



Assinado com Assinatura Eletrônica (Lei 14.063/2020 | Regulamento 910/2014/EC)
Hash SHA256 do original: 6bcb3217c7f4fb9052b783d042e0c076f8b53878b42884280c64bdf3ce9036c
Link de validação: <https://valida.ae/8acdae5d738cc8d6f65c154693de8b19aca93625e50732457>

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE LINS PROF. ANTONIO SEABRA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM GESTÃO DA QUALIDADE**

TAYNARA ROBERTA CERON CAMPOS

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E TEÓRICA DA DIGESTÃO
ANAERÓBICA DE DIFERENTES BIOMASSAS PARA PRODUÇÃO DE
BIOGÁS COM APOIO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

**LINS/SP
1º SEMESTRE/2026**



Validador



Assinado com Assinatura Eletrônica (Lei 14.063/2020 | Regulamento 910/2014/EC)
Hash SHA256 do original: 6bcb3217c7f4fb9052b783d042e0c076f8b53878b42884280c64bdf3ce9036c
Link de validação: <https://valida.ae/8acdae5d738cc8d6f65c154693de8b19aca93625e50732457>

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE LINS PROF. ANTONIO SEABRA
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA GESTÃO DA QUALIDADE**

TAYNARA ROBERTA CERON CAMPOS

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E TEÓRICA DA DIGESTÃO ANAERÓBICA DE DIFERENTES BIOMASSAS PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS COM APOIO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Tecnologia de Lins para a obtenção
do título de Tecnólogo (a) em Gestão da Qualidade

Orientador: Prof. Dr. Roberto Ota.
Coorientador: Profa. Dra. Ana Maria Taddei
Cardoso De Barros

**LINS/SP
1º SEMESTRE/2026**



Validador



Roberta Ceron Campos, Taynara

R639a Avaliação Experimental e Teórica da Digestão Anaeróbica de
Diferentes Biomassas para Produção de Biogás com Apoio de Simulação
Numérica / Taynara Roberta Ceron Campos. — Lins, 2026.

23f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Gestão da
Qualidade) — Faculdade de Tecnologia de Lins Professor Antonio
Seabra: Lins, 2026.

Orientador(a): Dr. Roberto Outa

1. digestão anaeróbica. 2. substratos orgânicos. 3. metano. 4.
biofertilizante. 5. sustentabilidade. I. Outa, Roberto . II. Faculdade de
Tecnologia de Lins Professor Antonio Seabra. III. Título.

CDD 658.562

Gerada automaticamente pelo módulo web de ficha catalográfica da FATEC Lins
mediante dados fornecidos pelo(a) autor(a).





TAYNARA ROBERTA CERON CAMPOS

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E TEÓRICA DA DIGESTÃO ANAERÓBICA DE DIFERENTES BIOMASSAS PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS COM APOIO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Tecnologia de Lins como parte dos requisitos para obtenção do título de Tecnólogo em Gestão da Qualidade sob orientação do prof. Dr. Roberto Outa e coorientação profa. Dra. Ana Maria Taddei Cardoso De Barros.

Data de aprovação: 16/06/2026



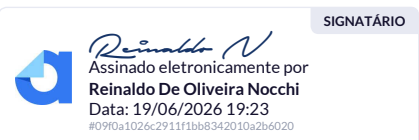
Orientador

Prof. Dr. Roberto Outa



Examinador1

Profa. Dra. Ana Maria Taddei Cardoso De Barros



Examinador2

Prof. Me. Reinaldo de Oliveira Nocchi





SUMÁRIO

RESUMO.....	4
ABSTRACT.....	4
1 INTRODUÇÃO.....	5
1.1 Objetivo Geral	6
1.2 Objetivos Específicos.....	6
1.3 Campo de Aplicação.....	7
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
2.1 Fundamentos da digestão anaeróbica.....	7
2.2 Etapas bioquímicas do processo (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese)	7
2.3 Interações microbianas e eficiência energética.....	8
2.4 Substratos orgânicos e produção de biogás	8
2.5 Biomassas lignocelulósicas e pré-tratamentos	9
3 MODELAGEM E SIMULAÇÃO NA DIGESTÃO ANAERÓBICA.....	9
3.1 Aplicação de modelos matemáticos em biodigestão	9
3.2 Simulação computacional como ferramenta de apoio experimental	10
4 ECONOMIA CIRCULAR E APLICAÇÕES DO BIOFERTILIZANTE	10
4.1 Produção e aplicações de biofertilizantes como coproduto da digestão anaeróbica.....	10
4.2 Inserção da digestão anaeróbica na economia circular.....	11
5 MATERIAIS E MÉTODOS	11
5.1 Algoritmo de simulação	12
5.2 Fatores de conversão e características das biomassas	13
6 RESULTADOS.....	14
6.1 Produção de gases na hidrólise.....	15
6.2 Produção de gases na acidogênese	15
6.3 Produção de gases na acetogênese	16
6.4 Produção de Gases na Metanogênese	17
6.5 Análise comparativa e implicações	18
DISCUSSÃO GERAL	18
CONCLUSÃO	19
REFERÊNCIAS.....	20





AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E TEÓRICA DA DIGESTÃO ANAERÓBICA DE DIFERENTES BIOMASSAS PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS COM APOIO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Taynara Roberta Ceron Campos¹, Dr. Roberto Outa²

¹Acadêmica do Curso de Gestão da Qualidade da Faculdade de Tecnologia de Lins
Prof. Antônio Seabra – Fatec, Lins – SP, Brasil

²Docente do Curso de Gestão da Qualidade da Faculdade de Tecnologia De Lins
Prof. Antônio Seabra – Fatec, Lins – SP, Brasil

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar a digestão anaeróbica de diferentes biomassas, considerando as etapas de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, de modo a identificar variações qualitativas e quantitativas na produção de biogás. Os resultados mostram que substratos de origem bovina e resíduos alimentares apresentaram melhor desempenho metanogênico, enquanto materiais lignocelulósicos exigiram estratégias de pré-tratamento para maior aproveitamento. De forma complementar, a simulação numérica computacional foi utilizada como ferramenta de apoio para organizar e interpretar os resultados, permitindo comparar o comportamento dos substratos em condições controladas e antecipar tendências observadas experimentalmente. O diferencial do estudo está em integrar análise experimental e teórica, comparar diferentes substratos e destacar a relevância do biofertilizante gerado, ampliando a contribuição do processo tanto para a produção de energia quanto para práticas de economia circular.

Palavras-Chave: digestão anaeróbica; substratos orgânicos; metano; biofertilizante; sustentabilidade.

ABSTRACT

This study aims to analyze the anaerobic digestion of different biomasses, considering the stages of hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis, and methanogenesis, in order to identify qualitative and quantitative variations in biogas production. The results show that substrates of bovine origin and food waste presented better methanogenic performance, while lignocellulosic materials required pretreatment strategies for greater utilization. Complementarily, computational numerical simulation was used as a support tool to organize and interpret the results, allowing for comparison of substrate behavior under controlled conditions and anticipation of experimentally observed trends. The study's unique feature lies in its integration of experimental and theoretical analysis, comparison of different substrates, and highlighting the relevance of the generated biofertilizer, expanding the process's contribution to both energy production and circular economy practices.

