

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MARIA EDOARDA TREVISAN

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS E ENERGIA EM
REATOR ANAERÓBIO ALIMENTADO COM RESÍDUOS DE FRIGORÍFICO**

FRANCISCO BELTRÃO

2026

MARIA EDOARDA TREVISAN

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS E ENERGIA EM
REATOR ANAERÓBIO ALIMENTADO COM RESÍDUOS DE FRIGORÍFICO**

**Evaluation of biogas and energy production efficiency in an anaerobic reactor
fed with slaughterhouse waste**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Marcelo Bortoli.

FRANCISCO BELTRÃO

2026



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MARIA EDOARDA TREVISAN

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS E ENERGIA EM
REATOR ANAERÓBIO ALIMENTADO COM RESÍDUOS DE FRIGORÍFICO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 26 de junho de 2026

Fernando Cesar Manosso
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Francisco Beltrão

João Vitor Moreschi
Mestrado
Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Marcelo Bortoli
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Francisco Beltrão

FRANCISCO BELTRÃO

2026

RESUMO

A digestão anaeróbia tem se consolidado como uma alternativa sustentável para o tratamento de resíduos orgânicos e a geração de energia renovável. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho operacional e energético de uma planta industrial de biogás equipada com biodigestor anaeróbio do tipo Continuous Stirred Tank Reactor, utilizada no tratamento de resíduos de um frigorífico de suínos. Foram analisados dados operacionais obtidos durante 96 dias de monitoramento, incluindo volume de alimentação, temperatura do biodigestor, produção de biogás, concentração de metano e geração de energia elétrica. Os resultados indicaram produção contínua de biogás e teores de metano entre 63% e 69%, evidenciando a elevada qualidade energética do biogás produzido. As análises demonstraram que a relação entre alimentação do biodigestor e produção de biogás foi mais evidente em escala mensal, destacando a influência do tempo de retenção hidráulica sobre o processo. A temperatura permaneceu dentro da faixa mesofílica recomendada para a digestão anaeróbia, contribuindo para a estabilidade operacional do sistema. Além disso, a estimativa do potencial energético apresentou forte relação com a geração real de energia em escala mensal. Os resultados confirmam a viabilidade da biodigestão anaeróbia para o tratamento de resíduos agroindustriais e a geração de energia renovável, reforçando seu potencial como ferramenta de sustentabilidade ambiental e energética no setor agroindustrial.

Palavras-chave: biodigestão anaeróbia; geração de energia elétrica; aproveitamento energético; resíduos agroindustriais.

ABSTRACT

Anaerobic digestion has become a sustainable alternative for the treatment of organic waste and the generation of renewable energy. In this context, the present study aimed to evaluate the operational and energy performance of an industrial biogas plant equipped with a CSTR-type anaerobic digester, used for the treatment of waste generated by a swine slaughterhouse. Operational data collected over a 96-day monitoring period were analyzed, including feed volume, digester temperature, biogas production, methane concentration, and electricity generation. The results indicated continuous biogas production and methane concentrations ranging from approximately 63% to 69%, demonstrating the high energy quality of the biogas produced. The analyses showed that the relationship between digester feeding and biogas production was more evident on a monthly scale, highlighting the influence of hydraulic retention time on the process. The digester temperature remained within the mesophilic range recommended for anaerobic digestion, contributing to the operational stability of the system. Furthermore, the estimated energy potential showed a strong relationship with actual electricity generation when evaluated on a monthly basis. The results confirm the feasibility of anaerobic digestion for the treatment of agro-industrial waste and the generation of renewable energy, reinforcing its potential as a tool for environmental and energy sustainability in the agro-industrial sector.

Keywords: anaerobic digestion; biogas; electricity generation; energy recovery; agro-industrial waste.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma do processo de digestão anaeróbia	16
Figura 2 - Fluxograma do Biodigestor.....	25
Figura 3 - Variação diária do volume de biogás produzido	32
Figura 4 - Volume mensal de biogás produzido	33
Figura 5 - Variação diária da geração de energia elétrica	35
Figura 6 - Variação mensal da geração de energia elétrica.....	36
Figura 7 - Relação entre a produção diária de biogás e a geração diária de energia elétrica	37
Figura 8 - Relação entre a produção mensal de biogás e a geração mensal de energia elétrica	38
Figura 9 - Relação semanal entre a concentração de metano e a geração de energia elétrica	39
Figura 10 - Variação diária entre o volume de alimentação do biodigestor e o volume de biogás produzido.....	41
Figura 11 - Relação mensal entre o volume de alimentação do biodigestor e a produção de biogás	42
Figura 12 - Relação entre a temperatura do biodigestor e o volume de biogás produzido	43
Figura 13 - Relação entre a concentração de metano (CH ₄) e o volume de biogás produzido	45
Figura 14 - Comparação entre o potencial teórico e a geração real diária de energia elétrica	46
Figura 15 - Relação mensal entre o potencial teórico de geração de energia e a geração real	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aproveitamento energético diário do sistema	49
Tabela 2 - Aproveitamento energético mensal do sistema.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABIOGAS – Associação Brasileira do Biogás e do Biometano

ABPA – Associação Brasileira de Proteína Animal

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CSTR – Continuous Stirred Tank Reactor

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEA – International Energy Agency

IEA BIOENERGY – International Energy Agency Bioenergy

TRH – Tempo de Retenção Hidráulica

LISTA DE SÍMBOLOS

E_{gerada} – Energia elétrica efetivamente gerada (kWh)

E_{pot} – Energia elétrica potencial estimada (kWh)

kW – Quilowatt

kWh – Quilowatt-hora

m³ – Metro cúbico

Nm³ – Metro cúbico normal

V_{BG} – Volume de biogás produzido (m³)

x_{CH_4} – Fração volumétrica de metano no biogás

η – Eficiência elétrica de conversão

η_{ap} – Índice de aproveitamento energético do sistema (%)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo Geral	13
2.2	Objetivos Específicos	13
3	REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1	Suinocultura no mundo e no Brasil	14
3.1.1	Abates suínos.....	14
3.1.2	Geração de resíduos na indústria frigorífica de suínos	15
3.2	Digestão anaeróbia	15
3.3	Reator CSTR	17
3.4	Produção de biogás	17
3.4.1	Fatores operacionais que influenciam a produção de biogás.....	18
<u>3.4.1.1</u>	<u>Temperatura</u>	<u>19</u>
<u>3.4.1.2</u>	<u>Potencial hidrogeniônico (pH)</u>	<u>19</u>
<u>3.4.1.3</u>	<u>Carga orgânica aplicada.....</u>	<u>19</u>
<u>3.4.1.4</u>	<u>Tempo de retenção hidráulica</u>	<u>20</u>
<u>3.4.1.5</u>	<u>Composição do substrato</u>	<u>20</u>
3.5	Aproveitamento energético do biogás	20
3.5.1	Conversão do biogás em energia elétrica	21
3.5.2	Potencial energético do metano	21
3.5.3	Eficiência da conversão energética do biogás	22
3.6	Plantas de biogás em escala industrial.....	22
4	MATERIAL E MÉTODOS	24
4.1	Caracterização da indústria.....	24
4.2	Caracterização da planta de biogás.....	24
4.3	Caracterização do reator CSTR.....	27
4.4	Avaliação do desempenho do biodigestor	27
4.4.1	Período de monitoramento	28
4.4.2	Análise da produção de biogás	28
4.4.3	Análise da geração de energia	28
4.4.4	Estimativa do potencial energético do biogás	29
4.5	Tratamento e análise dos dados	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32

5.1	Produção de biogás	32
5.2	Geração de energia	34
5.3	Relação entre biogás e geração de energia	36
5.4	Influência do metano na geração energética	39
5.5	Relação entre alimentação e produção de biogás	40
5.6	Influência da temperatura na produção de biogás	43
5.7	Relação entre o metano e a produção de biogás	44
5.8	Potencial energético	46
5.8.1	Índice de aproveitamento energético do sistema	49
6	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

A suinocultura possui grande relevância econômica no cenário mundial, destacando-se como uma das principais atividades do setor agroindustrial. O aumento da demanda global por proteína animal impulsionou significativamente a produção e o processamento de carne suína nas últimas décadas, tornando o Brasil um dos maiores produtores e exportadores mundiais do segmento (EMBRAPA, 2025).

Segundo dados da Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA), o país produziu aproximadamente 5,3 milhões de toneladas de carne suína em 2024, consolidando o setor como um importante componente da economia nacional e do agronegócio brasileiro. Esse crescimento da cadeia produtiva suinícola, embora economicamente relevante, também resulta no aumento expressivo da geração de resíduos líquidos e sólidos provenientes das atividades de criação, abate e processamento industrial.

Os frigoríficos de suínos apresentam elevado potencial poluidor devido à grande quantidade de matéria orgânica presente em seus efluentes. Durante os processos industriais são gerados resíduos contendo sangue, gordura, proteínas, sólidos suspensos e matéria orgânica biodegradável, resultando em elevadas concentrações de demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO) (Pacheco; Yamanaka, 2006).

Quando descartados inadequadamente, os resíduos de frigoríficos podem causar sérios impactos ambientais, como contaminação de corpos hídricos, emissão de gases de efeito estufa e degradação da qualidade do solo e da água (Kunz; Amaral; Steinmetz, 2019). Dessa forma, torna-se fundamental a adoção de sistemas de tratamento eficientes que possibilitem simultaneamente a redução do potencial poluidor e o aproveitamento energético dos resíduos gerados.

Sob essa perspectiva, Kunz, Amaral e Steinmetz (2019) apontam a digestão anaeróbia como uma das principais tecnologias utilizadas no tratamento de resíduos agroindustriais com elevada carga orgânica. Além de promover a estabilização da matéria orgânica, esse processo possibilita a produção de biogás, considerado uma importante fonte renovável de energia.

A digestão anaeróbia consiste em uma série de etapas bioquímicas sequenciais que envolvem diversos grupos de microrganismos, como bactérias que degradam matéria orgânica, bactérias acidogênicas, bactérias acetogênicas e

arqueias metanogênicas, responsáveis pela conversão da matéria orgânica em biogás (Yan *et al.*, 2021).

A eficiência desse processo depende diretamente de fatores operacionais como temperatura, carga orgânica aplicada, tempo de retenção hidráulica, composição do substrato e estabilidade microbiológica do sistema. Portanto, dessa forma, o monitoramento operacional dos biodigestores torna-se essencial para garantir estabilidade e eficiência na produção de biogás e no aproveitamento energético subsequente (Chernicharo, 2016)

Os sistemas de captura e aproveitamento de biogás convertem o metano em energia, mitigando as emissões de gases de efeito estufa. Além do benefício ambiental, essa tecnologia diversifica a matriz energética nacional e reduz a dependência de combustíveis fósseis (Milanez *et al.*, 2018).

No Brasil, o elevado potencial de biogás é impulsionado pela grande disponibilidade de resíduos agroindustriais e dejetos animais. Segundo o Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBiogás) (2026), o país superou 1.800 plantas ativas, produzindo cerca de 5 bilhões de metros cúbicos anuais. Desse volume total, o saneamento urbano responde por aproximadamente 63% da capacidade, seguido pelas atividades industriais (20%) e pelo setor agropecuário (17%).

Nos últimos anos, o setor apresentou crescimento significativo, impulsionado principalmente pela busca por soluções sustentáveis para geração de energia e gestão de resíduos industriais. Segundo Lemos, Cardoso e Costa (2024), o Brasil possui potencial estimado de aproximadamente 84,6 bilhões de Nm^3 de biogás por ano, embora apenas parte desse potencial seja atualmente aproveitada.

Conforme detalhado por Kunz, Amaral e Steinmetz (2019), o biogás produzido nos biodigestores é composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), e pode ser utilizado para geração de calor, produção de energia elétrica e obtenção de biometano, ampliando as possibilidades de aproveitamento energético dos resíduos agroindustriais.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência da produção de biogás e da geração de energia em uma planta industrial equipada com reator do tipo CSTR aplicada ao tratamento de resíduos provenientes de um frigorífico suíno, buscando analisar a relação entre produção de biogás, composição do gás e desempenho energético do sistema.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a eficiência da produção de biogás e da geração de energia em uma planta de digestão anaeróbia com reator CSTR instalada em um frigorífico de suínos, a partir da análise de dados operacionais do biodigestor e da produção energética do sistema.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o funcionamento operacional do biodigestor por meio da análise de parâmetros como alimentação de lodo, temperatura, pressão e nível do reator;
- Avaliar a produção de biogás ao longo do período analisado;
- Analisar a composição do biogás gerado, com ênfase nas concentrações de metano e dióxido de carbono;
- Estimar o potencial energético do biogás produzido e comparar com a energia elétrica efetivamente gerada;
- Avaliar a eficiência da conversão energética do sistema;
- Analisar a influência dos parâmetros operacionais na produção de biogás.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Suinocultura no mundo e no Brasil

A suinocultura tem grande relevância econômica no cenário mundial e é uma das principais atividades do setor pecuário. O aumento da demanda global por proteína animal impulsionou significativamente a produção de carne suína nas últimas décadas, tornando-a uma das carnes mais consumidas no mundo. Segundo dados da Food and Agriculture Organization (FAO, 2023), a produção mundial de carne suína ultrapassa 110 milhões de toneladas anuais, com destaque para países como a China, os Estados Unidos, o Brasil e a Espanha.

O Brasil ocupa posição de destaque entre os maiores produtores e exportadores mundiais de carne suína. O crescimento do setor está relacionado principalmente aos avanços tecnológicos aplicados ao manejo, à genética animal, à nutrição e ao processamento industrial. De acordo com a Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, 2024), o Brasil mantém posição de destaque entre os maiores produtores e exportadores mundiais de carne suína.

