



**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE LINS PROF. ANTONIO SEABRA**  
**CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM GESTÃO DA QUALIDADE**

**CLAUDIANE APARECIDA GOMES**  
**TÂNIA APARECIDA TEODORO**

**OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS POR DIGESTÃO**  
**ANAERÓBICA DE LODO DE ESGOTO: EFEITOS DA CO-DIGESTÃO**  
**COM ESTERCO DE VACA**

Escaneie a imagem para verificar a autenticidade do documento  
Hash SHA256 do PDF original 1eec832b2777ea1c07603cdb95ea47ff76060c70d21708ea7f33020e7b80655e  
<https://valida.ae/f4b1cea16403e939cb51df1483909482403364ec6e44533cc>

**LINS/SP**  
**1º SEMESTRE/2025**





**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE LINS PROF. ANTONIO SEABRA**  
**CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM GESTÃO DA QUALIDADE**

**CLAUDIANE APARECIDA GOMES**  
**TÂNIA APARECIDA TEODORO**

**OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS POR DIGESTÃO**  
**ANAERÓBICA DE LODO DE ESGOTO: EFEITOS DA CO-DIGESTÃO**  
**COM ESTERCO DE VACA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Tecnologia de Lins para a obtenção  
do título de Tecnóloga em Gestão da Qualidade.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Outa.

**LINS/SP**  
**1º SEMESTRE/2025**

Escaneie a imagem para verificar a autenticidade do documento  
Hash SHA256 do PDF original 1eec832b2777ea1c07603cdb95ea47ff76060c70d21708ea7f33020e7b80655e  
<https://valida.ae/f4b1cea16403e939cb51df1483909482403364ec6e44533cc>





Escaneie a imagem para verificar a autenticidade do documento  
Hash SHA256 do PDF original 1eec832b2777ea1c07603cddb95ea47ff76060c70d21708ea7f33020e7b80655e  
<https://valida.ae/f4b1cea16403e939cb51df1483909482403364ec6e44533cc>

Aparecida Teodoro, Tânia

A639o Otimização da produção de biogás por digestão anaeróbica de lodo de esgoto: Efeitos da co-digestão com esterco de vaca / Tânia Aparecida Teodoro, Claudiane Aparecida Gomes. — Lins, 2025.

30f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Gestão da Qualidade) — Faculdade de Tecnologia de Lins Professor Antonio Seabra: Lins, 2025.

Orientador(a): Dr. Roberto Outa

1. Digestão Anaeróbica. 2. Lodo de Esgoto. 3. Dejeito Bovino. 4. Biogás. 5. Metano. I. Aparecida Gomes, Claudiane. II. Outa, Roberto. III. Faculdade de Tecnologia de Lins Professor Antonio Seabra. IV. Título.

CDD 658.562





**CLAUDIANE APARECIDA GOMES  
TÂNIA APARECIDA TEODORO**

**OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS POR DIGESTÃO ANAERÓBICA DE  
LODO DE ESGOTO: EFEITOS DA CO-DIGESTÃO COM ESTERCO DE VACA**

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.

Data de aprovação: 25/06/2025

---

**Prof. Dr. Roberto Outa**

---

**Prof<sup>a</sup>. Dra. Ana Maria Taddei Cardoso De Barros**

---

**Prof<sup>a</sup>. Me. Alyssa Carolina Barbosa Marques Gedo**





## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>5</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>6</b>
<b>2 OBJETIVO.....</b>	<b>6</b>
<b>3 PRINCÍPIO DA DIGESTÃO ANAERÓBICA APLICADOS À QUALIDADE .....</b>	<b>7</b>
<b>3.1 GESTÃO DA QUALIDADE E MODELAGEM COMPUTACIONAL.....</b>	<b>7</b>
<b>3.2 FERRAMENTAS DA QUALIDADE .....</b>	<b>8</b>
<b>3.2.1 Conceito de Brainstorming .....</b>	<b>8</b>
<b>3.2.2 Conceito da Matriz GUT .....</b>	<b>9</b>
<b>3.2.3 Conceito do Diagrama de Ishikawa.....</b>	<b>9</b>
<b>3.2.4 Conceito do Diagrama de Pareto .....</b>	<b>10</b>
<b>4 METODOLOGIA .....</b>	<b>10</b>
<b>4.1 FUNDAMENTAÇÃO DO USO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE .....</b>	<b>11</b>
<b>4.1.1 Primeiro Brainstorming .....</b>	<b>12</b>
<b>4.1.2 Matriz de Relação ou Matriz GUT .....</b>	<b>12</b>
<b>4.1.3 Segundo Brainstorming .....</b>	<b>13</b>
<b>4.1.4 Desenvolvimento Diagrama Ishikawa.....</b>	<b>14</b>
<b>4.1.5 Diagrama de Pareto.....</b>	<b>15</b>
<b>4.2 DIGESTÃO ANAERÓBICA DO LODO DE ESGOTO: ANÁLISE ISOLADA ..</b>	<b>16</b>
<b>4.3 CO-DIGESTÃO DE LODO DE ESGOTO COM ESTERCO DE VACA.....</b>	<b>21</b>
<b>4.4 METANO.....</b>	<b>25</b>
<b>5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>26</b>
<b>5.1 ACIDOGÊNESE .....</b>	<b>27</b>
<b>5.2 ACETOGÊNESE .....</b>	<b>27</b>
<b>5.3 METANOGÊNESE .....</b>	<b>27</b>
<b>5.4 PRODUÇÃO TOTAL DE GASES.....</b>	<b>27</b>
<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>28</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>28</b>





# OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS POR DIGESTÃO ANAERÓBICA DE LODO DE ESGOTO: EFEITOS DA CO-DIGESTÃO COM ESTERCO DE VACA

Claudiane Aparecida Gomes<sup>1</sup>, Tânia Aparecida Teodoro<sup>2</sup>  
Roberto Outa<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Acadêmicas do Curso de Gestão da Qualidade da Faculdade de Tecnologia de Lins Prof. Antônio Seabra – Fatec, Lins – SP, Brasil

<sup>3</sup>Docente 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 investigar a eficiência da digestão anaeróbica do lodo de esgoto, tanto de forma isolada quanto por meio da co-digestão com inóculo de esterco de vaca, visando otimizar a produção de biogás. A pesquisa utilizou modelagem computacional para simular as quatro etapas do processo, hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese e analisou a produção dos principais gases gerados, como metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>), amônia (NH<sub>3</sub>) e álcool. Foram conduzidas duas fases distintas: na Fase I, avaliou-se a digestão do lodo de esgoto isoladamente; e na Fase II, introduziu-se o inóculo de esterco de vaca. Os resultados demonstraram que a co-digestão proporcionou uma maior formação de intermediários, como o acetato e o álcool, além de acelerar a metanogênese, resultando em um aumento significativo na produção de metano. Ferramentas da qualidade, como brainstorming, Matriz GUT, Diagrama de Ishikawa e Gráfico de Pareto foram utilizadas para justificar a escolha da simulação computacional como alternativa metodológica eficaz, destacando sua capacidade de reduzir custos, riscos e limitações associadas à experimentação física. A simulação se mostrou uma ferramenta confiável para representar o comportamento da digestão anaeróbica em diferentes condições, reforçando seu potencial como suporte à tomada de decisão em projetos de bioenergia. Os resultados obtidos reforçam a viabilidade da co-digestão como estratégia sustentável para o aproveitamento energético de resíduos orgânicos.

Palavras-chave: Digestão Anaeróbica. Lodo de Esgoto. Dejeito Bovino. Biogás. Metano.

## ABSTRACT

This study aims to investigate the efficiency of anaerobic digestion of sewage sludge, both in isolation and through co-digestion with cow manure inoculum, in order to optimize biogas production. The research employed computational modeling to simulate the four key stages of the process hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis, and methanogenesis and analyzed the generation of main gases such as methane (CH<sub>4</sub>), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), hydrogen (H<sub>2</sub>), ammonia (NH<sub>3</sub>), and alcohol. Two distinct phases were carried out: Phase I evaluated the digestion of sewage sludge alone, while Phase II introduced cow manure as a co-substrate. The results demonstrated





that co-digestion led to increased production of intermediates such as acetate and alcohol, as well as accelerated methanogenesis, resulting in a significant improvement in methane generation. Quality management tools such as brainstorming, GUT Matrix, Ishikawa Diagram, and Pareto Chart were applied to support the methodological choice of computational simulation, highlighting its ability to reduce costs, risks, and constraints typically associated with physical experimentation. The simulation proved to be a reliable tool for representing the behavior of anaerobic digestion under different operational conditions, reinforcing its potential as a decision-making aid in bioenergy projects. The findings confirm the feasibility of co-digestion as a sustainable strategy for enhancing the energy recovery of organic waste.

Keywords: Anaerobic digestion. Sewage Sludge. Cattle Waste. Biogas. Methane.

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes de energia renovável e alternativas sustentáveis para a gestão de resíduos sólidos tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas à produção de biogás por meio da digestão anaeróbica. Este processo, que ocorre na ausência de oxigênio, permite a conversão de resíduos orgânicos em metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), os principais componentes do biogás, o qual pode ser utilizado para geração de energia elétrica e térmica, além de servir como biocombustível (Li et al., 2011; apeles et al., 2008).

O tratamento de esgoto representa um dos principais desafios no gerenciamento de resíduos nas áreas urbanas e industriais, e a digestão anaeróbica do lodo de esgoto surge como uma solução promissora, tanto para o aproveitamento energético quanto para a redução do impacto ambiental dos resíduos (Tchobanoglous et al., 2003). No entanto, a eficiência desse processo pode ser limitada pela composição do substrato, o que tem levado à investigação de co-substratos, como o esterco de vaca, para otimizar a produção de biogás (Hagos et al., 2017).

A co-digestão de lodo de esgoto com resíduos agrícolas, como o esterco bovino, é uma técnica que tem ganhado destaque por sua capacidade de melhorar a estabilidade e o rendimento da digestão anaeróbica. A introdução de novos substratos não apenas oferece uma fonte adicional de nutrientes e microrganismos, como também acelera a conversão de intermediários em metano, aumentando o rendimento energético do processo (Elsayed et al., 2022; Gerardi, 2003). Além disso, a co-digestão pode reduzir o tempo de retenção dos resíduos nos reatores, otimizando o tempo e os custos de operação.

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo investigar a eficiência da digestão anaeróbica do lodo de esgoto, tanto de forma isolada quanto em combinação com o inóculo de esterco de vaca, utilizando simulações computacionais para modelar e analisar a produção de biogás. A pesquisa visa identificar as melhores condições para maximizar a produção de metano e avaliar o impacto da co-digestão na aceleração das fases do processo, com foco em possíveis aplicações industriais e soluções sustentáveis para o tratamento de resíduos.

## 2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é investigar a eficiência do processo de digestão anaeróbica do lodo de esgoto, tanto isoladamente quanto em combinação com inóculo de esterco de vaca, visando otimizar a produção de biogás. O estudo busca modelar





e comparar as dinâmicas das fases de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, avaliando a produção de gases como metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), amônia ( $\text{NH}_3$ ) e álcool ao longo do tempo, utilizando simulações computacionais realizadas no software GNU Octave.

### 3 PRINCÍPIO DA DIGESTÃO ANAERÓBICA APLICADOS À QUALIDADE

A digestão anaeróbica é um processo biológico no qual microrganismos degradam matéria orgânica na ausência de oxigênio, resultando na produção de biogás, composto majoritariamente por metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Esse processo ocorre em quatro etapas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, sendo amplamente utilizado para o tratamento de resíduos orgânicos, incluindo lodo de esgoto e esterco animal. O processo tem recebido crescente atenção devido às suas vantagens ambientais, como a redução de resíduos e a geração de energia renovável (Chernicharo, 2007).