Keywords: anaerobic digestion; organic substrates; methane; biofertilizer; sustainability.



1 INTRODUÇÃO

A digestão anaeróbica constitui um processo biológico amplamente consolidado para o tratamento de resíduos orgânicos e a geração de energia renovável. Esse processo consiste na decomposição da matéria orgânica por consórcios microbianos na ausência de oxigênio, resultando na produção de biogás, mistura gasosa rica em metano (CH_4), e de um subproduto rico em nutrientes, o digestato, que pode ser utilizado como biofertilizante. Tal processo apresenta relevância ambiental significativa, uma vez que contribui para a mitigação dos impactos causados pela acumulação de resíduos orgânicos e para o fortalecimento de práticas sustentáveis alinhadas aos princípios da economia circular (Holm-Nielsen et al., 2009).

As quatro etapas bioquímicas que compõem a digestão anaeróbica, denominadas hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, interagem de maneira sinérgica, garantindo a conversão eficiente da biomassa em seus produtos finais. A hidrólise é responsável pela quebra inicial de macromoléculas complexas em compostos mais simples, facilitando a atuação microbiana nas etapas subsequentes (Cavaleiro e Alves, 2020). A acidogênese converte esses compostos em ácidos orgânicos voláteis, alcoóis, dióxido de carbono (CO_2) e hidrogênio (H_2), que são utilizados pelas bactérias acetogênicas na acetogênese, resultando na formação de acetato, CO_2 e H_2 , os quais servem de substrato direto para as arqueias metanogênicas na etapa final, denominada metanogênese (Demirel e Scherer, 2008).

A digestão anaeróbica de esterco animal e de chorumes apresenta múltiplos benefícios, incluindo a melhoria de suas propriedades fertilizantes, a redução de odores e de microrganismos patogênicos, além da geração de um combustível renovável. Grandes volumes de esterco e resíduos orgânicos, quando não manejados de forma adequada, representam riscos significativos de poluição ambiental. De acordo com Holm-Nielsen, Al Seadi e Oleskowicz-Popiel (2009), cerca de 25% de toda a bioenergia futura poderá ser proveniente do biogás, obtido a partir de materiais orgânicos úmidos, como esterco animal, silagens e resíduos alimentares. Ressalta-se que o setor de produção animal é responsável por aproximadamente 18% das emissões totais de gases de efeito estufa e por 37% do metano antropogênico, cujo potencial de aquecimento global é 23 vezes superior ao do dióxido de carbono.

O presente estudo integra abordagens experimental e teórica, utilizando a simulação numérica como ferramenta de apoio para estruturar e interpretar os resultados. Essa metodologia permite comparar o comportamento de diferentes substratos e antecipar tendências, o que é essencial para a otimização de sistemas de bioenergia de pequeno e médio porte (Angelidaki e Ellegaard, 2003; Weiland, 2010). O objetivo central consiste em fornecer subsídios técnicos que orientem a escolha de substratos em projetos de bioenergia e que promovam práticas alinhadas à sustentabilidade e à economia circular. O campo de aplicação envolve sistemas de bioenergia, com destaque para plantas de biogás que utilizam resíduos agropecuários, alimentares e urbanos. Espera-se que o conhecimento gerado contribua para a transformação dos resíduos orgânicos de passivos ambientais em recursos energéticos e fertilizantes de alto valor agregado.

A digestão anaeróbica representa um processo microbiológico complexo, no qual a interação entre diferentes comunidades bacterianas e arqueanas determina a eficiência da conversão dos substratos orgânicos em metano e dióxido de carbono.

Na etapa inicial, denominada hidrólise, enzimas extracelulares degradam os polímeros presentes na biomassa, como proteínas, carboidratos e lipídios,

transformando-os em moléculas solúveis menores, tais como açúcares simples, ácidos graxos e aminoácidos. Esse processo facilita a absorção dos compostos pelos microrganismos acidogênicos (Cavaleiro e Alves, 2020).

Durante a acidogênese, esses produtos são fermentados, originando compostos intermediários como ácidos graxos voláteis, etanol, dióxido de carbono (CO_2) e hidrogênio (H_2). Essa etapa é caracterizada por elevada atividade metabólica e pela rápida multiplicação microbiana, fatores que influenciam diretamente a eficiência global do sistema (Holm-Nielsen et al., 2009).

Na sequência, ocorre a acetogênese, em que bactérias acetogênicas convertem os ácidos e álcoois formados na fase anterior em acetato, CO_2 e H_2 , que são substratos utilizados pelas arqueias metanogênicas na fase final do processo (Demirel e Scherer, 2008, 2008). A etapa de metanogênese é responsável pela conversão do acetato, hidrogênio e dióxido de carbono em metano, constituindo a principal fonte de energia renovável gerada pelo sistema (Mata-Alvarez et al., 2014).

A eficácia do processo depende das características da biomassa e de fatores ambientais e operacionais. Biomassas lignocelulósicas, como a palha de milho, apresentam menor biodegradabilidade e, portanto, requerem pré-tratamentos para potencializar a produção de metano (Hendriks e Zeeman, 2009).

O uso de simulação numérica, ainda que de forma simplificada, permite detalhar as etapas do processo, comparar o desempenho entre diferentes substratos e otimizar parâmetros de produção com eficiência e economia de recursos. Tal abordagem oferece suporte prático e científico para o desenvolvimento de projetos de bioenergia (Batstone et al., 2002).

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar a digestão anaeróbica de diferentes biomassas, contemplando as quatro etapas do processo (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese), a fim de identificar diferenças de desempenho entre substratos e compreender seu potencial na produção de metano e dióxido de carbono. Busca-se, assim, oferecer subsídios técnicos que orientem a escolha de substratos em projetos de bioenergia e fortalecer práticas ligadas à sustentabilidade e à economia circular. De forma complementar, a simulação numérica computacional foi utilizada apenas como ferramenta de apoio para estruturar e interpretar os resultados, sem se configurar como objeto central da pesquisa.

Considerando as diferenças de composição e degradabilidade das biomassas selecionadas, formulou-se a seguinte pergunta de pesquisa:

Como os fatores de conversão atribuídos ao esterco bovino, aos resíduos alimentares, à palha de milho e ao resíduo fecal canino influenciam as estimativas de produção de metano, dióxido de carbono e hidrogênio nas etapas simuladas da digestão anaeróbica?

A formulação dessa questão orienta a comparação entre as biomassas em condições numéricas padronizadas, considerando as etapas de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o comportamento de diferentes biomassas ao longo das etapas da digestão anaeróbica

- Comparar o desempenho na produção de biogás entre os substratos analisados
- Analisar a eficiência da produção de metano em cada fase do processo
- Utilizar simulação numérica como ferramenta de apoio para interpretação dos resultados
- Relacionar os resultados com aplicações em bioenergia e economia circular

1.3 Campo de Aplicação

O campo de aplicação deste estudo abrange sistemas de bioenergia, especialmente plantas de biogás de pequeno e médio porte, que utilizam resíduos agropecuários, alimentares e urbanos como substratos. A metodologia pode ser empregada em propriedades rurais, cooperativas agrícolas e indústrias alimentícias, além de ter potencial para contribuir em políticas de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos. O conhecimento gerado também pode apoiar iniciativas de economia circular, nas quais resíduos orgânicos deixam de ser passivos ambientais e passam a ser recursos energéticos e fertilizantes.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A revisão teórica abordará os fundamentos da digestão anaeróbica, os tipos de substratos orgânicos e a produção de biogás, a modelagem e simulação na digestão anaeróbica, e a relação com a economia circular e aplicações do biofertilizante. Serão explorados os seguintes tópicos:

2.1 Fundamentos da digestão anaeróbica

A digestão anaeróbica é um processo biológico complexo que ocorre na ausência de oxigênio, no qual microrganismos decompõem a matéria orgânica, resultando na produção de biogás, um combustível renovável rico em metano. Este processo é fundamental para a gestão de resíduos e a produção de energia sustentável (Lima, 2020).