A região Sul concentra a maior parte da produção brasileira, especialmente nos estados de Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Paraná, devido à forte presença de cooperativas agroindustriais e à disponibilidade de matéria-prima para alimentação animal (EMBRAPA, 2025). Apesar da relevância econômica do setor, a produção intensiva de suínos e o processamento industrial geram grandes volumes de resíduos líquidos e sólidos com elevada carga orgânica, o que aumenta a necessidade de sistemas eficientes de tratamento e aproveitamento energético desses resíduos (Kunz; Steinmetz; Sulzbach, 2024).

3.1.1 Abates suínos

O abate de suínos é uma das principais etapas da cadeia produtiva da suinocultura, envolvendo processos industriais que demandam elevado consumo de água e geram grandes volumes de resíduos líquidos e sólidos. Entre as principais etapas do abate estão a recepção dos animais, insensibilização, sangria, escaldagem, depilação, evisceração e resfriamento das carcaças. Durante essas operações são gerados resíduos contendo sangue, gordura, conteúdo estomacal, fezes e águas residuárias com elevada carga orgânica (Kunz; Amaral; Steinmetz, 2019).

O Brasil apresenta crescimento contínuo no número de abates suínos impulsionado pela expansão do mercado interno e das exportações. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024), o país registrou recordes históricos de abate nos últimos anos, consolidando o setor frigorífico suíno como um importante segmento agroindustrial nacional. Esse crescimento produtivo resulta diretamente no aumento da geração de efluentes industriais e resíduos orgânicos, intensificando a necessidade de sistemas eficientes de tratamento.

3.1.2 Geração de resíduos na indústria frigorífica de suínos

A indústria frigorífica de suínos é responsável pela geração de elevados volumes de efluentes e de resíduos sólidos ao longo das etapas de abate e de processamento industrial. Entre as principais fontes de resíduos estão as operações de lavagem das instalações, sangria, escaldagem, evisceração e higienização dos equipamentos que resultam em efluentes com elevada carga orgânica e elevado potencial poluidor (Pacheco; Yamanaka, 2006).

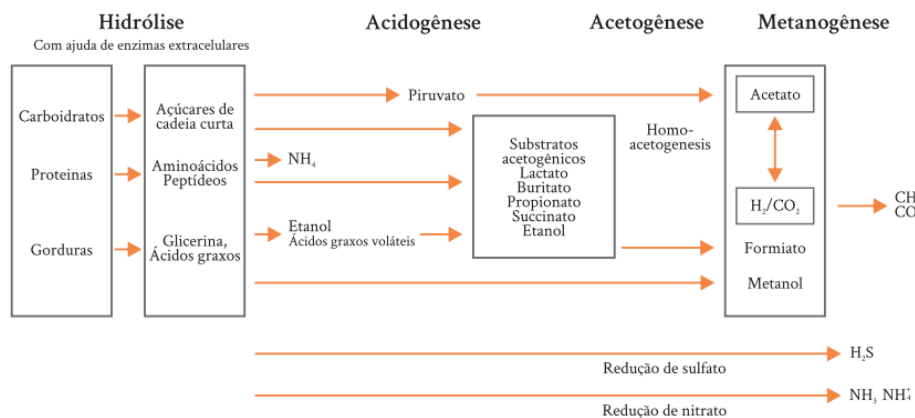
Os efluentes gerados nesse setor apresentam altas concentrações de matéria orgânica biodegradável, sólidos suspensos, nitrogênio, fósforo, óleos e graxas, além de sangue e resíduos de origem animal. Segundo Bustillo-Lecompte e Mehrvar (2017), frigoríficos estão entre os segmentos agroindustriais com maior potencial de geração de efluentes altamente carregados, principalmente devido à elevada concentração de compostos orgânicos nessas águas residuárias. Esses resíduos podem reduzir a concentração de oxigênio dissolvido em corpos hídricos e causar impactos ambientais significativos quando descartados de forma inadequada.

Além dos efluentes líquidos, o setor também gera resíduos sólidos, como gordura, vísceras, ossos, pelos e lodo proveniente das estações de tratamento de efluentes. De acordo com Schneider *et al.* (2021), o gerenciamento inadequado desses resíduos pode contribuir para a emissão de odores, a proliferação de microrganismos patogênicos e a emissão de gases de efeito estufa, especialmente o metano (CH₄).

3.2 Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um procedimento metabólico complexo que requer ausência de oxigênio e a colaboração de diversos micro-organismos para transformar substâncias orgânicas em dióxido de carbono e metano. Esse processo é composto por quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Kunz; Amaral; Steinmetz, 2019). O processo como um todo pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma do processo de digestão anaeróbia



Fonte: Kunz, Amaral e Steinmetz (2019)

Durante a hidrólise, substâncias de alta massa molecular — como lipídios, polissacarídeos e proteínas — são decompostas em monômeros solúveis por meio de enzimas extracelulares liberadas por bactérias hidrolíticas. Quando a matriz orgânica possui estrutura complexa, Chernicharo (2016) destaca que a hidrólise torna-se a etapa limitante da taxa global de degradação, variando de poucas horas para carboidratos simples até vários dias para macromoléculas.

Na sequência, a acidogênese promove a conversão desses monômeros em álcoois, gases e ácidos orgânicos de cadeia curta por ação de bactérias anaeróbias e facultativas. Conforme apontado por Von Sperling (2014), a pressão parcial de hidrogênio molecular no meio dita o balanço dos compostos gerados, onde pressões elevadas favorecem metabólitos com maior teor de carbono.

Posteriormente, na fase de acetogênese, os ácidos graxos voláteis remanescentes, como os ácidos butírico e propiônico, são transformados em acetato, hidrogênio gasoso e dióxido de carbono por microrganismos acetogênicos (Kunz; Amaral; Steinmetz, 2019).

A rota bioquímica é encerrada pela metanogênese, etapa estritamente anóxica conduzida por arqueias metanogênicas que realizam a síntese final do metano e do dióxido de carbono. Essas arqueias atuam por duas vias metabólicas principais: as acetoclásticas, que clivam o acetato, e as hidrogenotróficas, que utilizam o hidrogênio e o dióxido de carbono disponíveis no meio. Por fim, o equilíbrio cinético e a estabilidade microbiológica entre todas as fases operacionais são fundamentais para assegurar a eficiência do tratamento e a produtividade de metano do sistema (Chernicharo, 2016).

3.3 Reator CSTR

Os reatores do tipo Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR), também conhecidos como reatores de mistura contínua, são amplamente utilizados em sistemas de digestão anaeróbia aplicados ao tratamento de resíduos agroindustriais. Esse tipo de biodigestor caracteriza-se pela alimentação contínua do substrato e pela homogeneização contínua do conteúdo no interior do reator, favorecendo maior contato entre os microrganismos e a matéria orgânica (Júnior, 2025).

A agitação contínua constitui uma das principais características operacionais dos reatores CSTR, permitindo uma melhor distribuição de temperatura, nutrientes e biomassa no sistema. Além disso, a mistura reduz a sedimentação de sólidos e a formação de crostas superficiais, contribuindo para maior estabilidade microbiológica e eficiência no processo de digestão anaeróbia (Kunz, *et al.*, 2022)

Segundo Júnior (2025), os reatores CSTR são frequentemente utilizados no tratamento de resíduos com elevada concentração de sólidos, como dejetos animais, lodos orgânicos e resíduos agroindustriais. Em aplicações industriais, esse modelo apresenta vantagens relacionadas à estabilidade microbiológica, à simplicidade construtiva e à capacidade de suportar variações na carga orgânica aplicada. Entretanto, fatores como temperatura, tempo de retenção hidráulica e composição do substrato influenciam diretamente sobre o desempenho do sistema e a produção de biogás.

3.4 Produção de biogás

O gás produzido durante o processo de digestão anaeróbia, também conhecida como biogás, é formado basicamente por metano, CO_2 (dióxido de carbono) e pequenas concentrações de nitrogênio, oxigênio e H_2S (sulfeto de hidrogênio), além de traços de hidrocarbonetos voláteis (Kunz, 2017).

As propriedades do biogás são influenciadas pela temperatura, pressão, teor de metano e presença de outros gases inertes e/ou ácidos. Destaca-se a relevância desses fatores, uma vez que a capacidade energética do biogás está intimamente ligada à quantidade de metano presente na mistura gasosa (Milanez *et al.*, 2018).

O principal método de obtenção de biogás baseia-se na decomposição biológica de matéria orgânica na ausência de oxigênio, processo conhecido como digestão anaeróbica. Nas indústrias, os microrganismos decompõem a matéria-prima em um reator controlado, resultando na produção de biogás composto por 50% a 70% de metano. Posteriormente, o biogás pode passar por diferentes técnicas de purificação (absorção, adsorção, filtração por membrana, separação criogênica), a fim de aumentar a quantidade de metano e torná-lo mais semelhante ao gás natural fóssil, permitindo assim sua utilização de forma mais ampla (Milanez *et al.*, 2018).

De acordo com a ABIOGAS (2022), para determinar a quantidade de biogás que um sistema pode gerar, é essencial compreender a origem do resíduo. Isso implica conhecer sua composição, o fluxo de produção e seu volume. Também é importante avaliar o potencial de geração de biogás e metano. Com essas informações em mãos, é viável elaborar um projeto técnico e realizar uma análise preliminar de viabilidade econômica.

Compreender as propriedades físico-químicas do substrato, tais como o pH (índice de acidez), a quantidade de matéria sólida, a demanda química de oxigênio (DQO) e a temperatura, não só auxiliará na avaliação do potencial de produção de biogás, mas também na correção de condições desfavoráveis que possam prejudicar a digestão adequada, resultando na redução da quantidade de biogás gerado no final do processo. Existem diversas maneiras de ajustar esses parâmetros, como a utilização de agentes químicos ou a mistura com outros resíduos disponíveis (ABIOGAS, 2022).

3.4.1 Fatores operacionais que influenciam a produção de biogás

O desempenho da digestão anaeróbia e a eficiência da produção de biogás dependem diretamente das condições operacionais do biodigestor. Parâmetros como temperatura, pH, carga orgânica aplicada, tempo de retenção hidráulica e composição do substrato influenciam a atividade microbiológica e a estabilidade do processo anaeróbio (Chernicharo, 2016).

O controle adequado desses fatores é essencial para evitar desequilíbrios microbiológicos, o acúmulo de compostos inibidores e a redução da produção de metano. Dessa forma, o monitoramento operacional dos biodigestores torna-se fundamental para garantir a estabilidade e eficiência energética do sistema.

3.4.1.1 Temperatura

A temperatura exerce influência direta sobre a atividade metabólica dos microrganismos responsáveis pela digestão anaeróbia. Sistemas anaeróbios operam normalmente em faixas psicrófila, mesófila ou termófila, sendo a faixa mesófila, entre aproximadamente 30 °C e 40 °C, uma das mais utilizadas em aplicações industriais devido à maior estabilidade operacional (Kunz; Amaral; Steinmetz, 2019).

Variações bruscas de temperatura podem comprometer a atividade das arqueias metanogênicas, reduzindo a produção de biogás e a eficiência do processo anaeróbio.

Segundo Appels *et al.* (2008), a estabilidade térmica é essencial para manutenção da atividade microbiológica e da eficiência da produção de metano.

3.4.1.2 Potencial hidrogeniônico (pH)

O potencial hidrogeniônico (pH) está diretamente relacionado ao equilíbrio microbiológico da digestão anaeróbia. Valores inadequados podem inibir a atividade das arqueias metanogênicas e favorecer o acúmulo de ácidos graxos voláteis no interior do biodigestor (Chernicharo, 2016).

Em sistemas anaeróbios, o pH ideal geralmente situa-se próximo da neutralidade, entre 6,8 e 7,5. Valores muito ácidos ou alcalinos podem comprometer a estabilidade do processo e reduzir a eficiência da produção de biogás.

3.4.1.3 Carga orgânica aplicada

A carga orgânica aplicada corresponde à quantidade de matéria orgânica alimentada no biodigestor em determinado período. Esse parâmetro influencia diretamente a atividade microbiológica e o potencial de produção de biogás do sistema anaeróbio (Deublein; Steinhauser, 2011).

Segundo Ward *et al.* (2008), o controle adequado da carga orgânica é fundamental para a manutenção do desempenho operacional e otimização da produção de metano.

3.4.1.4 Tempo de retenção hidráulica

O tempo de retenção hidráulica (TRH) corresponde ao período médio em que o substrato permanece no interior do biodigestor. Esse parâmetro está relacionado ao tempo necessário para a degradação da matéria orgânica e formação do biogás (Chernicharo, 2016).

Tempos de retenção insuficientes podem reduzir a eficiência microbiológica do processo e comprometer a produção de metano, enquanto tempos excessivamente elevados podem reduzir a viabilidade operacional do sistema (Kunz; Amaral; Steinmetz, 2019).

3.4.1.5 Composição do substrato

A composição do substrato influencia diretamente o potencial de geração de biogás e a estabilidade microbiológica do processo anaeróbio. Resíduos ricos em carboidratos, proteínas e lipídios apresentam diferentes velocidades de degradação e potenciais de produção de metano (Ward *et al.*, 2008).

Segundo Ren *et al.* (2018), resíduos ricos em lipídios apresentam elevado potencial de produção de metano, porém concentrações excessivas podem causar acúmulo de ácidos graxos de cadeia longa e comprometer a estabilidade do processo anaeróbio.

