta para a tomada de decisão quanto a possível implantação do sistema de biodigestores, para aproveitar termicamente os resíduos orgânicos gerados pelo Restaurante Universitário da UNESP Rio Claro.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização do Substrato

A quantificação da massa de substrato gerada pelo restaurante universitário iniciou-se com a união das médias do número de refeições entre Picciafuoco (2013) e Alves (2024), a partir da nova média de 415 refeições/dia e do índice de geração de 0,135 kg de resíduos por refeição apresentados na metodologia. Com isso, obteve-se uma massa diária de aproximadamente 55,95 kg/dia de resíduos alimentares úmidos. Esse valor representou o substrato efetivamente gerado pelo restaurante universitário em um cenário de performance elevada de operação e foi adotado como base para a caracterização físico-química, para o dimensionamento do biodigestor e para o cálculo da carga orgânica inserida no modelo.

Com parâmetros físico-químicos que Alves (2024) empregou, foi possível converter a massa de substrato fresco nas frações sólidas e biodegradáveis, considerando-se a umidade de 79,7%, a fração seca corresponde a 20,3% da massa total. Assim, a massa de 55,95 kg/dia correspondeu a 11,36 kg/dia de sólidos totais (ST). Desse total, 90,3% são constituídos por sólidos voláteis (SV), resultando em 10,22 kg/dia de SV, que representam a fração efetivamente biodegradável no processo anaeróbio.

Para o intervalo operacional adotado correspondente a 5 dias de batelada, a massa acumulada de substrato fresco totalizou 279,78 kg/batelada. Aplicando-se os mesmos parâmetros físico-químicos à carga semanal, obteve-se 56,80 kg de ST por batelada, dos quais aproximadamente 51,29 kg correspondem a SV. Esse valor representa a carga orgânica inserida no reator a cada ciclo e foi utilizado como parâmetro de entrada na aplicação da cinética de Gompertz modificada, servindo como base para a estimativa da produção potencial de metano.

O índice médio de geração de resíduos do RU de Rio Claro de 0,135 kg/refeição encontrou-se dentro da faixa indicada por Moura (2017) para unidades de alimentação institucional, definida pelo intervalo de 0,11–0,28 kg/refeição. Da mesma forma, a razão entre sólidos totais e sólidos voláteis obtida por Alves de 90,3% permaneceu compatível com os intervalos reportados na literatura, como os valores compilados por Zhang *et al.* (2007, 2011, 2013), que demonstram a faixa de variação desta relação entre 85–100%, confirmando a consistência dos parâmetros utilizados na modelagem.

Os resultados físico-químicos consolidados demonstram que o substrato gerado pelo restaurante universitário apresenta elevada proporção de água, baixa fração de sólidos totais e alta participação de compostos voláteis, características compatíveis com resíduos alimentares frescos e favoráveis à digestão anaeróbia.

5.2 Dimensionamento do Biodigestor

O volume total do biodigestor foi estimado a partir da soma entre o volume útil, espaço ocupado pelo substrato reacional e o volume de headspace, espaço utilizado para armazenar

parte do biogás gerado, evitando possíveis efeitos inibitórios. A determinação do volume útil aplicou os dados referentes à caracterização de substrato, conforme Picciafuoco (2013) e Alves (2024), e determinou a diluição do substrato necessária para operação, a vazão de entrada diária e a carga orgânica volumétrica para por fim estimar o volume útil do biodigestor. Já para o cálculo do volume de headspace, considerou-se a partir da aplicação de uma fração percentual sobre o volume útil, definida conforme as proporções indicadas para sistemas em batelada de pequeno porte.

Desse modo, os resultados que compreendem o processo de dimensionamento do biodigestor foram agrupados com base nas equações apresentadas na revisão bibliográfica, expostas na tabela 4 a seguir:

Tabela 4: Síntese do dimensionamento físico do biodigestor em batelada

Faixa de COV	Eq. (1) Concentração ideal de SV	Eq. (2) Volume total da mistura	Eq. (3) Vazão média equivalente	Eq. (4) Volume útil	Volume total com headspace
3,28	49,20	1,04	0,21	3,12	3,90
3,7	55,50	0,92	0,18	2,76	3,45
4,1	61,50	0,83	0,17	2,49	3,12
4,5	67,50	0,76	0,15	2,27	2,84
5	75,00	0,68	0,14	2,04	2,56
5,4	81,00	0,63	0,13	1,89	2,37
5,95	89,25	0,57	0,11	1,72	2,15

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores evidenciados na tabela 5 resultaram no dimensionamento físico do biodigestor empregado no tratamento dos resíduos alimentares, tendo como fonte o RU da UNESP do campus de Rio Claro. Assim, a variação da faixa da carga orgânica volumétrica de 3,28 a 5,95 $\text{kgSV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ evidenciou tanto a diminuição progressiva do volume quanto o dimensionamento do biodigestor submetido a COV elevadas. Com isso, os valores de volume total listados possuem como objetivo confirmar a coerência do dimensionamento, além de evidenciar qual volume de reator converge melhor para um cenário de equilíbrio entre simplicidade e eficiência do processo.