2.2 Etapas bioquímicas do processo (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese)

Segundo Lima (2020) o processo de digestão anaeróbica é dividido em quatro fases bioquímicas principais e sequenciais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Uma fase adicional, a sulfetogênese, pode ocorrer concomitantemente, sendo responsável pela redução de sulfatos.

Hidrólise: Esta é a etapa inicial, na qual a matéria orgânica complexa e insolúvel (como carboidratos, proteínas e lipídios) é quebrada em moléculas menores e solúveis por meio da ação de enzimas extracelulares produzidas por bactérias hidrolíticas. A hidrólise é categórica, pois facilita a absorção dos substratos pelas bactérias nas fases subsequentes. Durante esta fase, não há produção significativa de gases como metano, dióxido de carbono ou hidrogênio.

Acidogênese: Na segunda fase, os produtos solúveis da hidrólise são consumidos por bactérias acidogênicas. Essas bactérias metabolizam os compostos, produzindo ácidos orgânicos voláteis (como acético, propiônico e butírico), álcoois (como etanol), cetonas (como acetona), dióxido de carbono (CO₂) e hidrogênio (H₂),

além de novas células bacterianas. A produção de CO_2 e H_2 é visível nesta etapa, mas o metano ainda não é produzido em quantidades significativas.

Acetogênese: Esta fase é caracterizada pela conversão dos ácidos orgânicos voláteis e álcoois, produzidos na acidogênese, em acetato, hidrogênio (H_2) e dióxido de carbono (CO_2) por bactérias acetogênicas sintróficas. O padrão de produção de gases é semelhante ao da acidogênese, com CO_2 e H_2 sendo os principais produtos, e sem produção significativa de metano.

Metanogênese: A fase final e mais importante para a produção de biogás é a metanogênese. Nesta etapa, arqueias metanogênicas convertem o acetato, o hidrogênio e o dióxido de carbono em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). A produção de metano é significativa nesta fase, com uma menor produção de CO_2 e quase nenhuma produção de H_2 . A predominância de CH_4 indica uma conversão eficiente dos intermediários em biogás.

2.3 Interações microbianas e eficiência energética

As interações microbianas desempenham um papel decisivo na eficiência da digestão anaeróbica. A comunidade microbiana é composta por diversos grupos de bactérias e arqueias que atuam em sinergia para decompor a matéria orgânica. Em particular, os metanógenos acetotróficos e hidrogenotróficos são essenciais para a etapa final da metanogênese, embora os relatórios sobre seus papéis específicos sejam limitados. Em baixas concentrações de acetato, espécies filamentosas de *Methanosaeta* tendem a dominar, como frequentemente observado em lodo de esgoto. Por outro lado, altas concentrações de agentes iônicos tóxicos, como amônia, sulfeto de hidrogênio (H_2S) e ácidos graxos voláteis (AGV), podem inibir preferencialmente as *Methanosaetaceae*, favorecendo o crescimento de espécies de *Methanosarcina*, que consistem em aglomerados celulares irregulares, como no esterco bovino (Demirel e Scherer, 2008).

Condições termofílicas podem favorecer metanógenos hidrogenotróficos em forma de bastonetes ou cocos, e espécies termofílicas de *Methanosarcina* também foram observadas. Fatores ambientais, como tempos de retenção curtos ou baixos em um reator de biomassa, também podem favorecer bactérias hidrogenotróficas. No entanto, não há regras gerais claras sobre quais parâmetros de processo favorecem os metanógenos hidrogenotróficos, dependendo provavelmente da concentração de hidrogênio (Demirel e Scherer, 2008).

2.4 Substratos orgânicos e produção de biogás

A digestão anaeróbica de esterco animal e chorumes oferece múltiplos benefícios, incluindo a melhoria de suas qualidades fertilizantes, a redução de odores e patógenos, e a produção de um combustível renovável, o biogás. Grandes volumes de esterco animal e resíduos orgânicos representam um risco de poluição significativo se não forem gerenciados adequadamente. A prevenção de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e a lixiviação de nutrientes e matéria orgânica para o ambiente natural exigem medidas de reciclagem otimizadas. O biogás pode ser produzido a partir de quase todos os tipos de matéria-prima biológica, incluindo as provenientes dos setores agrícolas primários e de vários fluxos de resíduos orgânicos da sociedade. A maior parte desse recurso é representada por esterco animal e chorumes de unidades de produção de gado e suínos, bem como de aves, peixes, peles, entre

outros. Somente na União Europeia (UE-27), mais de 1500 milhões de toneladas de esterco animal são produzidas anualmente (Holm-Nielsen et al., 2009).

Quando não tratado ou mal gerenciado, o esterco animal torna-se uma importante fonte de poluição do ar e da água, contribuindo para a lixiviação de nutrientes (principalmente nitrogênio e fósforo), evaporação de amônia e contaminação por patógenos. O setor de produção animal é responsável por 18% das emissões totais de GEE e por 37% do metano antropogênico, que possui um potencial de aquecimento global 23 vezes maior que o CO₂ (Holm-Nielsen et al., 2009).

2.5 Biomassas lignocelulósicas e pré-tratamentos

A biomassa lignocelulósica representa uma fonte subutilizada para a produção de biogás e etanol. Diversos fatores, como o teor de lignina, a cristalinidade da celulose e o tamanho das partículas, limitam a digestibilidade da hemicelulose e da celulose presentes na biomassa lignocelulósica. Os pré-tratamentos têm como objetivo melhorar a digestibilidade da biomassa lignocelulósica. Cada pré-tratamento possui efeitos distintos sobre a celulose, hemicelulose e lignina, os três principais componentes da biomassa lignocelulósica. Métodos como pré-tratamento a vapor, pré-tratamento com cal, pré-tratamentos com água quente líquida e pré-tratamentos à base de amônia são considerados de alto potencial. Os principais efeitos incluem a dissolução da hemicelulose e a alteração da estrutura da lignina, o que proporciona uma melhor acessibilidade da celulose para as enzimas hidrolíticas (Hendriks e Zeeman, 2009).

A biodegradabilidade da biomassa lignocelulósica é limitada por fatores como a cristalinidade da celulose, a área de superfície disponível e o teor de lignina. Os pré-tratamentos atuam em um ou mais desses aspectos. É favorável evitar a produção de inibidores, pois a desintoxicação da fração líquida pode ser custosa (Hendriks e Zeeman, 2009).