3.5 Aproveitamento energético do biogás

As principais formas de utilização do biogás incluem a produção de calor, a geração de eletricidade em motores geradores, a geração combinada de eletricidade e calor em sistemas CHP (cogeração), e o uso de biogás purificado, conhecido como

biometano, para injeção em redes de gás natural ou para uso em veículos. Cada uma dessas opções requer um processo de purificação específico, de acordo com as normas regulamentares e a sensibilidade dos componentes de cada sistema às impurezas presentes no biogás (ABIOGAS, 2020).

3.5.1 Conversão do biogás em energia elétrica

A conversão do biogás em energia elétrica ocorre principalmente por meio de motores geradores acoplados a sistemas de combustão interna. Nesses sistemas, o biogás é utilizado como combustível para acionar o motor, gerando energia mecânica que, posteriormente, é convertida em energia elétrica por meio de um gerador (Pecora, 2006).

A eficiência de conversão energética do biogás em energia elétrica em motogeradores de combustão interna depende de fatores como a qualidade do combustível, as condições operacionais do motor e a carga aplicada. De acordo com a literatura técnica, a eficiência elétrica desses sistemas situa-se tipicamente entre 30% e 45% para motores a gás aplicados à geração distribuída (Salomon; Lora, 2009; IEA BIOENERGY, 2021;).

Essa variação ocorre devido às perdas térmicas e mecânicas do processo de conversão, além da influência direta da composição do biogás, especialmente do teor de metano, que afeta o poder calorífico do combustível.

A eficiência da conversão energética depende diretamente da qualidade do biogás utilizado, especialmente da concentração de metano e da presença de impurezas como sulfeto de hidrogênio (H_2S) e vapor d'água, que podem causar corrosão e danos aos equipamentos. Dessa forma, o monitoramento da composição do biogás é fundamental para garantir maior eficiência do processo e estabilidade dos sistemas de geração elétrica (ABIOGAS, 2020).

3.5.2 Potencial energético do metano

O metano é o principal componente energético do biogás devido ao seu elevado poder calorífico, representando entre 50 e 70%. De acordo com a Associação Brasileira do Biogás e do Biometano (ABIOGAS, 2020), o potencial energético médio do metano é de aproximadamente 9,97 kWh/Nm³.

Dessa forma, a estimativa do potencial de geração de energia do biogás pode ser realizada a partir do volume produzido e da concentração de metano na mistura gasosa.

Segundo Milanez *et al.* (2018) o monitoramento da concentração de CH₄ torna-se fundamental para a avaliação da qualidade energética do biogás e da eficiência dos sistemas de aproveitamento energético.

3.5.3 Eficiência da conversão energética do biogás

A eficiência da conversão energética do biogás corresponde à capacidade de transformar a energia química do metano em energia elétrica útil. Esse desempenho pode variar conforme as características do biogás, o tipo de gerador utilizado e as condições operacionais do sistema (Salomon; Lora, 2009).

Fatores como baixo teor de metano e impurezas podem reduzir o desempenho dos motores geradores e comprometer o aproveitamento energético do sistema (IEA, 2020; Bragança *et al.*, 2020). Nesse contexto, o monitoramento simultâneo da produção de biogás, composição gasosa e geração elétrica torna-se importante para a avaliação do desempenho energético de plantas industriais de biogás.

3.6 Plantas de biogás em escala industrial

As plantas de biogás em escala industrial têm apresentado crescimento significativo nos últimos anos devido à necessidade de destinação adequada de resíduos orgânicos e à busca por fontes renováveis de energia. Esses sistemas são amplamente utilizados no tratamento de resíduos agroindustriais, dejetos animais, resíduos alimentícios e lodos provenientes de estações de tratamento, promovendo simultaneamente a redução do potencial poluidor e o aproveitamento energético da biomassa (IEA, 2020).

No setor agroindustrial, especialmente em frigoríficos e unidades de produção animal, as plantas de biogás permitem a conversão da matéria orgânica presente nos resíduos em biogás rico em metano, que pode ser utilizado para geração de energia elétrica, térmica ou produção de biometano. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), o potencial brasileiro de produção de biogás é elevado devido

à grande disponibilidade de resíduos provenientes da agropecuária e da indústria de alimentos.

As plantas industriais de biogás geralmente são compostas por sistemas de armazenamento de resíduos, biodigestores anaeróbios, unidades de tratamento do biogás e sistemas de aproveitamento energético. A eficiência operacional dessas unidades depende do controle de parâmetros como a carga orgânica, a temperatura, a composição do substrato e a qualidade do biogás produzido (IEA BIOENERGY, 2021).

Além dos benefícios energéticos, as plantas de biogás contribuem para a redução das emissões de gases de efeito estufa, para a mitigação dos impactos ambientais associados ao manejo de resíduos orgânicos e para o seu aproveitamento energético. Dessa forma, a utilização de biodigestores em escala industrial vem se consolidando como uma alternativa importante para promover a sustentabilidade no setor agroindustrial (Obileke *et al.*, 2021).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da indústria

O presente estudo foi realizado em uma unidade industrial do setor frigorífico suíno localizada no estado do Paraná. A indústria atua no processamento de suínos e gera resíduos orgânicos provenientes principalmente das etapas de abate, do processamento industrial e do tratamento de efluentes.

Devido à elevada carga orgânica presente nesses resíduos, a unidade possui sistema de biodigestão anaeróbia destinado ao tratamento do lodo e de resíduos orgânicos gerados durante o processo industrial, visando simultaneamente à redução do potencial poluidor e ao aproveitamento energético do biogás produzido.

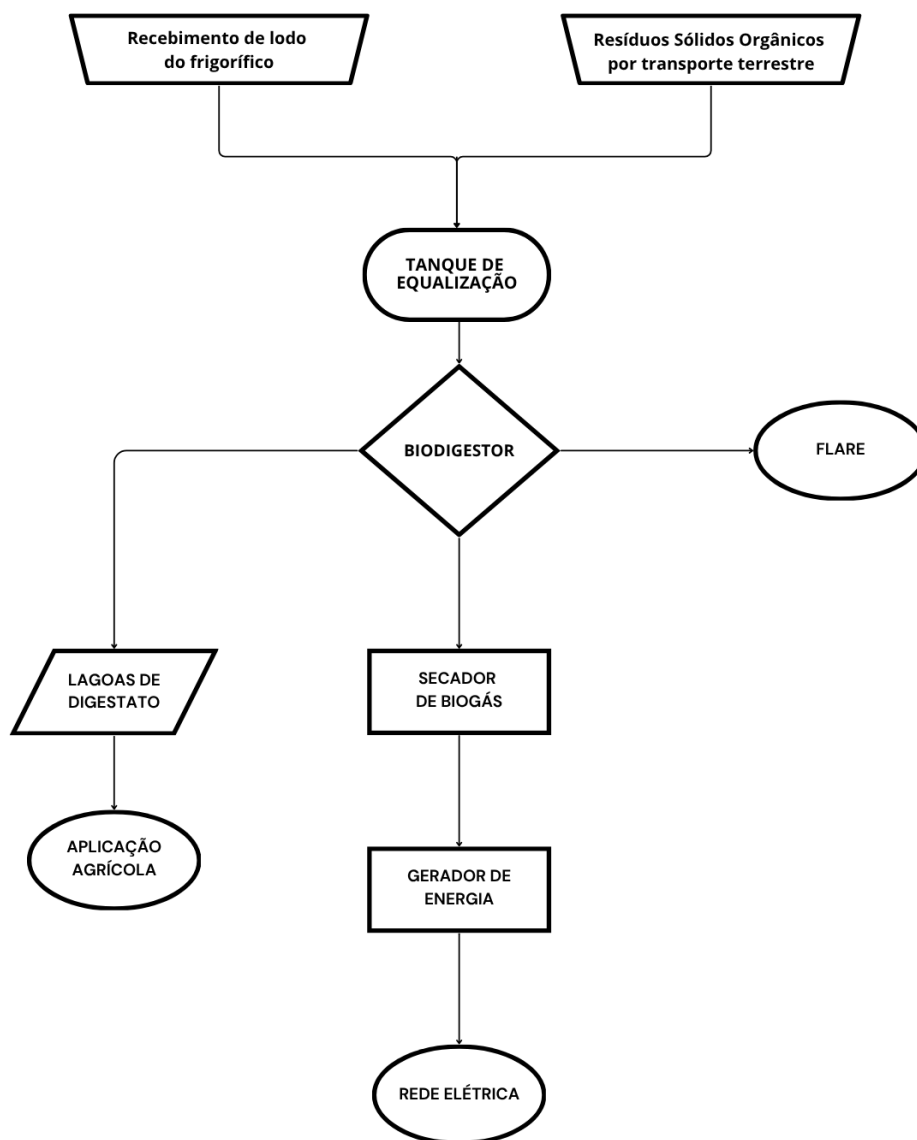
A planta opera de forma contínua, realizando o tratamento dos resíduos orgânicos por meio de um biodigestor anaeróbio do tipo CSTR, associado a um sistema de tratamento do biogás e de geração de energia elétrica.

4.2 Caracterização da planta de biogás

A planta de biogás da unidade industrial é composta pelas etapas de recebimento de resíduos orgânicos, equalização do substrato, digestão anaeróbia, tratamento do biogás, geração de energia elétrica e armazenamento do digestato.

O fluxo operacional simplificado da planta de biogás encontra-se representado na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma do Biodigestor



Fonte: Autoria própria (2026).

Os resíduos orgânicos provenientes do frigorífico podem ser recebidos de duas formas. O lodo líquido gerado no tratamento dos efluentes do frigorífico é encaminhado diretamente aos tanques de recebimento por meio de uma tubulação específica. Já os resíduos sólidos orgânicos e os provenientes de terceiros são descarregados nos tanques de recebimento por meio de transporte terrestre.

O substrato alimentado ao biodigestor consiste predominantemente em lodo proveniente da estação de tratamento de efluentes, podendo receber, complementarmente, outros resíduos orgânicos processados pela unidade.

Após o recebimento, os resíduos são encaminhados ao tanque de equalização e homogeneização, cuja função é promover maior estabilidade

operacional do sistema, reduzindo as variações de volume, de concentração de matéria orgânica e de pH do substrato alimentado ao biodigestor. A homogeneização é realizada com auxílio de agitadores mecânicos.

O substrato homogeneizado é posteriormente bombeado ao biodigestor em pequenas bateladas controladas automaticamente pelo sistema operacional da unidade. O volume diário alimentado é definido com base nas análises operacionais realizadas no substrato.

No interior do biodigestor ocorre a degradação anaeróbia da matéria orgânica, promovida pela ação de microrganismos anaeróbios presentes no sistema. Durante o processo, o substrato é constantemente homogeneizado pelos agitadores mecânicos, favorecendo o contato entre a biomassa e a matéria orgânica e contribuindo para maior estabilidade operacional do sistema.

À medida que o nível interno do biodigestor aumenta, o digestato é automaticamente direcionado para as lagoas de armazenamento pelo sistema de descarte automatizado. A unidade possui duas lagoas retangulares com capacidade de armazenamento de 4.500 m³ cada. Posteriormente, o digestato é destinado à aplicação agrícola por aspersão superficial, em períodos adequados de operação agrícola e em condições climáticas favoráveis.

O biogás gerado durante o processo anaeróbio é encaminhado para a etapa de tratamento, passando inicialmente por condensadores de resfriamento destinados à remoção de umidade. Nesse processo, a temperatura do biogás é reduzida para aproximadamente 7 °C, promovendo a condensação e separação da água presente na mistura gasosa.

Após a remoção da umidade, o biogás passa pela etapa de dessulfurização, utilizando filtros de carvão ativado granular, responsáveis pela adsorção do sulfeto de hidrogênio (H₂S), reduzindo o potencial corrosivo do gás e tornando-o adequado para utilização energética.

Após o tratamento, o biogás é encaminhado aos motogeradores para produção de energia elétrica. A unidade possui quatro motogeradores equipados com motores Scania OC16 e alternadores Stamford, cada um com potência nominal de 300 kW. O metano presente no biogás é utilizado como combustível para o funcionamento dos motores, sendo necessário teor mínimo de aproximadamente 55% de CH₄ para a operação adequada dos geradores.

A energia produzida é utilizada parcialmente para suprir a demanda energética da própria planta de biodigestão, sendo o excedente injetado na rede elétrica da concessionária responsável pelo fornecimento regional.

4.3 Caracterização do reator CSTR

O biodigestor utilizado na unidade industrial é do tipo Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR). Esse modelo caracteriza-se pela operação contínua e pela presença de agitadores mecânicos responsáveis pela homogeneização constante do material presente no interior do reator. Segundo informações fornecidas pela empresa, a agitação do sistema ocorre de forma contínua, embora não tenham sido disponibilizados dados referentes ao volume do reator.

A alimentação do biodigestor é realizada em pequenas bateladas automatizadas ao longo do dia, utilizando substrato previamente homogeneizado no tanque de equalização. O controle operacional do sistema é realizado com base em parâmetros monitorados diariamente pela unidade, incluindo temperatura, volume operacional, tempo de retenção hidráulica e qualidade do biogás produzido.

O biogás gerado é posteriormente encaminhado ao sistema de tratamento e aproveitamento energético da unidade.

4.4 Avaliação do desempenho do biodigestor

Para avaliação do desempenho da planta de biogás e da eficiência de geração de energia do sistema, foram utilizados dados operacionais fornecidos pela unidade industrial, referentes ao funcionamento do biodigestor anaeróbio e dos motogeradores.

