



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

ISABELLA GONÇALVES DE CAMARGO

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A
PARTIR DE MATERIAL ORGÂNICO BOVINO E AVÍCOLA POR
DIGESTÃO ANAERÓBICA**

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

ISABELLA GONÇALVES DE CAMARGO

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A
PARTIR DE MATERIAL ORGÂNICO BOVINO E AVÍCOLA POR
DIGESTÃO ANAERÓBICA**

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 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 1eec832b2777ea1c07603cdb95ea47ff76060c70d21708ea7f33020e7b80655e
<https://valida.ae/f4b1cea16403e939cb51df1483909482403364ec6e44533cc>

Camargo, Isabella Gonçalves de

C172s Simulação Computacional da Produção de Biogás a partir de Material Orgânico Bovino e Avícola por Digestão Anaeróbica / Isabella Gonçalves de Camargo. — Lins, 2025.

24f.

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. Biogás. 2. Digestão Anaeróbica. 3. Simulação Numérica. 4. Substrato Bovino. 5. Biomassa Avícola. 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).





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

ISABELLA GONÇALVES DE CAMARGO

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE MATERIAL ORGÂNICO BOVINO E
AVÍCOLA POR DIGESTÃO ANAERÓBICA**

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 Profº Dr.
Roberto Outa.

Data de aprovação: 25/06/2025

Prof. Dr. Roberto Outa

Prof.^a. Dra. Ana Maria Taddei Cardoso de Barros

Prof.^a. Me. Allysya Carolina Barbosa Marques Gedo





SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	5
1 INTRODUÇÃO	5
2 GESTÃO QUALIDADE E A PRODUÇÃO DE BIOGÁS	6
2.1 HISTÓRIA DO BIOGÁS	7
2.2 PRODUÇÃO DO BIOGÁS.....	7
2.3 DIGESTÃO ANAERÓBICA.....	8
2.3.1 Formação do biogás hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.....	8
2.4 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS COMO SUBSTRATOS.....	10
2.4.1 Inóculo	10
2.4.2 Resíduo Orgânico Bovino	11
2.4.3 Resíduo Orgânico Avícola	12
2.5 CONDIÇÕES OPERACIONAIS	12
2.5.1 Concentração de Nutrientes	12
2.5.2 Condições de pH	13
2.5.3 Temperatura.....	14
3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	15
3.1 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS EM PROCESSOS BIOQUÍMICOS	16
3.2 MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS	16
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	17
5 DISCUSSÃO GERAL	20
6 CONCLUSÃO	21
REFERÊNCIAS	23





SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE MATERIAL ORGÂNICO BOVINO E AVÍCOLA POR DIGESTÃO ANAERÓBICA

Isabella Gonçalves de Camargo¹
Prof. 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 desenvolveu o conceito de aplicação em simulação numérica para modelar o processo de produção de biogás a partir de uma mistura de substrato orgânico bovino e inóculo avícola, utilizando a digestão anaeróbica. A simulação foi conduzida ao longo de 100 horas, cobrindo as quatro principais etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Os resultados mostram a eficiência do processo, permitindo ajustes nos parâmetros para maximizar a produção de biogás. A metodologia utilizada oferece aplicações significativas para a indústria e para a ciência, contribuindo para a otimização e melhoria dos modelos de digestão anaeróbica.

Palavras-chave: Biogás. Digestão Anaeróbica. Simulação Numérica. Substrato Bovino. Biomassa Avícola.

ABSTRACT

This work developed the concept of applying numerical simulation to model the biogas production process from a mixture of cattle organic substrate and poultry inoculum, using anaerobic digestion. The simulation was conducted over 100 hours, covering the four main stages: hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis and methanogenesis. The detailed analysis of each stage revealed the importance of the acidogenesis and acetogenesis stages in the formation of the intermediates necessary for methanogenesis, where the greatest methane production occurs. The methodology adopted offers significant applications both for industry, optimizing processes and reducing costs, and for science, contributing with data to improve anaerobic digestion models and develop more efficient technologies.

Keywords: Biogas. Anaerobic Digestion. Numerical Simulation. Bovine Substrate. Poultry Biomass.

1 INTRODUÇÃO

Ao analisar o cenário atual o biogás é uma bioenergia que está crescendo consideravelmente desde a última década e está levando ao aumento de produção energética em níveis significativos (Coelho *et al.* 2018). A indústria de energia





brasileira é um dos mais diversificados do planeta, com 48,4% da energia de origem renovável (GEF Biogás Brasil, 2022).

A justificativa deste projeto parte da consideração de todas as etapas de formação do biogás por meio de seu processo bioquímico da respiração anaeróbica e de seus microrganismos, além da criação de uma modelagem computacional com software Octave que tem a capacidade de fazer simulações e cálculos matriciais.

Devido ao fato de que a simulação tem o intuito de compreender a evolução do biogás e desenvolver uma otimização das etapas assim fomentando a quantidade de gás e as situações ideais para o processo.

Ademais, a queima do biogás não libera o dióxido de carbono de volta para a atmosfera, mas sim aproveita seu potencial energético e desta forma não impacta negativamente as mudanças climáticas comentam Karlsson *et al.* (2014).

Além disso, ressalta-se as vantagens da produção do biogás, sendo a principal delas redução de materiais orgânicos que são lançados no meio-ambiente, e também ajuda no controle da emissão de gases poluentes como o dióxido de carbono e o metano na natureza (Araújo, 2017).

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e aplicar uma simulação numérica para modelar o processo de produção de biogás a partir de uma mistura de material orgânico bovino e do inóculo de substrato avícola utilizando a digestão anaeróbica. A meta principal foi compreender como cada uma das etapas do processo — hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese — contribui para a produção de metano, otimizando, assim, a eficiência do processo e fornecendo dados relevantes para futuras aplicações industriais e pesquisas científicas.

2 GESTÃO QUALIDADE E A PRODUÇÃO DE BIOGÁS

O conceito da qualidade na literatura em geral pode ser descrito como a satisfação dos clientes, onde atingem tanto os clientes internos que são os colaboradores quanto os externos que são o público-alvo de uma instituição, argumenta Machado (2012). O referido autor ainda explica que a qualidade varia de acordo com a percepção de cada indivíduo em relação a um produto ou serviço, conforme suas necessidades ou desejos momentâneos

A gestão da qualidade tem um papel significativo para a melhoria contínua, planejamento e na utilização de dados na tomada de decisões e na análise de processos (Machado, 2012). Kunz *et al.* (2019) comentam que essa concepção se aplica aos setores industriais e na produção de biogás onde se visa maximizar a eficiência tanto a qualidade do gás e subprodutos gerados.

O biogás é uma substância constituída por uma mescla de gás metano e dióxido de carbono em sua maioria. Sua produção parte de materiais orgânicos e de diferentes grupos de bactérias, que realizam um processo bioquímico onde determinados fatores como pH, temperatura e substrato afetam a produção do gás obtido (Karlsson *et al.*, 2014).

Por sua vez, o biogás é uma excelente fonte alternativa para os meios energéticos em comparação aos combustíveis fósseis que são finitos na natureza, visto que a produção de biogás se utiliza de diversos tipos de resíduos orgânicos que são produzidos diariamente pela demanda populacional e do crescente consumismo humano na atualidade (Araújo, 2017).

Portanto, a gestão da qualidade ajuda na mensuração dos procedimentos e técnicas utilizadas na produção do biogás, onde impulsiona a sustentabilidade, eficiência e inovação na competitividade dentro da indústria de energias renováveis.





Ademais, a implantação destes princípios garante um procedimento otimizado e mais ecológico para o meio-ambiente.