3 MODELAGEM E SIMULAÇÃO NA DIGESTÃO ANAERÓBICA

3.1 Aplicação de modelos matemáticos em biodigestão

O Modelo de Digestão Anaeróbica No. 1 (ADM1), desenvolvido pela International Water Association, representa os processos bioquímicos e físico-químicos envolvidos na digestão anaeróbica, incluindo desintegração, hidrólise, acidogênese, acetogênese, metanogênese, crescimento e decaimento microbiano e transferência de gases entre as fases líquida e gasosa. De forma geral, a variação temporal da concentração de cada componente pode ser representada pelo seguinte balanço de massa (Batstone et al., 2002),

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{Q}{V} (x_{i,in} - x_i) + \sum_{j=1}^m v_{ij} \rho_j - r_{T,i} \quad (1)$$

Nessa equação, x_i representa a concentração do componente analisado no interior do reator; $x_{i,in}$ corresponde à concentração desse componente na alimentação; Q representa a vazão volumétrica; V corresponde ao volume do reator; v_{ij} representa o coeficiente estequiométrico; ρ_j corresponde à velocidade do processo bioquímico; e $r_{T,i}$ representa a transferência do componente da fase líquida para a fase gasosa. A equação expressa que a variação de cada componente depende da

entrada e saída de material, de sua produção ou consumo nas reações bioquímicas e da transferência entre as fases do sistema (Batstone et al., 2002).

No presente trabalho, o ADM1 foi utilizado como referência conceitual para organizar as etapas da digestão anaeróbica. O modelo completo não foi implementado, pois exigiria parâmetros cinéticos, estequiométricos, microbiológicos e operacionais específicos para cada biomassa. Dessa forma, adotou-se uma formulação reduzida, baseada em fatores de conversão aplicados sequencialmente às etapas de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese: $M_{i,k+1} = f_{i,k} M_{i,k}$ em que $M_{i,k}$ representa a quantidade de matéria orgânica da biomassa i na etapa k , enquanto $f_{i,k}$ corresponde ao fator de conversão atribuído à biomassa nessa etapa (Batstone et al., 2002). As quantidades estimadas de metano, dióxido de carbono e hidrogênio foram calculadas a partir da matéria convertida e das frações definidas no algoritmo. Essa simplificação permitiu comparar as biomassas em condições numéricas padronizadas, preservando a sequência conceitual do ADM1. Portanto, os resultados apresentados correspondem a estimativas comparativas produzidas pelo modelo reduzido, e não à solução completa do ADM1 ou à produção experimental de biogás (Batstone et al., 2002).

3.2 Simulação computacional como ferramenta de apoio experimental

A simulação computacional, como a baseada no modelo ADM1, serve como uma ferramenta de apoio experimental valiosa na digestão anaeróbica. Ela permite a análise detalhada do processo, a comparação entre diferentes biomassas e a predição de resultados, otimizando a produção de biogás.

A produção de biogás a partir da digestão anaeróbica de culturas energéticas, resíduos e dejetos tem despertado crescente interesse para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para facilitar um desenvolvimento sustentável do fornecimento de energia. A simulação computacional permite avaliar os parâmetros bioquímicos e as matérias-primas que influenciam a eficiência e a confiabilidade da conversão microbiana e o rendimento de gás.

4 ECONOMIA CIRCULAR E APLICAÇÕES DO BIOFERTILIZANTE

4.1 Produção e aplicações de biofertilizantes como coproduto da digestão anaeróbica

A digestão anaeróbica é um processo biológico no qual microrganismos decompõem a matéria orgânica na ausência de oxigênio. Diferentes materiais orgânicos podem ser processados, incluindo papel e papelão contaminados por alimentos, restos vegetais, resíduos alimentares, efluentes industriais, esgoto e resíduos animais (Molino et al., 2013).

O processo produz biogás, composto, em condições típicas, por cerca de 60% de metano e 40% de dióxido de carbono, podendo ser empregado na geração de calor, eletricidade ou como combustível veicular (Molino et al., 2013). O digestato resultante pode ser utilizado como fertilizante devido à disponibilidade de nitrogênio e ao seu efeito fertilizante em curto prazo. O tratamento anaeróbico também contribui para a redução da sobrevivência de patógenos, favorecendo o aproveitamento agrícola do material digerido (Weiland, 2010).



4.2 Inserção da digestão anaeróbica na economia circular

A digestão anaeróbica é uma realidade comercial para diversos tipos de resíduos. No entanto, a digestão anaeróbica de substratos únicos apresenta algumas desvantagens ligadas às características do substrato. A codigestão anaeróbica, que é a digestão simultânea de dois ou mais substratos, surge como uma opção viável para superar as desvantagens da monodigestão e melhorar a viabilidade econômica da planta. Atualmente, a codigestão anaeróbica é um tópico relevante na pesquisa em digestão anaeróbica. O esterco animal se destaca como o substrato mais estudado, sendo os resíduos agroindustriais e a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos os cossustratos mais frequentemente relatados. Uma ênfase especial tem sido dada ao efeito da codigestão na qualidade do digestato, visto que a aplicação em solos parece ser a melhor opção para a reciclagem do digestato (Mata-Alvarez et al., 2014).

Tradicionalmente, a codigestão anaeróbica entre lodo de esgoto e a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos tem sido a mistura mais relatada. No entanto, entre 2010 e 2013, houve um aumento nas publicações que abordam gorduras, óleos e graxas, e algas como cossustratos de lodo. Isso ocorre porque ambos os cossustratos podem ser obtidos na mesma estação de tratamento de águas residuais (Mata-Alvarez et al., 2014).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia foi estruturada para analisar o comportamento de diferentes biomassas ao longo das etapas de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, considerando seus efeitos sobre as estimativas de produção de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e hidrogênio (H_2).

Inicialmente, realizou-se uma etapa experimental preliminar com as biomassas selecionadas, visando acompanhar o processo de digestão anaeróbica e obter dados relacionados à produção de biogás. Durante a execução do experimento, foram identificadas limitações associadas a [informar o problema ocorrido], que comprometeram a confiabilidade, a consistência e a rastreabilidade dos dados coletados. Por essa razão, os resultados experimentais foram considerados inadequados para comparações quantitativas e não foram incorporados às análises do trabalho.

Diante dessa limitação, adotou-se uma abordagem baseada em modelagem simplificada e simulação numérica. Para sua implementação, elaborou-se um algoritmo que aplica fatores de conversão específicos a cada biomassa, definidos com base em informações da literatura. Esses fatores representam as eficiências relativas das etapas da digestão anaeróbica e permitem calcular as quantidades estimadas de gases produzidos em cada fase do processo.

A estrutura numérica possibilitou a comparação padronizada entre esterco bovino, resíduos alimentares, palha de milho e resíduo fecal canino. A análise por etapas permitiu identificar diferenças nos perfis teóricos de conversão, verificar quais substratos apresentam maior ou menor potencial de produção de biogás e reconhecer limitações associadas às características de cada biomassa. No caso da palha de milho, por exemplo, o modelo permite discutir a influência de sua composição lignocelulósica e a possível necessidade de pré-tratamento.