Os dados analisados foram obtidos a partir do sistema de monitoramento operacional da planta e organizados em planilhas eletrônicas para posterior tratamento e análise. As variáveis utilizadas no estudo foram:

- temperatura interna do biodigestor (°C);
- concentração de metano no biogás (CH₄, %);
- volume diário de alimentação do biodigestor (m³);
- volume diário de biogás produzido (m³);
- geração diária de energia elétrica (kWh).

A temperatura do biodigestor foi utilizada para avaliar a estabilidade térmica do processo anaeróbio, enquanto a concentração de CH_4 foi empregada como indicador da qualidade energética do biogás produzido.

Os dados de volume de alimentação do biodigestor foram utilizados na análise operacional da carga aplicada ao sistema, enquanto o volume diário de biogás produzido foi relacionado ao desempenho microbiológico do processo anaeróbio e ao potencial de geração de energia da unidade.

Os dados de geração de energia elétrica foram obtidos a partir dos registros operacionais dos motogeradores e utilizados para avaliar o desempenho energético da planta.

4.4.1 Período de monitoramento

Os dados operacionais analisados neste estudo correspondem ao período de 01 de agosto de 2025 a 04 de novembro de 2025, totalizando 96 dias de monitoramento.

Para os estudos de correlação, foram considerados apenas os períodos em que havia disponibilidade simultânea das variáveis avaliadas. Dessa forma, o número de observações variou entre as análises em função da disponibilidade dos dados e dos critérios adotados para o tratamento das informações.

4.4.2 Análise da produção de biogás

A análise da produção de biogás foi realizada com base na avaliação dos volumes diários, da concentração de metano e da temperatura do biodigestor. Foram elaborados gráficos de séries temporais e análises comparativas, para avaliar o comportamento da produção ao longo do período monitorado e sua relação com os parâmetros operacionais da planta.

4.4.3 Análise da geração de energia

A geração diária de energia elétrica foi obtida a partir dos registros operacionais dos motogeradores. Embora a planilha operacional identificasse a variável como "kW gerado", verificou-se que os valores correspondiam à diferença entre as leituras iniciais e finais dos medidores acumulados de energia dos geradores,

o que representa a energia efetivamente produzida no período. Dessa forma, os dados foram tratados neste estudo como energia elétrica gerada, expressa em quilowatt-hora (kWh).

Os valores de geração de energia elétrica foram analisados em conjunto com os dados de produção de biogás e de concentração de metano, permitindo avaliar a influência dessas variáveis sobre o desempenho energético da planta.

4.4.4 Estimativa do potencial energético do biogás

Além da geração efetivamente registrada pelos motogeradores, estimou-se o potencial teórico de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido. Para essa estimativa, adotou-se o potencial energético médio do metano de 9,97 kWh/m³, conforme a Associação Brasileira do Biogás e do Biometano (2020).

A unidade de geração é composta por quatro motogeradores equipados com motores Scania OC16 e alternadores Stamford, com potência nominal individual de 300 kW. Para a estimativa do potencial energético do biogás, adotou-se uma eficiência elétrica de conversão de 40%, valor representativo da faixa de 30% a 45% reportada na literatura técnica para motogeradores a biogás de combustão interna (Salomon; Lora, 2009; IEA BIOENERGY, 2021).

Esse valor foi utilizado exclusivamente para a estimativa teórica do potencial de geração de energia elétrica, permitindo a comparação com a energia efetivamente gerada pelos motogeradores da unidade industrial.

A estimativa do potencial teórico de geração de energia elétrica foi realizada com base no balanço energético do metano contido no biogás produzido, considerando o volume de biogás gerado, a fração volumétrica de metano e seu potencial energético e a eficiência de conversão elétrica dos motogeradores, conforme apresentado na Equação 1:

(1)

$$E_{pot} = V_{bg} \times X_{CH_4} \times 9,97 \times \eta$$

Onde:

- E_{pot} = energia elétrica potencial (kWh);
- V_{bg} = volume diário de biogás produzido (m³);

- X_{CH_4} = fração volumétrica de metano no biogás;
- 9,97 = potencial energético médio do metano (kWh/Nm³);
- η = eficiência elétrica de conversão adotada para os motogeradores (0,40).

Os valores obtidos foram comparados à geração real de energia elétrica registrada pela unidade, o que permitiu avaliar o aproveitamento energético do biogás produzido. Adicionalmente, foi calculado o índice de aproveitamento energético do sistema, obtido pela razão entre a energia elétrica efetivamente gerada e a energia elétrica potencial estimada a partir do biogás produzido, expresso em porcentagem por meio de Equação 2:

(2)

$$\eta_{ap} = \frac{E_{gerada}}{E_{pot}} \times 100$$

Onde:

- η_{ap} = aproveitamento energético do sistema (%);
- E_{gerada} = energia elétrica efetivamente gerada (kWh);
- E_{pot} = energia elétrica potencial estimada (kWh).

Os volumes de biogás foram utilizados conforme registrados pelo sistema operacional da unidade. Como não foram disponibilizadas informações sobre eventuais correções para condições normais de temperatura e pressão (Nm³), os cálculos foram realizados com base nos valores fornecidos pela empresa, o que deve ser considerado na interpretação dos resultados.

Como o cálculo do potencial energético depende simultaneamente dos dados de volume de biogás e concentração de metano, a estimativa foi realizada apenas para os períodos em que ambas as informações estavam disponíveis.

4.5 Tratamento e análise dos dados

Os dados foram organizados e tratados em planilhas eletrônicas no Microsoft Excel®. Inicialmente, foram identificados inconsistências, valores ausentes e registros anômalos. Nos conjuntos de dados diários, foram excluídos registros que

apresentavam indícios de acúmulo de leituras, identificados por valores significativamente superior ao padrão operacional observado e frequentemente associados à ausência de registros nos dias anteriores, com o objetivo de reduzir possíveis distorções nos resultados.

Para a avaliação em escala mensal, os dados foram agrupados e somados por mês e utilizados integralmente em análises comparativas e de correlação, incluindo registros acumulados, uma vez que passaram a representar a produção total do período.

Para a avaliação das relações entre os parâmetros operacionais e energéticos da planta, foram elaborados, adicionalmente, gráficos de dispersão com linha de tendência linear. A intensidade da relação entre as variáveis foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2), enquanto a equação da reta foi utilizada para representar matematicamente a tendência observada nos dados analisados.

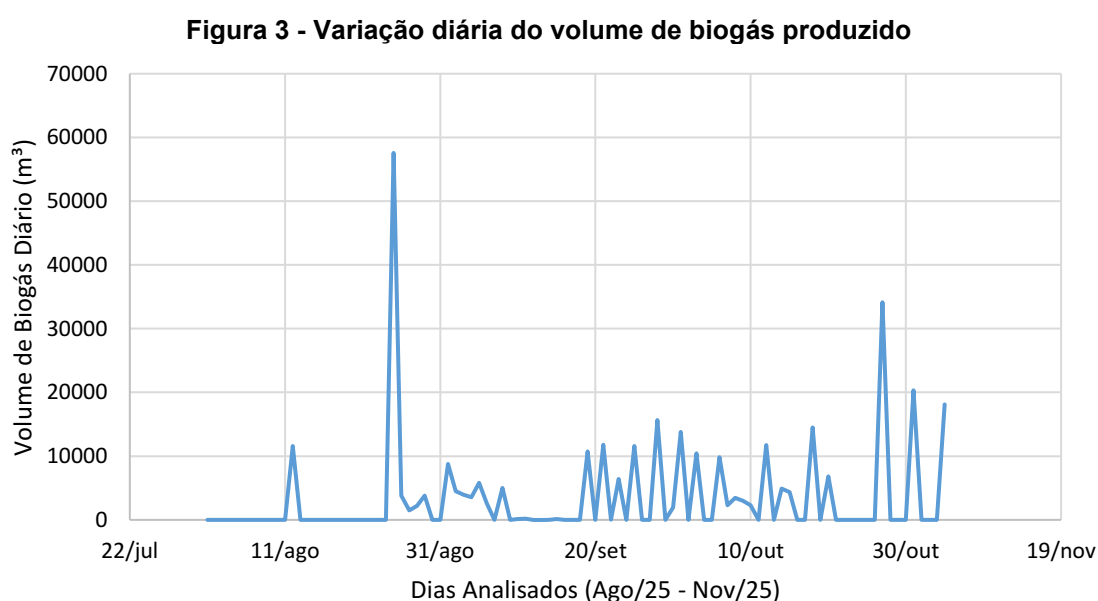
Os gráficos e as análises comparativas foram elaborados em escala diária e/ou mensal, conforme a disponibilidade dos dados e os objetivos específicos de cada avaliação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises de correlação realizadas em escala mensal devem ser interpretadas com cautela, uma vez que foram baseadas em apenas quatro observações correspondentes aos meses avaliados e os dados do mês de novembro correspondem apenas aos quatro primeiros dias do mês, uma vez que o período de monitoramento foi encerrado em 04 de novembro de 2025. Apesar dessa limitação, os resultados foram mantidos por permitirem uma visão global do comportamento da planta ao longo do período de estudo.

5.1 Produção de biogás

A Figura 3 apresenta a variação diária do volume de biogás produzido pela planta entre os dias 01 de agosto e 04 de novembro de 2025. Durante esse período, foram analisados 96 dias consecutivos, dos quais 40 apresentavam registros de volume de biogás disponível. Assim, os períodos sem valores observados no gráfico não devem ser interpretados como ausência de produção, mas como datas em que não havia registros disponíveis. Para esta análise foram considerados todos os dados fornecidos pela unidade, incluindo registros que apresentaram indícios de acúmulo de leituras, com o objetivo de representar o comportamento operacional geral da planta ao longo do período monitorado.



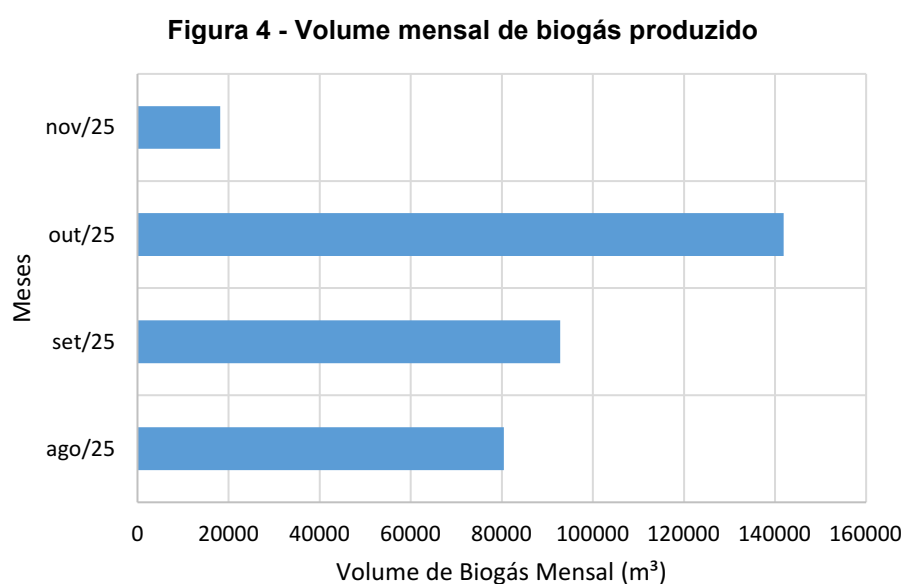
Fonte: Autoria própria (2026).

Verifica-se que a produção de biogás apresentou oscilações significativas entre os dias analisados, com períodos de baixa produção intercalados por picos expressivos de geração. Os maiores volumes registrados ocorreram principalmente no final do mês de agosto e no final de outubro, destacando-se valores substancialmente superiores aos observados na maior parte do período.

Alguns desses picos podem estar relacionados ao acúmulo de leituras operacionais, especialmente quando precedidos por dias sem registro de produção ou com valores reduzidos. No entanto, optou-se por manter esses dados na análise por representarem os registros efetivamente obtidos durante a operação da planta.

De modo geral, o gráfico evidencia a variabilidade da produção de biogás ao longo do período estudado, refletindo as oscilações inerentes ao processo de digestão anaeróbia e às condições operacionais da unidade. Essa análise permite uma visão geral do desempenho da planta e auxilia na interpretação dos resultados apresentados nos gráficos de correlação discutidos posteriormente.

A Figura 4 apresenta o volume mensal de biogás produzido pela planta entre agosto e novembro de 2025. Para sua elaboração, foram somados os volumes diários registrados em cada mês, permitindo avaliar o comportamento da produção em uma escala temporal mais ampla.



Fonte: Autoria própria (2026).

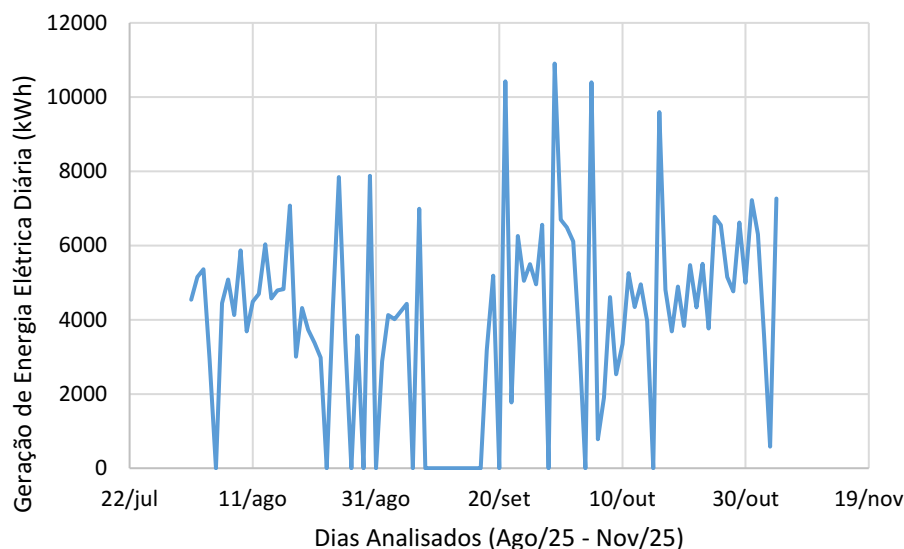
Observa-se um aumento gradual da produção de biogás entre agosto e outubro. Em agosto, foram produzidos aproximadamente 80.449 m³ de biogás, enquanto, em setembro, esse volume aumentou para 92.786 m³. A maior produção foi registrada em outubro, totalizando 141.865 m³.