A co-digestão anaeróbica, que consiste na adição de um substrato complementar ao lodo de esgoto, como o esterco de vaca, pode melhorar a eficiência do processo, aumentando a produção de biogás e a estabilidade da digestão. Estudos indicam que a combinação de diferentes substratos resulta em uma melhor disponibilidade de nutrientes para os microrganismos envolvidos na degradação da matéria orgânica, impactando positivamente o rendimento da produção de biogás. Além disso, a co-digestão pode reduzir a toxicidade de certos componentes presentes no lodo de esgoto, favorecendo o crescimento microbiano e melhorando a conversão de matéria orgânica em metano (Angelidaki et al., 2003).

A modelagem computacional tem se mostrado uma ferramenta essencial para representar com precisão esse processo, permitindo a simulação de diferentes condições operacionais sem a necessidade de experimentação prática. A utilização de modelos matemáticos possibilita a previsão do comportamento dos sistemas biológicos e auxilia na otimização do desempenho dos biodigestores. Modelos como ADM1 (Anaerobic Digestion Model No.1) são amplamente utilizados na área para descrever a dinâmica dos processos bioquímicos envolvidos. Esse modelo fornece uma representação detalhada das reações bioquímicas e do crescimento microbiano, possibilitando a análise da influência de variáveis como temperatura, tempo de retenção e composição dos substratos (Batstone et al., 2002).

Estudos indicam que a combinação de modelagem matemática com validação experimental permite uma melhor compreensão dos mecanismos da digestão anaeróbica e suas variáveis operacionais. Assim, pesquisadores têm utilizado simulações para investigar a influência da relação carbono/nitrogênio, da carga orgânica aplicada e do tempo de retenção hidráulica na eficiência do processo. Além disso, a modelagem auxilia na previsão de possíveis limitações, como a acidificação excessiva do meio, que pode comprometer a produção de biogás (Mata-Alvarez et al., 2014).

#### 3.1 GESTÃO DA QUALIDADE E MODELAGEM COMPUTACIONAL

No contexto da gestão da qualidade, a modelagem computacional permite otimizar processos e reduzir variabilidades operacionais, assegurando maior eficiência na produção de biogás. Ferramentas de controle estatístico e simulação auxiliam na tomada de decisões e na implementação de melhorias contínuas,





alinhando-se aos princípios da gestão da qualidade total (Deming, 1986). A aplicação de metodologias como Seis Sigma e Kaizen pode contribuir para a identificação de falhas e aprimoramento do processo de digestão anaeróbica.

### 3.2 FERRAMENTAS DA QUALIDADE

As ferramentas da qualidade são recursos estratégicos amplamente utilizados para a identificação, análise e resolução de problemas nos processos organizacionais. Elas auxiliam na compreensão de falhas, no planejamento de melhorias e no direcionamento de ações com foco em eficiência e satisfação do cliente.

De acordo com Godoy (2009), essas ferramentas "representam os processos empregados na busca por melhorias e melhores resultados", podendo ser tanto gráficas quanto analíticas. Lucinda (2010) complementa afirmando que, com a crescente complexidade das atividades empresariais, essas ferramentas passaram a ser indispensáveis para o desenvolvimento das equipes e para a organização das informações. A autora ainda ressalta que seu uso proporciona "um método eficaz de abordagem, disciplina no trabalho e aumento de produtividade".

Lins (1993, apud Vergueiro, 2002) propôs uma classificação didática que divide essas ferramentas em dois grupos:

- Ferramentas Básicas, voltadas para a análise de problemas e dados (como o Diagrama de Pareto, o Brainstorming e o Diagrama de Causa e Efeito);
- Ferramentas Complementares, que apoiam a análise e a tomada de decisões (como a Matriz GUT).

Essas ferramentas também se integram aos ciclos de melhoria contínua, como o PDCA, e são comumente aplicadas em contextos industriais, educacionais e de serviços.

No desenvolvimento deste trabalho, foram utilizadas algumas dessas ferramentas, como o Brainstorming, a Matriz GUT e o Diagrama de Pareto, com o objetivo de levantar, priorizar e analisar os fatores que influenciam a produção de biogás via digestão anaeróbica. A seguir, apresentam-se os conceitos teóricos que fundamentam cada uma delas.

#### 3.2.1 Conceito de Brainstorming

O Brainstorming, ou tempestade de ideias, é uma técnica amplamente utilizada para fomentar a criatividade em grupo e levantar soluções para um problema de forma livre e colaborativa. Desenvolvido por Alex Osborn em 1938, esse método tem como característica principal a geração de ideias sem julgamentos ou críticas no momento inicial, buscando estimular a participação coletiva e o pensamento divergente.

Segundo Farias et al. (2021), o Brainstorming consiste em uma ferramenta essencial dentro da gestão de processos criativos e da melhoria contínua, pois "permite identificar problemas e alternativas de soluções por meio do levantamento de ideias originadas de um grupo de pessoas que conhecem o processo em estudo". O sucesso da técnica está diretamente relacionado ao envolvimento dos participantes e ao ambiente favorável à livre expressão de ideias, onde nenhuma sugestão é considerada errada ou absurda.

Ainda conforme os autores, essa técnica é bastante eficaz nas fases iniciais de projetos, especialmente no levantamento de causas de problemas ou na busca de





alternativas, sendo compatível com outras ferramentas da qualidade, como o Diagrama de Ishikawa ou a Matriz GUT.

Portanto, o Brainstorming não apenas promove o engajamento da equipe, como também enriquece a análise de processos por meio da diversidade de perspectivas, funcionando como um recurso valioso na etapa de diagnóstico de problemas.

### 3.2.2 Conceito da Matriz GUT

A Matriz GUT é uma ferramenta de gestão bastante utilizada para identificar, classificar e priorizar problemas dentro de um processo ou organização. Seu nome é um acrônimo que representa três critérios principais de avaliação: Gravidade, Urgência e Tendência. Cada um desses critérios recebe uma pontuação, geralmente de 1 a 5, conforme a intensidade de sua presença ou impacto. Ao multiplicar essas notas, é possível obter uma pontuação total que auxilia na definição das prioridades de ação.

- Gravidade refere-se ao impacto que o problema pode causar, levando em conta prejuízos à organização, clientes ou processos;
- Urgência está ligada ao tempo disponível para resolver o problema, ou seja, quanto mais rápido a ação precisar ser tomada, maior a pontuação;
- Tendência avalia a probabilidade de o problema piorar com o tempo, caso nenhuma medida seja adotada.

A aplicação da Matriz GUT se mostra útil principalmente em contextos onde existem muitos problemas a serem resolvidos e recursos limitados para atuar sobre todos eles ao mesmo tempo, como destacado por Alves et al. (2017) no artigo analisado. Ela permite uma visão estratégica e objetiva do que precisa ser feito primeiro, ajudando a focar os esforços naquilo que trará maior benefício ou evitará maiores danos.

No estudo realizado em uma panificadora, a matriz foi utilizada para classificar os problemas mais recorrentes no setor produtivo. A pontuação final dos itens avaliados facilitou a definição de prioridades e embasou a construção do Gráfico de Pareto, ferramenta que complementou a análise visual da frequência e impacto das perdas. Segundo os autores, a Matriz GUT foi eficaz para "identificar as falhas com ocorrência de perdas mais graves, que devem ser priorizadas com maior urgência e que possuem a maior tendência de se agravar" (Novaski et al., 2020, p. 42205).

### 3.2.3 Conceito do Diagrama de Ishikawa

Usado para representar a relação do efeito de um determinado problema com suas respectivas causas, o diagrama de Ishikawa é formulado como uma seção de brainstorming que busca levantar todas as possíveis causas que afetam o resultado esperado de um processo. O diagrama de Ishikawa parte de uma ferramenta gráfica utilizada pela Administração das organizações para buscar o gerenciamento e o Controle da Qualidade em diversos processos. (Souza et al., 2014).

Segundo os autores, o diagrama também é conhecido como "Diagrama de Causa e Efeito", "Diagrama Espinha de peixe" ou "Diagrama 6M". O Diagrama foi originalmente proposto pelo engenheiro químico Kaoru Ishikawa em 1943, e foi sendo aperfeiçoada nos anos seguintes. Na sua estrutura, os problemas são classificados em seis tipos diferentes em: método, matéria-prima, mão de obra, máquinas, medição e meio ambiente.





O Diagrama de Ishikawa é amplamente utilizado em empresas que buscam um sistema de gestão de qualidade mais robusto. Esses autores explicam que esse sistema permite estruturar hierarquicamente as causas potenciais de um determinado problema ou também uma oportunidade de melhoria, assim como seus efeitos sobre a qualidade dos produtos. O Diagrama de Ishikawa é uma das ferramentas mais eficazes e mais utilizadas nas ações de melhoria e controle de qualidade nas organizações, permitindo agrupar e visualizar as várias causas que estão na origem de qualquer problema ou de um resultado que se pretende melhorar.

### 3.2.4 Conceito do Diagrama de Pareto

O Diagrama de Pareto é uma das sete ferramentas clássicas da qualidade e tem como objetivo identificar e priorizar os problemas mais relevantes dentro de um processo, produto ou serviço. Ele é baseado no Princípio 80/20, formulado por Vilfredo Pareto, segundo o qual 80% dos efeitos são causados por apenas 20% das causas. Esse princípio foi posteriormente adotado e difundido por Joseph Juran no contexto da gestão da qualidade (Koch, 2015; Falconi, 2009).

Segundo Santos et al. (2019), essa ferramenta permite uma visualização clara das principais falhas ou problemas, organizando-os em um gráfico de barras em ordem decrescente de frequência. Isso facilita a tomada de decisão pelos gestores, uma vez que é possível concentrar esforços nas causas mais impactantes e, com isso, obter melhores resultados com menor esforço.

Além de identificar falhas de produção, desperdícios ou problemas na qualidade, o Diagrama de Pareto também é utilizado como uma ferramenta de apoio à melhoria contínua, possibilitando a alocação mais eficiente de recursos e o aumento da produtividade (Machado, 2012).

De forma prática, a construção do gráfico requer a coleta e a classificação dos dados em ordem decrescente, seguidos do cálculo das frequências absolutas e acumuladas. A visualização gráfica desses dados permite detectar quais causas são "vitais" e quais são "triviais", ajudando na priorização das ações corretivas (Teles, 2019).

Portanto, o Diagrama de Pareto contribui significativamente para a gestão da qualidade, não apenas por sua simplicidade, mas principalmente por sua eficácia na identificação de causas críticas e na melhoria de processos dentro das organizações.

## 4 METODOLOGIA

A presente pesquisa adotou uma abordagem teórico-exploratória com aplicação de simulação computacional para analisar a produção de biogás por digestão anaeróbica. Diante da inviabilidade de experimentação física, a metodologia baseou-se em dados obtidos na literatura científica, incorporados a um modelo matemático desenvolvido no software GNU Octave.

Como destaca Yin (2015), a força de estudos de caso está justamente em sua capacidade de lidar com múltiplas fontes de evidência e aplicar diversas técnicas de análise. Assim, foram combinadas ferramentas da qualidade com a modelagem computacional para fundamentar as escolhas do projeto.

Inicialmente, conduziu-se uma sessão de brainstorming para levantar os principais fatores que influenciam a eficiência da digestão anaeróbica. As 30 proposições geradas foram organizadas em categorias, conforme recomenda Yin (2015), criando uma estrutura analítica sólida para a etapa seguinte. Esses fatores





foram priorizados por meio da matriz GUT e analisados com auxílio do Diagrama de Pareto, permitindo identificar as variáveis mais críticas.