Os resultados obtidos representam estimativas geradas pelo modelo e devem ser interpretados como uma análise comparativa dos substratos, e não como valores provenientes de produção experimental de biogás. Dessa forma, a simulação constitui



uma ferramenta de apoio para organizar os dados, avaliar tendências teóricas e orientar estudos posteriores sobre a seleção e a combinação de biomassas.

A confiabilidade das estimativas depende dos fatores de conversão adotados e da qualidade das informações utilizadas como dados de entrada. O modelo também não representa, de forma direta, as interações microbianas, as variações temporais da composição das biomassas, a temperatura, o pH, o tempo de retenção e outras condições operacionais do biodigestor. Além disso, a análise foi limitada às quatro biomassas selecionadas.

Como continuidade do estudo, recomenda-se realizar novos ensaios experimentais sob condições controladas, com definição dos parâmetros operacionais, procedimentos de medição e critérios de validação. Os dados obtidos poderão ser utilizados para calibrar os fatores de conversão, avaliar a correspondência entre os resultados experimentais e numéricos e ampliar o modelo para outras biomassas, como resíduos agrícolas, lodo de esgoto e resíduos orgânicos industriais.

5.1 Algoritmo de simulação

O algoritmo desenvolvido para simular a produção de biogás a partir de diferentes tipos de biomassa é estruturado de forma organizada e lógica, facilitando tanto a compreensão do processo quanto a sua modificação futura. A simulação começa com a definição dos parâmetros iniciais, incluindo a quantidade de matéria orgânica (MO) e os fatores de conversão específicos para cada etapa do processo de digestão anaeróbica: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Esses fatores são ajustados para refletir as eficiências nas etapas para cada tipo de biomassa considerada. A lógica do algoritmo pode ser representada de forma resumida por meio de pseudocódigo, que descreve as etapas de processamento em linguagem simplificada pode ser escrita conforme mostra a Figura 1.

```
1  Início
2  MO <- valor inicial de matéria orgânica
3  Definir fatores de conversão por biomassa e etapa
4
5  Para cada biomassa -> i
6    Hidrólise <- MO * fator(i,1)
7    Acidogênese <- Hidrólise * fator(i,2)
8    CO2(i,2) <- 0.3 * Acidogênese
9    H2(i,2) <- 0.1 * Acidogênese
10   Acetogênese <- Acidogênese * fator(i,3)
11   CO2(i,3) <- 0.2 * Acetogênese
12   H2(i,3) <- 0.05 * Acetogênese
13   Acetato <- 0.75 * Acetogênese
14   Metanogênese <- Acetogênese * fator(i,4)
15   CH4(i,4) <- 0.6 * Metanogênese
16   CO2(i,4) <- 0.4 * Metanogênese
17 Fim para
18
19 Gerar gráficos -> etapas (Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese, Metanogênese)
20 Exibir resultados
21 Fim
22
```

Figura 1- Pseudocódigo do Trabalho

Fonte: Elaborada pelos autores, 2025.

Em seguida, o algoritmo inicializa as variáveis que armazenam os resultados da produção de gases (CH_4 , CO_2 , H_2) em cada etapa, permitindo que os resultados sejam calculados e armazenados separadamente para cada biomassa e para cada fase do processo. O processamento é realizado através de um loop que percorre as



etapas do processo para cada tipo de biomassa, calculando as quantidades de gases produzidos com base nos fatores de conversão previamente definidos. Após os cálculos, o algoritmo gera gráficos que visualizam a produção de gases em cada etapa para cada tipo de biomassa. A estrutura do código de visualização utiliza gráficos de barras, o que facilita a comparação entre as diferentes biomassas e etapas. As cores distintas atribuídas a cada biomassa tornam a interpretação dos resultados mais intuitiva. No aspecto da eficiência, o algoritmo é adequado para o propósito de simulação, com operações diretas e sem complexidades desnecessárias, o que assegura sua eficiência computacional mesmo em simulações de grande escala.

5.2 Fatores de conversão e características das biomassas

Os fatores de conversão utilizados na simulação da produção de biogás foram baseados em dados típicos encontrados na literatura científica sobre digestão anaeróbica de diferentes biomassas. Angelidaki e Ellegaard (2003) discutem a codigestão de esterco e resíduos orgânicos em plantas de biogás centralizadas, fornecendo informações valiosas sobre a eficiência das diferentes etapas do processo, como hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Além disso, Weiland (2010) revisa o estado atual da produção de biogás, incluindo as condições e desafios associados ao uso de diversas biomassas, o que pode servir como base para determinar os fatores de conversão utilizados no estudo. Essas referências oferecem um respaldo científico para os valores de conversão adotados na simulação, garantindo que os resultados obtidos sejam consistentes com as práticas observadas em pesquisas anteriores.

As biomassas escolhidas para a simulação, esterco de gado, resíduos alimentares, palha de milho e fezes de cachorro, refletem uma gama diversificada de materiais orgânicos que possuem potencial para a produção de biogás, cada uma com características distintas que influenciam sua eficiência no processo de digestão anaeróbica. O esterco de gado é destacado como uma biomassa comum e eficiente devido à sua alta disponibilidade e composição equilibrada, servindo como um benchmark na comparação com outras biomassas. Resíduos alimentares são relevantes especialmente em áreas urbanas, sendo facilmente degradáveis e eficientes na produção de biogás, oferecendo uma solução sustentável para o desperdício de alimentos. Palha de milho, uma biomassa lignocelulósica, é mais resistente à degradação, exigindo pré-tratamentos, mas sua inclusão na simulação é importante para explorar o uso de resíduos agrícolas, particularmente em regiões rurais. Por fim, fezes de cachorro representam uma escolha inusitada, mas relevante para contextos urbanos, apesar de sua eficiência ser menor.

As condições iniciais da simulação foram feitas como mostradas na tabela 1,

Tabela 1 - Fatores de conversão utilizados na simulação da produção de biogás

Biomassa	Fator de Hidrólise	Fator de Acidogênese	Fator de Acetogênese	Fator de Metanogênese
Esterco de Gado	0.85	0.80	0.90	0.75
Resíduos Alimentares	0.90	0.85	0.95	0.70
Palha de Milho	0.70	0.60	0.80	0.65
Fezes de Cachorro	0.75	0.65	0.85	0.60



Fonte: Elaborada pelos autores, 2025.

Note que na tabela 1 o Fator de Hidrólise: Representa a eficiência com que a biomassa é convertida em moléculas menores durante a hidrólise. O Fator de Acidogênese: Representa a eficiência com que os produtos da hidrólise são convertidos em ácidos voláteis, álcool, CO_2 e H_2 . O Fator de Acetogênese: Indica a eficiência na conversão dos produtos da acidogênese em acetato, CO_2 e H_2 . O Fator de Metanogênese: Reflete a eficiência com que os produtos da acetogênese são convertidos em metano (CH_4) e CO_2 .

Os fatores de conversão utilizados na simulação da produção de biogás foram baseados em dados típicos encontrados na literatura científica sobre digestão anaeróbica de diferentes biomassas. Angelidaki e Ellegaard (2003) discutem a codigestão de esterco e resíduos orgânicos em plantas de biogás centralizadas, fornecendo informações valiosas sobre a eficiência das diferentes etapas do processo, como hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Além disso, Weiland (2010) revisa o estado atual da produção de biogás, incluindo as condições e desafios associados ao uso de diversas biomassas, o que pode servir como base para determinar os fatores de conversão utilizados no estudo. Essas referências oferecem um respaldo científico para os valores de conversão adotados na simulação, garantindo que os resultados obtidos sejam consistentes com as práticas observadas em pesquisas anteriores.