Além disso, a faixa de COV analisada encontra-se dentro do intervalo típicos de operação relatado na literatura de Zhang *et al.* (2007), que expôs a variação do COV entre os valores de 1 a 4 $\text{kgSv m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ para reatores operados em via úmida. Ademais, em uma perspectiva complementar, Schmeier (2017) avaliou que a COV variou de 3,28 a 9,64 $\text{kg SV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$. Porém, os melhores desempenhos se encontram nas faixas intermediárias de 3,5 e 5,0 $\text{kgSV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, enquanto os valores fora deste recorte tendem a inibir o processo.

Desse modo, o volume útil do biodigestor assumiu valor de 2,56 m^3 e atuou como fator de compensação, diluindo a elevada carga de resíduos alimentares aplicada e mantendo a operação dentro do limite superior da faixa estável descrita na literatura. Além disso, a adoção deste volume ao mesmo tempo que não opera nas faixas onde há processos inibitórios

apresenta capacidade que possibilita sua operação em pequena escala.

A carga orgânica volumétrica de $5,0 \text{ kgSV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ adotada neste dimensionamento garante coerência com os limites hidráulicos e de concentração definidos para o regime úmido, mantendo a conversão estável e eficiente. Desse modo, os resultados que foram obtidos neste dimensionamento servirão de subsídio direto para a etapa de avaliação de viabilidade técnica e econômica, na qual serão integrados aos cálculos dos custos de implementação e operação do sistema de biodigestores para aproveitamento energético dos resíduos alimentares.

5.3 Cinética química e seus parâmetros

Os resultados apresentados nesta seção corresponderam ao Cenário 2, construído a partir do ajuste dos parâmetros cinéticos referentes ao cenário ideal apresentado por Blasius (2018).

Assim o comportamento real dos resíduos orgânicos totais provenientes da rotina do restaurante universitário, foram representados pelos parâmetros cinéticos ajustados expostos na tabela 5 a seguir:

Tabela 5: Parâmetros cinéticos cenário 2 empregado no modelo cinético de Gompertz Modificado.

Parâmetro	Valor estimado	unidade
B(0)	509,5	$\text{mL CH}_4 \cdot \text{gSV}^{-1}$
Rm ($\text{mL} \cdot \text{d}^{-1}$)	51,2	$\text{mL CH}_4 \cdot \text{gSV}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$
λ (d)	—	dias

Recorte adaptado da tabela original de Blasius (2018), referente à mistura M3.

Vale ressaltar, que a ausência dos resultados referentes a L decorre do fato que a fase lag não foi observada ou foi considerada nula, graças à inicialização imediata do processo após a entrada de RA.

Com isso, a determinação do volume de biogás gerado teve como dado de entrada a quantificação do substrato definido por Picciafuoco (2013) e das características físico-químicas expostas por Alves (2024). A seleção dos parâmetros do cenário real permitiu aplicar a cinética de Gompertz modificada à carga orgânica do restaurante universitário. O potencial metanogênico ajustado $509,5 \text{ mL CH}_4 \cdot \text{gSV}^{-1}$ foi definido a partir da média ponderada entre os valores reportados reportados na revisão bibliográfica, de modo a representar um desempenho realista para resíduos alimentares heterogêneos.

Desse modo, a massa de 51,29 kg de sólidos voláteis obtidos a partir da massa de 279,79 kg de resíduos por batelada correspondeu ao volume de aproximadamente $26,13 \text{ m}^3$ de metano por batelada, representando assim um cenário real.

5.4 Definição Do Sistema De Bateladas

Os resultados obtidos nas etapas anteriores permitiu a modelagem do sistema de

biodigestores em bateladas alternantes, aplicado aos resíduos alimentares do Restaurante Universitário da UNESP Campus Rio Claro. O desenvolvimento desta seção tem como objetivo avaliar a eficiência técnica do arranjo proposto, verificando sua produção de biogás, a fim de otimizar o aproveitamento da fração metanogênica do substrato, checando se a operação está adequada à rotina do RU.

Assim, a avaliação do sistema de biodigestores do tipo batelada empregados em paralelo prosseguiu com os dados relativos aos diferentes intervalos entre cargas e tempos de retenção hidráulica, associados a suas respectivas produção de metano por batelada, o que possibilitou estimar o comportamento operacional do sistema de biodigestores em bateladas.

Logo, a tabela a seguir apresenta a relação estabelecida entre o TDH e os diferentes intervalos de carga considerados 5 e 10 dias, indicando para cada cenário o número de reatores que foram necessários, o número de bateladas anuais do sistema e a produção anual total de metano.

Tabela 6: Dinâmica do modelo de bateladas defasadas

TDH (dias)	Intervalo entre cargas (Δ , dias)	Produção por batelada no TRH ($\text{m}^3 \text{CH}_4$)	Número de reatores	Número de bateladas anuais totais	Produção anual total ($\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{ano}$)
5	5	13,06	1	26	338,93
	10	26,12	1	17	443,22
10	5	21,89	2	34	744,29
	10	43,78	1	13	569,17
15	5	24,98	3	39	974,06
	10	49,95	2	20	999,03
20	5	26,63	4	40	1.065,32
	10	51,66	2	16	826,57

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Vale ressaltar que a produção de metano não se manteve constante, pois a massa de entrada de RA variou com os intervalos entre carga, já que este parâmetro representa também os dias de geração matéria orgânica, resultando na massa total de resíduos que os intervalos de 5,10 dias terão que tratar.