2.1 HISTÓRIA DO BIOGÁS

O biogás é uma substância que sempre existiu em ambientes anóxicos ao redor do mundo, como pântanos e corpos de água em geral. No entanto, a descoberta e o interesse humano pelo biogás só ocorreram no final do século XIX e no início do século XX (Karlsson *et al.*, 2014).

Karlsson *et al.* (2014) ainda comenta que os países como China e Índia foram as pioneiras no uso e produção do biogás, porém, na atualidade, sua fabricação ganhou fama devido à crise do petróleo que ocorreu na década 70 fazendo o preço da energia disparasse, aparecendo assim uma maior necessidade de suprir o uso de materiais fósseis de alto custo por uma variante mais sustentável e de fácil produção.

Todavia, Bley JR (2015) ressalta que nos anos 1990 houve uma certa resistência global sobre a produção do biogás devido que seu principal componente que é o gás metano, que é muitas vezes mais poluente que o gás carbono e sendo ele um dos principais problemas relacionados ao efeito estufa. Apesar disso, em 1997 ocorreu o Protocolo de Kyoto que trouxe códigos mais aceito para o uso do biogás na época atual.

2.2 PRODUÇÃO DO BIOGÁS

A composição do biogás pode ser descrita como a junção principal de gás metano (CH_4), gás carbônico (CO_2), e em menores concentrações sulfídricas (H_2S) e amônia (NH_3), traços de hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), monóxido de carbono (CO), carboidratos e oxigênio (O_2), de acordo com Araújo (2017).

A concentração do biogás depende diretamente do material utilizado em sua produção, do tipo de biodigestor empregado e do processo ao qual essas substâncias são submetidas. Ademais, existem etapas que antecedem o produto final, sendo elas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Coelho, 2018).

O biogás é produzido a partir da digestão anaeróbica, em um ambiente com ausência de oxigênio, onde, sob um descanso hidráulico e condições necessárias de pH, temperatura e agitação, criam-se colônias de microrganismos saudáveis para sua proliferação que irão se alimentar do material orgânico e, assim, degradar a biomassa presente no biodigestor (Bley JR 2015).

Karlsson *et al.* (2014) explicam que, quanto melhor é o processo de digestão anaeróbio, melhor será a qualidade do biogás produzido naquele momento. Karlsson *et al.* (2014) ainda comenta que somente após a purificação do biogás ele poderá ser transformado em energia e em outras formas de combustíveis. Inclusive, a produção do biogás em climas mais rigorosos como no continente europeu, necessita-se de um processo que supere as condições climáticas destes locais e devido a situação e deslocação acarreta um acréscimo no custo da produção. Já nos ambientes tropicais como no Brasil, se têm as circunstâncias de clima favoráveis para a formação do biogás (Bley JR, 2015).

Vale salientar, que o Metano é vinte e uma vezes mais poluente que o Dióxido de Carbono e que, quando direcionado para a atmosfera, dependendo da sua quantidade, o metano pode causar grandes impactos ambientais. Dado a essas circunstâncias, fazer o seu aproveitamento energético é indispensável (Coelho, 2018).

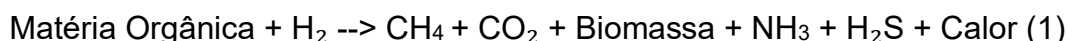




Portanto, segundo Araújo (2017), o biogás é um gás combustível renovável que possui uma queima mais limpa que as demais, tendo um potencial calórico que alterna entre 5000 e 7000 Kcal/m³, o que o torna uma viável opção alternativa em relação aos outros métodos energéticos não renováveis.

2.3 DIGESTÃO ANAERÓBICA

Ao impulsionar a decomposição controlada da matéria orgânica em ambientes sem oxigênio, a fermentação anaeróbica libera metano e dióxido de carbono, originando o biogás, que pode ser aproveitado na produção de eletricidade e calor (COELHO, 2018). Araújo (2017, p.09) explica que a fórmula para a levedação anaeróbica pode ser expressa da seguinte maneira:



O processo de fermentação anaeróbica ocorre geralmente em lugares controláveis como em tanques próprios para essas ocorrências e em lagoas anaeróbicas, todavia, também pode ser encontrada na natureza como em pântanos e solos profundos (Karlsson *et al.*, 2014).

Adicionalmente, o biofertilizante é gerado como subproduto desse processo e pode ser utilizado para enriquecer o solo com nutrientes essenciais, contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis (Bley JR, 2015).

Araújo (2017) comenta que os microrganismos da digestão anaeróbica são os hidrolíticos, acidogênicos, acetogênicos e metanogênicos; que provêm de grupos que sofrem influências do meio que ficam sujeitos. Além disso, Bley JR (2015) argumenta que a biodigestão anaeróbica necessita de um tempo em condições específicas para que ocorra a proliferação das bactérias e assim chegar ao resultado desejado do biogás.

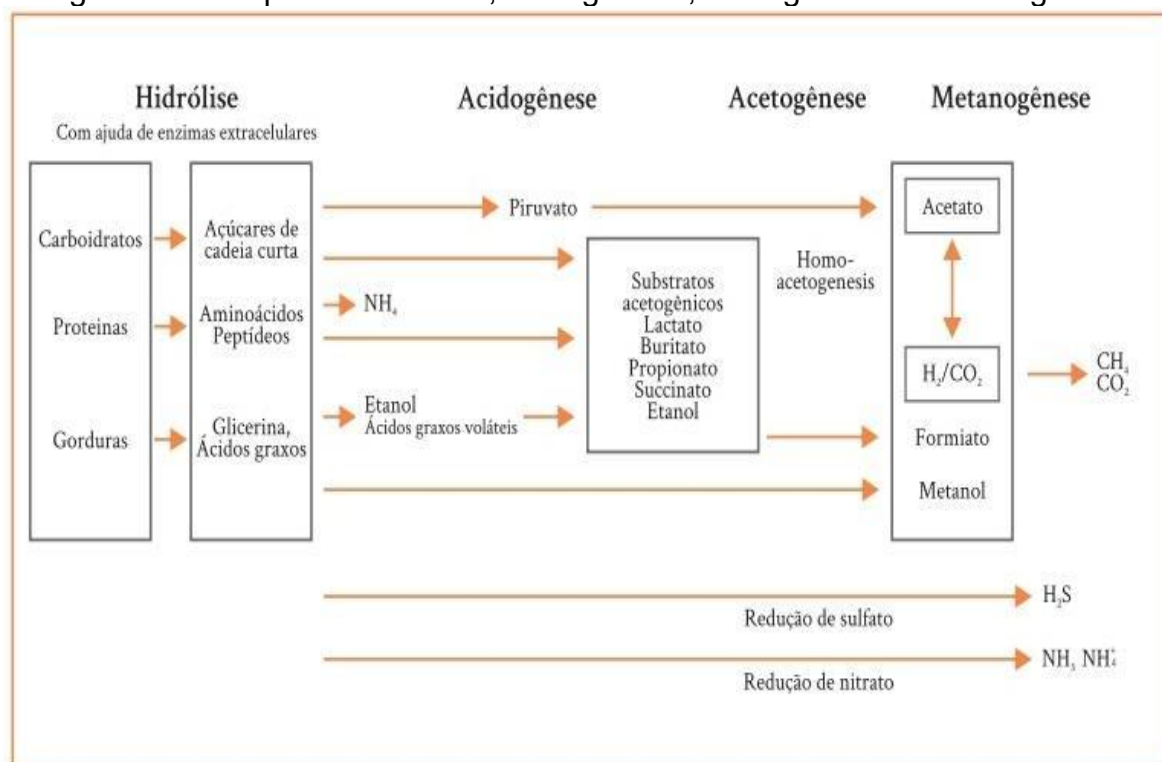
2.3.1 Formação do biogás hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese

O biogás consiste predominantemente em metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), acompanhados por uma pequena variedade de outros elementos, resultantes do processo de digestão anaeróbica (Bley JR, 2015). Este método ocorre sem a presença de oxigênio, culminando na formação do produto final e subprodutos resultantes que se caracterizam pela sua composição não refinada momentaneamente para seu uso imediato (Bley JR, 2015).