De acordo com Yin (2015), a inclusão de modelos lógicos é adequada para representar o funcionamento do fenômeno estudado e viabilizar simulações. Com base nisso, o modelo computacional desenvolvido considerou as etapas bioquímicas da digestão (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese), simulando o comportamento do sistema ao longo do tempo. A simulação foi dividida em duas fases: na Fase I, foram simuladas as condições iniciais de digestão do lodo de esgoto; e na Fase II, avaliou-se o impacto da co-digestão com esterco de vaca e na simulação, foi adotada a proporção de 1000 gramas de lodo de esgoto para 200 gramas de inóculo de esterco de vaca, o que estabelece uma razão substrato/inóculo de 5:1. Essa escolha foi fundamentada em dados de literatura científica e considerações práticas de modelagem, visando representar condições realistas de co-digestão.

A explicação teórica construída a partir da simulação se mostra relevante por permitir uma generalização analítica, indo além de uma simples descrição dos resultados, como ressalta Yin (2015). Dessa forma, a metodologia adotada possibilitou representar com fidelidade os mecanismos que regem a produção de biogás, mesmo sem a realização de experimentos físicos.

#### **4.1 FUNDAMENTAÇÃO DO USO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE**

A escolha da simulação computacional como abordagem metodológica para o estudo da produção de biogás a partir do lodo de esgoto e da co-digestão do esterco bovino, foi justificada por meio da aplicação de ferramentas da qualidade que permitiram estruturar e priorizar os motivos que fundamentam essa decisão. A partir da técnica de brainstorming, foram levantadas trinta razões que indicam as vantagens do uso da simulação, abrangendo aspectos como redução de custos operacionais, segurança, flexibilidade nos testes, eficiência na análise de cenários e possibilidade de replicação sem a necessidade de ensaios físicos repetitivos.

Em seguida, foi aplicada a matriz GUT (Gravidade, Urgência e Tendência), que permitiu classificar e ranquear os motivos levantados. O fator mais crítico identificado foi a redução da necessidade de estrutura laboratorial completa, demonstrando que esse ponto concentra grande parte dos entraves e limitações relacionadas à execução de experimentos físicos. Esse resultado direcionou o aprofundamento da análise com um segundo brainstorming, focado nas causas que exigem uma infraestrutura laboratorial complexa, como o uso de equipamentos especializados, necessidade de ambientes controlados, exigência de segurança e presença de processos manuais custosos e demorados.

Para organizar essas causas, foi elaborado um diagrama de Ishikawa, distribuindo os fatores entre os seis Ms da manufatura (Método, Máquina, Medida, Mão de Obra, Material e Meio Ambiente). Essa estrutura evidenciou que as causas não se concentram em um único aspecto, mas estão dispersas em diversas áreas do sistema, o que reforça a complexidade da abordagem experimental tradicional. Por fim, o gráfico de Pareto indicou que a maior parte dos fatores críticos está relacionada às categorias Máquina, Meio Ambiente e Método, as quais exigem altos investimentos, controle rigoroso e presença constante de operadores, tornando o processo físico oneroso e de difícil gerenciamento.

Dessa forma, o uso da simulação computacional é justificado como uma solução eficaz, pois mitiga os principais fatores que encarecem, dificultam ou





inviabilizam a experimentação em escala real. A análise demonstra que a simulação permite estudar o processo com flexibilidade, rapidez, segurança e menor custo, oferecendo base sólida para a modelagem de sistemas reais com alto grau de confiabilidade.

#### 4.1.1 Primeiro Brainstorming

A primeira etapa do processo foi a realização de um brainstorming, com o objetivo de levantar, de forma livre e sem julgamentos, as possíveis razões que justificam a escolha da simulação computacional como alternativa ao experimento físico. Essa etapa teve como foco capturar percepções técnicas, econômicas, operacionais e estratégicas que evidenciam as vantagens do uso da simulação, tais como a redução de custos, o aumento da segurança, a flexibilidade nos testes, a possibilidade de reprodutibilidade, a agilidade na obtenção de resultados e a integração com modelos matemáticos.

A função principal dessa atividade no contexto do projeto foi fundamentar a motivação inicial para a escolha da abordagem computacional, além de fornecer insumos para a etapa seguinte de priorização dos fatores, realizada por meio da aplicação da matriz GUT. Ao todo, foram levantadas 30 ideias que justificam o uso da simulação computacional na análise da produção de biogás, consolidando um panorama amplo e multidimensional dos benefícios dessa metodologia frente à experimentação física tradicional.

Tabela 4.1 - Resultados do brainstorming sobre uso da simulação computacional.

Nº	Ideia Levantada	Nº	Ideia Levantada
1	Reduz o custo com ensaios físicos	16	Estuda impacto da granulometria do material
2	Acelera o tempo de avaliação dos cenários	17	Suporta análises estatísticas avançadas
3	Permite testar múltiplas condições operacionais	18	Integra-se com modelos de engenharia de reatores
4	Evita desperdício de material real	19	Permite simular biodigestores de escala industrial
5	Facilita alterações no modelo de forma rápida	20	Gera dados para calibração de sensores e atuadores
6	Gera dados em tempo reduzido	21	Fornece base para algoritmos de controle automatizado
7	Permite simular falhas ou condições extremas	22	Pode ser repetida infinitamente sem custo adicional
8	Elimina riscos de contaminação no ambiente de teste	23	Favorece comparações entre métodos de digestão
9	Permite a integração com modelos termodinâmicos e cinéticos	24	Dá suporte a projetos de financiamento
10	Auxilia na previsão de rendimento de biogás	25	Evita riscos com gases potencialmente tóxicos
11	Possibilita estudar diferentes composições do esterco	26	Permite prever tempo ótimo de residência
12	Reduz necessidade de estrutura laboratorial completa	27	Auxilia na escolha do melhor tipo de biodigestor
13	Permite rodar cenários com e sem agitação no biodigestor	28	Gera material didático para formação técnica
14	Facilita estudos com presença de co-substratos	29	Permite analisar rendimento energético em tempo real
15	Avalia eficiência com variações de temperatura	30	Garante reprodutibilidade e padronização dos testes

Fonte: Elaborado pela autora, 2025

#### 4.1.2 Matriz de Relação ou Matriz GUT

Com o propósito de priorizar os 30 itens levantados durante a etapa de brainstorming, foi aplicada a Matriz GUT (Gravidade, Urgência e Tendência). Essa ferramenta permite classificar e hierarquizar os elementos identificados com base em três critérios fundamentais: Gravidade, que se refere ao impacto gerado pela causa; Urgência, relacionada à necessidade imediata de ação; e Tendência, que avalia o potencial de agravamento do problema ao longo do tempo.

A função dessa etapa dentro do projeto foi direcionar os esforços analíticos para as causas consideradas mais críticas, de modo a otimizar a tomada de decisões





e aprofundar a análise nos pontos de maior relevância. Como resultado da aplicação da Matriz GUT, o fator mais significativo identificado foi a necessidade de uma estrutura laboratorial completa, destacando-se como o principal entrave à realização de ensaios físicos. Esse elemento tornou-se, então, o foco das etapas subsequentes da investigação.

A tabela 4.2 apresenta a distribuição dos 30 brainstorms na Matriz GUT, bem como sua respectiva classificação com base nos critérios estabelecidos.

Tabela 4.2 - Distribuição dos 30 Brainstorms na Matriz GUT

Item	Gravidade	Urgência	Tendência	GxUxT
<b>Reduz necessidade de estrutura laboratorial completa</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>125</b>
Facilita estudos com presença de co-substratos	5	5	4	100
Suporta análises estatísticas avançadas	5	4	4	80
Gera dados para calibração de sensores e atuadores	4	4	5	80
Permite a integração com modelos termodinâmicos e cinéticos	5	4	4	80
Permite simular biodigestores de escala industrial	4	4	4	80
Auxilia na previsão de rendimento de biogás	5	3	5	75
Evita desperdício de material real	4	3	5	75
Facilita alterações no modelo de forma rápida	3	4	3	60
Avalia eficiência com variações de temperatura	5	3	4	60
Permite analisar rendimento energético em tempo real	5	3	4	60
Elimina riscos de contaminação no ambiente de teste	4	3	5	60
Permite simular falhas ou condições extremas	5	3	4	60
Gera dados em tempo reduzido	3	3	4	60
Permite testar múltiplas condições operacionais	5	5	2	50
Favorece comparações entre métodos de digestão	4	3	4	48
Permite rodar cenários com e sem agitação no biodigestor	3	3	4	48
Auxilia na escolha do melhor tipo de biodigestor	3	3	3	45
Garante reprodutibilidade e padronização dos testes	5	3	3	45
Acelera o tempo de avaliação dos cenários	3	5	3	45
Evita riscos com gases potencialmente tóxicos	5	3	3	45
Possibilita estudar diferentes composições do esterco	5	2	2	30
Dá suporte a projetos de financiamento	3	4	3	36
Gera material didático para formação técnica	5	3	2	30
Permite prever tempo ótimo de residência	3	2	2	30
Reduz o custo com ensaios físicos	5	2	3	30
Integra-se com modelos de engenharia de reatores	4	2	3	24
Pode ser repetida infinitamente sem custo adicional	3	2	3	18
Fornecer base para algoritmos de controle automatizado	3	2	3	18
Estuda impacto da granulometria do material	3	2	2	12

Fonte: Elaborado pela autora, 2025

#### 4.1.3 Segundo Brainstorming

Com base no resultado da Matriz GUT, foi necessário aprofundar a análise do principal fator identificado como crítico: a elevada dependência de uma estrutura laboratorial completa para a realização de experimentos físicos. O objetivo desta etapa foi investigar e detalhar as causas específicas que tornam essa estrutura exigente, onerosa e complexa, a fim de compreender os elementos que dificultam ou inviabilizam a execução prática dos ensaios.





A função dessa análise no contexto do projeto foi estruturar os fatores técnicos, operacionais, ambientais e de segurança que impõem barreiras à experimentação física. Esses fatores foram organizados de forma sistemática para embasar a construção do Diagrama de Ishikawa, além de fortalecer a justificativa do uso da simulação computacional como alternativa viável e eficiente.

As causas identificadas para a alta dependência de estrutura laboratorial foram diversas e abrangem desde a necessidade de equipamentos especializados ambientes controlados, até exigências relativas à presença de operadores qualificados, protocolos de segurança rigorosos e altos custos de manutenção e operação. Essa etapa revelou a complexidade multifatorial que envolve a experimentação física, reforçando o papel estratégico da simulação computacional no contexto da pesquisa.

Tabela 4.3 - Causas mapeadas no segundo Brainstorming.