Dessa forma, ao comparar o desempenho que o modelo de biodigestores de bateladas paralelas desenvolve quando submetido aos diferentes intervalos entre cargas, observou-se que não houve um cenário predominante. As faixas de produção de metano estão situadas próximas, a fim de determinar a faixa que une o rendimento energético e a simplicidade operacional.

O intervalo entre cargas de 5 dias, ao mesmo tempo que exibiu as maiores produções anuais de metano, apresentou pouco rendimento para os TDH de 5, pelo fato desse cenário exigir apenas 1 reator. Conforme a tabela 6, relatou-se a necessidade da demanda de um número mais elevado de reatores, que chegou até 4 unidades, o que equilibra a complexidade e os custos de manejo com a produtividade. Ademais, o cenário de 10 dias reduz a necessidade de reatores para no máximo 2 unidades, o que consequentemente diminui a produção anual, resultando em valores inferiores quando comparados com o cenário anterior, além de gerar

longos períodos de inatividade entre as bateladas, ocasionando em problemas com o armazenamento dos resíduos alimentares.

Além disso, a escolha desta relação entre TDH e intervalo entre carga considerou além do desempenho energético e da adequação operacional aos fluxos do restaurante universitário. Tal cenário também se destaca por representar o ponto final da curva sigmoideal prevista pela cinética de Gompertz modificada, momento em que aproximadamente 95% da matéria orgânica disponível já foi convertida.

Dessa forma, a geração de metano de 974,06 m³ CH₄/ano, no intervalo de 5 dias, aliado ao TDH de 15 dias, representa o ponto ótimo do sistema, oferecendo um rendimento anual próximo da máxima produção de metano para quatro reatores de 999,03 m³ CH₄/ano, mantendo a coerência com a geração real de resíduos alimentares e com a rotina de funcionamento do RU. Essa configuração encerra a etapa de avaliação, consolidando o modelo proposto como tecnicamente equilibrado, operacionalmente viável e adaptado às condições de funcionamento do restaurante universitário.

5.5 Uso do Biogás.

Desse modo, a produção anual de 974,06 m³·ano⁻¹ de biogás teve sua conversão energética definida pela aplicação da relação de 1 m³ de biogás $\approx$ 0,564 kg de GLP, obtidos a partir dos valores médios que foram expostos na metodologia. Com isso, os resultados da equivalência energética correspondeu a uma massa de 549,37 kg de GLP por ano, que quando observada sob a ótica econômica, agregou valor de aproximado de 4.581,73 R\$ por ano, considerando o preço médio de 8,34 R\$/kg calculado a partir do valor comercial de R\$ 108,50 por botijão de 13 kg.

Essa estimativa apresentada representou um cenário conservador-realista, refletindo o limite inferior esperado do sistema e podendo ser refinada conforme a composição real e o PCI do biogás sejam determinados experimentalmente.

Tal afirmação se fundamenta quando comparado o fator de equivalência energética utilizado para o presente trabalho aos valores reportados por Bezerra (2019) e DE MATTIA (2019). Em seu estudo, a coleta de informações de diferentes trabalhos gerou o intervalo de 0,40 e 1,43 kg de GLP por metro cúbico de biogás. Para fins comparativos, a tabela 7 ilustra os cenários possíveis de equivalência energética, relacionado o fator utilizado na presente pesquisa, juntamente com os limites inferior e superior reportados pela literatura comparativa com o volume total anual e relacionando a equivalência com botijões de 13 kg de GLP.

Tabela 7: Cenários de equivalência energética e substituição de GLP

Cenário	Equivalência energética (kg GLP·m ⁻³)	Mass total de GLP (kg.ano-1)	Botijões substituídos (unid·ano ⁻¹)
Cenário adotado (este estudo)	0,564	549,37	42,20

Limite inferior	0,391	380,86	29,30
Limite superior	1,43	1.392,90	107,15

Fonte: Adaptado de Bezerra (2019) e De Mattia (2017) CIBiogás (2022) e elaborado pelo autor.

Em síntese, o fator de equivalência adotado de $0,546 \text{ kg GLP} \cdot \text{m}^{-3}$, calculado a partir do poder calorífico inferior médio e da densidade do biogás reportados por CIBiogás (2022), representa um cenário conservador-realista para a conversão energética do sistema. Essa abordagem assegurou que os resultados expressam o potencial energético do biogás em condições operacionais típicas, evitando superestimação e mantendo a coerência metodológica da análise de viabilidade. Ao converter o volume de biogás produzido em massa e valor econômico equivalentes de GLP, a seção evidenciou o potencial de aproveitamento térmico e de economia anual que o sistema pode proporcionar ao restaurante universitário, oferecendo uma base quantitativa sólida para as etapas subsequentes de viabilidade econômica.