Figura 2.1 - Etapas de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

Fonte : Kunz *et al.* (2019, p.14).

A primeira fase para a formação do biogás é conhecida como Hidrólise que consiste em quebrar as moléculas da biomassa depositada no biodigestor (Araújo, 2017). Coelho *et al.* (2018) explica que a hidrólise degrada as substâncias como as proteínas, polissacarídeos e os lipídios em outras formas mais descomplicadas como os aminoácidos e os açúcares.

Vale ressaltar, que a etapa da hidrólise é categorizada pela sua velocidade de decomposição da matéria orgânica, sendo que, o ponto de limitação da fermentação anaeróbica e seu intervalo de duração depende exclusivamente do substrato usado para a criação do biogás, como por exemplo lipídios podem levar horas e os lignocelulose e lignina podem nem ser totalmente finalizados e acabarem o processo de maneira ambígua (Kunz *et al.*, 2019).

O próximo ciclo é a Acidogênese, que se utiliza de bactérias anaeróbias e facultativas acidogênicas que geram compostos que são degradados em ácidos graxos de cadeias menores, que fazem até cinco ligações com o dióxido de carbono (CO_2) como os ácidos butírico, e propiônico e também em secundários compostos os de ácido láctico e os álcoois (Coelho *et al.* 2018). Ademais, a instituição Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2010) comenta que os elementos consistem na dependência do hidrogênio intermediário neste momento do processo.

O passo seguinte é a Acetogênese, que se equivale ao período em que as bactérias acetogênicas quebram as moléculas que já haviam sido rompidas nos dois estágios anteriores em partes ainda menores, através da oxidação anaeróbica transformando os componentes em hidrogênio, dióxido de carbono e ácido acético. Todavia, Karlsson *et al.* (2014) apontam que esse tipo de microrganismos não consegue sobreviver se estiverem em um ambiente com muito hidrogênio.

Pode-se ressaltar também que, caso tenha um elevado nível de hidrogênio, é capaz de suceder que ao decorrer da Acidogênese não conseguirá se transformar em Acetogênese (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010). As bactérias





acetogênicas são endotérmicas e também fazem uma relação de simbiose com as bactérias metanogênicas e as homoacetogênicas, explica Kunz *et al.* (2019).

O último estado é conhecido como Metanogênese, que transforma os resultados dos predecessores em metano e as arqueas metanogênicas podem ser divididas em duas variáveis, sendo o metanógenos hidrogenotróficos, que geram metano por meio de hidrogênio e dióxido de carbono, e os microorganismos metanógenos acetoclásticos que criam pelo mingramento do ácido acético na composição, comenta a agência Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2010).

Dado ao fato de que as reações da Metanogênese são exotérmicas, Kunz *et al.* (2019) cita que as arqueas acetoclásticas são mais suscetíveis às alterações do pH e ao acúmulo da amônia, então biomassas como por exemplo o lodo sanitário possui alto teor destas substâncias, e isso acarreta uma maior concentração de bactérias metanogênicas hidrogenotróficas.

2.4 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS COMO SUBSTRATOS

É de fundamental relevância que o substrato utilizado no processo do biogás afeta a qualidade e a eficiência da evolução do método. Sendo assim, a composição de cada material utilizado é diretamente associada à quantidade de compostos nutritivos e impurezas prováveis da biomassa (Karlsson *et al.* 2014).

No entanto, para que a biomassa se torne o substrato perfeito para a fabricação do biogás existem inúmeros cuidados que devem ser levados em consideração como o pH, temperatura, a ausência ou presença do oxigênio, umidade, tipo de biodigestor, entre outros fatores (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010).

Vale salientar, que a quantidade de biogás que será produzido depende fortemente do tipo de material orgânico que está sendo utilizado e a quantidade de carbono e nitrogênio que apresenta dentro de cada categoria de resíduo (Kunz *et al.* 2019).

A organização GEF Biogás Brasil (2022) cita que as principais biomassas derivam de produções agropecuárias tais como de animais bovinos tanto de corte como os de leite, suínos e aves de abate e de poedeiras, além de processos agroindustriais que também podem ser utilizados como restolhos florestais e agrícolas, lodo de Estações de Tratamento de Esgoto de substâncias tanto líquidas como sólidas.

Ademais, o inóculo é uma substância adicionada para reanimar a processo de digestão anaeróbica, comenta Araújo (2017). Todavia, quanto maior for o acréscimo do inóculo no procedimento, mais rápido as fases de início serão realizadas (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010).

Portanto, o substrato ideal está fortemente atrelado aos elementos de sua composição e necessidade de produção e reanimação do processo (Karlsson *et al.*, 2014). Em vista disso, a utilização do resíduo correto consegue alcançar melhores níveis de produção de biogás.

2.4.1 Inóculo

A instituição Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2010) cita que quanto maior for a dosagem utilizada do inóculo mais rápido será o processo das fases iniciais da degradação anaeróbica, ademais que o biodigestor deve ser preenchido completamente de maneira rápida devido a possível formação de gases explosivos. Além disso, existem diversos métodos para avaliar a qualidade da





biomassa com o inóculo, são realizados pequenos experimentos com amostras sob procedimentos controlados, feitos em laboratórios que podem testar desde a qualidade bioquímica do metano até a velocidade de decomposição dos substratos (Kunz *et al.* 2019).

Quando se inicia o processo de geração do biogás existem inúmeros fatores que devem ser levados em conta, mas, principalmente se irão misturar ao material orgânico ao inóculo já que ele tende a acelerar as etapas, todavia os microrganismos no inóculo devem se mostrar resistentes ao novo ambiente para que possam se desenvolver corretamente, explicam Karlsson *et al.* (2014).

Também deve ser ressaltado que, quando a substância do inóculo é parecida com o material orgânico já presente no biodigestor, o agregamento da nova substância juntamente ao atual material acelera a biodigestão pela compatibilidade entre as partes (Araújo, 2017).

O principal contratempo da fermentação anaeróbica é quando a mistura dentro do biodigestor começa a se tornar ácida demais para o processo, tendo um descontrole da queda do pH. Assim, existe a necessidade de se utilizar um inóculo que haja em contrapartida a esse efeito (Araújo, 2017). Ainda, pode-se medir o percentual da introdução do inóculo, considerando os fatores dos sólidos totais do inóculo e sólidos totais do substrato (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010).

Portanto, necessita-se acentuar que, quando não se tem inóculo suficiente, é de conhecimento comum da área que se deve misturá-lo com água para manter o gasômetro em níveis menores, e que a mistura dos dois tem uma menor aptidão para o tamponamento de acordo com o volume da solução (Karlsson *et al.*, 2014).

2.4.2 Resíduo Orgânico Bovino

Ao analisar o cenário da bovinocultura repara-se que está muito atrelada a economia do país, visando que o Brasil é o maior exportador de carne bovina do mundo. O material orgânico deste setor provém de criações animais de corte e leiteiro (Mattos, 2016). Além disso, Resende *et al.* (2015) comentam que a biodigestão anaeróbica de material bovino é um sistema sustentável e altamente eficiente para a reciclagem destes recursos.

Os resíduos orgânicos bovinos apresentam notórias características de aceleração de proliferação das bactérias metanogênicas do final do processo da digestão anaeróbica, em comparação com a velocidade de outros substratos animais (Dotto e Wolff, 2012). Dotto e Wolff (2012) também recomendam que o ideal seria a utilização da biomassa bovina primeiro nos biodigestores para fomentar a criação de um ecossistema de microrganismos capazes e efetivos na produção de biogás antes da adição do inóculo de outro material.

