



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E  
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**ENGENHARIA QUÍMICA**

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE  
BIODIGESTÃO ANAERÓBIA EM UM FRIGORÍFICO DE SUÍNOS**

**DISCENTES: ADRIELY BOGLER MARTINS  
SABRINA DA MAIA**

Foz do Iguaçu - PR  
2025



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E  
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**ENGENHARIA QUÍMICA**

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE  
BIODIGESTÃO ANAERÓBIA EM UM FRIGORÍFICO DE SUÍNOS**

**DISCENTES: ADRIELY BOGLER MARTINS  
SABRINA DA MAIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território (ILATIT), como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Kátia Regina de Freitas Zara

Coorientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Andréia Cristina Furtado


Foz do Iguaçu - PR  
2025

**ADRIELY BOGLER MARTINS  
SABRINA DA MAIA**

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE  
BIODIGESTÃO ANAERÓBIA EM UM FRIGORÍFICO DE SUÍNOS**


Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território (ILATIT), como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **KATYA REGINA DE FREITAS ZARA**  
Data: 18/08/2025 16:32:36-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Kátya Regina de Freitas Zara  
UNILA

Documento assinado digitalmente  
 **ANDREIA CRISTINA FURTADO**  
Data: 18/08/2025 11:53:55-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Coorientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Andréia Cristina Furtado  
UNILA

Documento assinado digitalmente  
 **GLAUCIO JOSE GOMES**  
Data: 18/08/2025 13:48:55-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Glaucio José Gomes

 **RODRIGO MONTEIRO ELIOTT**  
Data: 18/08/2025 12:49:47-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Rodrigo Eliott  
UNILA

Foz do Iguaçu - PR  
2025

## TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): Adriely Bogler Martins, Sabrina da Maia

Curso: Engenharia Química

	Tipo de Documento
(X) graduação	(... ..) artigo
(.....) especialização	( X ) trabalho de conclusão de curso
(.....) mestrado	(... ..) monografia
(.....) doutorado	(... ..) dissertação
	(... ..) tese
	(... ..) CD/DVD – obras audiovisuais
	(... ..) _____

Título do trabalho acadêmico: **ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE BIODIGESTÃO ANAERÓBIA EM UM FRIGORÍFICO DE SUÍNOS**

Nome do orientador(a): Prof<sup>a</sup>.Dr<sup>a</sup>. Kátya Regina de Freitas Zara

Data da Defesa: 07/08/2025

### Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons* **Licença 3.0 Unported**.

Foz do Iguaçu, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_  
Assinatura do Responsável

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho é resultado de uma caminhada que não trilhamos sozinhas.

Agradecemos à Universidade Federal da Integração Latino-Americana pela oportunidade de estudo, onde tivemos a chance de conhecer discentes e docentes que contribuíram significativamente para o nosso processo de formação

Às nossas orientadoras, Kátya e Andreia, por terem aceitado os desafios desta jornada. E à empresa estudada, pelo apoio e disponibilidade que tornaram este trabalho possível.

Eu, Adriely, gostaria de agradecer primeiramente à Sabrina, por ter aceitado viver esse desafio comigo. Aos meus pais, Antoninha e Guilherme, por terem tornado essa trajetória possível durante todos esses anos, e a todos os familiares que estiveram ao meu lado.

Aos amigos que a graduação me presenteou e que tornaram os dias mais leves, meu muito obrigada à Emmy, Ethan, Alexsandra e Anne. Os anos de graduação foram mais fáceis com vocês ao meu lado.

Às amigadas de São Paulo, que mesmo a quilômetros de distância sempre se fizeram presentes. Obrigada por estarem comigo há mais de 12 anos: Thaiana, Safira, Victoria, Nathan e Ananda.

À minha prima e quase irmã, Viviane, por compartilharmos toda uma vida junta, dividindo também os altos e baixos da graduação. E a todos os outros amigos de vida e de universidade que passaram por aqui, deixo minha sincera gratidão.

Um agradecimento especial a duas professoras que marcaram minha trajetória: Roseli e Janete, que ainda no ensino fundamental me ajudaram, mesmo que indiretamente, a identificar meu sonho profissional. Durante a graduação, em muitos momentos minha memória me levou até vocês. Obrigada.

E, por fim, às minhas companheiras de quatro patas, Gaia e Atena, que entre miados e ronrons tornaram as horas em frente ao computador muito mais leves.