6 RESULTADOS

A análise dos resultados evidencia que a digestão anaeróbica apresenta desempenho diferenciado conforme a composição do substrato, o tempo de retenção e a configuração do reator. Schmaedecke (2021) destaca que o tempo de retenção é determinante para a produção de metano, sendo mais eficiente em intervalos de até 45 dias, o que converge com os resultados obtidos, em que substratos de origem bovina e resíduos alimentares apresentaram melhor desempenho, enquanto materiais lignocelulósicos, como a palha de milho, exigem pré-tratamento para maior aproveitamento.

Oliveira e Cardoso (2022) apontam que a divisão das etapas de hidrólise, acidogênese e metanogênese em reatores associados aumenta a eficiência da biodigestão. A comparação com este estudo mostra que, embora a configuração em batelada apresente limitações de continuidade, pode ser vantajosa em contextos rurais de pequena escala, onde a simplicidade operacional é prioritária. Assim, a escolha do modelo de reator deve considerar não apenas o rendimento energético, mas também as condições socioeconômicas e de operação.

Outro aspecto relevante é a qualidade do biofertilizante produzido, rico em nutrientes como nitrogênio e fósforo, o que reforça o papel do processo na economia circular, permitindo a substituição parcial de insumos químicos e a redução de impactos ambientais.

O diferencial deste trabalho está em integrar análise experimental e teórica, comparar diferentes substratos e considerar simultaneamente aspectos qualitativos e quantitativos. Quantitativamente, foram observadas variações significativas na produção de metano; qualitativamente, verificou-se que os perfis de degradação influenciam a dinâmica do processo, sendo que substratos de rápida hidrólise geraram picos iniciais de produção, enquanto os de degradação lenta apresentaram

rendimentos mais graduais. Essa complementaridade pode orientar a co-digestão como estratégia para equilibrar produção e estabilidade do sistema.

Em síntese, os resultados alinham-se às principais referências da área e ressaltam a originalidade do estudo ao adotar uma abordagem multidimensional. O próximo avanço é a validação com dados de campo, ampliando a confiabilidade das previsões sobre o potencial bioenergético de diferentes biomassas.

Na sequência, através do uso do algoritmo, a figura 2 mostra a produção de hidrólise; a figura 3, a produção de acidogênese; a figura 4 mostra a produção da acetogênese; a figura 5 mostra a produção de metanogênese.

6.1 Produção de gases na hidrólise

Neste primeiro estágio, não há produção significativa de gases (CH_4 , CO_2 , H_2) para nenhuma das biomassas, conforme ilustrado na Figura 2. Isso está de acordo com a teoria da digestão anaeróbica, onde a hidrólise é a etapa inicial em que grandes moléculas orgânicas (carboidratos, proteínas, lipídios) são quebradas em moléculas menores (açúcares simples, ácidos graxos, aminoácidos). Não se espera uma produção de gases significativa nesta etapa, pois é mais um processo de conversão de fase sólida em líquida. Angelidaki e Ellegaard (2003) destacam que a hidrólise é uma etapa categórica que facilita a absorção dos substratos pelas bactérias nas fases subsequentes, mas não resulta em emissões gasosas significativas.

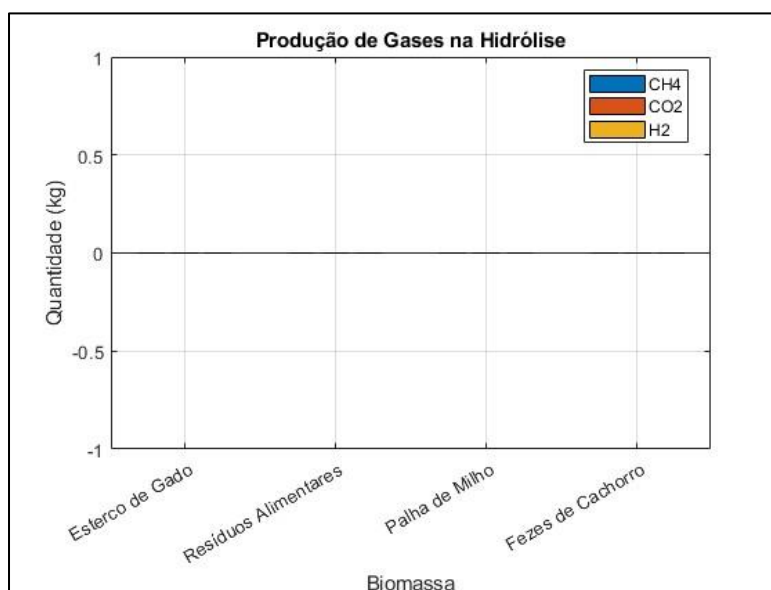


Figura 2 - Produção de gases na etapa de Hidrólise

Fonte: Elaborada pelos autores, 2025.

6.2 Produção de gases na acidogênese

A etapa de acidogênese marca o início da produção de CO_2 e H_2 , à medida que as matérias da hidrólise são consumidas por bactérias acidogênicas. Essas bactérias metabolizam os compostos, produzindo ácidos orgânicos voláteis, como acético, propiônico e butírico, álcoois, como etanol, cetonas, como acetona, dióxido de carbono (CO_2) e hidrogênio (H_2), além de novas células bacterianas. A simulação

indica que o esterco de gado e os resíduos alimentares apresentam uma produção de gases intermediários mais acentuada, refletindo sua maior degradabilidade em comparação com a palha de milho. A produção de CO_2 e H_2 é visível nesta etapa, mas o metano ainda não é produzido em quantidades significativas.

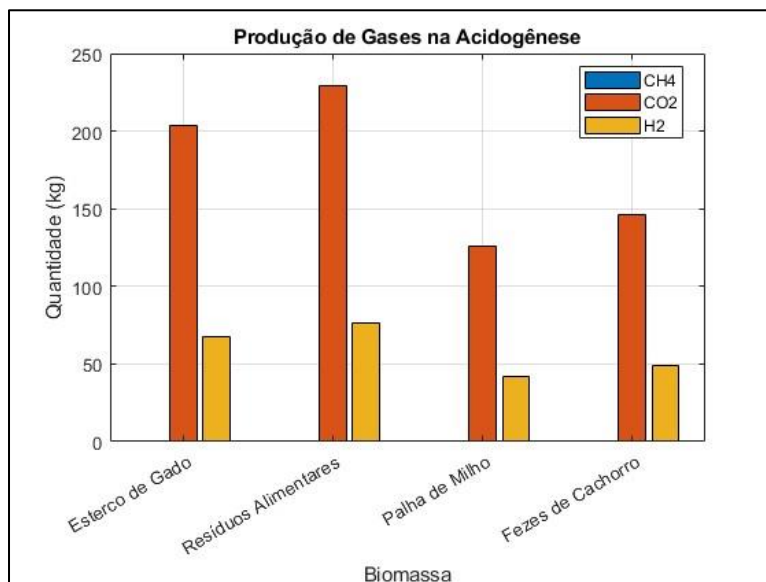


Figura 3- Produção de gases na etapa de Acidogênese

Fonte: Elaborada pelos autores, 2025.