Todavia, Karlsson *et al.* (2014) explicam que geralmente a biomassa bovina possui um menor teor de produção de biogás em relação ao material orgânico suíno e avícola, dado que uma parte significativa do composto bovino é degradado no próprio estômago do animal onde lá se torna metano.

Vale salientar, que se o resíduo bovino for degradado juntamente com outros substratos como carcaça animal ou biomassa vegetal a quantidade de biogás produzido será maior, e que se for utilizado com o inóculo esterco bovino pode ajudar na estabilidade do processo da biodigestão ao diminuir os índices de amônia (Karlsson *et al.* 2014).

Sendo assim, o substrato bovino é um instrumento necessário e de fácil acesso para a produção de biogás dado que a criação de biodigestores alimentados por essa





biomassa pode ajudar a suprir demandas energéticas de ambientes rurais e até mesmo fora dele, além de que o material orgânico bovino já possui microrganismos já adaptados a temperaturas mesofílicas que facilitam a digestão anaeróbica (Karlsson *et al.* 2014).

2.4.3 Resíduo Orgânico Avícola

O material orgânico avícola provém de aves de corte e de poedeiras, onde frequentemente são utilizados como fertilizantes naturais para melhorar a produtividade das atividades agrícolas em geral. Todavia, a sua composição orgânica residual é apropriada para a geração de biogás devido ao seu alto teor de nitrogênio, fósforo, cálcio e potássio em sua composição (Oliveira *et al.* 2024).

De acordo com De Bona *et al.* (2017), o crescimento expansivo nos últimos anos do consumo da carne de frango tanto no Brasil quanto no exterior provocou um impacto significativo no meio-ambiente gerado pelo excesso de resíduos orgânicos tanto em ambientes de cultivos dos animais quanto no abate dos mesmos, sendo assim este material necessita de tratamento adequado para que não chegue a contaminar o solo e crie maiores acúmulos de despejos.

Vale salientar, que a principal necessidade de energia em aviários se dá no começo dos lotes na introdução de novas aves, e nos meses mais gelidos do ano (De Bona *et al.*, 2017). Oliveira *et al.* (2024) ainda indicam que o esterco de frango apresenta um grande potencial energético sendo um dos maiores em comparação com outros animais, e que o pré-tratamento deste resíduo reduz a concentração de amônia na digestão anaeróbica melhorando os índices de criação do biogás.

Deste modo, os resíduos avícolas que são gerados no setor de produção de aves se tornam um método qualificado para gerar grandes quantidades de energia através do biogás, e ao mesmo tempo a biodigestão não afeta o subproduto originalizado após o processo, sendo assim o biofertilizante gerado pode ser reutilizado no ambiente agrícola e o condicionamento desta matéria-prima minimiza os impactos ambientais (Oliveira *et al.*, 2024).

2.5 CONDIÇÕES OPERACIONAIS

As condições do meio afetam diretamente no processo de produção do biogás, ou seja, as alterações em temperatura, pH, concentração de nutrientes disponíveis, e os elementos presentes em cada etapa, e entre outros são fatores cruciais para o desenvolvimento dos resultados finais dos métodos (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010).

As variabilidades das bactérias e seus processos exigem equilíbrio, visto que a concentração da biomassa e seus tipos também interferem nos processamentos, na finalidade da concentração e no modelo de biodigestor utilizado (Kunz *et al.*, 2019). Em vista disso, são fatores importantes a serem considerados, em virtude de cada projeto ter uma demanda de captação de biogás diferente (Araújo, 2017).

2.5.1 Concentração de Nutrientes

O biogás é um composto gasoso formado principalmente de CH₄ e CO₂ em uma relação de 50% a 75% de gás metano, e de 25% até 50% de gás carbônico, explica a agência Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2010). Ademais existem menores concentrações de hidrogênio, sulfeto de hidrogênio, e amônia.





As bactérias no processo de Hidrólise fazem que elementos complexos se tornem mais comuns sendo transformados em aminoácidos e em açúcares simples, assim o processo das bactérias fermentativas acidogênicas deixam as células ainda menores e ficam sugestivas a quantidade de hidrogênio neste momento (Kunz *et al.* 2019).

Quando chega a etapa de acetogênese criam-se ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono, assim passando para o ciclo da Metanogênese, onde são gerados os resultados finais e suas duas variedades de arqueas (Araújo, 2017).

Todavia, Kunz *et al.* (2019) salienta que as células dos microrganismos anaeróbios são compostas principalmente por nitrogênio, fósforo e enxofre, e esta última substância pode acarretar diversas complicações para o processo, visto que se inicia uma precipitação de nutrientes insolúveis e de baixa potência em redox.

Sendo assim, Araújo (2017) comenta que o acúmulo e tipo de biomassa devem ser medidos e monitorados para que ocorra um processo de biodigestão anaeróbica sem maiores preocupações é que o desenvolvimento chegue ao resultado desejado.

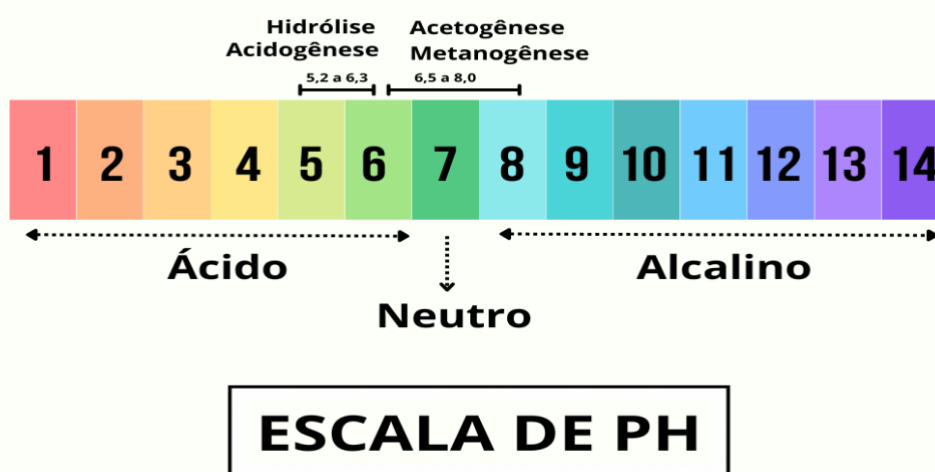
2.5.2 Condições de pH

Em síntese, a maioria dos microrganismos fermentativos conseguem se adaptar entre os pH de 4,0 até 8,5, de acordo com Kunz *et al.* (2019). No entanto, em menores valores de pH se encontram os ácidos acético e butírico, e em níveis mais elevados os ácidos acéticos e propiônico.

A instituição Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2010) comenta que o pH ótimo para a criação do metano se encontra entre 7,0 até 7,5, contudo, também pode correr formação do gás em níveis um pouco abaixo ou acima, só que sem muita divergência do aconselhável.

As duas primeiras fases da Hidrólise e Acidogênese são reguladas em pH mais ácidos, indo próximo ao 6,3 e as últimas etapas, Acetogênese e Metanogênese, se beneficiam de pHs mais alcalinos, podendo chegar a 8,0 na escala, conforme explicam Coelho *et al.* (2018).

Figura 2.2 - Escala de pH.



Fonte: Autor (2024 *apud* COELHO *et al.* 2018, p.14).





Vale salientar, que o biogás tem melhores produtividade quando está em pH neutro ou um pouco superior a este grau, sendo o ideal manter a constância e controle das elevações. Kunz *et al.* (2019) também citam que os ácidos voláteis podem minimizar os padrões de pH, de onde ocorrem as confecções, e que a altura de equilíbrio do potencial hidrogeniônico do estado líquido e gasoso se encontra em 6,7 na grandeza.