5.6 Composição física dos biodigestores.

A composição apresentada na tabela acima ultrapassou o papel meramente descritivo dos requisitos técnicos para a construção e operação dos biodigestores, pois evidenciou o caráter democrático e sustentável da proposta de projeto desenvolvido para o restaurante universitário. A predominância de materiais plásticos e passíveis de serem reaproveitados, como tanques de ibc e tubos de pvc, revelou uma abordagem de engenharia acessível, capaz de ser replicada por diferentes instituições sem depender de infraestrutura industrial. Essa simplicidade intencional transforma o sistema em uma tecnologia social, unindo eficiência técnica, baixo custo e disponibilidade local de componentes.

Desse modo, o presente trabalho apresentou a quantificação total e a estimativa de custos físicos correspondentes à construção do sistema de três biodigestores, considerando os mesmos itens descritos na tabela 8. Os valores foram estimados em médias de mercado de 2025 e refletem a composição consolidada do sistema completo instalado no restaurante universitário da UNESP Rio Claro. Dessa forma, os componentes foram analisados de acordo com parte do sistema a qual estas pertencem, ensinado pela determinação da estrutura central apresentada pela tabela 8 a seguir:

Tabela 8: Estrutura central do sistema de três biodigestores

Componente	Especificação técnica	Unidade	Quantidade total	Custo unitário (R\$)	Custo Sistema(R\$)
Cisternas plásticas verticais 2.500L	Polietileno de alta densidade (PEAD), tampa rosqueável e saída inferior 2"	un	3	1.233,90	3.701,70
Adaptador de saída da cisterna	Rosca BSP 2" fêmea + 1" macho em PVC	un	3 pares	12,00 + 9,47	64,41

Torneira para gas na parte superior	Espigão PVC 20 mm × ½" BSP com porca e arruela de vedação	un	3	35,50	106,50
Junta e vedação da tampa	Anel de borracha nitrílica (NBR) e silicone de alta temperatura	un	3	28,68	86,04
Suportes de base das cisternas	Bloco de concreto nivelador (0,5 × 0,5 m)	un	27	12,90	232,2

Fonte: Adaptado de Marchi (2013) e elaborado pelo autor (2025).

A tabela 8 evidenciou o núcleo do sistema e traduz a adaptação de materiais de uso comum em uma solução de engenharia. A adoção da cisterna de 3 m³ garantiu o volume reacional e sem que a complexidade construtiva seja ultrapassada, mantendo a lógica modular e facilmente replicável. O uso de elementos simples, como flanges e vedações convencionais, demonstra que o projeto equilibra resistência mecânica e acessibilidade, reafirmando o caráter de tecnologia social de baixo custo e alta aplicabilidade prática.

Tabela 9: Linha de Alimentação e Descarga

Componente	Especificação técnica	Unidade	Quantidade total	Custo unitário (R\$)	Custo Sistema(R\$)
Tubo PVC marrom DN160 mm (classe esgoto)	Junta elástica, SN4	m	10	59,50	590,50
Tê PVC DN160 mm com tampão	Derivação para inspeção e limpeza	un	2	44,10	132,30
Joelho PVC 90° DN160 mm	Curva longa – raio padrão	un	1	38,52	115,56
União PVC DN160 mm	Junta dupla de acoplamento rápido	un	3	27,50	82,50
Válvula esfera PVC 1" soldável	Corpo PVC-U – PN 10 bar	un	3	16,49	49,47

Fonte: Adaptado de Marchi (2013) e elaborado pelo autor

A linha de alimentação e descarga determinou a hidráulica do sistema. As conexões em PVC de grande diâmetro asseguram o fluxo contínuo de substrato e o escoamento eficiente do digestato, minimizando perdas por atrito e riscos de entupimento. O conjunto evidenciou um dimensionamento, expresso pela busca por um equilíbrio entre durabilidade, desempenho operacional e praticidade de operação no contexto institucional

Tabela 10: Linha de Biogás Individual

Componente	Especificação técnica (detalhada)	Unidade	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Custo Sistema(R\$)
Tubo PEAD preto PN80	Parede espessa, Ø 20 mm, uso para condução de biogás	m	20	3,14	62,80

Mangueira flexível	Mangueira reforçada de PVC, Ø 3/4",	m	1,5	1,59	7,15
Passa-muro	Conexão passa-muro 3/4",	un	1	12,84	38,61
Niple galvanizado	Niple galvanizado 3/4", 1	un	1	15,85	47,55
Válvula esfera metálica	Válvula de esfera 3/4",	un	1	27,11	81,33
Bico espigão	Adaptador tipo espigão 3/4" para mangueira 3/4",	un	1	24,56	73,68

Fonte: Adaptado de Marchi (2013) e elaborado pelo autor (2025).

A linha individual de biogás foi estruturada no princípio da autonomia operacional entre os biodigestores, permitindo isolar a coleta por unidade e evitar reflexos indesejados. O uso de PEAD e válvulas de retenção assegura estabilidade e segurança mesmo sob pequenas variações de pressão.

Tabela 11: Manifold e Linha Principal

Componente	Especificação técnica	Unidade	Quantidade total	Custo unitário (R\$)	Custo Sistema(R\$)
Tubo PEAD DN20 mm (PN10)	Linha principal até a cozinha (máx. 30 m)	m	30	2,90	87,00
Tê PEAD DN20 mm	Derivação dos três reatores	un	3	22,19	44,20
Válvula esfera PEAD DN20 mm	Geral do manifold – compressão PN10	un	1	29,99	29,90

Fonte: Adaptado de Marchi (2013) e elaborado pelo autor (2025).