6.3 Produção de gases na acetogênese

Na acetogênese, observa-se um padrão semelhante ao da acidogênese, com CO_2 sendo o principal gás produzido e uma menor quantidade de H_2 . Novamente, não há produção significativa de CH_4 . Nesta etapa, os ácidos voláteis e o álcool são convertidos em acetato, hidrogênio (H_2) e dióxido de carbono (CO_2). A produção de CO_2 e H_2 é consistente com o que é esperado nesta fase. O metano (CH_4) ainda não é produzido em quantidades significativas, pois isso ocorre principalmente na próxima etapa, a metanogênese.

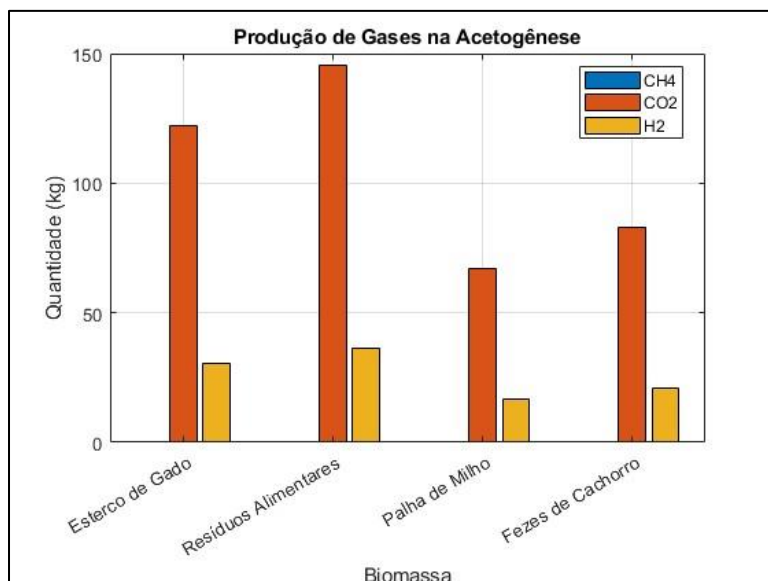


Figura 4 - Produção de gases na etapa de Acetogênese

Fonte: Elaborada pelos autores, 2025.

6.4 Produção de Gases na Metanogênese

A etapa final, a metanogênese, é onde ocorre a produção significativa de metano (CH_4). Nesta fase, arqueias metanogênicas convertem o acetato, o hidrogênio e o dióxido de carbono em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Os resultados da simulação indicam que o esterco bovino e os resíduos alimentares apresentam o melhor desempenho metanogênico, o que é consistente com a literatura. Materiais lignocelulósicos, como a palha de milho, exigem estratégias de pré-tratamento para um maior aproveitamento, o que é refletido em sua menor produção de metano na simulação. Hendriks e Zeeman (2009) destacam que diversos fatores, como o teor de lignina, a cristalinidade da celulose e o tamanho das partículas, limitam a digestibilidade da hemicelulose e da celulose presentes na biomassa lignocelulósica, justificando a necessidade de pré-tratamentos.

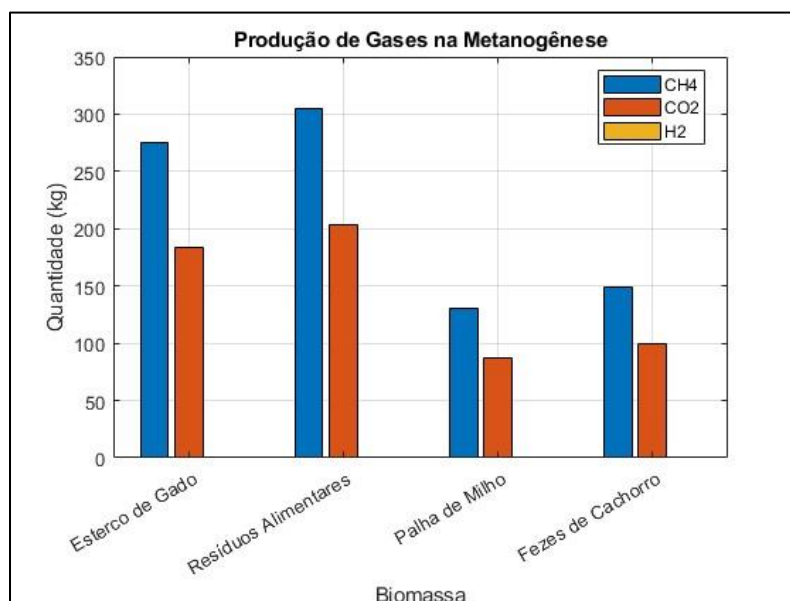


Figura 5- Produção de gases na etapa de Metanogênese



Fonte: Elaborada pelos autores, 2025.

6.5 Análise comparativa e implicações

A simulação computacional, apesar de suas simplificações, provou ser uma ferramenta valiosa para a análise comparativa do potencial de biogás de diferentes biomassas. Os pontos fortes da abordagem incluem o detalhamento por etapa, que permite uma análise de onde cada tipo de biomassa é mais eficiente ou apresenta limitações; a comparação direta entre os substratos, evidenciando como esterco de gado, resíduos alimentares, palha de milho e fezes de cachorro diferem em suas capacidades de produção de biogás em cada etapa; a capacidade de predição de resultados, permitindo que pesquisadores e engenheiros ajustem os parâmetros do processo antes mesmo de implementá-lo no mundo real, economizando tempo e recursos; e a aplicabilidade prática para otimização de plantas de biogás, ajuste da mistura de biomassas, ou decisão sobre o pré-tratamento necessário para maximizar a produção de energia renovável.

No entanto, é importante reconhecer as limitações da simulação. A precisão dos resultados depende da qualidade dos dados de entrada, como os fatores de conversão utilizados para cada biomassa. No caso de biomassas menos estudadas, como as fezes de cachorro, seria benéfico validar esses dados com experimentos laboratoriais para garantir a confiabilidade da simulação. Além disso, a simulação utiliza um modelo simplificado que, embora útil para comparações iniciais, pode não capturar todas as complexidades do processo de digestão anaeróbica, como interações microbianas e variações na composição química das biomassas ao longo do tempo. Para uma análise mais abrangente, seria interessante estender o modelo para incluir outras biomassas comuns, como resíduos de culturas específicas, lodo de esgoto ou resíduos industriais orgânicos.

DISCUSSÃO GERAL

A análise dos resultados evidencia que a digestão anaeróbica apresenta desempenho diferenciado conforme a composição do substrato, o tempo de retenção e a configuração do reator. Schmaedecke (2021) destaca que o tempo de retenção é determinante para a produção de metano, sendo mais eficiente em intervalos de até 45 dias, o que converge com os resultados obtidos, em que substratos de origem bovina e resíduos alimentares apresentaram melhor desempenho, enquanto materiais lignocelulósicos, como a palha de milho, exigem pré-tratamento para maior aproveitamento.