A análise dos valores mensais permite observar com mais clareza a evolução da produção ao longo do período estudado, reduzindo a influência das oscilações observadas nos registros diários. O aumento observado entre agosto e outubro sugere um melhor desempenho operacional da planta nesse período, refletido pelo crescimento do volume total de biogás produzido.

Dessa forma, a avaliação mensal complementa a análise diária e contribui para uma compreensão mais abrangente do comportamento da unidade de biodigestão no período monitorado. Com base nessa caracterização da produção de biogás, as próximas análises abordam a geração de energia elétrica e sua relação com os parâmetros operacionais do sistema.

5.2 Geração de energia

A Figura 5 apresenta a variação diária da geração de energia elétrica da planta entre os dias 01 de agosto e 04 de novembro de 2025. Para esta análise foram considerados todos os dias do período monitorado, o que permitiu avaliar o comportamento da geração elétrica ao longo do tempo, bem como identificar oscilações e eventuais interrupções operacionais.

Figura 5 - Variação diária da geração de energia elétrica

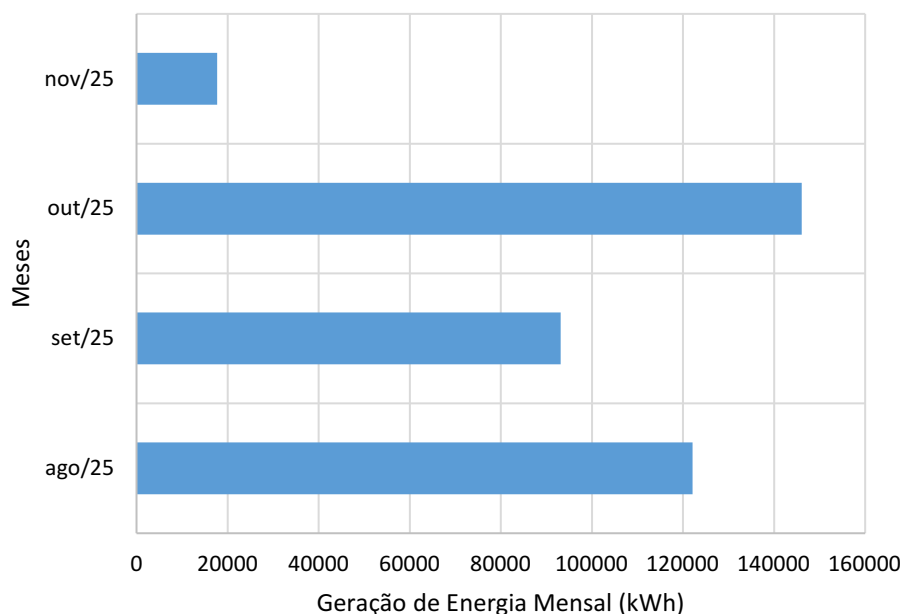
Fonte: Autoria própria (2026).

Durante os 96 dias avaliados, foram registrados dados de geração de energia em 76 dias. Dessa forma, os períodos sem registro de geração correspondem efetivamente a dias sem produção de energia elétrica. Essas interrupções podem estar relacionadas a fatores operacionais, como manutenções programadas dos motogeradores, paradas para ajustes no sistema ou indisponibilidade temporária de biogás para a alimentação dos equipamentos.

De modo geral, observa-se que a geração de energia foi mantida ao longo da maior parte do período analisado, com valores predominantemente entre 3.000 e 7.000 kWh por dia. Em alguns momentos foram registrados picos superiores a 9.000 kWh, indicando períodos de maior aproveitamento energético da planta.

Apesar das oscilações observadas, o gráfico demonstra que a unidade operou de forma relativamente contínua ao longo do período monitorado, mantendo a conversão do biogás em energia elétrica durante a maior parte dos dias analisados. A análise desses dados fornece uma visão geral do desempenho energético da planta e serve de base para as correlações apresentadas nos tópicos seguintes.

A Figura 6 apresenta a variação mensal da geração de energia elétrica da planta entre os meses de agosto e novembro de 2025. Para sua elaboração, foram somados os valores diários de energia gerada em cada mês, permitindo avaliar o comportamento da geração elétrica ao longo do período monitorado.

Figura 6 - Variação mensal da geração de energia elétrica

Fonte: Autoria própria (2026).

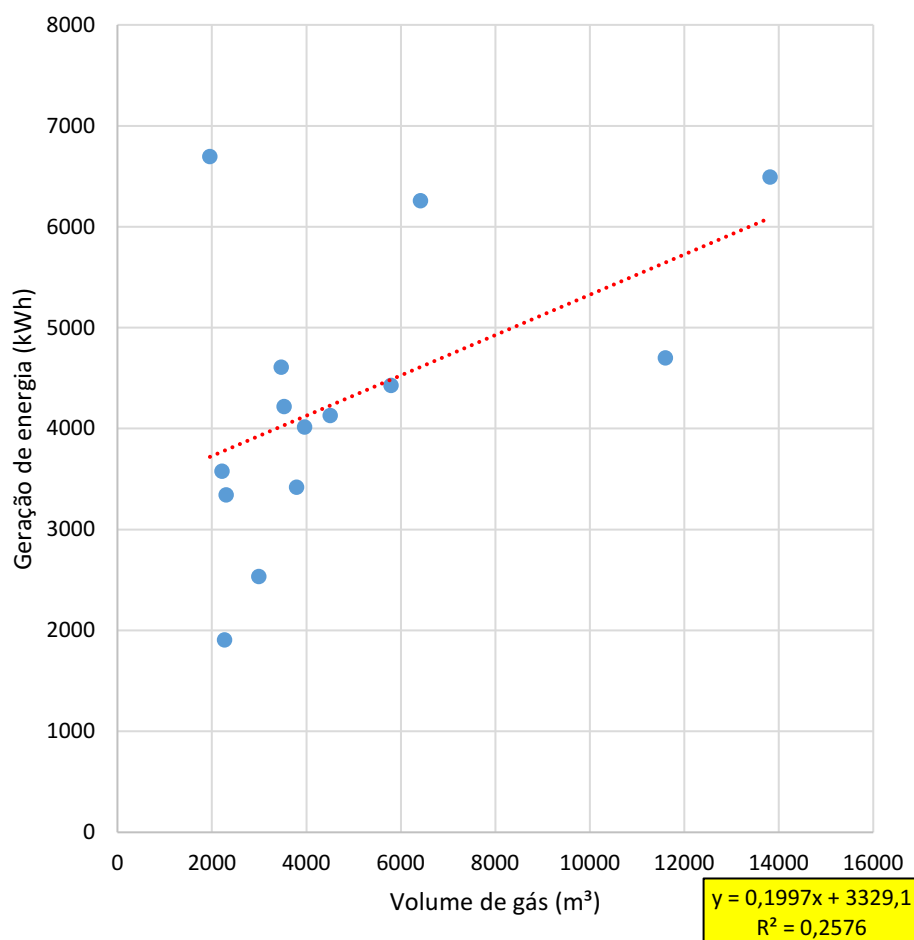
Em agosto foram gerados aproximadamente 122.119 kWh de energia elétrica. No mês de setembro, a geração total foi de 93.148 kWh, valor inferior ao observado no mês anterior. Essa redução pode estar relacionada ao menor número de dias com geração registrada, uma vez que apenas 17 dias apresentaram produção de energia ao longo do mês. Em outubro foi registrado o maior volume de geração do período analisado, totalizando 146.094 kWh.

A avaliação dos dados em escala mensal permite uma melhor visualização do desempenho da unidade, reduzindo a influência das oscilações observadas nos registros diários. De forma geral, observa-se que a geração de energia variou ao longo do período monitorado, com destaque para o aumento registrado em outubro, quando se registrou o maior volume de energia elétrica produzida.

5.3 Relação entre biogás e geração de energia

A Figura 7 apresenta a relação entre o volume diário de biogás produzido e a geração diária de energia elétrica ao longo do período analisado. Para esta avaliação foram utilizadas 14 observações, correspondentes aos registros em que ambas as variáveis estavam disponíveis.

Figura 7 - Relação entre a produção diária de biogás e a geração diária de energia elétrica



Fonte: Autoria própria (2026).

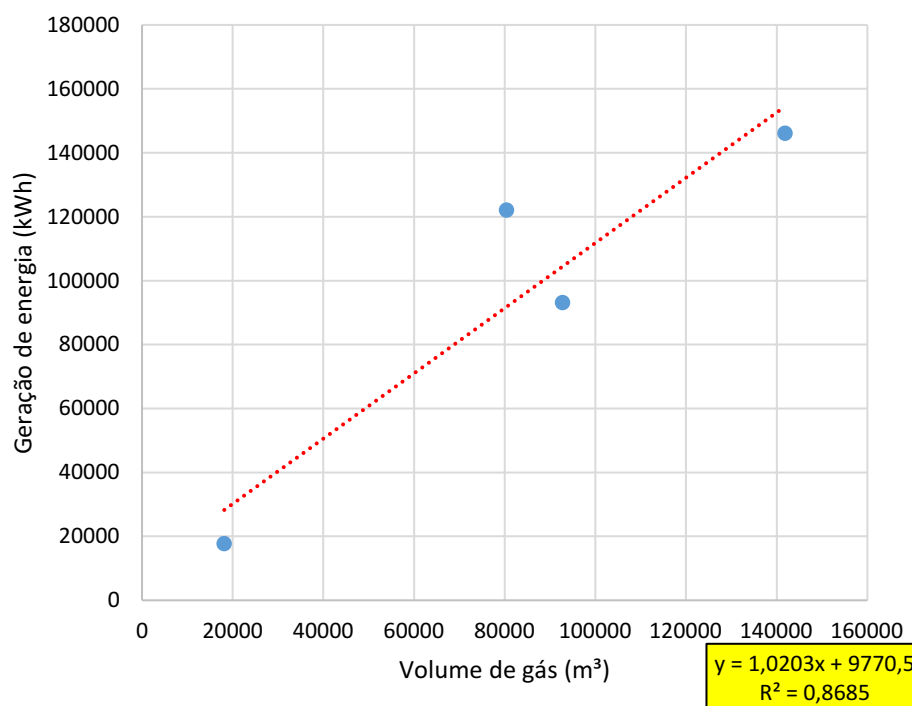
A linha de tendência obtida foi representada pela equação $y = 0,1997x + 3329,1$, indicando uma tendência de aumento da geração de energia à medida que ocorre aumento do volume de biogás produzido. Entretanto, observa-se uma dispersão considerável dos pontos em torno da reta de tendência.

O coeficiente de determinação obtido foi de $R^2 = 0,2576$, indicando baixa correlação entre as variáveis quando avaliadas em escala diária. Esse resultado demonstra que a produção de biogás, isoladamente, não foi suficiente para explicar as variações observadas na geração de energia elétrica no período monitorado.

A dispersão dos dados sugere a influência de outros fatores operacionais no desempenho energético da planta, como a qualidade do biogás, a disponibilidade dos motogeradores e as condições de operação do sistema. Dessa forma, embora exista uma tendência positiva entre as variáveis, a relação observada mostrou-se relativamente fraca na escala diária.

A Figura 8 apresenta a relação entre a produção mensal de biogás e a geração mensal de energia elétrica no período analisado. Para sua elaboração, foram utilizados os volumes totais de biogás produzidos e os valores totais de energia gerada em cada mês de monitoramento.

Figura 8 - Relação entre a produção mensal de biogás e a geração mensal de energia elétrica



Fonte: Autoria própria (2026).

A análise dos dados mostra que os meses com maior produção de biogás também apresentaram maiores valores de geração de energia elétrica. Essa tendência pode ser observada pela inclinação positiva da linha de tendência, representada pela equação $y = 1,0203x + 9770,5$.