Nº	Ideia Levantada	Nº	Ideia Levantada
1	Necessidade de biodigestores físicos para diferentes volumes	16	Equipamentos de cromatografia para análise de gases
2	Equipamentos de agitação mecânica controlada	17	Necessidade de pessoal técnico em tempo integral
3	Sistemas de controle de temperatura do reator	18	Estrutura de lavagem e sanitização dos equipamentos
4	Monitoramento contínuo de pH e temperatura	19	Sistema de backup de energia para testes longos
5	Coleta manual de amostras para análise periódica	20	Câmaras frias para armazenamento de amostras
6	Necessidade de câmaras de isolamento biológico	21	Necessidade de licenciamento ambiental para operação
7	Instalação de sistemas de segurança contra vazamentos de gás	22	Ambientes segregados para evitar contaminação cruzada
8	Exigência de bancadas para preparação de substratos	23	Equipamentos de medição de pressão e volume do gás gerado
9	Espaço físico para múltiplos reatores simultâneos	24	Tubulações e válvulas com controle manual ou automático
10	Necessidade de sala exclusiva para resíduos orgânicos	25	Espaço para experimentos em diferentes escalas (bancada, piloto)
11	Aquisição de balanças de precisão para dosagem	26	Reatores com sistema de alimentação contínua ou batelada
12	Tanques de armazenamento de substrato e efluente	27	Instalações específicas para descarte seguro de resíduos
13	Compressores ou agitadores pneumáticos	28	Controladores de vazão e sensores em tempo real
14	Incubadoras ou estufas climatizadas	29	Estrutura para experimentação com diferentes substratos simultaneamente
15	Sistema de exaustão com filtragem de gases	30	Necessidade de manter condições ambientais estáveis (temperatura, umidade)

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

#### 4.1.4 Desenvolvimento Diagrama Ishikawa

A etapa seguinte consistiu na organização das causas ligadas ao problema “necessidade de estrutura laboratorial”, utilizando a metodologia dos 6 Ms da Manufatura: Método, Máquina, Medida, Mão de Obra, Material e Meio Ambiente. O objetivo foi representar visualmente os fatores que tornam a abordagem experimental física mais complexa, exigente e, por vezes, inviável.

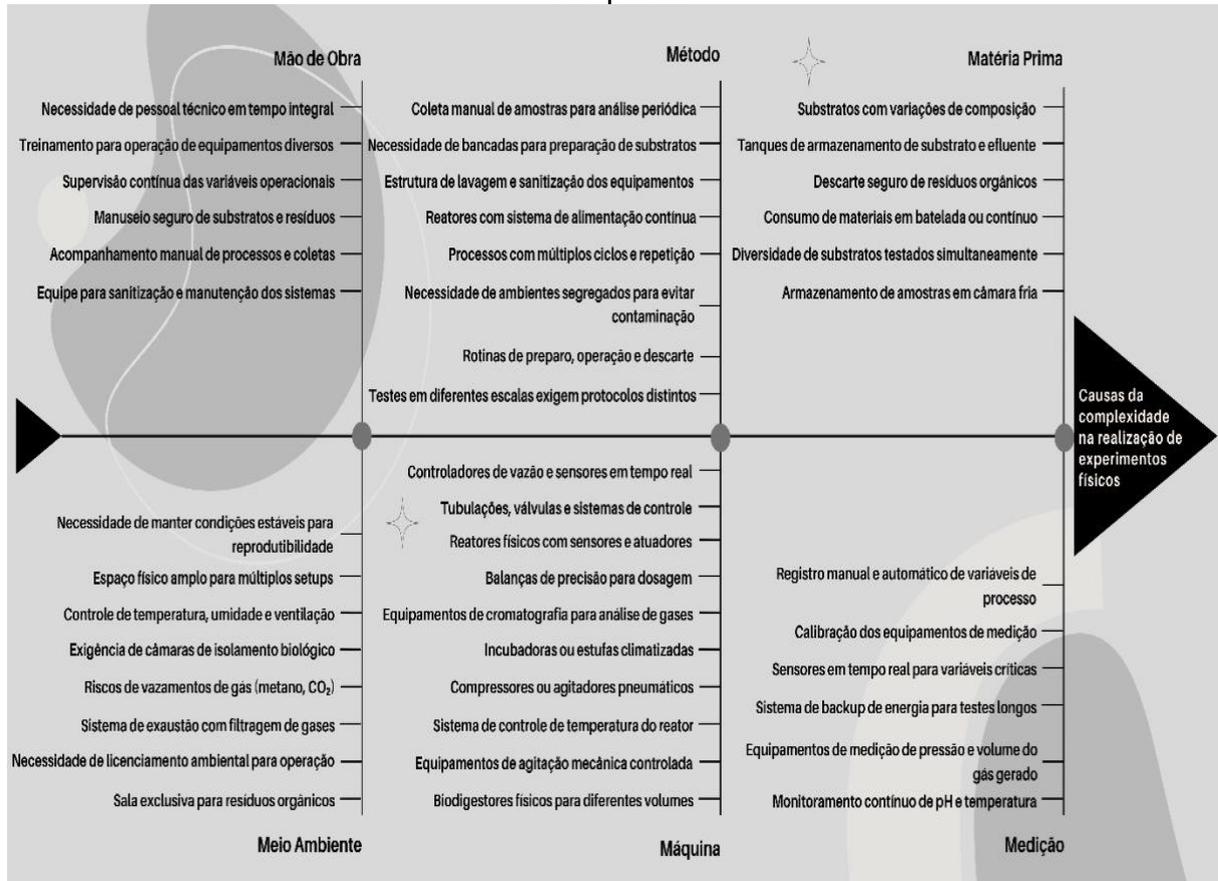
A estruturação das causas segundo os seis eixos evidenciou que os desafios dos ensaios físicos são diversos e interdependentes. Esse cenário reforça a vantagem da simulação computacional, capaz de mitigar ou eliminar simultaneamente muitos desses obstáculos.

As 30 ideias geradas no brainstorming foram distribuídas no Diagrama de Ishikawa, sendo alocadas conforme as categorias mais adequadas. Em alguns casos, uma mesma causa se encaixou em mais de uma dimensão, demonstrando a complexidade envolvida no processo e justificando a escolha pela modelagem computacional como alternativa estratégica.





Figura 4.1 – Diagrama de Ishikawa sobre a necessidade de estrutura laboratorial completa.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

#### 4.1.5 Diagrama de Pareto

Com o intuito de visualizar graficamente a concentração dos fatores críticos associados à necessidade de estrutura laboratorial, foi construído um Gráfico de Pareto com base na frequência de ocorrência das causas em cada um dos 6 Ms da Manufatura. O objetivo desta etapa foi aplicar o princípio 80/20, que indica que uma pequena quantidade de categorias tende a concentrar a maior parte dos problemas, permitindo assim uma análise mais focada e estratégica.

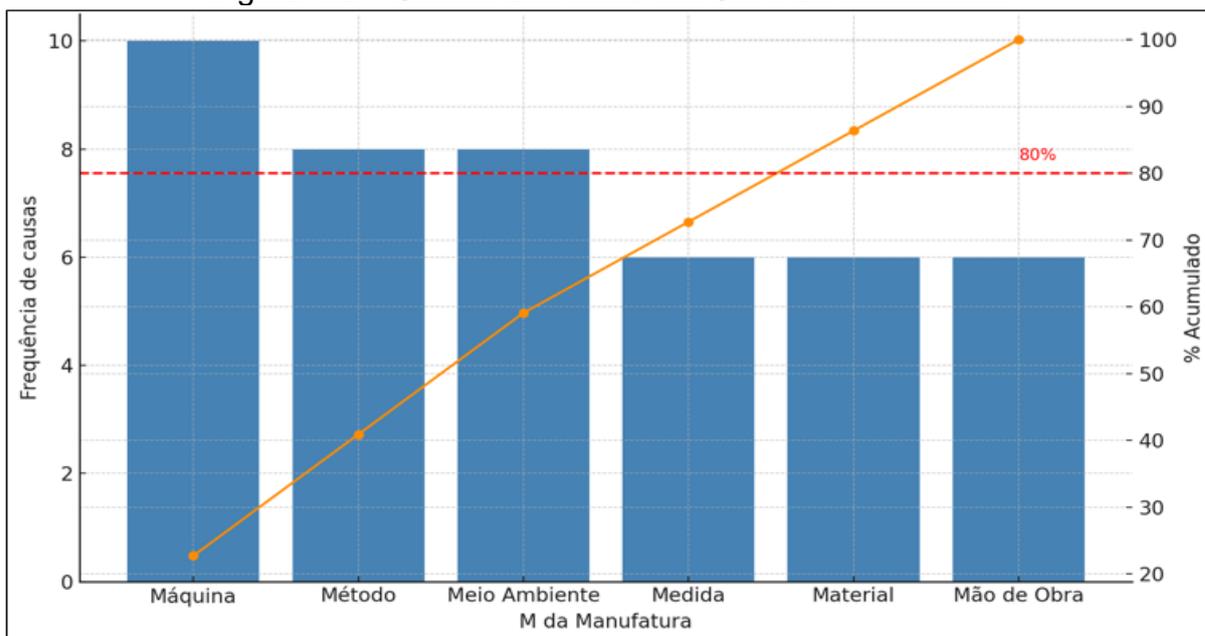
A função desse gráfico no projeto é reforçar de forma quantitativa os resultados obtidos nas etapas anteriores, evidenciando que a maior parte dos entraves está associada às categorias Máquina, Método e Meio Ambiente. Esses três eixos, quando combinados, representam um conjunto de fatores que exigem altos investimentos, controle rigoroso, equipamentos específicos e ambientes adequados, tornando a realização de experimentos físicos um processo oneroso e complexo.

Dessa forma, o Gráfico de Pareto serve como evidência gráfica e objetiva da eficácia da simulação computacional como alternativa metodológica, já que essa abordagem elimina ou reduz significativamente os impactos nas categorias mais críticas. A Figura 3.2 apresenta a distribuição dos dados e reforça a justificativa da escolha pelo uso de ferramentas computacionais no desenvolvimento do projeto.





Figura 4.2 – Gráfico de Pareto dos 5M's da Manufatura.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A interpretação do Gráfico de Pareto permite identificar com clareza quais categorias concentram a maior parte das causas relacionadas à alta dependência de estrutura laboratorial. A categoria "Máquina" se destaca como a mais significativa, com dez causas atribuídas, indicando que a maioria dos fatores limitantes está ligada ao uso de equipamentos, dispositivos específicos e infraestrutura técnica. Esse dado evidencia o peso dos recursos materiais na viabilidade de experimentos físicos.

Na sequência, as categorias "Método" e "Meio Ambiente" aparecem com oito causas cada, revelando que os procedimentos operacionais complexos e as condições ambientais controladas também exercem forte influência sobre a dificuldade de implementar a abordagem experimental tradicional.

As demais categorias — "Medida", "Material" e "Mão de Obra" — apresentam frequências menores, com seis causas cada, o que indica uma influência menos significativa, mas ainda relevante no contexto analisado. Esses fatores, embora não prioritários, contribuem para a complexidade geral do processo.

Observa-se que o ponto de interseção com a linha de 80% do gráfico ocorre por volta da terceira categoria, o que reforça que "Máquina", "Método" e "Meio Ambiente" concentram mais de 80% das causas críticas. Essa constatação orienta a priorização de esforços e valida, de forma objetiva, a escolha da simulação computacional como alternativa metodológica eficaz, uma vez que essa abordagem elimina ou mitiga os impactos justamente nas categorias mais problemáticas.

## 4.2 DIGESTÃO ANAERÓBICA DO LODO DE ESGOTO: ANÁLISE ISOLADA

A escolha da biomassa e o período de simulação baseiam-se em parâmetros comumente utilizados em estudos de digestão anaeróbica de resíduos orgânicos, conforme descrito por Li et al. (2011) e Appels et al. (2008). Foram atribuídos coeficientes específicos a cada uma das substâncias envolvidas no processo, como ácidos, álcool, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, amônia, acetato e metano, baseando-se em dados experimentais reportados na literatura. Estes coeficientes refletem a eficiência de conversão das macromoléculas presentes no lodo em produtos intermediários e finais,





conforme documentado em fontes reconhecidas, como Tchobanoglous et al. (2003) e Appels et al. (2008).