O manifold centraliza e equilibra os fluxos de biogás, conduzindo-o até o ponto de consumo. A escolha por PEAD de 25 mm na linha principal permite percursos de até 30 m com baixa perda de carga e alta resistência. Essa configuração reforça a simplicidade e confiabilidade da estrutura, adequando-se bem a aplicações institucionais de pequeno porte.

Tabela 12: Instrumentos auxiliares

Componente	Especificação técnica	Unidade	Quantidade total	Custo unitário (R\$)
Medidor digital de pH e temperatura	Faixa 0–14 pH e 0–80 °C – precisão $\pm 0,1$ pH	un	1	203,00
Triturador TR200 Trapp	Motor 2 HP – trituração de resíduos alimentares	un	1	1.400,00

Fonte: Adaptado de Marchi (2013) e elaborado pelo autor (2025).

A instrumentação e o preparo do substrato refletem o caráter experimental e didático do projeto. O controle de pH e temperatura permitem acompanhar a estabilidade do processo, enquanto o triturador garante uniformidade do material alimentado, elevando a eficiência da

digestão e a consistência dos resultados obtidos.

Tabela 13 : Fixação, Vedação e Montagem

Componente	Especificação técnica	Unidade	Quantidade total	Custo unitário (R\$)	Custo Sistema(R\$)
Cola PVC (amarela)	Bisnaga 175 g – Tigre ou Krona	un	2	21,00	42,00
Fita veda-rosca PTFE	12 mm × 25 m – Tekbond	un	2	9,00	18,00
Abraçadeiras metálicas ½"-1"	Inox AISI 304 – fixação de tubos/mangueiras	un	12	52,00	52,00
Suportes e bases niveladoras	Aço galvanizado – sustentação das linhas	un	6	60,00	240,00

Fonte: Adaptado de Marchi (2013) e elaborado pelo autor (2025).

Os itens de fixação e vedação complementam a montagem do sistema, assegurando estabilidade e estabilidade estrutural. A escolha de materiais simples, como colas, fitas e abraçadeiras metálicas, reforça o foco em soluções práticas, acessíveis e de fácil manutenção, coerentes com a proposta de engenharia aplicada do trabalho.

Dessa forma, com a quantificação dos elementos descritos na Tabela 2, o projeto atinge um ponto de síntese entre viabilidade construtiva e racionalidade econômica, mostrando que é possível estruturar um sistema completo de digestão anaeróbia com controle operacional, segurança e eficiência, mantendo custos compatíveis com a realidade institucional. A leitura conjunta das duas tabelas reforça, portanto, que o modelo desenvolvido para o Restaurante Universitário da UNESP Campus Rio Claro não é apenas tecnicamente exequível, mas também simboliza uma prova de conceito da democratização tecnológica.

5.7 Análise de viabilidade econômica

A utilização térmica do biogás para a cocção de alimentos representa uma economia direta do gás liquefeito de petróleo, o que consequentemente gerou impactos financeiros positivos para o restaurante universitário. Desse modo, com o objetivo de quantificar estes efeitos, a análise de viabilidade econômica foi empregada a partir da coleta das informações descritas na tabela 14 da seção 4.8.2 exposta a seguir:

Tabela 14: Parâmetros iniciais para análise de viabilidade econômica de biodigestores

Parâmetro Inicial	Resultados encontrados
Investimento Inicial	O custo de materiais foi de 9.221,80 R\$ e de mão de obra de 1.600 R\$, totalizando 10.821 R\$
Produtividade Média	Volume total estimado de biogás tratado foi de 974,06 m ³ , correspondendo a R\$ R\$ 4.581,73 de economia.
Demanda de Biomassa Seca	A massa de sólidos voláteis utilizados como entradas do sistema foi de 10,22 kgSv/dia.

Vida Útil	Os componentes do sistema possuem em média uma vida útil de 12 anos
Volume	O sistema é composto por 3 biodigestores de respectivamente 2,56 m ³
Tipo de Biomassa	A biomassa foi caracterizada como resíduo alimentar com geração de 55,96 kg/dia, com a fração de sólidos voláteis representando 18,27% do volume total. A massa utilizada para a digestão foi de 279,79 kg/bat de resíduos alimentares.
Complexidade de Construção	Baixa complexidade a média complexidade.
Complexidade de Operação	Exige rotinas de monitoramentos simples e manutenção básica.

Fonte: adaptado Alcântara (2022).

Com as informações de entrada do estudo de viabilidade apresentadas na tabela 14, observou-se que o sistema de bateladas alternadas apresentou parâmetros de operação compatíveis com o porte e funcionamento do Restaurante Universitário da UNESP Campus Rio Claro.

O investimento inicial (CAPEX), que totalizou R\$10.821, teve seu valor definido principalmente pela aquisição das cisternas, mão de obra para sua instalação e da aquisição do aparelho triturador TR 200. Já o custo de operação do sistema (OPEX) consistiu no valor R\$649,26 ao ano.