Karlsson *et al.* (2014) expõem que os íons alcalinos são feitos, principalmente, de bicarbonato e se estabelecem em equilíbrio com a concentração de dióxido de carbono para aumentar o nível de grau básico da formação do biogás. Porém, a degradação da quantidade de nitrogênio na biomassa também corrobora para maximizar a alcalinidade.

O sistema do pH é guiado pelas concentrações de dióxido de carbono e bicarbonato. Se porventura as camadas de pH diminuam radicalmente, o CO₂ irá ser manifestado em maiores quantidades fazendo que a acidez se eleve, e caso aconteça o aumento excessivamente o CO₂, será transformado em ácido carbônico que liberará os íons de hidrogênio deixando a formulação mais próxima ao neutro (Kunz *et al.* 2019).

Diante disso, os padrões pH devem ser regulados para que cada fase ocorra da melhor maneira para que não suceda modificações drásticas em seu desempenho e precise de correções para voltar ao normal (*Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe*, 2010).

2.5.3 Temperatura

A instituição Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2010) comenta que no geral as reações químicas acontecem com maior velocidade quando a temperatura está mais elevada. No entanto, nos métodos biológicos de alterações constantes de cada fase podem ter sua preferência e, conseqüentemente, o mesmo ocorre para os diferentes tipos de microrganismos.

As bactérias podem ser classificadas pelas suas temperaturas, sendo os três principais grupos são Termofílicos, que vão até 60°C, Mesofílicos chegando aos 45°C e Psicrofílicos que atingem até os 15°C (Coelho *et al.* 2018).

Tabela 2.1 - Classificação dos principais grupos bactérias.

Identificação dos microrganismos	Crescimentos em graus C°
Psicrofílicos	≤15°C
Mesofílicos	20 a 45°C
Termofílicos	45 a 60°C

Fonte: Coelho *et al.* (2018, p.14).

É de suma importância manter a constância da temperatura para que não corra drásticas mudanças de queda nem de aumento, pois se um desequilíbrio acontecer o biodigestor poderá subir demais a temperatura, atingindo o sistema da amônia, que até o momento era NH₄⁺ (íon amônio) passando a ser NH₃ (amoníaco) em estado aquoso. Este composto executará a parada do processo, visto que atingirá as bactérias metanogênicas causando a desordem iônica ou a falta de potássio na solução (Kunz *et al.* 2019).





Existem diferentes fatores que podem levar ao término da geração do biogás, como por exemplo, ir a temperaturas abaixo de 10°C, encerrará o processo e acima de 65°C, perderá a capacidade de degradação da biomassa, ou o descontrole dos índices de amônia irão atrapalhar o processo e em caso de falta de correção acontecerá a perda da fabricação, cita Coelho *et al.* (2018).

O processo Metanogênico possui arqueas que são consideradas muito sensíveis em termos de variações de temperatura dado que suas duas variações são as mesofílicas que variam entre 20°C até 40°C e as termofílicas que vão de 50 a 60°C, explica Araújo (2017).

Kunz *et al.* (2019) também informam que na Termodinâmica de condições padrões os processos endotérmicos tendem a ser mais oportunos para maiores condições térmicas, e as etapas exotérmicas são menos favoráveis para o calor.

A cada mudança nos estágios do biogás existe sua própria microflora onde se enquadra em sua melhor condição situacional, todavia leva-se um tempo considerado para que as bactérias consigam se formar e também leva mais um prazo para sua modificação, a recomendação para o aumento da temperatura seja de 1°C por dia, contudo o estado do processo no todo deve ser estável (Karlsson *et al.*, 2014).

Nesse sentido, a preservação do equilíbrio da temperatura é mais relevante que seu grau em si (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010). A regularidade do processo garante que a termicidade da fabricação do gás não sofra tanto quando ocorrer as mudanças de grupos de bactérias que se utilizam de diferentes hipertermias, assim gerando uma manufatura do biogás de maneira mais homogênea (Kunz *et al.* 2019).

3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

É de fundamental relevância que a simulação seja utilizada como uma ferramenta que cria análises e soluções de questionamentos complexos (Sabbadini, 2020). Dado que a simulação está relacionada com testes e experimentos onde busca a compreensão da elaboração de uma representação real em medida a uma situação controlada, explica Nascimento (2007).

Além disso, praticamente todos os campos da ciência são dependentes das simulações computacionais, devido ao alto nível de informações processada todos os dias, cujos cálculos simples já não se adequam aos tempos atuais (Marietto, Minami e Westera, 2013). O conceito de Simulação Computacional pode ser descrito como um processo que copia a realidade, onde pode ou não conservar os atributos lógicos e físicos de um sistema real (Guterres, 2017).

Dentro deste sentido, o Sistema é um conjunto de partes interligadas que se conectam entre si com a meta de compor uma estrutura organizada, onde estes mesmos sistemas podem ser denominados como abertos ou fechados, de acordo com Marietto, Minami e Westera (2013). Ademais, os autores ainda comentam que os Modelos de Simulação permitem que o sistema modelado se envolva sob condições determinadas onde possam examinar com mais descrições as consequências das volatilidades internas.

Pode-se citar também que a Modelagem de Dados é um método para conseguir modelos probabilísticos que possam fazer conclusões das particularidades aleatórias de cada fenômeno (Sabbadini, 2020).

Segundo Marietto, Minami e Westera (2013) a confiabilidade da simulação computacional se dá pela verificação e validação onde a verificação deve comprovar





se o modelo foi implementado corretamente e a validação deve considerar se as condições aptas do sistema real são plausíveis.

O uso de software está acoplado com a simulação computacional dado que facilita uma modelagem mais rápida e a realizar os cálculos estatísticos (Sabbadini, 2020). O software Octave é um simulador matemático que cria operações matriciais onde se pode elaborar gráficos de até três dimensões com uma linguagem de programação avançada (Corrêa, 2011).

Portanto, a simulação computacional é utilizada como uma ferramenta para explorar problemas relevantes em vários segmentos através de cálculos feitos por softwares, onde possam ser traduzidos em uma linguagem eletrônica que se tem como finalidade ser o mais assertiva possível dentro do ambiente desejado (Sabbadini, 2020).

3.1 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS EM PROCESSOS BIOQUÍMICOS

Tendo em vista que os processos bioquímicos são o estudo sobre os processos químicos que acontecem nos organismos vivos, onde abordam as estruturas e funções metabólicas das características celulares, sendo de composição e função metabólica como proteína, lipídios, e ácidos nucleicos, entre outros (Ferri, 2015). Além disso, Ferri (2015) ainda comenta que as biomoléculas podem ser grandes e complexas como polímeros ou cadeias longas como monômeros, e que cada biomolécula apresenta sua própria estrutura.

Os processos bioquímicos do biogás implicam em todo seu processo de digestão anaeróbica onde as colônias dos microrganismos dos quatro grupos de bactérias hidrolíticas, acidogênicas, acetogênicas e metanogênicas são responsáveis pela fermentação de todo o sistema para a geração do gás cujo são nutridas pelas biomoléculas presentes nos substratos e inóculos colocados dentro dos biodigestores (Kunz *et al.* 2019).

Por sua vez a Simulação Numérica é um composto de equações matemáticas e métodos distintos com variáveis e de diferentes parâmetros de uma situação ou cenário real criados em um ambiente computacional (Sabbadini, 2020). Onde sua relevância parte que o modelo matemático equivale a uma linguagem coesa que expressa com precisão a situação desejada, no qual representa um corte da realidade do pensamento construído, comenta Nascimento (2007).

Ademais, os modelos de interpretação atenuam os princípios bioquímicos, e as equações do modelo matemático define as normas que agiram sobre os elementos do sistema planejado, onde os parâmetros do modelo se mantêm coesos e sem incertezas (Silva, 2009).