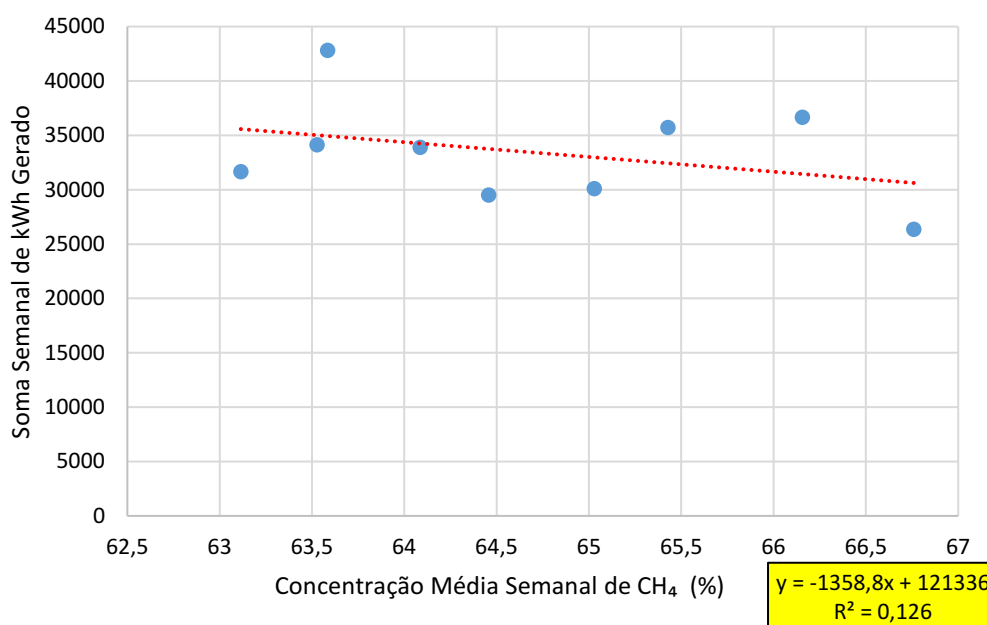
O coeficiente de determinação obtido foi de $R^2 = 0,8685$, indicando uma forte relação entre as variáveis quando analisadas em escala mensal. Esse resultado difere significativamente da análise diária apresentada anteriormente, na qual se observou maior dispersão dos dados e menor correlação entre os parâmetros avaliados.

A consolidação dos dados por mês reduz o efeito das oscilações observadas ao longo da operação da planta, permitindo visualizar com mais clareza a relação entre a disponibilidade de biogás e a geração de energia elétrica. Dessa forma, os resultados sugerem que o aumento da produção de biogás esteve associado ao aumento da geração de energia no período monitorado.

5.4 Influência do metano na geração energética

A Figura 9 apresenta a relação entre a concentração média semanal de metano no biogás e a geração semanal de energia elétrica ao longo do período de monitoramento. Para esta análise, foram considerados 61 dias com registros simultâneos das variáveis, agrupados sequencialmente em períodos de sete dias, sendo o último composto por cinco dias, totalizando nove semanas de observação.

Figura 9 – Relação semanal entre a concentração de metano e a geração de energia elétrica



Fonte: Autoria própria (2026).

A equação da linha de tendência obtida foi $y = -1358,8x + 121336$. Embora a reta apresente inclinação negativa, os pontos permanecem relativamente dispersos no gráfico, não sendo possível identificar uma relação clara entre a concentração média semanal de metano e a geração de energia elétrica. Dessa forma, a tendência negativa observada não deve ser interpretada como indicativo de que maiores teores de metano resultem em menor geração de energia, uma vez que a dispersão dos dados demonstra a ausência de uma relação linear significativa entre as variáveis.

O coeficiente de determinação encontrado foi de $R^2 = 0,126$, indicando uma correlação fraca entre as variáveis analisadas. Esse resultado demonstra que a concentração de metano, quando avaliada isoladamente, apresentou baixa

capacidade de explicar as variações observadas na geração de energia elétrica ao longo do período estudado.

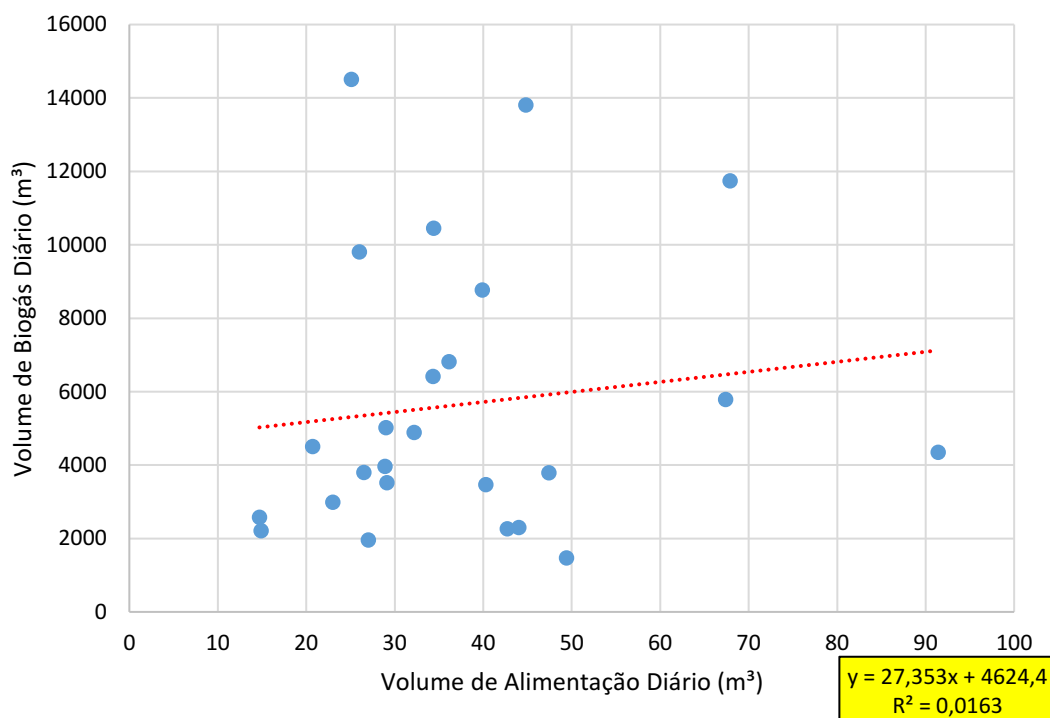
Um fator que pode ter contribuído para esse comportamento foi a pequena variação da concentração de metano durante o monitoramento. Os teores médios semanais de CH_4 permaneceram relativamente estáveis, enquanto a geração de energia apresentou oscilações mais expressivas entre as semanas analisadas. Dessa forma, os resultados sugerem que outros fatores operacionais exerceram maior influência na geração de energia elétrica da planta.

Além disso, a geração de energia não depende exclusivamente da qualidade do biogás, mas também da quantidade disponível para consumo e das condições de operação dos motogeradores. Assim, a concentração de metano representa apenas um dos fatores envolvidos no desempenho energético do sistema, o que ajuda a explicar a baixa correlação observada entre as variáveis.

5.5 Relação entre alimentação e produção de biogás

A Figura 10 apresenta a relação entre o volume diário de alimentação do biodigestor e o volume diário de biogás produzido. Para esta análise, foram considerados 25 registros com disponibilidade simultânea das duas variáveis.

Figura 10 - Variação diária entre o volume de alimentação do biodigestor e o volume de biogás produzido



Fonte: Autoria própria (2026).

A linha de tendência obtida foi representada pela equação $y = 27,353x + 4624,4$. Apesar de apresentar inclinação positiva, observa-se grande dispersão dos dados, indicando que o aumento do volume de alimentação não resultou, necessariamente, em maiores volumes de biogás produzidos no mesmo dia.

O coeficiente de determinação encontrado foi de $R^2 = 0,0163$, evidenciando uma correlação muito baixa entre as variáveis analisadas. Esse resultado sugere que a quantidade de substrato alimentada diariamente não exerceu influência imediata sobre a produção diária de biogás no período monitorado.

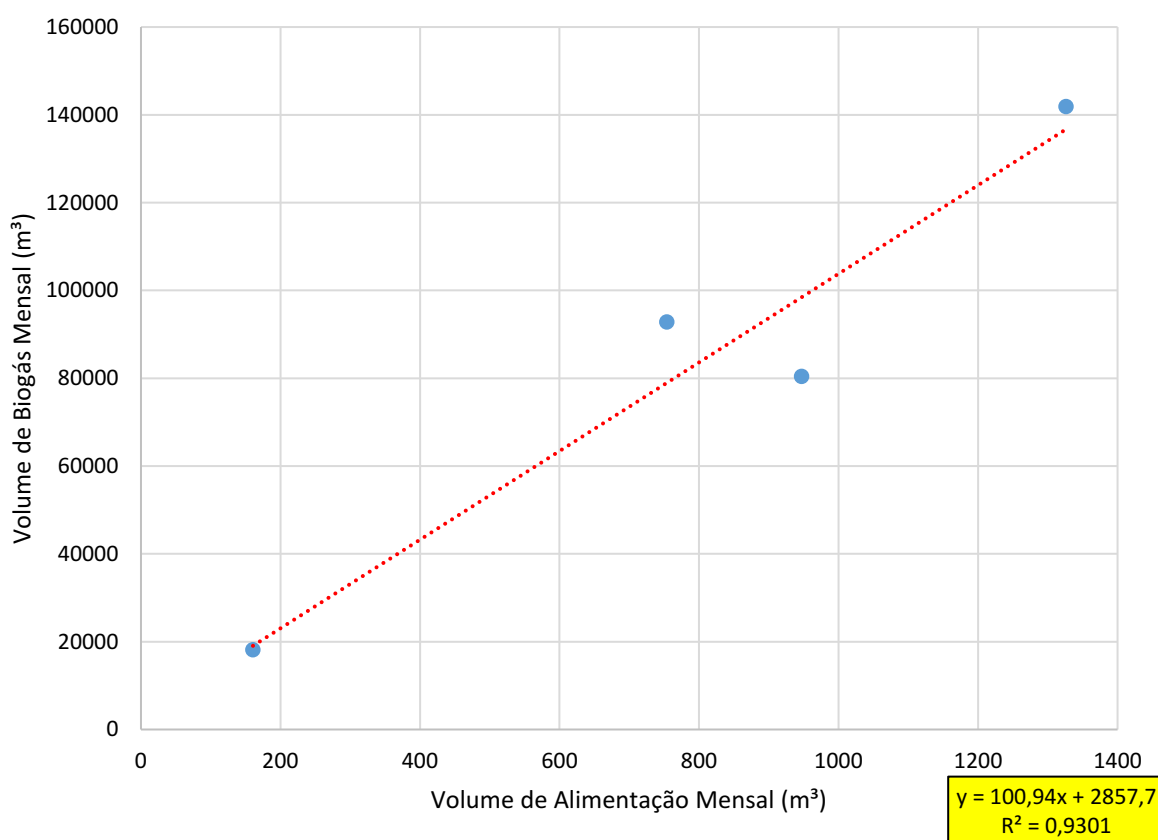
Uma possível explicação para esse comportamento está relacionada ao próprio funcionamento do processo de digestão anaeróbia. Conforme descrito por Chernicharo (2016), a produção de biogás depende do tempo de permanência do substrato no interior do biodigestor, representado pelo TRH. Dessa forma, o biogás gerado em determinado dia não está necessariamente associado apenas à alimentação realizada naquele mesmo período, mas também à degradação da matéria orgânica introduzida nos dias anteriores.

Dessa forma, a baixa correlação observada era esperada em uma análise em escala diária, uma vez que há um intervalo entre a entrada do substrato no sistema e

sua conversão em biogás. Portanto, a influência da alimentação tende a ser melhor observada quando avaliada em períodos de operação mais amplos.

A Figura 11 apresenta a relação mensal entre o volume de alimentação do biodigestor e a produção de biogás. Para sua elaboração, foram utilizados os valores totais mensais de alimentação e de biogás produzido, obtidos pela soma dos registros diários de cada variável.

Figura 11 - Relação mensal entre o volume de alimentação do biodigestor e a produção de biogás



Fonte: Autoria própria (2026).

A equação da linha de tendência foi representada por $y = 100,94x + 2857,7$. Observa-se que os meses com maiores volumes de alimentação também apresentaram maiores volumes de biogás produzido.

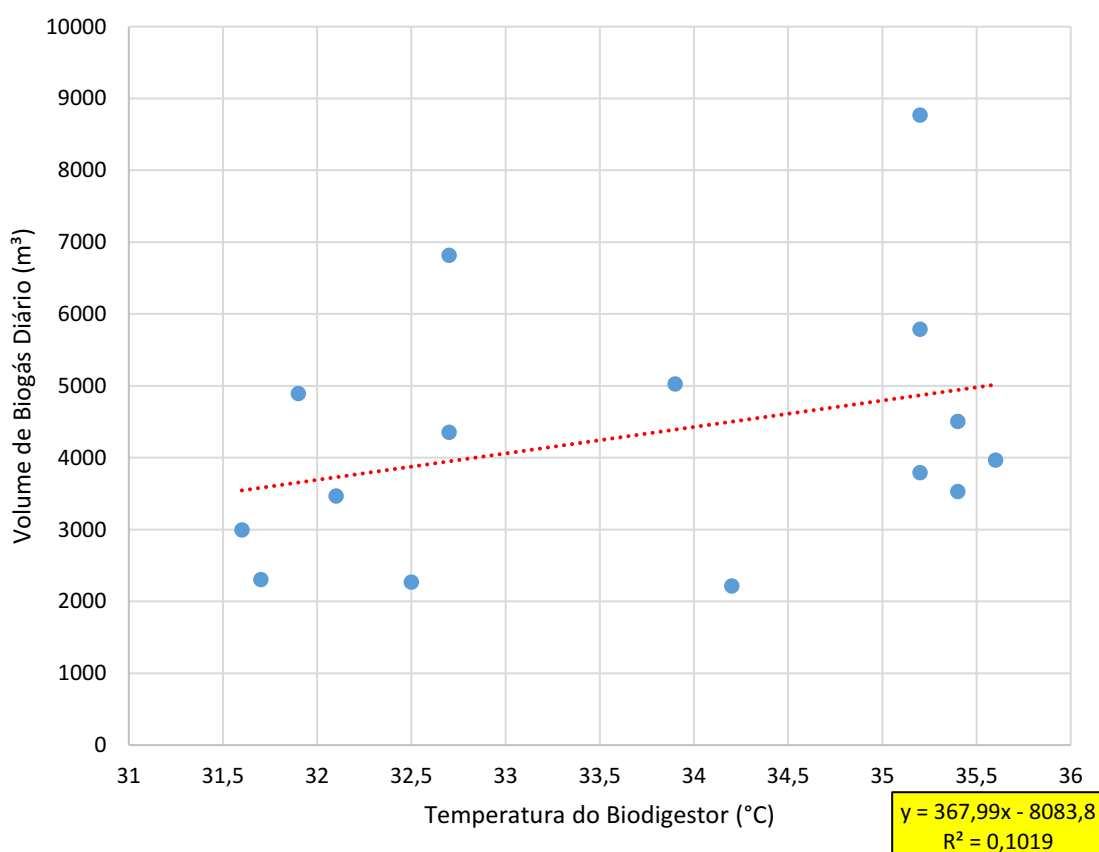
O coeficiente de determinação obtido foi de $R^2 = 0,9301$, indicando forte correlação entre as variáveis quando avaliadas em escala mensal. Esse resultado contrasta com a baixa correlação observada na análise diária (Figura 10), sugerindo que a relação entre alimentação e produção de biogás torna-se mais evidente quando considerada ao longo de períodos mais longos.