A produção de biogás de 974,06 m³ que o sistema possui de potencial, ao ser convertida para a massa de 549,37 kg de GLP, a fim de analisar a equivalência energética entre os gases, além de quantificar a substituição do biogás na cozinha, evidenciou uma economia bruta de R\$ 4.581,73 por ano. Correspondendo a R\$3.931,74 após a redução dos custos anuais de operação e manutenção, obteve-se uma economia líquida anual representado o fluxo de caixa.

Para fins de análise financeira, foi considerada uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 15% ao ano, conforme definido na metodologia, representando o custo de oportunidade institucional para investimentos de baixo risco e servindo como base para o desconto dos fluxos de caixa ao longo da vida útil de 12 anos. As demais etapas da figura 1 estão desenvolvidas na tabela a seguir:

Tabela 15: Parâmetros da viabilidade econômica para o sistema de biodigestores

Etapas	Descrição e objetivo	Resultados obtidos
Valor Presente Líquido (VPL)	R\$ 10.495,42	O VPL positivo indica que o projeto gera valor acima do custo de oportunidade (TMA = 15%), demonstrando atratividade econômica e justificando o investimento ao longo da vida útil.
Taxa Interna de Retorno (TIR)	35,4% a.a.	A TIR supera em quase três vezes a TMA, evidenciando alta rentabilidade, ampla margem de segurança e forte retorno percentual mesmo em cenários conservadores.
<i>Payback</i>	2,75 anos ($\approx$ 33 meses)	Retorno simples rápido, adequado ao porte do sistema e ao baixo risco operacional, indicando que o valor investido retorna ainda no primeiro quarto da vida útil.

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

A tabela 15 mostra que fluxo de caixa de R\$ 3.931,74 ao longo da vida útil de 12 anos resultaram em valores positivos derivados da substituição direta do GLP por biogás.

Os parâmetros asseguram uma avaliação prudente e realista, adequada ao contexto

institucional e às diretrizes de sustentabilidade financeira da universidade.

Os resultados do valor presente líquido de R\$10.495,42 taxa interna de retorno de 35,4% a.a. e *Payback* = 2,75 ano, enquadraram o modelo nas faixas de alta atratividade econômica descritas por Gitman (2001) e Faria (2017), que consideram projetos com VPL positivo e TIR acima da TMA como investimentos rentáveis e de baixo risco. De modo similar, Freitas *et al.* (2018) demonstram que biodigestores de pequeno porte apresentam viabilidade elevada quando o custo construtivo é reduzido e o aproveitamento energético é local, o que reforça a coerência dos resultados obtidos para o restaurante universitário.

Apesar de o sistema atender apenas cerca de 14% da demanda térmica da cozinha universitária, o modelo demonstra rentabilidade e eficiência energética notáveis. O baixo volume de biogás produzido de 974,06 m³ ao ano é compensado pelo custo de implantação reduzido e pela estabilidade operacional das bateladas alternadas. Mesmo operando em pequena escala, o sistema apresentou VPL positivo, TIR dentro da literatura, além de *payback* inferior a três anos, resultados que evidenciam a solidez financeira do investimento.

Isso confirma que, no contexto do Restaurante Universitário da UNESP Campus Rio Claro, a digestão anaeróbia é economicamente viável mesmo quando aplicada de forma complementar, atuando como uma unidade demonstrativa autossustentável e como instrumento de economia institucional e educação ambiental.

6. CONCLUSÃO

O estudo de viabilidade econômica realizado permite concluir que o sistema de biodigestores em batelada apresenta condições de implantação no Restaurante Universitário da UNESP Campus Rio Claro. Os indicadores de viabilidade analisados demonstram capacidade de recuperação do investimento e compatibilidade com as restrições operacionais e orçamentárias da unidade, confirmando que o aproveitamento energético dos resíduos alimentares constitui uma alternativa tecnicamente aplicável e economicamente justificável.

O processo de caracterização confirmou um substrato altamente biodegradável, que quando seco possui fração predominante de sólidos voláteis, que sustentou a escolha da digestão anaeróbia como rota de valorização. A modelagem pela cinética de Gompertz modificada, ajustada para atender o contexto de composição real do material do restaurante universitário, indica um potencial médio de aproximadamente 26 m³ de metano por batelada, coerente com sistemas de pequena escala e suficiente para representar o dimensionamento adotado.

Além disso, os volumes definidos para os sistema de biodigestores, o headspace operacional e os intervalos de carga demonstraram compatibilidade entre geração real de resíduos, ritmo de degradação e capacidade volumétrica, produzindo um arranjo simples, estável e de baixa complexidade construtiva, conciliados com a rotina de funcionamento do restaurante universitário.

A projeção energética empregada identifica que o biogás contendo cerca de 65% de metano permite substituir 14% do consumo de GLP do restaurante, mantendo coerência com fatores de conversão e PCI estimado para essa composição. Embora a substituição da matriz não seja integral, ela reafirma a contribuição ambiental do sistema e a redução proporcional de emissões e descarte em aterros. Do ponto de vista social, o arranjo favorece processos educativos, aproxima a comunidade acadêmica de tecnologias ambientais e amplia a transparência da gestão de resíduos no espaço universitário.