Dado aos fatos citados, a simulação numérica aplicada aos processos bioquímicos corrobora com a compreensão de como o sistema opera individualmente (Guterres, 2017). A simulação se torna responsável por encontrar os melhores critérios e otimizações para a evolução das biomoléculas que alimentaram o sistema de respiração anaeróbia que por fim geraram o biogás e seus subprodutos.

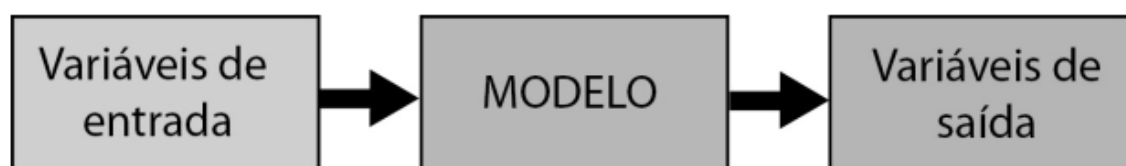
3.2 MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS

De acordo com Sabbadini (2020) a modelagem pode ser descrita como um processo de construção de um modelo, onde a modelagem de dados pode-se conseguir padrões probabilísticos que consentem em fazer a ilação dos atributos aleatórios de um fenômeno. Ademais pode ser exemplificado pela figura 3.3:





Figura 3.3 - Parâmetros de entrada e saída de um modelo simbólico.



Fonte: Sabbadini (2020, p.33).

Segundo Chwif e Medina (2015) a modelagem pode ser descrita em três etapas sendo elas: a coleta de dados, tratamento das informações, e por último a inferência. Os autores ainda comentam que a primeira fase de Coleta de Dados é onde se obtém a amostragem das informações no qual será a representação do fenômeno desejado, na segunda etapa de Tratamento de Informações é onde os dados serão mediados pelas técnicas escolhidas para fazer um levantamento das prováveis falhas desta amostragem, assim garantido a aceitabilidade do estudo, e a terceira etapa de Inferência é quando se aplica os critérios probabilísticos a fim de ter uma representação do evento aleatório determinado.

Os autores Marietto, Minami e Westera (2013) argumentam que o Processo consiste em revisar dados, onde o ponto principal do processo de modelagem é encontrar os possíveis aspectos e as associações entre eles. Sabbadini (2020) ainda menciona que o processo segue um determinado fluxo sendo ele: elaborar um modelo teórico, criar um modelo computacional para simular o evento e em seguida realizar o experimento para demonstrar as possibilidades e verificar se os resultados são adequados.

Dentro deste sentido a otimização incorpora o papel de trazer benefícios e agilidade na simulação, com a finalidade de combinar e aprimorar os resultados das saídas do modelo determinado (Sabbadini, 2020).

Além disso, dentro da modelagem existem dois tipos de modelos, sendo eles o modelo teórico, e o modelo objeto. Nascimento (2007) explica que o modelo Teórico é associado a teorias já existem, e o modelo Objeto preserva a estabilidade real sendo homogêneo em suas características, e dentro deste sentido o modelo teórico passa a ser elaborado em torno do modelo objeto, assim criando teorias associada entres ambas.

Portanto, dados aos fatos citados a modelagem e otimização de processo é uma etapa necessária para a criação de uma simulação computacional assertiva, a utilização da modelagem otimizada juntamente a simulação e traz vantagens ao sistema ou evento analisado (Marietto, Minami e Westera, 2013).

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Na presente metodologia, foi empregada a simulação numérica como uma ferramenta para modelar e otimizar o processo de produção de biogás a partir de substrato bovino, por meio da digestão anaeróbica. A simulação foi desenvolvida com base em modelos matemáticos que replicam as quatro principais etapas do processo: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Essa abordagem permite explorar diferentes condições operacionais, testar cenários alternativos e





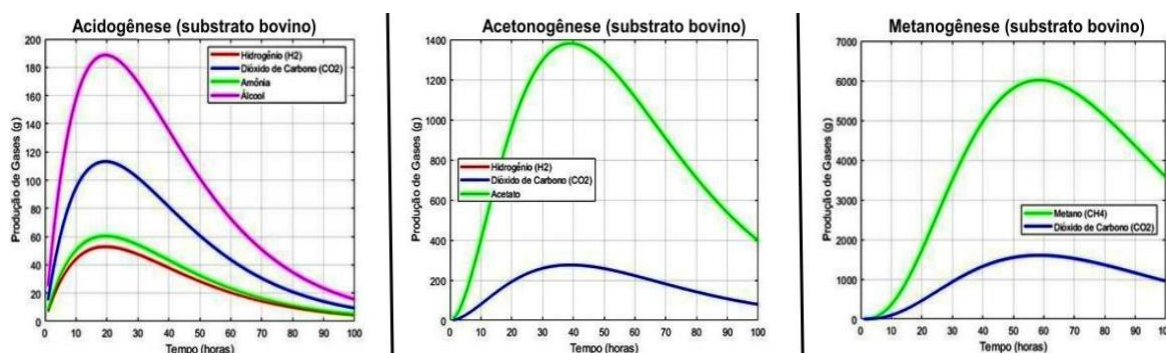
compreender o comportamento do sistema ao longo do tempo, sem a necessidade de experimentação física imediata. O Octave é um software de código aberto amplamente utilizado para cálculos numéricos, análise de dados, e simulações científicas.

Este trabalho científico de simulação numérica do processo de digestão anaeróbica foi dividido em duas fases distintas, sendo a fase I o processo em que é demonstrado as aplicações da teoria e formação do algoritmo para a adequação e realização de cenários. Já na fase II, após os devidos ajustes, é apresentada a introdução do inóculo no substrato bovino.

A primeira fase a biomassa foi estabelecida e as variáveis de tempo foram configuradas para acompanhar o progresso do processo ao longo de 100 horas. Ao longo do tempo de simulação, a biomassa foi progressivamente reduzida para refletir o consumo da matéria orgânica pelos micro-organismos envolvidos no processo. Os resultados foram então analisados para quantificar a produção de cada gás, permitindo visualizar a contribuição de cada etapa para a produção final de biogás. A simulação proporcionou uma compreensão detalhada do comportamento do sistema ao longo do tempo e fornece *insights* sobre a eficiência do processo de produção de biogás a partir do substrato bovino.

As condições iniciais estabelecidas no algoritmo são essenciais para assegurar que a simulação reflita as condições reais observadas em experimentos ou operações industriais. A quantidade inicial de biomassa foi fixada em 1000 gramas. Este valor é representativo para simulações de escala laboratorial e permite que os resultados sejam escalonados para sistemas maiores. A escolha de 1000 gramas garante uma massa suficiente para observar as mudanças ao longo do tempo e simular adequadamente a produção de biogás. O tempo total da simulação foi definido em 100 horas, com um passo de tempo (dt) de 1 hora. Este período de tempo é adequado para capturar a dinâmica do processo de digestão anaeróbica, que normalmente ocorre ao longo de vários dias a semanas em sistemas reais. Os resultados das etapas são as seguintes, de acordo com a figura 4.4:

Figura 4.4 – Simulação da Fase I da produção do biogás pelo substrato bovino.



Fonte: Autor (2024).