Oliveira e Cardoso (2022) apontam que a divisão das etapas de hidrólise, acidogênese e metanogênese em reatores associados aumenta a eficiência da biodigestão. A comparação com este estudo mostra que, embora a configuração em batelada apresente limitações de continuidade, pode ser vantajosa em contextos rurais de pequena escala, onde a simplicidade operacional é prioritária. Assim, a escolha do modelo de reator deve considerar não apenas o rendimento energético, mas também as condições socioeconômicas e de operação.

Outro aspecto relevante é a qualidade do biofertilizante produzido, rico em nutrientes como nitrogênio e fósforo, o que reforça o papel do processo na economia circular, permitindo a substituição parcial de insumos químicos e a redução de impactos ambientais.



O diferencial deste trabalho está em integrar análise experimental e teórica, comparar diferentes substratos e considerar simultaneamente aspectos qualitativos e quantitativos. Quantitativamente, foram observadas variações significativas na produção de metano; qualitativamente, verificou-se que os perfis de degradação influenciam a dinâmica do processo, sendo que substratos de rápida hidrólise geraram picos iniciais de produção, enquanto os de degradação lenta apresentaram rendimentos mais graduais. Essa complementaridade pode orientar a co-digestão como estratégia para equilibrar produção e estabilidade do sistema.

Em síntese, os resultados alinham-se às principais referências da área e ressaltam a originalidade do estudo ao adotar uma abordagem multidimensional. O próximo avanço é a validação com dados de campo, ampliando a confiabilidade das previsões sobre o potencial bioenergético de diferentes biomassas.

CONCLUSÃO

O estudo realizado permitiu identificar que a digestão anaeróbica de diferentes biomassas apresenta desempenhos distintos em termos quantitativos e qualitativos. Quantitativamente, observou-se variação significativa na produção de metano e dióxido de carbono, confirmando a influência direta da composição do substrato e do tempo de retenção hidráulica no rendimento do processo. Qualitativamente, verificou-se que cada biomassa possui características próprias de degradação, resultando em diferentes padrões de produção ao longo das etapas de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Esses aspectos destacam a necessidade de caracterização prévia dos substratos e do uso de estratégias complementares, como co-digestão ou pré-tratamentos, para aumentar a eficiência do processo.

Os resultados também mostraram consonância com estudos de referência, como os de Schmaedecke (2021), que apontam a importância do tempo ótimo de retenção para maximizar a produção de metano, e Oliveira e Cardoso (2022), que ressaltam a eficiência de sistemas em série de biodigestores para melhor aproveitamento da matéria orgânica. Essa integração entre resultados experimentais e literatura fundamenta a consistência do trabalho e amplia sua relevância.

Do ponto de vista aplicado, o projeto evidencia que a escolha da configuração do reator deve considerar não apenas o rendimento energético, mas também o contexto operacional e socioeconômico. Modelos em batelada, por exemplo, podem ser mais viáveis em ambientes rurais de pequena escala, enquanto arranjos em série tendem a atender demandas industriais com maior eficiência.

Para a sociedade, os resultados reforçam a possibilidade de aproveitamento energético de resíduos orgânicos, reduzindo passivos ambientais e incentivando práticas sustentáveis. Para a indústria, oferecem subsídios para otimização de processos de biodigestão, com ganhos de eficiência energética e redução de custos em insumos agrícolas por meio do biofertilizante gerado. Para a ciência, consolidam dados que ampliam a compreensão sobre o comportamento das biomassas em condições controladas, fornecendo base sólida para estudos futuros que integrem dados de campo e ampliem a aplicabilidade da tecnologia.

Assim, o trabalho não apenas atinge seus objetivos, mas também estabelece um caminho para o desenvolvimento de modelos mais precisos, alinhados às condições reais de operação, fortalecendo o papel da digestão anaeróbica como alternativa sustentável de geração de energia e insumo agrícola.



REFERÊNCIAS

- ANGELIDAKI, I.; ELLEGAARD, L. Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants: status and future trends. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 109, p. 95–105, 2003. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1385/ABAB:109:1-3:95>. Acesso em: 3 set. 2025.
- BATSTONE, D. J.; KELLER, J.; ANGELIDAKI, I.; KALYUZHNYI, S. V.; PAVLOSTATHIS, S. G.; ROZZI, A.; VAVILIN, V. A. Anaerobic digestion model No.1 (ADM1). *Water Science and Technology*, v. 45, n. 10, p. 65–73, 2002. Disponível em: https://watertap.readthedocs.io/en/1.2.0/technical_reference/flowsheets/ADM1.html. Acesso em: 7 set. 2025.
- CAVALEIRO, A. J.; ALVES, M. M. Digestão anaeróbia. *Revista de Ciência Elementar*, v. 8, n. 1, art. 009, mar. 2020. DOI: 10.24927/rce2020.009.
- DEMIREL, B.; SCHERER, P. The roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 7, n. 2, p. 173–190, 2008. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11157-008-9131-1>. Acesso em: 3 set. 2025.
- HENDRIKS, A. T. W. M.; ZEEMAN, G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, v. 100, n. 1, p. 10–18, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852408004574>. Acesso em: 7 set. 2025.
- HOLM-NIELSEN, J. B.; AL SEADI, T.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, v. 100, n. 22, p. 5478–5484, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852408011012>. Acesso em: 3 set. 2025.
- LIMA, Heleno Quevedo de. Fundamentos do processo de digestão anaeróbia. *Energia e Biogás*, 30 ago. 2020. Atualizado em: 10 fev. 2021. Disponível em: <https://energiaebiogas.com/fundamentos-do-processo-de-digestao-anaerobia>. Acesso em: 19 jun. 2026.
- MATA-ALVAREZ, J.; DOSTA, J.; ROMERO-GÜIZA, M. S.; FONOLL, X.; PECES, M.; ASTALS, S. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 36, p. 412–427, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114002664>. Acesso em: 18 set. 2025.
- MOLINO, A.; NANNA, F.; DING, Y.; BIANCO, M.; GIORDANO, G.; BRUNO, S. Biomethane production by anaerobic digestion of organic waste. *Fuel*, v. 103, p. 1003–1009, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001623611200631X>. Acesso em: 12 set. 2025.
- OLIVEIRA, G. K. A. de; CARDOSO, S. de A. Modelagem matemática e simulação de reatores associados para biodigestão anaeróbia. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, Ponta Grossa, v. 14, n. 3, p. 248–257, set. 2022.



PORTAL ENERGIA E BIOGÁS. Fundamentos do Processo de Digestão Anaeróbia. Disponível em: <https://biogaseenergia.com.br/fundamentos-do-processo-de-digestao-anaerobia>. Acesso em: 18 set. 2025.

SCHMAEDECKE, P. P.; OBREGON, L.; CAMPOS, M. de; BINELO, M. de F. B.; SILVA, J. M. L. V. da. Modelagem matemática e computacional de um biodigestor. Salão do Conhecimento, Ijuí, v. 7, n. 7, 2021.

WATERTAP. Anaerobic Digestion Model No. 1. Disponível em: https://watertap.readthedocs.io/en/1.2.0/technical_reference/flowsheets/ADM1.html. Acesso em: 23 set. 2025.

WEILAND, P. Biogas production: current state and perspectives. Applied Microbiology and Biotechnology, v. 85, p. 849–860, 2010. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-009-2246-7>. Acesso em: 12 set. 2025.