Por fim, os indicadores econômicos confirmam a convergência entre as etapas técnicas do estudo. O investimento de R\$10.821,00 associado a retornos anuais da ordem de R\$4.500,00 resultou em VPL positivo, TIR superior à TMA de 15% e *payback* compatível com sistemas descentralizados de baixo risco, confirmando a viabilidade econômica do projeto.

Considerando ainda a possibilidade de aumento do número de refeições servidas, observa-se uma tendência de crescimento proporcional da geração de resíduos e, portanto, do volume de metano recuperado, o que reforça o potencial energético e a conveniência institucional do sistema.

Dessa forma, os objetivos estabelecidos para o presente trabalho são atendidos, permitindo compreender a capacidade do sistema em produzir biogás e em substituir parcialmente o consumo anual de GLP. Observa-se ainda que eventuais aumentos no número

de refeições servidas no campus tendem a elevar proporcionalmente a geração de resíduos e, consequentemente, o potencial de biogás, ampliando o rendimento energético do sistema.

Cabe destacar, que para a implementação real do sistema no campus, algumas recomendações devem ser consideradas. A realização de um ensaio de BMP específico para o resíduo real do restaurante universitário é fundamental para definir parâmetros cinéticos próprios e reduzir incertezas da modelagem. Também se recomenda a determinação experimental do poder calorífico inferior do biogás produzido localmente, permitindo maior precisão na equivalência energética com o GLP, o que por sua vez afeta diretamente os ganhos econômicos do projeto.

Além disso, para uso seguro do biogás na cocção, a mistura necessita de tratamento básico de dessulfurização e remoção de umidade, assegurando estabilidade de combustão e evitando corrosão das tubulações e bocas dos fogões. Vale ressaltar que o pequeno volume de biogás determinado é originado pelo número reduzido de refeições servidas por dia, o que limita a quantidade de resíduos disponíveis para conversão. Uma eventual intervenção que amplie paradigma, além de fortalecer a função social do RU no apoio à permanência estudantil, também gera reflexos positivos na eficiência do sistema de biodigestão, uma vez que o aumento da produção de alimentos eleva a oferta de substrato e consequentemente o volume de metano recuperado.

Sucessivamente, o digestato gerado deve ser caracterizado quanto ao seu potencial de uso como biofertilizante nas áreas verdes da universidade, ampliando o ciclo de aproveitamento. Ademais, recomenda-se quantificar de forma sistemática os ganhos socioambientais associados ao sistema e realizar uma análise de sensibilidade econômica para antecipar variações futuras de custos e preços do GLP. Por fim, recomenda-se que o biodigestor seja integrado às políticas institucionais de sustentabilidade da UNESP Rio Claro, pois essa vinculação pode ampliar sua relevância estratégica no campus, favorecendo seu uso contínuo como ferramenta educativa e de apoio à gestão de resíduos.

7. REFERÊNCIAS

- ABREMA. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. São Paulo, SP: ABREMA, 2020.
- _____. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024**. São Paulo, SP: ABREMA, 2024.
- ALCANTARA, Lucas da Paixão; ZANG, Joachim Werner; FONSECA-ZANG, Warde Antonieta da. A viabilidade econômica de modelos de biodigestores para a produção de biogás. **RECIT: Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, Medianeira, v. 13, n. 32, p. 1-50, jan./abr. 2022. DOI: 103895/recit.V13N52.13188. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/recit>. Acesso em: 3 dez. 2025.
- ALVES, Gabriel. **Potencial de compostagem dos resíduos orgânicos gerados em estabelecimentos de hortifruti no município de Rio Claro - SP**. 2024. 74 f. Trabalho de Formatura (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2024.
- AMARAL, André Cestonaro do; STEINMETZ, Ricardo Luis Radis; KUNZ, Airton. Parâmetros de importância ao processo de digestão anaeróbica. In: **Fundamentos da digestão anaeróbica, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. [S.l.: s.n.], [20--]. Cap. 2, p. 1-14.
- BATSTONE, D. J. et al. The IWA anaerobic digestion model no 1 (ADM1). **Water Science and Technology**, v. 45, n. 10, p. 65-73, 2002. Acesso em: 30 out. 2025.
- BEZERRA, Vanessa Rosales; LEITE, Valderi Duarte. Tecnologia de biodigestores de resíduos sólidos orgânicos. In: **CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE E SOCIEDADE**, 1., 2019, Campina Grande. Anais... Campina Grande: CONIMAS, 2019. p. 1-17. Acesso em: 02 dez. 2025.
- BLASIUS, Jandir Pereira. **Influência de diferentes composições de resíduos alimentares no processo de biometanização**. 2018. 131 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2018.
- CIBIOGÁS. **Guia prático para projetos de biogás**. [S.l.]: CIBIOGÁS, 2022. 79 p. (Publicações CIBiogás).

DE MATTIA, Luíze L. **Estudo preliminar de viabilidade para implantação de uma central de produção de biogás a partir de dejetos suínos para fins energéticos**. 2017. 11 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA SUÍNOS E AVES; SBERA (org.). **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia, SC: Embrapa Suínos e Aves; Sbera, 2019.

FREITAS, M. F.; PIRES, M. M.; BENINCÁ, D. Fragilidades e potencialidades na gestão dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 16, e20230271, 2024. DOI: 10.1590/2175-3369.016.e20230271. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2175-3369.016.e20230271>. Acesso em: 03 dez. 2025.