Na Acidogênese os compostos do substrato orgânico se tornam ácidos voláteis, álcool, dióxido de carbono e hidrogênio e outros subprodutos. As análises da linha desta etapa é que a linha cor magenta representa o Álcool, que é produzido em maiores quantidades que os outros componentes, a curva alcança seu auge às 20 horas de produção indicando uma produtividade mais intensa nesta fase. O Dióxido





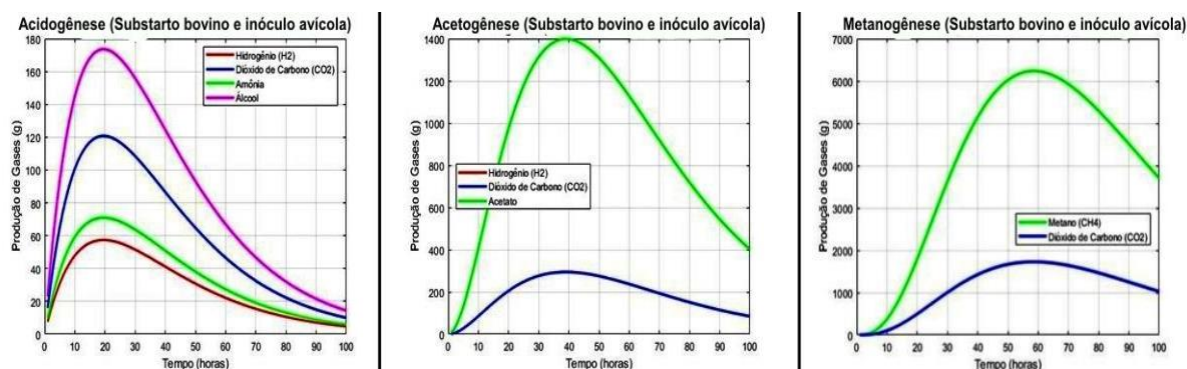
de Carbono é representado pela linha azul, onde é o segundo gás mais produzido e seu pico se dá após 30 horas aproximadamente. A linha verde representa a Amônia presente no processo que atinge seu máximo em torno de 25 a 30 horas; E a linha vermelha representa o hidrogênio que aparece em menores quantidades em relação aos outros gases atinge seu auge em torno de 20 a 30 horas após o início do processo.

Já na Acetonogênese é onde ácidos voláteis e álcool produzidos na acidogênese são convertidos em acetato, dióxido de carbono (CO_2) e hidrogênio (H_2). Onde na figura é representado por três linhas onde o verde é a linha do Acetato que é o principal componente desta fase do processo que atinge seu máximo em torno de 40 horas, todavia sua produção começa a diminuir gradualmente, ao se aproximar da fase metanogênese; O dióxido de carbono é apresentado pela linha azul que também atinge o seu pico por volta das 40 horas, só que em um volume menor que o acetato; O hidrogênio é representado pela linha vermelha que todavia, não aparece na figura devido ao seu menor teor, e alcança seu pico por volta de 30 horas de processo.

E a última etapa é a metanogênese onde a curva de metano atinge seu pico. Na figura o Metano é representado pela linha verde que atinge seu máximo as 50 horas e ultrapassa 6000 gramas em volume, e após isso sua produção diminui consideravelmente devido ao final do processo de respiração anaeróbica; Já o dióxido de carbono é representado pela linha azul onde a produção do CO_2 se aproxima consideravelmente da linha do Metano e o auge desta fase do Dióxido de Carbono é por volta de 40 a 45 horas onde atinge um volume próximo de 1800 gramas.

Na parte II da simulação o algoritmo foi desenvolvido para simular a produção de biogás a partir de uma mistura de substrato bovino e inóculo avícola, utilizando um modelo de digestão anaeróbica. O algoritmo inicia definindo as condições iniciais, que incluem a quantidade de biomassa, sendo 800 gramas de esterco de vaca e 200 gramas de inóculo de frango. Vale salientar que a simulação é executada em um ciclo contínuo de tempo, sobre um período de simulação total de 100 horas, e as iterações ocorrem a cada 1 hora. Os dados obtidos são representados pela figura 4.5:

Figura 4.5 – Simulação da Fase II da produção do biogás pelo substrato bovino e inóculo avícola.



Fonte: Autor (2024).

Novamente o processo se inicia e a Acidogênese mostra quatro linhas, sendo que os auge de cada um dos pontos ainda se mantém nas mesmas horas. A linha magenta representa os álcoois com seu máximo em 20 horas com, por volta de 180 gramas, e a linha azul representa o dióxido de carbono, com seu pico de 30 horas e com 120 gramas. A linha verde, a Amônia apresenta-se por volta de 70 gramas, com



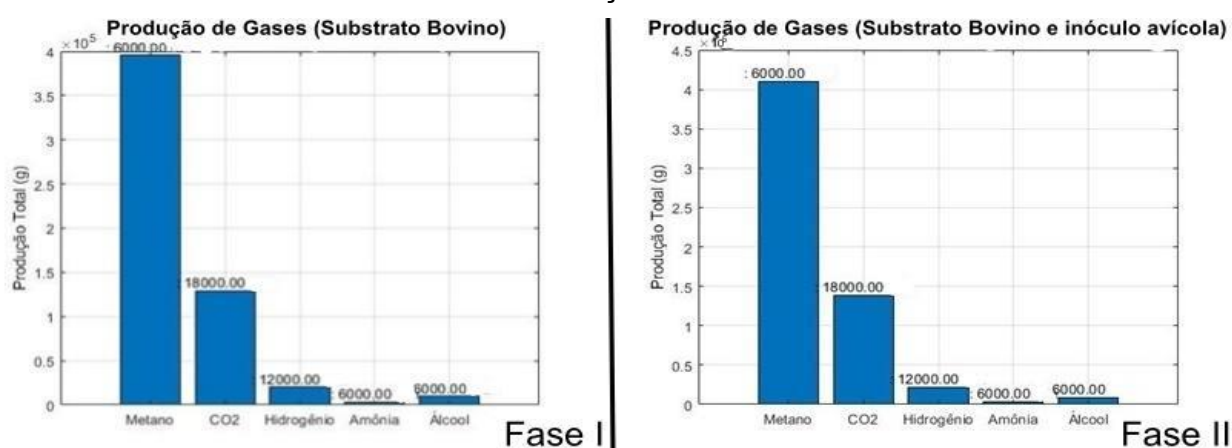


o pico de 30 horas e, por último, a linha vermelha do hidrogênio com 55 gramas e com o auge em 25 horas.

A segunda etapa Acetogênese é representada por três linhas, onde a verde é o Acetato, atingindo um pico de produção em torno de 40 horas com cerca de 1400 gramas. A linha azul representa o CO₂, onde sua produção atinge o máximo entre as 25 a 30 horas e com um total de 270 gramas em média. E na linha vermelha, o Hidrogênio produziu 150 gramas com 30 horas de trabalho para atingir o seu pico.

A metanogênese é demonstrada com duas curvas, onde a verde representa o Metano com 6000 gramas de gás e com 50 horas para chegar ao seu pico; e a linha azul é o dióxido de carbono com 1800 gramas e atinge o seu auge entre 40 a 50 horas. O demonstrativo da comparação entre a produção de gás nas simulações das fases I e II está na figura 4.6:

Figura 4.6 – Comparativo da produção da Fase I com a Fase II na simulação.



Fonte: Autor (2024).

Portanto, o comparativo entre a fase I e II demonstra que na primeira etapa o volume dos gases se encontra um pouco baixo em relação aos gases do segundo método. Sendo assim, a introdução do inóculo se mostra eficiente. Todavia, em ambas as fases a produção dos gases dominantes são os mesmos sendo o Metano com as maiores produções, seguidos por dióxido de carbono, hidrogênio, amônia e álcool.

5 DISCUSSÃO GERAL

A simulação numérica utilizada nesta metodologia permitiu modelar e otimizar o processo de produção de biogás a partir de substrato bovino e inóculo avícola utilizando a digestão anaeróbica. A simulação foi realizada ao longo de 100 horas, cobrindo as quatro principais etapas do processo digestão anaeróbica.

As condições iniciais estabelecidas no algoritmo garantiram que a simulação refletisse condições reais observadas em experimentos. Foram utilizadas 800 gramas de esterco de vaca e 200 gramas de inóculo de frango, um total de 1000 gramas de biomassa.