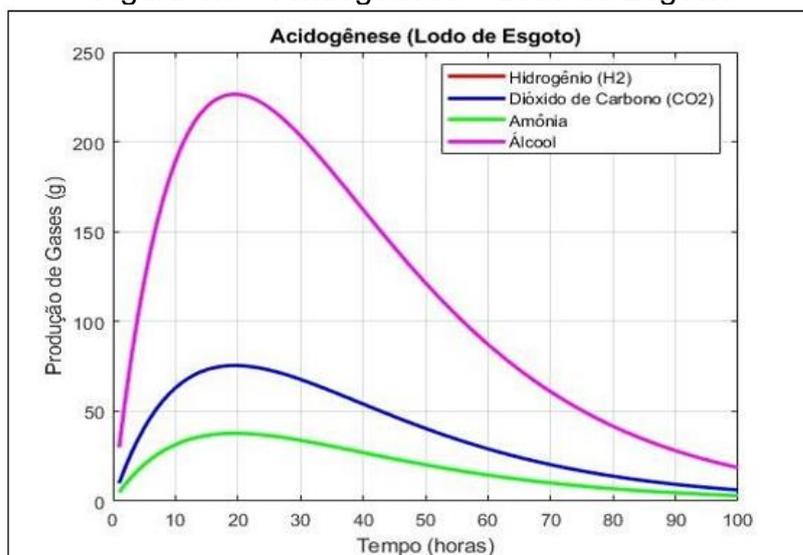
A simulação foi realizada em um loop temporal, onde a cada iteração, representando uma hora, as etapas foram executadas sequencialmente. Na etapa da hidrólise, a biomassa foi dividida em componentes menores, como açúcares, aminoácidos e ácidos graxos, sem produção de gases. Em seguida, os produtos da hidrólise foram convertidos em ácidos voláteis, álcool,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  e amônia na etapa de acidogênese, onde foi gerada a produção inicial de gases. Posteriormente, os ácidos voláteis e o álcool formados na acidogênese foram convertidos em acetato,  $\text{H}_2$  e  $\text{CO}_2$  durante a acetogênese, preparando os precursores para a metanogênese.

Finalmente, o acetato e o  $\text{H}_2$  foram convertidos em metano e  $\text{CO}_2$ , que constituem os principais componentes do biogás. Em cada etapa, a produção dos gases foi registrada e a biomassa foi atualizada, assumindo-se que 5% da biomassa era consumida por hora, conforme indicado nos estudos de digestão anaeróbica de lodo de esgoto. Ao final de cada interação, o tempo efetivo de produção de cada gás foi contabilizado, permitindo uma análise detalhada da eficiência do processo ao longo do tempo.

Os dados de produção de gases ao longo do tempo foram visualizados por meio de gráficos, que mostraram a quantidade de cada gás produzido em cada etapa do processo. Além disso, a produção acumulada ao final do processo foi apresentada, permitindo a avaliação da eficácia do processo de digestão anaeróbica para a produção de biogás.

O tempo efetivo de produção para cada gás foi convertido em minutos e associado aos valores totais de produção, fornecendo uma compreensão detalhada das dinâmicas envolvidas. A figura 4.3 mostra o resultado gráfico da produção de diferentes gases durante a fase de acidogênese do processo de digestão anaeróbica do lodo de esgoto ao longo de 100 horas.

Figura 4.3 – Acidogênese – Lodo de Esgoto.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Nota-se que, a acidogênese é uma etapa onde os compostos orgânicos, resultantes da hidrólise, são convertidos em ácidos voláteis, álcool, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e amônia. O gráfico mostra que todos os gases analisados (álcool,  $\text{CO}_2$ , e amônia) têm um comportamento semelhante: a produção aumenta





rapidamente durante as primeiras 20 horas, atingindo um pico, após o qual começa a declinar. Este comportamento é típico da etapa de acidogênese, o qual compostos orgânicos são convertidos em ácidos voláteis, álcool,  $\text{CO}_2$ , e amônia.

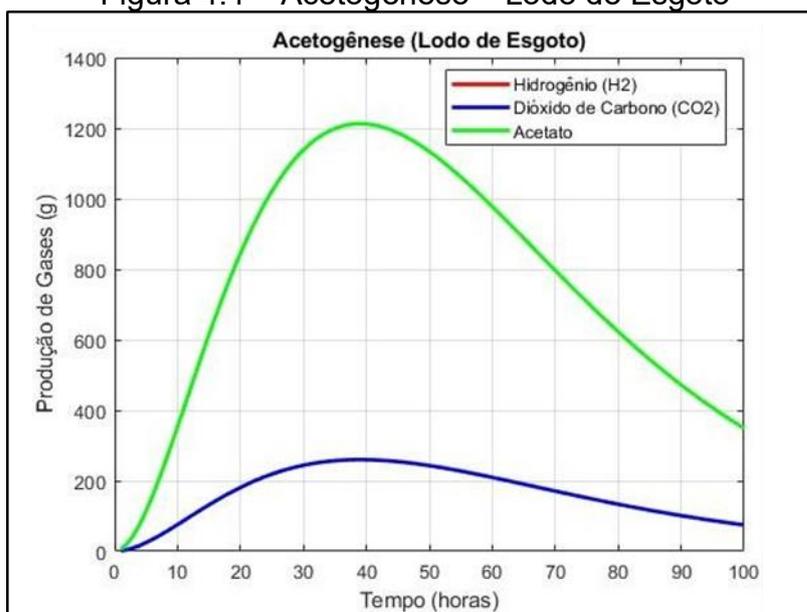
A tendência de declínio após o pico indica que esses compostos estão sendo consumidos ou convertidos em outros produtos à medida que o processo de digestão anaeróbica avança para as etapas subsequentes, como a acetogênese e a metanogênese. O álcool possui a maior produção inicial, sugerindo que é um intermediário significativo nesta fase, antes de ser transformado em outros compostos nas etapas seguintes.

A produção de álcool, representado pela linha rosa, atinge um pico por volta de 20 horas, com uma produção máxima próxima de 250 gramas. Após atingir o pico, a produção de álcool começa a diminuir de forma gradual, o que indica que o álcool está sendo convertido em outros compostos nas etapas subsequentes da digestão anaeróbica. A produção de  $\text{CO}_2$ , representado pela linha azul, aumenta ao longo do tempo, atingindo um máximo em torno de 50 gramas por volta de 20 horas. Após esse pico, a produção de  $\text{CO}_2$  diminui, o que pode indicar a sua utilização em processos subsequentes, como na formação de metano na metanogênese.

A produção de amônia (linha verde) é a menor dentre os compostos medidos, alcançando um pico em torno de 30 gramas, também próximo de 20 horas. A redução subsequente na quantidade de amônia sugere sua transformação ou utilização em outras fases do processo.

A ausência da linha vermelha, hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), no gráfico, é o resultado da baixa produção do hidrogênio em comparação com os outros gases, como o álcool, o  $\text{CO}_2$  e a amônia. Se os valores de produção de  $\text{H}_2$  forem muito baixos, a linha correspondente pode não ser visível no gráfico devido à escala utilizada. No gráfico da figura 4.4 é mostrado a produção de diferentes compostos durante a fase de acetogênese do processo de digestão anaeróbica do lodo de esgoto ao longo de 100 horas.

Figura 4.4 – Acetogênese – Lodo de Esgoto



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Nota-se que, a acetogênese é uma etapa intermediária crucial onde ácidos graxos voláteis e outros intermediários, formados na acidogênese, são convertidos em acetato, hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). O gráfico mostra que a





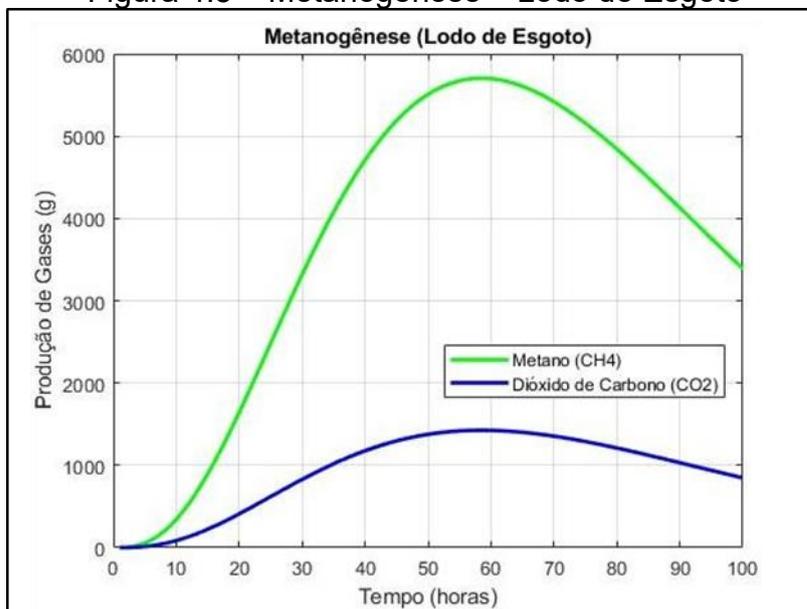
produção de todos os compostos monitorados aumenta durante as primeiras 40 horas, atingindo um pico, e depois começa a diminuir. Esse comportamento é típico da fase de acetogênese, onde os produtos da acidogênese são convertidos em compostos que servirão de substrato para a fase final da digestão anaeróbica, a metanogênese. O acetato é um intermediário chave que, após ser produzido em grande quantidade, é posteriormente consumido para a geração de metano. O  $\text{CO}_2$  e o  $\text{H}_2$ , embora produzidos em menores quantidades, também são importantes intermediários no processo de formação de biogás.

A produção de acetato, representado pela linha verde, é a mais significativa no processo, atingindo um pico de aproximadamente 1200 gramas por volta das 40 horas. Após esse pico, a produção começa a diminuir, indicando que o acetato está sendo consumido nas etapas seguintes, principalmente na metanogênese, onde é convertido em metano.

O  $\text{CO}_2$  também é produzido, representado pela linha azul, mas em quantidades menores, com um pico em torno de 200 gramas, também por volta de 40 horas. Após o pico, a produção de  $\text{CO}_2$  começa a diminuir gradualmente, o que sugere que ele está sendo parcialmente utilizado em reações subsequentes ou se acumulando no sistema. A ausência visível da linha do hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) pode indicar que a sua produção é muito baixa em comparação ao acetato e ao  $\text{CO}_2$ , ficando fora da escala visível ou não destacada no gráfico.

A figura 4.5 mostra a produção de metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) ao longo de 100 horas durante a fase de metanogênese no processo de digestão anaeróbica do lodo de esgoto.

Figura 4.5 – Metanogênese – Lodo de Esgoto



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Nota-se que, a metanogênese é a etapa final do processo de digestão anaeróbica, onde os intermediários formados nas fases anteriores, como o acetato e o hidrogênio, são convertidos em metano e dióxido de carbono, os principais componentes do biogás. O gráfico mostra que durante a metanogênese, a produção de metano é predominante em comparação ao  $\text{CO}_2$ , o que é esperado, já que o metano é o principal produto final da digestão anaeróbica e o componente desejado do biogás. O fato de o metano atingir um pico mais alto e depois diminuir sugere que

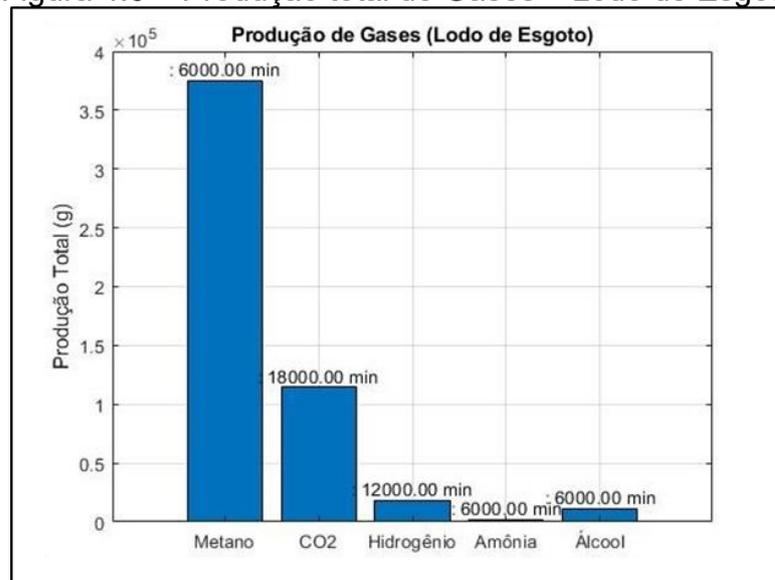


a maior parte do material disponível para conversão em metano foi utilizada até cerca de 60 horas após o momento em que a produção começa a cair. O comportamento do CO<sub>2</sub>, embora siga um padrão similar, é de menor magnitude, o que pode ser explicado pelo fato de que parte do CO<sub>2</sub> produzido durante a metanogênese pode ser reutilizado ou permanecer dissolvido no meio, não sendo liberado na mesma proporção que o metano.