Eu, Sabrina, gostaria de expressar toda minha gratidão começando pelos meus pais, Sergio e Sandra, que são minha base e porto seguro. Em especial à minha mãe, que me ensinou a voar e acreditar nos meus sonhos. Aos meus irmãos, Sergio, Joseph e Anna, à minha cunhada, Marina, e ao meu sobrinho, Antônio, que ilumina a minha vida com sua alegria.

Ao meu namorado, Felipe, que chegou no final da graduação e se tornou meu suporte diário, trazendo amor e leveza. Aos meus avós maternos, Conceição e Maurício, que

participaram tão ativamente da minha criação. Meu avô, mesmo não estando mais aqui, segue sendo para mim uma referência de vida.

À minha amiga de infância, Vanessa, companheira e confidente desde os 14 anos, e à minha prima Monique, que cresceu comigo e é uma das minhas pessoas preferidas. Às amigas da faculdade, Emmy (e seu filho Ethan), Adriely e Alexandra, que dividiram comigo provas, noites de estudos e mudanças. Um agradecimento especial à Adriely, pela parceria e companheirismo no TCC.

Aos demais familiares, madrinhas, padrinhos e amigos que me acompanharam nessa caminhada acadêmica e torceram tanto pela minha formatura quanto eu, deixo minha sincera gratidão.

E não poderia esquecer dos meus companheirinhos de quatro patas, Senhorzinho e Jorginho, que enchem meus dias de alegria.

Agradeço a Deus, por me guiar e abençoar cada passo dessa jornada.

Por fim, estendo minha gratidão a todos que, de alguma forma, cruzaram o meu caminho. Cada palavra de incentivo, cada gesto de carinho e cada presença silenciosa foram essenciais para que eu chegasse até aqui. É a soma de todos esses encontros que me permitiu realizar o sonho de me tornar Engenheira Química.

A todos que caminharam conosco e fizeram parte desta história, o nosso muito obrigada.

BOGLER MARTINS, Adriely. DA MAIA, Sabrina. Estudo de viabilidade de implementação de um sistema de biodigestão anaeróbia em um frigorífico de suínos. 104p. Graduação (Bacharelado em Engenharia Química) – UNILA, Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Foz do Iguaçu, 2025.

## RESUMO

A intensificação da suinocultura no Brasil tem impulsionado a geração de grandes volumes de resíduos, principalmente efluentes líquidos com elevada carga orgânica, cuja disposição inadequada pode comprometer a qualidade do solo e dos recursos hídricos. Este estudo de caso contemplou a identificação de fatores que poderiam maximizar a produção de biogás, pelo biodigestor anaeróbio, e viabilizar sua integração como fonte de energia renovável aos processos produtivos da indústria, contribuindo para a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental. Os resultados indicaram que o sistema opera sob condições adequadas para a digestão mesofílica (pH 6,94; temperatura 32,02 °C; relação C/N de 20:1). Contudo, a operação atual corresponde a apenas 28,8% da capacidade projetada, resultando em produção média de 13,5 m<sup>3</sup>/dia de biogás, suficiente para suprir aproximadamente 0,54% da demanda de GLP da planta. As estimativas foram baseadas em parâmetros de referência e dados médios de operação, não havendo medições diretas da produção de biogás ou ensaios laboratoriais de potencial bioquímico de metano (BMP), o que indica a necessidade de estudos experimentais e técnico-econômicos complementares.

**Palavras-chave:** Energia renovável; Resíduos agroindustriais; Eficiência energética; Sustentabilidade industrial; Tratamento de efluentes.

BOGLER MARTINS, Adriely. DA MAIA, Sabrina. Estudio de viabilidad para la implementación de un sistema de biodigestión anaerobia en un frigorífico de cerdos. 104p. Grado (Licenciatura en Ingeniería Química) – UNILA, Universidad Federal de la Integración Latinoamericana. Foz do Iguaçu, 2025.