Os gráficos gerados durante a simulação permitiram uma análise da produção de gases em cada etapa do processo. Durante a Fase I foi observado que o álcool foi





produzido em maior quantidade, com um pico de produção em torno de 180 gramas por volta das 20 horas, sendo o álcool o principal elemento desta etapa.

Ainda na Fase I, na etapa de acetogênese mostrou-se que o acetato foi o composto principal produzido, atingindo cerca de 1400 gramas por volta das 40 horas. Isso indica uma conversão dos ácidos voláteis e do álcool em intermediários para a metanogênese.

Entrando na Fase II, observou-se que o metano (CH_4) foi o principal produto, com um pico de produção de mais de 6000 gramas por volta das 50 horas. A produção de CO_2 , embora presente, foi menor, atingindo cerca de 1000 gramas. Este comportamento sugere que a maior parte do carbono disponível no sistema foi convertida em metano, que é o componente mais valioso do biogás.

Ao comparar os gráficos das diferentes etapas do processo, observa-se que a produção de gases varia ao longo do tempo e entre as diferentes fases da digestão anaeróbica. Durante a Fase I, a produção de álcool e CO_2 foi mais intensa, enquanto na acetogênese, o acetato foi o principal produto. A Fase II foi constituída pela produção de metano, que foi o produto final mais abundante, seguido pelo CO_2 .

A figura 4.6 resume a produção total de gases ao longo do processo de digestão anaeróbica, o qual demonstra a eficiência global do sistema. Ao comparar as quantidades totais de cada gás produzido, fica evidente que o metano (CH_4) foi o produto predominante, reforçando a eficácia da digestão anaeróbica como uma tecnologia para a produção de energia renovável.

As figuras 4.4 e 4.5 fornecem uma visão de como a biomassa é convertida em diferentes gases ao longo do tempo, confirmando que o metano é o componente mais valioso e mais produzido.

A simulação numérica realizada confirmou a eficiência da digestão anaeróbica na produção de biogás, com ênfase na conversão de substrato bovino e no inóculo de frango. Os resultados mostraram que o metano é o principal produto final, com a maior parte dos intermediários sendo convertidos ao longo das diferentes fases do processo. A comparação entre as diferentes etapas revelou a importância dos elementos intermediários ao longo do processo até chegar na formação do metano. Estes resultados fornecem uma base para otimizar futuras simulações e experimentos, buscando maximizar a produção de metano e a eficiência do processo como um todo.

6 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi alcançado por meio da implementação de um modelo computacional que simula as quatro etapas da digestão anaeróbica. A simulação, realizada ao longo de 100 horas, permitiu a análise detalhada de cada fase, destacando a produção de gases como metano, dióxido de carbono, hidrogênio, amônia e álcool.

Os resultados mostraram que a acidogênese e a acetogênese são fundamentais para a formação dos intermediários necessários para a metanogênese, o qual ocorre a maior produção de metano. Além disso, a capacidade de prever e otimizar a produção de biogás, utilizando dados experimentais, permitiu ajustes nos parâmetros do processo para maximizar a produção de metano.

A análise dos gráficos gerados para cada etapa forneceu informações sobre as condições ótimas para a produção de biogás, contribuindo para a eficiência do processo. A modelagem detalhada e a validação dos resultados, com base em dados da literatura, confirmaram a eficácia da simulação numérica em reproduzir condições





reais de produção de biogás, atingindo o objetivo proposto e oferecendo aplicações tanto para a indústria quanto para a ciência.

Sugere-se que, em futuras pesquisas, o modelo seja testado com um biodigestor utilizando as biomassas aplicadas neste presente artigo. Deste modo, a fim de corroborar com a pesquisa. Portanto, o presente trabalho atingiu sua meta em criar uma simulação do processo de biodigestão anaeróbica da produção do biogás através de uma simulação computacional.





REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, A.P.C. **Produção de Biogás a partir de Resíduos Orgânicos Utilizando Biodigestor Anaeróbico**. 2017. Monografia (Bacharel em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.
- BLEY JR, C. **Biogás: A energia invisível**. 2. ed. São Paulo: CIBiogás, 2015.
- CHWIF, L; MEDINA, A.C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria & aplicações**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- COELHO, S.T; GARCILASSO, V.P; FERRAZ JUNIOR, A.D.N; SANTOS, M.M; JOPPERT, C.L. **Tecnologias de Produção e uso de Biogás E Biometano**. São Paulo: IEE-USP, 2018.
- CORRÊA, F.R. **Gestão da Qualidade**. 1.ed. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2011.
- DE BONA, E. A. M; STEINMETZ, R.; SOMER, J. G; LINS, L. P; VIANCELLI, A; KUNZ, A. CAMA DE FRANGO COMO SUBSTRATO PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS APÓS DIFERENTES PERÍODOS DE ESTOCAGEM. In: V Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais, nº5, 2017, Foz Iguaçu. **Anais [...]**. Foz Iguaçu: Vsiger, 2017. p. 451-455.
- DOTTO, R.B; WOLFF, D.B. BIODIGESTÃO E PRODUÇÃO DE BIOGÁS UTILIZANDO DEJETOS BOVINOS. **Disciplinarum Scientia | Naturais E Tecnológicas**, Santa Maria, vº 13, p. 13-26, 2012.
- FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. 5. ed. Gulzow: Deutsches BiomasseForschungsZentrum (DBFZ), 2010.
- FERRI, V.C. **Bioquímica**. 1 ed. Pelotas: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2015.
- GEF BIOGÁS BRASIL. **Metodologias Para Integração do Biogás da Cadeia de Valor da Agroindústria**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2022.
- GUTERRES, M.X. **Simulação - Módulo 01**. 1.ed. Rio Grande do Sul: Unipampa, 2017.
- KARLSSON, T; KONRAD, O; LUMI, M; SCHMEIER, N.P; MARDER, M. CASARIL, C.E; KOCH, F.F; PEDROSO, A.G. **Manual Básico De Biogás**. Lajeado: Editora da Univates, 2014.
- KUNZ, A; STEINMETZ, R. L. R; AMARAL, A. C. **Fundamentos da Digestão Anaeróbia, Purificação do Biogás, uso e Tratamento do Digestato**. 1. ed. Concórdia: Sbera Embrapa Suínos e Aves, 2019.
- MACHADO, S.S. **Gestão da Qualidade**. 1. ed. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012.
- MARIETTO, M.G.B; MINAMI, M; WESTERA, P.W. **Bases Computacionais da Ciência**. 1.ed. Santo André: Universidade Federal do ABC, 2013.
- MATTO, C.F. **Produção de Biogás e Biofertilizante a Partir de Dejetos de Bovinos, sob Sistema Orgânico e Convencional de Produção**. 2016. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro Instituto de Tecnologia, 2016.
- NASCIMENTO, R.A. **Modelagem Matemática com Simulação Computacional na Aprendizagem de Funções**. 2007. Tese (Doutorado em Educação) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.
- OLIVEIRA, I.B.C; SANTANA, H.E.P; FERNANDES, I.V; FERNANDES, I.V; SANTOS, S.J; SILVA, I.P; SILVA, D.P. Biodigestão Anaeróbia de esterco de frango para Produção de Energia Limpa. **Científica Digital**, Guarujá, nº 2, p. 52-63, 2024.





RESENDE, J.A; DINIZ, C.G; SILVA, V.L; CARNEIRO, J.C; RIBEIRO, M.T; OTENIO, M.H. Dejetos bovinos para produção de biogás e biofertilizante por biodigestão anaeróbica. **Circular Técnica**, Juiz de Fora, nº 1, p. 1-5, 2015.

SABBADINI, F.S. **Simulação**. 1. Ed. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2020.

SILVA, H.G. **Estratégias Integradas de Simulação e Otimização de Processos Químicos**. 2009. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.