A produção de metano, representado pela linha verde, é a mais significativa nesta fase, começando lentamente e atingindo um pico por volta de 60 horas, onde a produção chega a aproximadamente 6000 gramas. Após atingir o pico, a produção de metano começa a diminuir, o que pode indicar que a maior parte dos substratos disponíveis, como acetato e hidrogênio, já foi consumida.

A linha azul representa a produção de CO<sub>2</sub> que também aumenta ao longo do tempo, mas em uma quantidade menor que o metano. O pico de produção de CO<sub>2</sub> ocorre um pouco antes do pico do metano, alcançando cerca de 1200 gramas. Após o pico, a produção de CO<sub>2</sub> também começa a diminuir gradualmente, indicando que as reações que geram CO<sub>2</sub> estão diminuindo à medida que o processo avança. A figura 4.6 mostra o gráfico de barras da produção total de diferentes gases ao longo do processo de digestão anaeróbica do lodo de esgoto.

Figura 4.6 – Produção total de Gases – Lodo de Esgoto



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Nota-se que, cada barra representa a quantidade acumulada de cada gás produzido, com a escala em gramas (g), com o tempo total efetivo de produção de cada gás em minutos. O gráfico mostra que o metano é o principal gás produzido durante a digestão anaeróbica, o que é esperado, dado que a metanogênese é a fase final e mais importante do processo para a produção de biogás. O CO<sub>2</sub> é o segundo maior componente, mas sua produção é mais extensa em termos de tempo, sugerindo que ele é gerado em várias etapas do processo, não apenas na metanogênese.

Os outros gases (hidrogênio, amônia e álcool) são produzidos em quantidades significativamente menores e em períodos mais curtos. Isso reflete suas funções como intermediários ou subprodutos do processo, que são consumidos ou transformados em outras substâncias à medida que a digestão anaeróbica avança. O tempo de produção efetiva indicado para cada gás oferece insights sobre quando e por quanto





tempo cada gás foi predominantemente gerado, o que pode ajudar na otimização do processo para maximizar a produção de biogás (metano) e na gestão de subprodutos como  $\text{CO}_2$  e amônia.

O metano é o gás produzido em maior quantidade, com uma produção total próxima a 350.000 gramas (ou 350 kg). O tempo efetivo de produção de metano é indicado como 6000 minutos, o que sugere que a produção de metano ocorreu de forma intensa e contínua ao longo de uma parte significativa do processo. O dióxido de carbono é o segundo gás mais produzido, com um total próximo a 180.000 gramas (ou 180 kg). O tempo efetivo de produção de  $\text{CO}_2$  é de 18.000 minutos, indicando uma produção mais distribuída ao longo do tempo, em comparação ao metano.

O hidrogênio é produzido em uma quantidade muito menor, com um total de cerca de 12.000 gramas (ou 12 kg). O tempo de produção efetiva de hidrogênio é de 12.000 minutos, sugerindo uma produção contínua, porém em menor escala. A produção de amônia é ainda menor, atingindo aproximadamente 6000 gramas (ou 6 kg). O tempo de produção efetiva de amônia é de 6000 minutos, mostrando que a amônia foi gerada em quantidades limitadas ao longo de um período específico. O álcool tem uma produção total semelhante à amônia, com cerca de 6000 gramas (ou 6 kg). O tempo de produção efetiva de álcool também é de 6000 minutos, indicando que foi produzido em uma janela de tempo específica, provavelmente na fase de acidogênese.

### 4.3 CO-DIGESTÃO DE LODO DE ESGOTO COM ESTERCO DE VACA

O algoritmo em questão realiza uma simulação computacional do processo de produção de biogás a partir de lodo de esgoto, utilizando inóculo de esterco de vaca como um co-substrato no processo de digestão anaeróbica. O objetivo é modelar as quatro etapas principais do processo de digestão anaeróbica: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, para avaliar a produção de diferentes gases ao longo do tempo. Esta abordagem baseia-se em parâmetros e coeficientes específicos estabelecidos na literatura, como descrito por Li et al. (2011), Tchobanoglous et al. (2003), Appels et al. (2008) para lodo de esgoto, e por Hagos et al. (2017), Elsayed et al. (2022), Gerardi (2003) para o esterco de vaca.

Inicialmente, são definidas as quantidades de biomassa de lodo de esgoto e inóculo de esterco de vaca, que são 1000 gramas e 200 gramas, respectivamente. O tempo total da simulação é de 100 horas, com um passo de tempo de 1 hora. Em seguida, são estabelecidos coeficientes específicos para cada uma das fases do processo, tanto para o lodo de esgoto quanto para o esterco de vaca. Esses coeficientes representam a eficiência de conversão de diferentes componentes orgânicos em produtos finais, como ácidos, álcool, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), amônia, acetato e metano.

Durante a simulação, o código executa um loop temporal que simula cada etapa da digestão anaeróbica. Na etapa de hidrólise, as macromoléculas presentes na biomassa são quebradas em componentes menores, como açúcares, aminoácidos e ácidos graxos. Em seguida, na acidogênese, esses componentes são convertidos em ácidos voláteis, álcool,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  e amônia, com a produção de cada gás sendo acumulada ao longo do tempo. Os tempos efetivos de produção desses gases são registrados para análise posterior.

Na acetogênese, os ácidos voláteis e o álcool produzidos na acidogênese são convertidos em acetato,  $\text{H}_2$  e  $\text{CO}_2$ , sendo que novamente a produção de cada composto é somada. Finalmente, na metanogênese, o acetato e o  $\text{H}_2$  são convertidos

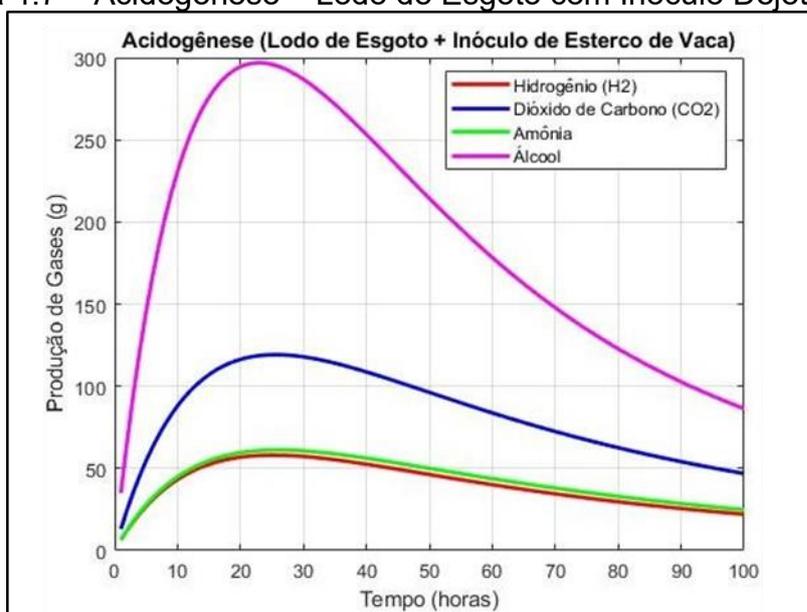




em metano e  $\text{CO}_2$ , que são os principais componentes do biogás. Durante todas as etapas, a biomassa de lodo de esgoto e o inóculo de esterco de vaca são gradualmente consumidos, com uma redução de 5% e 2% por hora, respectivamente.

A figura 4.7 apresenta a produção de diferentes gases ao longo do tempo durante a fase de acidogênese no processo de digestão anaeróbica, utilizando uma mistura de lodo de esgoto e inóculo de esterco de vaca.

Figura 4.7 – Acidogênese – Lodo de Esgoto com Inóculo Dejeito Vaca.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Nota-se que, a acidogênese é uma das etapas iniciais da digestão anaeróbica, onde compostos orgânicos complexos, resultantes da hidrólise, são convertidos em ácidos voláteis, álcool, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e amônia. O gráfico mostra que todos os gases analisados apresentam um comportamento típico durante a acidogênese: suas produções aumentam inicialmente, atingem um pico em torno de 20 a 30 horas, e depois começam a diminuir. Este comportamento é esperado, pois, durante a acidogênese, ocorre uma intensa conversão de compostos orgânicos em intermediários que são posteriormente utilizados nas etapas seguintes da digestão anaeróbica, como a acetogênese e a metanogênese. A combinação de lodo de esgoto com inóculo de esterco de vaca parece promover uma produção significativa de álcool e  $\text{CO}_2$ , que são os produtos predominantes nesta fase. A menor produção de  $\text{H}_2$  e amônia sugere que esses gases são formados em quantidades menores ou que são rapidamente convertidos em outros compostos no decorrer do processo.

O álcool é o gás produzido em maior quantidade durante a acidogênese, atingindo um pico de aproximadamente 300 gramas por volta das 20 horas.

Após atingir o pico, a produção de álcool diminui gradualmente, indicando que ele está sendo consumido ou convertido em outros compostos nas etapas subsequentes do processo. A produção de  $\text{CO}_2$  também é significativa, alcançando um pico de cerca de 120 gramas após 30 horas.

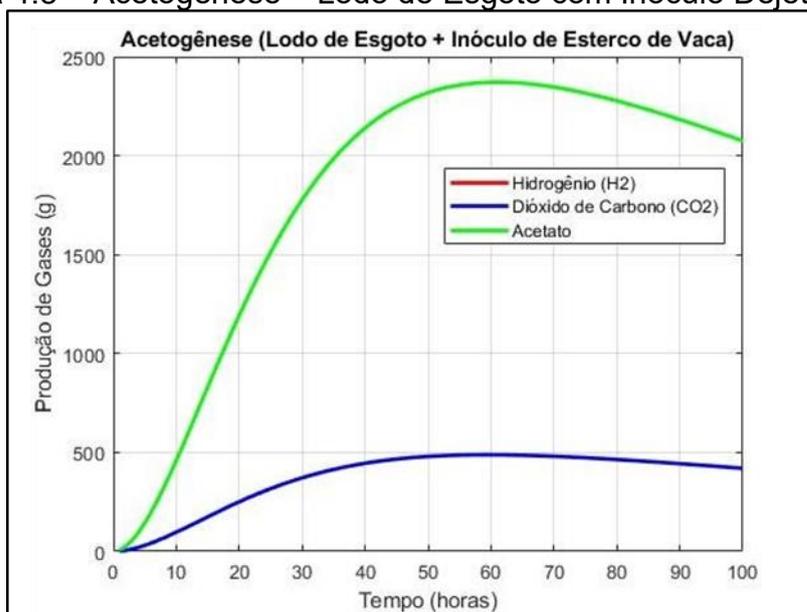
Assim como o álcool, a produção de  $\text{CO}_2$  começa a diminuir após o pico, sugerindo sua utilização ou transformação em fases posteriores do processo de digestão anaeróbica. A produção de  $\text{H}_2$  atinge um pico em torno de 60 gramas por volta de 30 horas. Depois do pico, a produção de hidrogênio diminui, refletindo sua conversão em outros produtos, como metano, na etapa de metanogênese.