A análise mensal permite representar de forma mais adequada a dinâmica do processo de digestão anaeróbia, uma vez que incorpora os efeitos do tempo de retenção hidráulica e da degradação gradual da matéria orgânica no interior do biodigestor. Dessa forma, os resultados indicam que a disponibilidade de substrato exerceu influência significativa sobre a produção de biogás durante o período monitorado.

5.6 Influência da temperatura na produção de biogás

A Figura 12 apresenta a relação entre a temperatura do biodigestor e o volume diário de biogás produzido. Para esta análise, foram utilizados 15 registros com disponibilidade simultânea de ambas as variáveis.

Figura 12 - Relação entre a temperatura do biodigestor e o volume de biogás produzido



Fonte: Autoria própria (2026).

A equação da linha de tendência foi representada por $y = 367,99x - 8083,8$. Embora a reta apresente inclinação positiva, observa-se dispersão considerável dos dados, sem relação claramente definida entre as variáveis.

O coeficiente de determinação obtido foi de $R^2 = 0,1019$, indicando baixa correlação entre a temperatura do biodigestor e a produção diária de biogás durante o período analisado.

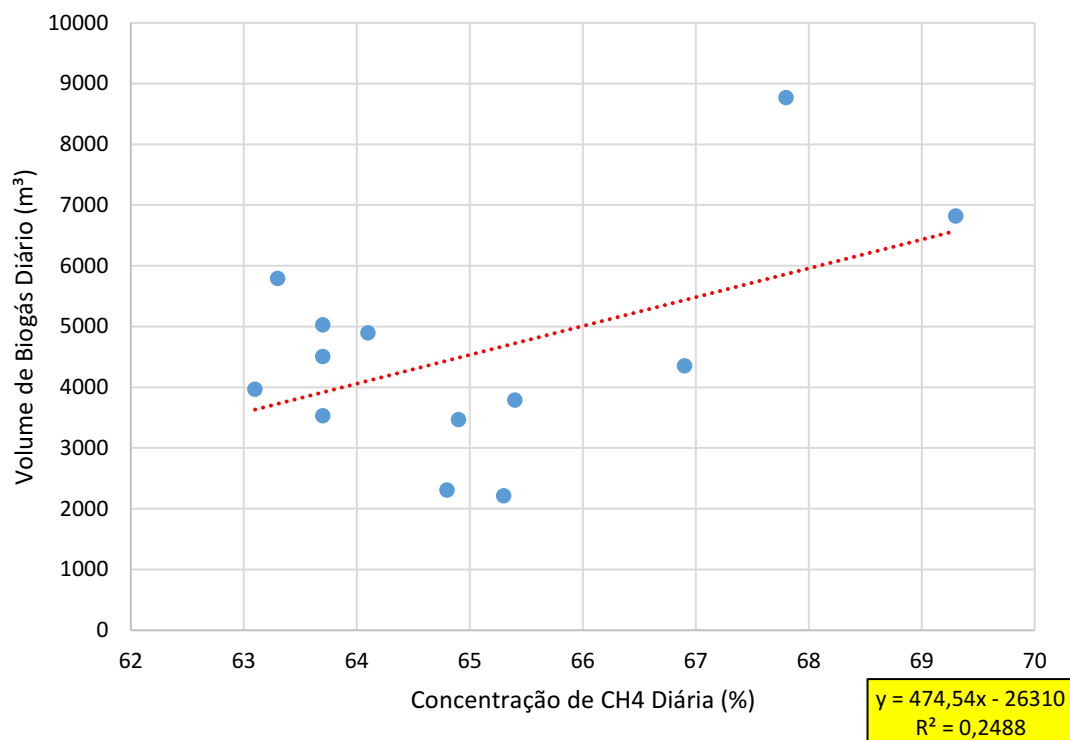
Um fator que pode ter contribuído para esse resultado é a pequena amplitude de variação da temperatura observada ao longo do monitoramento. Os valores registrados permaneceram entre 31,5 °C e 35,6 °C, faixa que se enquadra nas condições mesofílicas descritas por Kunz, Amaral e Steinmetz (2019), consideradas adequadas para a operação de sistemas anaeróbios devido à sua estabilidade operacional.

De acordo com Appels *et al.* (2008), a manutenção de condições térmicas estáveis é fundamental para a atividade microbiológica e para a eficiência da produção de metano. Nesse contexto, a baixa variação observada na temperatura pode ter contribuído para a estabilidade do processo, reduzindo a influência desse parâmetro sobre as oscilações na produção de biogás.

5.7 Relação entre o metano e a produção de biogás

A Figura 13 apresenta a relação entre a concentração de metano no biogás e o volume diário de biogás produzido. Para esta análise, foram utilizados 13 registros em que havia disponibilidade simultânea das duas variáveis.

Figura 13 - Relação entre a concentração de metano (CH₄) e o volume de biogás produzido



Fonte: Autoria própria (2026).

A linha de tendência obtida foi representada pela equação $y = 474,54x - 26310$. Observa-se uma tendência positiva entre as variáveis, porém com considerável dispersão dos dados, o que indica que o aumento da concentração de metano não esteve necessariamente associado a maiores volumes de biogás produzidos.

O coeficiente de determinação obtido foi de $R^2 = 0,2488$, indicando baixa correlação entre a concentração de metano e o volume de biogás produzido. Esse resultado sugere que as variações observadas na produção de biogás não podem ser explicadas apenas pelo teor de CH₄.

Embora o teor de metano não tenha apresentado relação direta com o aumento da produção de biogás, os valores registrados permaneceram entre 63% e 69%, faixa considerada elevada para biogás proveniente da digestão anaeróbia. Conforme apresentado no referencial teórico, o metano é o principal componente energético do biogás e pode representar entre 50% e 70% de sua composição (ABIOGAS, 2020; Milanez *et al.*, 2018).

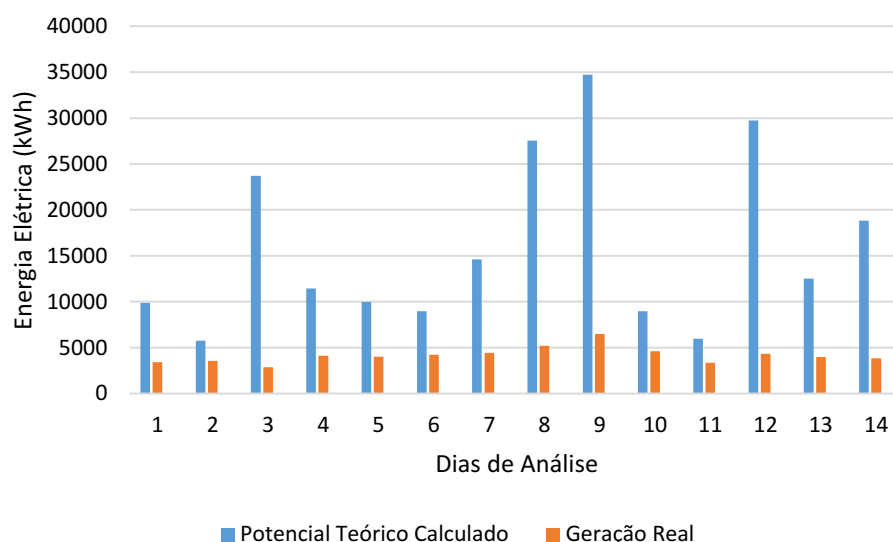
Dessa forma, os resultados indicam que, apesar da baixa correlação com o volume produzido, o biogás gerado durante o período monitorado apresentou elevada

concentração de metano, característica associada a um maior potencial energético. Esse aspecto torna-se particularmente relevante quando se analisa o aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica, tema abordado no tópico seguinte.

5.8 Potencial energético

A Figura 14 apresenta a relação entre o potencial teórico diário de geração de energia elétrica e a geração real observada durante o período de monitoramento. Para esta análise foram utilizados 14 registros com disponibilidade simultânea dos dados necessários para o cálculo do potencial energético e da energia efetivamente gerada.

Figura 14 - Comparação entre o potencial teórico e a geração real diária de energia elétrica



Fonte: Autoria própria (2026).

O potencial teórico foi estimado a partir da Equação 1, considerando o volume de biogás produzido, a concentração de metano no biogás e o potencial energético médio do metano, conforme descrito na literatura.

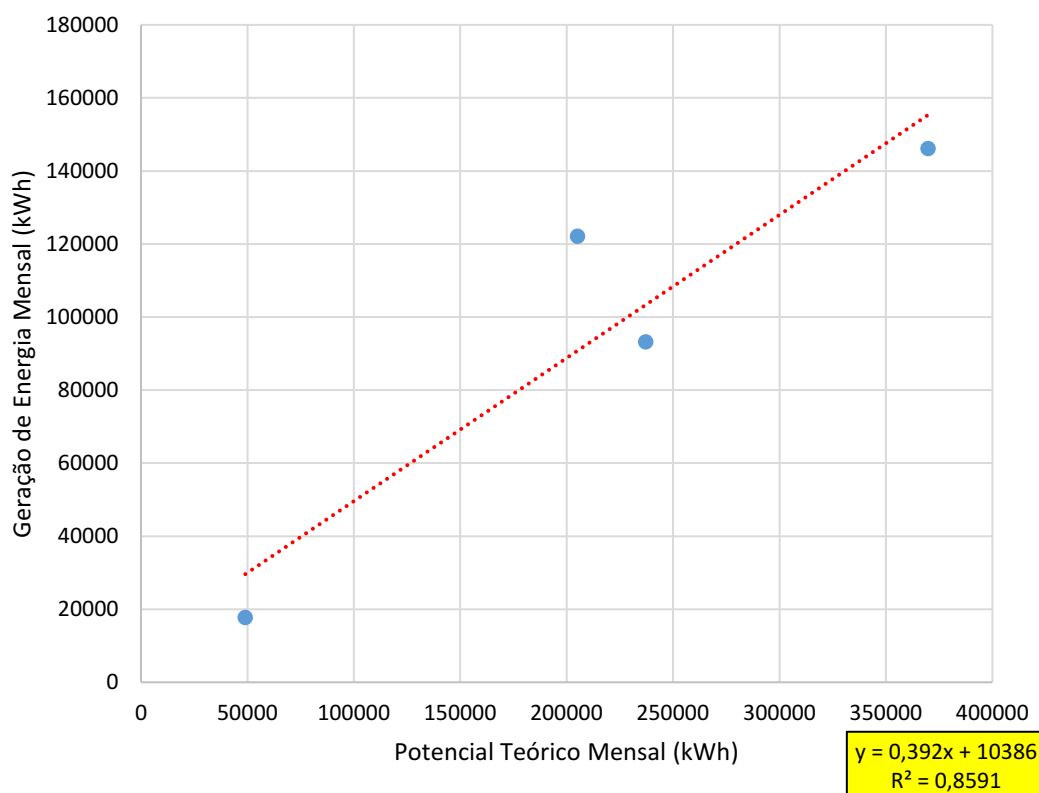
De modo geral, observa-se que as variações no potencial teórico foram acompanhadas pelo comportamento da geração real de energia elétrica, de forma que períodos com maiores valores de energia potencial tenderam a apresentar maiores valores de geração efetiva. Entretanto, a diferença entre as duas curvas evidencia que apenas uma parcela da energia potencialmente disponível no biogás foi convertida em energia elétrica.

Verifica-se ainda que a geração real apresentou menor amplitude de variação em comparação ao potencial teórico calculado, indicando que o aproveitamento energético do sistema não ocorreu de maneira proporcional em todos os períodos analisados. Esse comportamento sugere a influência de fatores operacionais adicionais sobre o desempenho dos motogeradores, além da própria disponibilidade energética do biogás produzido.

A diferença observada entre o potencial teórico e a energia efetivamente gerada pode ser atribuída às limitações inerentes ao processo de conversão energética, incluindo perdas associadas à eficiência dos motogeradores, à disponibilidade dos equipamentos, à eventuais períodos de manutenção e às condições operacionais da planta. Dessa forma, nem toda a energia potencialmente contida no biogás produzido é convertida em energia elétrica, o que reforça a importância da avaliação conjunta entre o potencial energético estimado e o desempenho real do sistema, essa diferença pode ser quantificada por meio do índice de aproveitamento energético do sistema, apresentado no item 5.8.1.

A Figura 15 apresenta a relação mensal entre o potencial teórico de geração de energia elétrica e a geração real observada durante o período de monitoramento. Para esta análise, o potencial energético mensal foi calculado a partir da soma dos volumes de biogás produzidos em cada mês e da concentração média mensal de metano, aplicados à Equação 1. Os resultados obtidos foram comparados com os valores totais de energia elétrica efetivamente gerada em cada mês.