GITMAN, Lawrence J. **Princípios de administração financeira**. Tradução Allan Vidigal Hastings. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

GOMES, Leonardo Henrique Santos. **Possibilidades para a utilização de biogás – Um estudo teórico**. 2017. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

GUERI, Matheus Vitor Diniz. **Avaliação do processo de digestão anaeróbia de resíduos alimentares em reatores batelada e semi-contínuo**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

LIMA, M. A. M.; TRINDADE, N. M.; SILVA, I. J. da. A construção do biodigestor como exercício da prática pedagógica na atividade de extensão universitária. **Revista Eletrônica da Faculdade Anhanguera de Sorocaba**, Sorocaba, v. 1, n. 1, p. 1–9, 2010. Acesso em: 03 dez. 2025.

MALEKI, Esmat; BOKHARY, Alnour; LIAO, B. Q. A review of anaerobic digestion bio-kinetics. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 17, p. 691-705, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9484-z>. Acesso em: 03 dez. 2025.

MARCHI, Maria Eugenia Vial; BARBOSA, Paulo Menescal; BRESSIANI, Paulo do Amaral. **Digestão anaeróbia de resíduos orgânicos para cozinha industrial dos restaurantes Latife**. 2013. Trabalho de Formatura (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

MARCUCCI, Leandro Willian. **Otimização da produção de biogás em biodigestores batelada**. 2018. 65 f. Dissertação (Mestrado em Biometria) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2018.

MEDEIROS, Gerson de Araújo et al. Biodigestor: uma tecnologia para a gestão de resíduos sólidos integrada com a educação ambiental e extensão universitária. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 3, p. 10741–10754, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n3-083>. Acesso em: 03 dez. 2025.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Tecnologias de digestão anaeróbia com biogás: relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás**. 1. ed. Brasília, 2015. (Coletânea de publicações do PROBIOGÁS. Série Desenvolvimento do Mercado de Biogás).

MOREIRA, Ailton João Gonçalves. **Aplicação de modelos cinéticos a testes do potencial de biometanização de substratos orgânicos diversos**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

MOURA, Raquel Piedade. **Avaliação do potencial de geração de energia a partir dos resíduos orgânicos do Restaurante Universitário Central da UFRJ**. 2017. Projeto de Graduação (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

NASCIMENTO, Victor Fernandez et al. Evolução e desafios no gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 10, n. 4, p. 889–902, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1635>. Acesso em: 14 out. 2025.

PICCIAFUOCO, Beatriz Di Francesco. **Diagnóstico dos resíduos sólidos gerados no restaurante universitário da Unesp de Rio Claro: uma análise do potencial de compostagem**. 2013. Trabalho de Formatura (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2013.

QU, W.; TU, Q.; BLUEMLING, B. Quais fatores são eficazes para o uso do biogás pelos agricultores? - Evidências de uma pesquisa em larga escala na China. **Energy Policy**, v. 63, p. 26-33, 2013. Acesso em: 23 set. 2024.

RIBEIRO, Marcia Carla Pereira et al. Institutional and Legal Framework of the Brazilian Energy Market: Biomass as a Sustainable Alternative for Brazilian Agribusiness. **Sustainability**, v. 12, n. 1554, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12041554>. Acesso em: 03 dez. 2025.

ROA, I. D. et al. Economic Feasibility of Biogas Microgeneration from Food Waste: Potential for Sustainable Energy in Northeastern Brazil. **Sustainability**, v. 16, n. 10238, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su162310238>. Acesso em: 09 set 2025.

SANTOS, A. A. et al. Gestão de resíduos sólidos em uma comunidade universitária. **Cadernos de Educação e Desenvolvimento**, Portugal, v. 16, n. 10, p. 01–14, 2024. DOI: 10.55905/cuadv16n10-142. Acesso em: 3 dez. 2025.

SANTOS, Ana Elisa Esteves dos. **Uso de resíduos alimentares na produção de biogás: avaliação experimental e modelagem da digestão anaeróbia**. 2022. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

SCHMEIER, Nara Paula. **Avaliação da operação de biodigestor no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos**. 2017. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2017.

SENA, Isabela Barros de et al. Proposta para o desenvolvimento de biodigestores anaeróbios em instituições de ensino superior. In: **ENCONTRO LATINO-AMERICANO E EUROPEU SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS**, 3., 2019. Anais... [S.l.], v. 3, n. 1, p. 583-591, 2019. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/euroelecs/article/view/2771>. Acesso em: 13 nov. 2025.

SILVA, C. S. S. da et al. Análise histórica da geração, coleta e destinação dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Revista Tecnologia e Sociedade**, Curitiba, v. 16, n. 41, p. 125–138, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3895/rts.v16n41.11815>. Acesso em: 03 dez. 2025.

SOARES, Itania Pinheiro et al. **Biogás e suas contribuições para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2022. 54 p. (Documentos, 49).

TAVARES, Jimmy Carter Lima. **Caracterização dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Maceió-AL**. 2008. 116 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2008.

ZAIAT, Marcelo. **Fundamentos de cinética e análise de reatores aplicados ao tratamento de águas residuárias**. São Carlos, SP: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005. Notas de aula