A amônia é produzida em menor quantidade em comparação com os outros gases, atingindo um pico de cerca de 40 gramas próximo a 30 horas. A produção de amônia também diminui após o pico, mostrando um comportamento similar ao dos outros gases. A figura 4.8 apresenta a produção de acetato, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) ao longo do tempo durante a fase de acetogênese no processo de digestão anaeróbica, utilizando uma combinação de lodo de esgoto e inóculo de esterco de vaca.

Figura 4.8 – Acetogênese – Lodo de Esgoto com Inóculo Dejeto Vaca.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Observa-se que, a acetogênese é uma etapa intermediária do processo, onde os ácidos voláteis e o álcool, formados durante a acidogênese, são convertidos em acetato,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$ . O gráfico mostra que, durante a acetogênese, o acetato é o principal produto, com uma produção significativamente maior em comparação ao  $\text{CO}_2$  e ao  $\text{H}_2$ . Isso reflete a importância do acetato como um intermediário crucial que será posteriormente convertido em metano, o componente principal do biogás. O fato de o acetato atingir um pico por volta de 50 horas e depois começar a diminuir sugere que, após esse período, a maior parte dos ácidos voláteis e do álcool foi convertida, e o processo está se movendo em direção à metanogênese. O  $\text{CO}_2$  e o  $\text{H}_2$ , embora produzidos em menores quantidades, são igualmente importantes no contexto do processo, servindo como indicadores da conversão de substratos e da eficiência do processo de digestão anaeróbica. A combinação de lodo de esgoto e esterco de vaca parece ser eficaz em promover a produção desses intermediários, especialmente o acetato, que é fundamental para a fase final da digestão.

A produção de acetato é a mais significativa nesta fase, começando a crescer rapidamente nas primeiras horas e atingindo um pico de cerca de 2400 gramas por volta das 50 horas. Após atingir esse pico, a produção de acetato começa a diminuir, indicando que ele está sendo consumido na etapa subsequente, a metanogênese, onde é convertido em metano.

A produção de  $\text{CO}_2$  também é considerável, mas ocorre em menor quantidade em comparação ao acetato. O  $\text{CO}_2$  atinge um pico de aproximadamente 500 gramas por volta das 50 horas. Após o pico, a produção de  $\text{CO}_2$  começa a decrescer, sugerindo que parte do  $\text{CO}_2$  é utilizada ou permanece dissolvida no meio reacional.

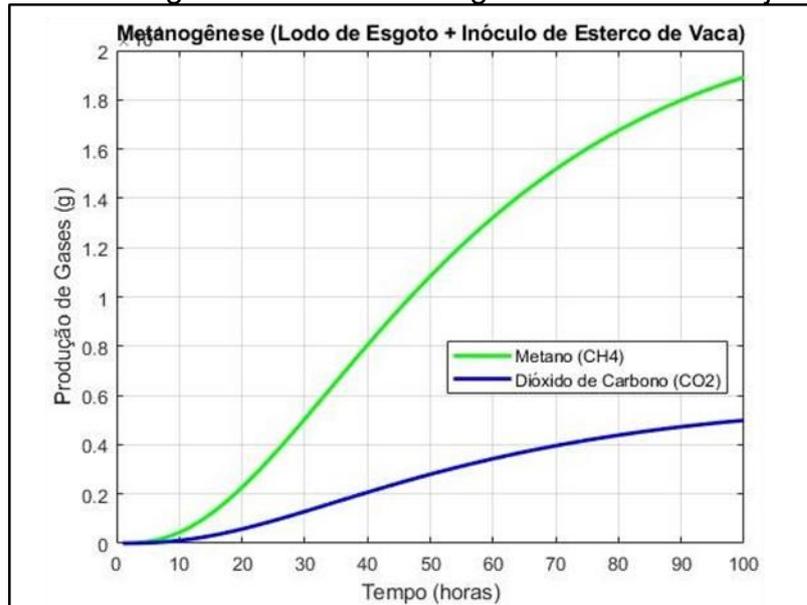


A produção de hidrogênio é a menor dentre os três compostos representados, atingindo um pico em torno de 100 gramas, também por volta das 50 horas.

Assim como o  $\text{CO}_2$ , a produção de  $\text{H}_2$  diminui após o pico, o que indica que o hidrogênio é um intermediário importante, mas rapidamente consumido ou transformado em outros produtos, como o metano, durante a metanogênese.

A figura 4.9 ilustra a produção de metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) ao longo de 100 horas durante a fase de metanogênese no processo de digestão anaeróbica, utilizando uma mistura de lodo de esgoto e inóculo de esterco de vaca.

Figura 4.9 – Metanogênese – Lodo de Esgoto com Inóculo Dejeito de Vaca.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Observa-se que, a metanogênese é a etapa final do processo de digestão anaeróbica, o qual compostos intermediários, como o acetato e o hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), são convertidos em metano e  $\text{CO}_2$ , os principais componentes do biogás. O gráfico mostra que durante a fase de metanogênese, a produção de metano é dominante em comparação com o dióxido de carbono, o que é esperado, já que o objetivo da digestão anaeróbica é maximizar a produção de metano, que é o componente principal do biogás. A contínua produção de metano ao longo do tempo indica que os substratos produzidos nas etapas anteriores, como o acetato e o hidrogênio, estão sendo eficientemente convertidos em metano.

A produção de  $\text{CO}_2$ , embora menos expressiva, ainda é significativa e segue uma tendência de crescimento ao longo do tempo. Isso pode refletir o fato de que o  $\text{CO}_2$  é tanto um subproduto direto da metanogênese quanto um produto de outras reações paralelas que ocorrem durante o processo.

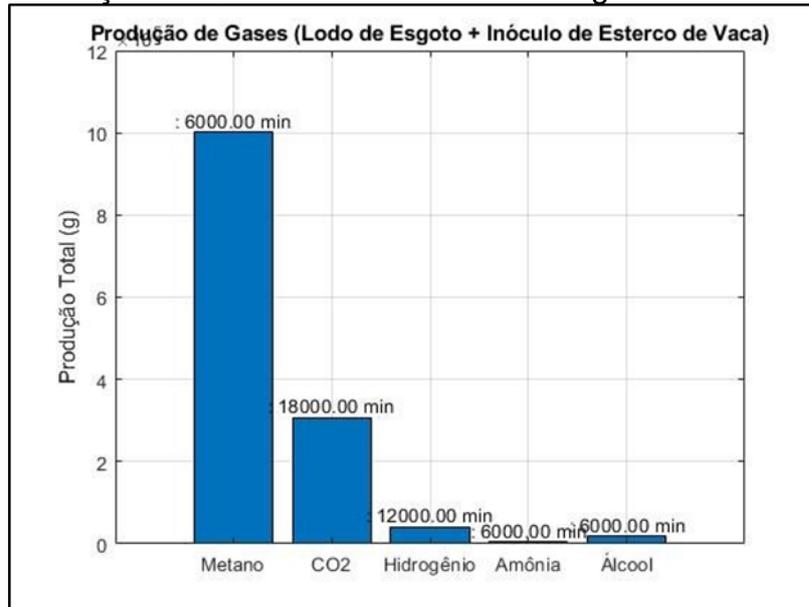
A produção de metano começa de forma lenta nas primeiras horas da simulação, mas acelera rapidamente após cerca de 10 horas, mostrando um crescimento contínuo e significativo ao longo do tempo. Ao final de 100 horas, a produção de metano atinge aproximadamente 1,8 gramas. Este aumento constante indica uma conversão eficiente dos substratos intermediários, como o acetato, em metano durante o processo de metanogênese.

A curva ascendente reflete a principal característica da metanogênese, que é a produção sustentada de metano, uma vez que os intermediários da acetogênese se tornam disponíveis. A produção de  $\text{CO}_2$  também aumenta ao longo do tempo, mas em



uma escala menor em comparação ao metano. A quantidade de CO<sub>2</sub> produzida ao final das 100 horas é de aproximadamente 0,5 gramas. A curva do CO<sub>2</sub> é mais suave e menos íngreme, o que sugere que, embora o CO<sub>2</sub> seja um subproduto importante, ele é gerado em menor quantidade ou pode estar parcialmente sendo utilizado em outras reações dentro do sistema. A figura 4.10 mostra o resultado gráfico da produção total de diferentes gases ao longo do processo de digestão anaeróbica de uma mistura de lodo de esgoto com inóculo de esterco de vaca.

Figura 4.10 – Produção de Gases Totais – Lodo de Esgoto com Inóculo Dejetos de Vaca



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

No gráfico de barras, cada barra representa a quantidade total de gás produzido, medida em gramas (g), ao final do processo, e também indica o tempo efetivo de produção de cada gás em minutos.

O gráfico mostra que o metano é o principal produto da digestão anaeróbica, o que é esperado, dado que o objetivo final do processo é a produção de biogás, do qual o metano é o principal componente. O dióxido de carbono, embora produzido em menor quantidade, também é um subproduto significativo, enquanto os outros gases (hidrogênio, amônia e álcool) são gerados em quantidades muito menores.

A informação sobre o tempo efetivo de produção de cada gás fornece informações sobre as fases do processo em que esses gases são predominantemente gerados.

#### 4.4 METANO

O metano é o gás produzido em maior quantidade, com um total de aproximadamente 10 gramas. O tempo efetivo de produção de metano é de 6000 minutos. Essa alta produção reflete o fato de que o metano é o principal produto final da digestão anaeróbica, especialmente durante a fase de metanogênese, onde o acetato e o hidrogênio são convertidos em metano.

O dióxido de carbono é o segundo gás mais produzido, com um total de aproximadamente 4 gramas. O tempo efetivo de produção de CO<sub>2</sub> é de 18.000 minutos, indicando que o CO<sub>2</sub> foi gerado de forma contínua ao longo de todo o





processo, tanto nas fases iniciais, como a acidogênese e acetogênese, quanto na metanogênese.

A produção de hidrogênio é bastante menor em comparação ao metano e ao  $\text{CO}_2$ , totalizando cerca de 1 grama. O tempo efetivo de produção de hidrogênio é de 12.000 minutos, o que sugere que, embora tenha sido produzido ao longo de um período considerável, ele foi gerado em quantidades relativamente pequenas, e é rapidamente convertido em outros compostos, como o metano, na metanogênese.

A amônia é produzida em uma quantidade ainda menor, atingindo um total de 0,5 gramas. O tempo efetivo de produção de amônia é de 6000 minutos, indicando que ela é gerada em fases específicas do processo, possivelmente durante a acidogênese. A produção de álcool é muito baixa, também em torno de 0,5 gramas.

O tempo efetivo de produção de álcool é de 6000 minutos, semelhante ao da amônia, sugerindo que o álcool é um produto intermediário que é rapidamente convertido em outras substâncias nas etapas seguintes do processo.

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste estudo foram demonstrados a eficiência e as dinâmicas do processo de digestão anaeróbica do lodo de esgoto, tanto isoladamente quanto em combinação com o inóculo de esterco de vaca, com foco na produção de biogás. No processo de desenvolvimento foram simulados detalhadamente as etapas de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, fases importantes para a conversão de biomassa em metano e dióxido de carbono, os principais componentes do biogás.