Figura 15 - Relação mensal entre o potencial teórico de geração de energia e a geração real



Fonte: Autoria própria (2026).

A linha de tendência foi representada pela equação $y = 0,392x + 10386$. Observa-se uma relação positiva entre as variáveis, indicando que os meses com maior potencial teórico de geração também apresentaram maiores valores de energia elétrica gerada.

O coeficiente de determinação obtido foi de $R^2 = 0,8591$, indicando forte correlação entre o potencial energético estimado e a geração real de energia elétrica. Esse resultado é significativamente superior ao observado na análise diária ($R^2 = 0,3461$), demonstrando que a relação entre as variáveis se torna mais evidente quando analisada em períodos mais amplos.

A agregação dos dados em escala mensal reduz a influência das oscilações operacionais observadas ao longo dos dias, permitindo uma representação mais consistente do comportamento do sistema. Dessa forma, o potencial energético calculado a partir do volume de biogás produzido e da concentração de metano apresentou boa capacidade de representar a geração elétrica efetivamente obtida ao longo do período analisado.

Apesar da forte correlação observada, nota-se que a energia gerada permaneceu inferior ao potencial teórico estimado em todos os meses avaliados. Esse comportamento era esperado, uma vez que o potencial energético representa uma condição ideal de aproveitamento do biogás, enquanto a geração real está sujeita a limitações operacionais e perdas inerentes ao processo de conversão energética.

Os resultados obtidos indicam que o biogás produzido pelo sistema apresentou elevado potencial de aproveitamento energético e que a geração elétrica acompanhou de forma consistente a disponibilidade energética do biogás ao longo do período monitorado.

5.8.1 Índice de aproveitamento energético do sistema

O índice de aproveitamento energético do sistema foi calculado por meio da Equação 2, utilizando os valores de energia elétrica efetivamente gerada e de energia elétrica potencial estimada a partir da produção de biogás e da concentração de metano.

Para a análise diária foram considerados os mesmos 14 registros utilizados na comparação entre o potencial teórico e a geração real de energia elétrica. Os valores obtidos variaram entre 12,13% e 62,03%, com média de 33,43%, indicando variações significativas no desempenho do sistema ao longo do período analisado, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Aproveitamento energético diário do sistema (continua)

Energia Potencial (kWh)	Energia Real Gerada (kWh)	Índice de Aproveitamento Energético (%)
9884,89608	3418,0000	34,58
5763,014932	3575,0000	62,03
23712,88728	2877,0000	12,13
11444,30378	4127,0000	36,06
9980,153448	4015,0000	40,23
8959,835612	4218,0000	47,08
14616,29916	4426,0000	30,28
27556,62138	5189,0000	18,83
34706,84616	6490,0000	18,70
8973,331004	4607,0000	51,34
5956,63632	3343,0000	56,12
29735,20596	4340,0000	14,60

Tabela 1 - Aproveitamento energético diário do sistema (conclusão)

12510,57135	3967,0000	31,71
18842,79751	3837,0000	20,36

Fonte: Autoria própria (2026)

Em escala mensal, os índices de aproveitamento energético obtidos foram de 59,54%, 39,27%, 39,51% e 36,18% nos meses avaliados, resultando em média de 43,62%, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Aproveitamento energético mensal do sistema

Energia Potencial Mensal (kWh)	Energia Mensal Gerada (kWh)	Índice Mensal de Aproveitamento Energético (%)
205087,7604	122119,0000	59,54
237189,5941	93148,0000	39,27
369787,8844	146094,0000	39,51
49007,76365	17732,0000	36,18

Fonte: Autoria própria (2026)

Assim como observado nas demais análises, a agregação dos dados em períodos mais amplos reduziu a influência das oscilações diárias e permitiu uma avaliação mais representativa do desempenho global do sistema.

Considerando que a estimativa da energia potencial foi realizada adotando eficiência elétrica de conversão de 40%, valor representativo para motogeradores a biogás segundo Salomon e Lora (2009) e IEA Bioenergy (2021), os resultados indicam que a geração elétrica efetivamente observada correspondeu, em média, a 43,62% da energia elétrica teórica estimada pela Equação 1. Dessa forma, o índice calculado não representa o aproveitamento da energia química total contida no biogás, mas sim a parcela da energia elétrica potencialmente gerável que foi efetivamente convertida em eletricidade durante a operação da unidade.

Os resultados demonstram que uma parte significativa do potencial energético estimado foi aproveitada pelo sistema, embora ainda haja diferenças entre a geração teórica e a efetivamente registrada. Essas diferenças podem estar associadas a fatores operacionais, como a disponibilidade dos motogeradores, as condições de operação, as paradas para manutenção e demais perdas inerentes ao processo de conversão energética.

De forma geral, os resultados corroboram as análises apresentadas anteriormente, indicando que o biogás produzido apresentou elevada qualidade

energética e potencial efetivo para geração de energia elétrica na unidade industrial estudada.

6 CONCLUSÃO

A caracterização operacional do biodigestor permitiu compreender o comportamento dos principais parâmetros monitorados ao longo do período analisado. Os resultados evidenciaram condições favoráveis à digestão anaeróbia, com destaque para a estabilidade operacional da planta e a manutenção da temperatura em faixa adequada ao desenvolvimento da atividade microbiológica.

A avaliação da produção de biogás demonstrou geração contínua ao longo do período monitorado, com tendência de aumento da produção nos meses analisados, evidenciando condições adequadas para o desenvolvimento do processo anaeróbio.

A análise da composição do biogás evidenciou teores de metano entre 63% e 69%, valores compatíveis com aqueles reportados na literatura para sistemas anaeróbios eficientes e que confirmam a elevada qualidade energética do biogás produzido.

A estimativa do potencial energético e sua comparação com a geração efetivamente observada demonstraram a viabilidade do aproveitamento energético do biogás produzido, principalmente quando os dados foram avaliados em escala mensal.

A avaliação da eficiência de conversão energética mostrou que parte significativa da energia potencialmente disponível foi convertida em energia elétrica, evidenciando desempenho satisfatório do sistema nas condições operacionais da unidade.

A análise da influência dos parâmetros operacionais demonstrou que a relação entre alimentação do biodigestor e produção de biogás tornou-se mais evidente em escala mensal, reforçando a importância do tempo de retenção hidráulica no processo. Por outro lado, temperatura e concentração de metano apresentaram influência limitada sobre as variações observadas na produção de biogás e na geração de energia.

De forma geral, os resultados obtidos permitiram atingir o objetivo principal do trabalho, demonstrando que a digestão anaeróbia aplicada aos resíduos de frigorífico de suínos constitui uma alternativa tecnicamente viável para o tratamento de resíduos e para a geração de energia renovável. A produção contínua de biogás e o potencial de recuperação energética observados reforçam a capacidade dessa tecnologia em

integrar tratamento de resíduos, recuperação energética e sustentabilidade ambiental em um único processo.

Por fim, recomenda-se que trabalhos futuros utilizem períodos mais longos de monitoramento e maior disponibilidade de dados operacionais, possibilitando aprofundar a avaliação dos fatores que influenciam a produção de biogás e o desempenho energético de plantas industriais de biodigestão. Estudos voltados à eficiência dos motogeradores e às perdas associadas ao processo de conversão energética também podem contribuir para o aprimoramento operacional do sistema.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS E BIOMETANO (ABIOGAS). **Guia do produtor**. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/protectedfiles/Guia-do-Produtor-ABiogas.pdf>. Acesso em: 18 maio 2026.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS E BIOMETANO (ABIOGAS). **Potencial brasileiro de biogás**: nota técnica. São Paulo, 2020. Disponível em: https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/protectedfiles/6390e394c734a95f3032a2da_NOTA-TECNICA_POTENCIAL_ABIOGAS.pdf Acesso em: 18 maio. 2026.
- APPELS, L. et al. 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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL (ABPA). **Relatório anual 2024**. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://abpa-br.org/abpa-relatorio-anual/>. Acesso em: 15 maio 2026.
- BRAGANÇA, I. et al. Impurities in biogas: Analytical strategies, occurrence, effects and removal technologies. **Biomass and Bioenergy**, v. 143, 2020. DOI: 10.1016/j.biombioe.2020.105878. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/biomass-and-bioenergy/vol/143/suppl/C> . Acesso em 03 jul. 2026.
- BUSTILLO-LECOMPTE, C. F.; MEHRVAR, M. Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: a review. **Journal of Environmental Management**, v. 161, p. 287–302, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479715301535>. Acesso em 15 jun. 2026.
- CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS (CIBiogás). **Panorama do Biogás no Brasil 2025**. Foz do Iguaçu: CIBiogás, 2026. Disponível em: <https://materiais.cibiogas.org/panorama-do-biogas-2025-download-lp>. Acesso em: 02 jul. 2026.
- CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG, 2016.
- DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources: an introduction**. 2. ed. Weinheim: Wiley-VCH, USA, 2011.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Central de inteligência de aves e suínos**. Concórdia, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/web/suinos-e-aves/cias/estatisticas-suinos>. Acesso em: 10 maio 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Potencial Técnico do Biogás de Resíduos**. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-372/topico-679/Potencial%20de%20biog%C3%A1s%20de%20res%C3%ADduos%20no%20horizonte%20decenal.pdf> . Acesso em: 19 mai. 2026.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **World Food and Agriculture: Statistical Yearbook 2023**. Rome, FAO, 2023. ISBN 978-92-5-138262-2. DOI: 10.4060/cc8166en. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/items/5c272dc7-e1b8-486a-b323-6babb174eee0>. Acesso em: 15 mai. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estatística da produção pecuária**. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria>. Acesso em: 18 maio 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Outlook for biogas and biomethane: prospects for organic growth**. Paris, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>. Acesso em: 14 maio 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY BIOENERGY (IEA BIOENERGY). **Task 37: Energy from Biogas**. [S.l.]: IEA Bioenergy, 2021. Disponível em: <https://www.iea-biogas.net/?>. Acesso em: 2 jun. 2026

JÚNIOR, Francisco das Chagas Gomes da Silva. **Eficiência energética e gestão sustentável na digestão anaeróbia de resíduos de frutas e verduras em uma CEASA do Ceará**. 2025. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025. doi:10.11606/T.18.2025.tde-30052025-080217. Acesso em: 01 jul. 2026.

KUNZ, A. **Processo de biodigestão**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/1355242/0/Curso-Dia0310-1.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2026.

KUNZ, A.; AMARAL, A. C.; STEINMETZ, R. L. R. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019.

KUNZ, A. et al. **Instalação de biodigestores e aproveitamento de biogás e digestato: guia prático**. 2. ed. rev. e ampl. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2022. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1141618/1/final9894.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2026.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; SULZBACH, M. **Gestão dos resíduos da produção animal: gestão e tratamento dos dejetos na suinocultura**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2024. v. 3. Disponível em:

<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1167466/1/Volume-III-Gestao-e-tratamento-dos-dejetos-na-suinocultura-Kunz.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2026.

LEMONS, Geraldo L.; FRANK OLIVEIRA CARDOSO, Maxiane; DE MEDEIROS COSTA, Hirdan Katarina. Biogás e biometano no Brasil: panorama e perspectivas. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, [S. l.], v. 63, 2024. DOI: 10.5380/dma.v63i0.88929. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/made/article/view/88929>. Acesso em 15 jun. 2026.

MILANEZ, Artur Yabe et al. Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 47, p. 221-276, 2018. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/15384/1/BS47BiogasFECHAD O.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2026.

OBILEKE, K.; NWOKOLO, N.; MAKAKA, G.; MUKUMBA, P.; ONYEAKA, H. Anaerobic digestion: Technology for biogas production as a source of renewable energy—**A review**. **Energy & Environment**, v. 32, n. 2, p. 191–225, 2021. DOI: 10.1177/0958305X20923117. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0958305X20923117>. Acesso em 03 jul. 2026.

PACHECO, J. W. F.; YAMANAKA, H. T. **Guia técnico ambiental de abates (bovino e suíno)**: série P+L. São Paulo: CETESB, 2006. P. 98. Disponível em: <https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/items/5f35cc10-3a4b-4242-9e2b-76d899c1f4bb>. Acesso em: 15 jun. 2026.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP**. 2006. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

REN, Y. et al. A comprehensive review on food waste anaerobic digestion: Research updates and tendencies. **Bioresource Technology**, v. 247, p. 1044–1054, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852417316747>. Acesso em: 05 jun. 2026

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 9, p. 1101–1107, 2009. DOI: 10.1016/j.biombioe.2009.03.001. Disponível em: https://www.academia.edu/117426092/Estimate_of_the_electric_energy_generating_potential_for_different_sources_of_biogas_in_Brazil. Acesso em 15 jun. 2026.

SCHNEIDER, V. E. et al. **Diagnóstico dos resíduos orgânicos do setor agrossilvopastoril e agroindústrias associadas**: relatório de pesquisa. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2012. p. 134. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/server/api/core/bitstreams/9dcf2c51-8f78-4d61-8f2e-1fb66a89ca28/content>. Acesso em: 10 jun. 2026

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade da água e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG, 2014. v. 1.

WARD, A. J. et al. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 17, p. 7928–7940, 2008. Disponível em: https://www.academia.edu/24834296/Optimisationoftheanaerobicdigestionofagricultural_resources. Acesso em 15 jun. 2026.

YAN, H. H. et al. Effect of microaerobic microbial pretreatment on anaerobic digestion of a lignocellulosic substrate under controlled pH conditions. **Bioresource Technology**, v. 337, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852421001917?via%3Di>hub. Acesso em 15 jun. 2026.