Na fase de digestão anaeróbica do lodo de esgoto, que examinou sem adição de inóculo, observou-se que a produção de biogás seguiu os padrões esperados, com a acidogênese e a acetogênese gerando quantidades significativas de compostos intermediários, como álcool,  $\text{CO}_2$ , acetato e hidrogênio. O metano, o produto final desejado, foi predominantemente gerado durante a metanogênese. O pico de produção de metano, alcançado por volta de 60 horas, confirmou que a conversão de acetato e hidrogênio foi eficiente, refletindo a efetividade do lodo de esgoto como substrato para produção de biogás. No entanto, os outros gases, como  $\text{CO}_2$  e hidrogênio, foram gerados em menor quantidade, indicando a possível necessidade de otimizações para maximizar a conversão destes em metano.

A fase de co-digestão de lodo de esgoto com esterco de vaca introduziu o inóculo de esterco de vaca, e os resultados mostraram uma melhora na produção de biogás. A presença do inóculo aumentou a produção de álcool e  $\text{CO}_2$  durante a acidogênese, e, mais significativamente, o acetato produzido na acetogênese foi superior ao da Fase I. Esta maior disponibilidade de acetato resultou em uma produção de metano mais eficiente e rápida, sugerindo que o esterco de vaca atua como um catalisador no processo, promovendo uma maior conversão de intermediários em metano. O  $\text{CO}_2$  continuou a ser gerado de forma mais extensa, o que indica que o processo de co-digestão, apesar de melhorar a produção de metano, também aumenta a produção de  $\text{CO}_2$ , que pode exigir controle ou aproveitamento adicional.

Em ambas as fases, a produção de hidrogênio e amônia foi limitada, confirmando seu papel como intermediários transitórios, rapidamente convertidos ou consumidos nas etapas subsequentes. A análise dos tempos efetivos de produção de cada gás oferece uma compreensão detalhada das etapas em que ocorrem as maiores produções, permitindo ajustes específicos para melhorar a eficiência do processo como um todo.



A comparação dos resultados obtidos nas Fases I e II, conforme representados nos gráficos, revela importantes diferenças na dinâmica de produção de biogás quando o lodo de esgoto é utilizado isoladamente (Fase I) e em co-digestão com o inóculo de esterco de vaca (Fase II).

### 5.1 ACIDOGÊNESE

Na fase de acidogênese, o gráfico da Fase I mostrou uma produção moderada de álcool, CO<sub>2</sub>, hidrogênio e amônia, com picos de produção relativamente baixos e uma redução gradual ao longo do tempo. Em contraste, na Fase II, onde o inóculo de esterco de vaca foi adicionado, observou-se um aumento significativo na produção de álcool e CO<sub>2</sub>. O álcool, em particular, atingiu picos mais elevados, indicando que o esterco de vaca contribui para uma maior formação de precursores voláteis, que são essenciais para as etapas subsequentes. Esse incremento sugere que o inóculo de esterco de vaca promove uma acidogênese mais eficiente, gerando maiores quantidades de intermediários.

### 5.2 ACETOGÊNESE

Durante a acetogênese, os gráficos da Fase I indicaram uma produção notável de acetato, mas com quantidades mais modestas de CO<sub>2</sub> e hidrogênio. Comparativamente, na Fase II, houve um aumento expressivo na produção de acetato, que atingiu um pico muito mais alto do que na Fase I. Este aumento é indicativo de que o inóculo de esterco de vaca não apenas melhora a produção de intermediários na acidogênese, mas também facilita a conversão desses intermediários em acetato durante a acetogênese. O maior pico de produção de acetato na Fase II é crucial, pois este composto é um precursor direto do metano na metanogênese. O aumento simultâneo de CO<sub>2</sub> na Fase II também sugere uma maior atividade microbiana global, resultante da co-digestão.

### 5.3 METANOGÊNESE

A fase de metanogênese apresentou a maior diferença entre as duas fases experimentais. Na Fase I, a produção de metano foi significativa, mas a taxa de produção foi mais lenta e o pico de metano atingido foi inferior ao observado na Fase II. Com a adição do inóculo de esterco de vaca na Fase II, houve uma aceleração da produção de metano, com o gás atingindo picos mais altos e em um menor intervalo de tempo. Este resultado confirma a hipótese de que a co-digestão melhora a eficiência da metanogênese, possivelmente devido à maior disponibilidade de acetato e à maior diversidade microbiana introduzida pelo esterco de vaca. O dióxido de carbono, embora também mais elevado na Fase II, continuou a ser produzido em menor quantidade que o metano, mantendo-se como um subproduto secundário.

### 5.4 PRODUÇÃO TOTAL DE GASES

Quando analisamos a produção total de gases ao final de cada fase, os gráficos revelam que a Fase II não apenas gerou mais metano do que a Fase I, mas também apresentou uma produção mais equilibrada de CO<sub>2</sub>, hidrogênio, amônia e álcool. Enquanto o metano foi o principal gás produzido em ambas as fases, a co-digestão





na Fase II levou a uma maior produção geral de gases, indicando que o processo foi mais completo e eficiente. A maior produção de CO<sub>2</sub> e hidrogênio na Fase II sugere que o inóculo contribuiu para uma digestão mais robusta e sustentada ao longo do tempo.

Os resultados comparativos entre as Fases I e II mostram que a adição de esterco de vaca como inóculo na co-digestão com lodo de esgoto melhora significativamente a eficiência do processo de digestão anaeróbica. A maior produção de intermediários como álcool e acetato, bem como a aceleração da metanogênese na Fase II, indicam que o inóculo de esterco de vaca não apenas fornece nutrientes adicionais, mas também introduz uma microbiota diversificada que potencializa a conversão de matéria orgânica em biogás. No entanto, o aumento na produção de CO<sub>2</sub> na Fase II destaca a necessidade de estratégias adicionais para capturar e utilizar eficientemente este subproduto. Em suma, a co-digestão se mostra como uma abordagem promissora para otimizar a produção de biogás a partir de resíduos orgânicos.

## CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi atingido ao demonstrar, por meio de simulações computacionais, que a adição de inóculo de esterco de vaca ao lodo de esgoto melhora significativamente a eficiência do processo de digestão anaeróbica, resultando em uma maior produção de biogás, especialmente de metano. A co-digestão, conforme modelada nas Fases I e II, revelou que o inóculo de esterco de vaca não apenas promove uma maior formação de intermediários essenciais, como acetato e álcool, mas também acelera a metanogênese, levando a uma conversão mais rápida e eficiente de substratos em metano.

Do ponto de vista industrial, a implementação de co-digestão com inóculo de esterco de vaca pode representar um avanço significativo na produção de biogás, oferecendo uma solução viável para aumentar o rendimento energético em plantas de tratamento de resíduos. Além disso, a maior eficiência do processo pode contribuir para uma gestão mais eficaz dos resíduos orgânicos, reduzindo a emissão de gases de efeito estufa, como o CO<sub>2</sub>. Cientificamente, o estudo oferece novas perspectivas sobre a otimização da digestão anaeróbica, destacando a importância de explorar diferentes combinações de substratos para maximizar a produção de biogás.

As simulações realizadas também reforçam a utilidade de ferramentas computacionais, como o GNU Octave, na modelagem de processos complexos, permitindo previsões precisas que podem ser aplicadas em escalas industriais. Assim, este trabalho não só atinge seus objetivos, como também fornece uma base sólida para futuras pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos no campo da bioenergia e tratamento de resíduo.

## REFERÊNCIAS

ANGELIDAKI, I.; ELLEGAARD, L.; AHRING, B. K. **Applications of the Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1)**. *Water Science & Technology*, v. 45, n. 10, p. 65-73, 2003.

APPELS, L.; BAEYENS, J.; DEGRÈVE, J.; DEWIL, R. **Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge**. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 34, n. 6, p. 755-781, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>.





BATSTONE, D. J.; KELLER, J.; ANGELIDAKI, I. et al. **The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1)**. Water Science & Technology, v. 45, n. 10, p. 65-73, 2002.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

DEMING, W. E. *Out of the Crisis*. Cambridge: MIT Press, 1986.

ELSAIED, M.; ANDRES, Y.; BLEL, W. **Anaerobic co-digestion of linen, sugar beet pulp, and wheat straw with cow manure: effects of mixing ratio and transient change of co-substrate**. Biomass Conversion and Biorefinery, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02229-8>.

FALCONI, V. A. **TQC: Controle da Qualidade Total no estilo japonês**. 10. ed. Nova Lima: Falconi Editora, 2009.

FARIAS, L. M. S.; MELO, J. M. A.; CARVALHO, D. O. de; COSTA, R. A. **Uso de Brainstorming como ferramenta de gestão na resolução de problemas organizacionais**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, São Paulo, vol. 08, n. 01, p. 174–191, jan. 2021. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/administracao/brainstorming>. Acesso em: 07 jun. 2025.

GERARDI, M. H. **The Microbiology of Anaerobic Digesters**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.

GODOY, J. C. F. **As ferramentas da qualidade como suporte à melhoria contínua na construção civil: estudo de caso em uma empresa construtora de médio porte**. 2009. 152 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.

HAGOS, K.; ZONG, J.; LI, D.; LIU, C.; LU, X. **Anaerobic co-digestion process for biogas production: progress, challenges and perspectives**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 76, p. 1485-1496, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184>.

JURAN, J. M. **Juran on Quality by Design: The New Steps for Planning Quality into Goods and Services**. New York: Free Press, 1991.

KOCH, R. **O Princípio de Pareto: o segredo de realizar mais com menos**. Rio de Janeiro: Best Seller, 2015.

LI, Y.; PARK, S. Y.; ZHU, J. **Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, n. 1, p. 821-826, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.042>.

LINS, M. R. G. **Ferramentas da qualidade: conceitos e aplicações**. In: VERGUEIRO, W. (Org.). *Gestão da qualidade: fundamentos e aplicações*. São Paulo: Atlas, 2002. p. 43-70.

LUCINDA, F. A. **As ferramentas da qualidade e sua aplicação nas micro e pequenas empresas: estudo de caso em uma marcenaria na cidade de São Mateus**. 2010. 78 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2010.

MACHADO, D. I. L. **Gestão da qualidade total com foco em ferramentas da qualidade: estudo de caso em uma empresa de confecção**. 2012. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Administração) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2012.





MATA-ALVAREZ, J.; DOSTA, J.; MACÉ, S.; 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.

NOVASKI, O.; MARÇAL, E. R.; SILVA, C. A.; LIMA, T. L.; DANTAS, D. M. **Aplicação de matriz GUT e gráfico de Pareto para priorização de perdas no processo produtivo de uma panificadora**. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 6, n. 9, p. 42201–42217, set. 2020. DOI: 10.34117/bjdvn9-006. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/16974>. Acesso em: 07 jun. 2025.

OSBORN, A. F. **Applied Imagination: Principles and Procedures of Creative Thinking**. New York: Scribner, 1953.

SANTOS, E. S.; MELO, J. S. de; PONTES, J. F. S. **Aplicação do Diagrama de Pareto na identificação de falhas no processo de produção de blocos cerâmicos**. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 89–104, jan. 2019. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharias/diagrama-de-pareto>. Acesso em: 07 jun. 2025.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Operations Management**. 6th ed. Harlow: Pearson Education, 2010.

SOUZA, Roger Maliski de; FRANCISCO, Antonio Carlos de; BRAGA, Ana Carolina; COELHO, Adriane Marie Salm. **Resolução do alto nível de ruídos na área de abate e manufatura de animais: aplicação do diagrama de Ishikawa para a melhoria do ambiente de trabalho**. 2014. Disponível em: <https://www.revistaespacios.com/a14v35n12/14351221.html>. Acesso em: 7 jun. 2025.

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2003.

TELES, J. R. **Ferramentas da Qualidade: Aplicações Práticas**. São Paulo: Atlas, 2019.

YIN, Robert K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