## RESUMEN

La intensificación de la porcicultura en Brasil ha impulsado la generación de grandes volúmenes de residuos, principalmente efluentes líquidos con alta carga orgánica, cuya disposición inadecuada puede comprometer la calidad del suelo y de los recursos hídricos. Este estudio de caso contempló la identificación de factores que podrían maximizar la producción de biogás en el biodigestor anaerobio y viabilizar su integración como fuente de energía renovable en los procesos productivos de la industria, contribuyendo a la eficiencia energética y a la sostenibilidad ambiental. Los resultados indicaron que el sistema opera bajo condiciones adecuadas para la digestión mesofílica (pH 6,94; temperatura 32,02 °C; relación C/N de 20:1). Sin embargo, la operación actual corresponde a solo el 28,8% de la capacidad proyectada, resultando en una producción media de 13,5 m<sup>3</sup>/día de biogás, suficiente para cubrir aproximadamente el 0,54% de la demanda de GLP de la planta. Las estimaciones se basaron en parámetros de referencia y datos medios de operación, sin mediciones directas de la producción de biogás ni ensayos de potencial bioquímico de metano (BMP), lo que indica la necesidad de estudios experimentales y técnico-económicos complementarios.

**Palabras clave:** Energía renovable; Residuos agroindustriales; Eficiencia energética; Sostenibilidad industrial; Tratamiento de efluentes.

BOGLER MARTINS, Adriely. DA MAIA, Sabrina. Feasibility study for the implementation of an anaerobic digestion system in a pig slaughterhouse. 104p. Undergraduate (Bachelor's in Chemical Engineering) – UNILA, Federal University for Latin American Integration. Foz do Iguaçu, 2025.

### ABSTRACT

The intensification of swine farming in Brazil has driven the generation of large volumes of waste, mainly liquid effluents with high organic load, whose inadequate disposal can compromise soil quality and water resources. This case study considered the identification of factors that could maximize biogas production in the anaerobic digester and enable its integration as a renewable energy source into the industry's production processes, contributing to energy efficiency and environmental sustainability. The results indicated that the system operates under suitable conditions for mesophilic digestion (pH 6.94; temperature 32.02 °C; C/N ratio of 20:1). However, the current operation corresponds to only 28.8% of the designed capacity, resulting in an average production of 13.5 m<sup>3</sup>/day of biogas, sufficient to supply approximately 0.54% of the plant's LPG demand. The estimates were based on reference parameters and average operational data, without direct measurements of biogas production or laboratory tests of biochemical methane potential (BMP), which indicates the need for complementary experimental and techno-economic studies.

**Keywords:** Renewable energy; Agro-industrial waste; Energy efficiency; Industrial sustainability; Wastewater treatment.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Abate de suínos por região no Brasil para o ano referência 2023.....	22
Figura 2 – Quantidade de suínos abatidos, no trimestre (cabeças).....	23
Figura 3 – Diagrama de Blocos do Processo Industrial do Frigorífico .....	26
Figura 4 – Estação de tratamento de efluentes genérica para um frigorífico de suínos .....	28
Figura 5 – Modelo de biodigestor canadense .....	34
Figura 6 – Diagrama de blocos do processo industrial do estudo de caso .....	48
Figura 7 – Estação de Tratamentos de Efluentes Industriais da empresa.....	54
Figura 8 – Peneiras estáticas.....	55
Figura 9 – Equalizador .....	56
Figura 10 – Flotador .....	57
Figura 11 – Biodigestor tipo lona.....	58
Figura 12 – Lagoa de digestato.....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Destino das exportações de carne suína in natura brasileira (2023–2024).....	23
Tabela 2 – Dados operacionais planta frigorífica.....	49
Tabela 3 – Consumo específico de água por suíno (L/suíno.dia).....	49
Tabela 4 – Gasto de água por etapa do processo .....	50
Tabela 5 – Vazão de efluente gerado pelo processo.....	52
Tabela 6 – Vazão de efluente por suíno no frigorífico avaliado .....	53
Tabela 7 – Dimensionamento dos equipamentos da estação de tratamento de efluentes.....	55
Tabela 8 – Comparativo entre vazão ideal e real de alimentação do biodigestor .....	61
Tabela 9 – Análise de pH e temperatura do lodo direcionado ao biodigestor.....	62
Tabela 10 – Estimativas de produção de biogás nos cenários real e potencial .....	65
Tabela 11 – Estimativa do volume necessário de armazenamento de biogás .....	66
Tabela 12 – Parâmetros físico-químicos e energéticos do biogás considerado.....	67
Tabela 13 – Comparação energética: GLP <i>versus</i> biogás .....	69

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Etapas do processo de abate de suínos e uso da água.....	25
Quadro 1 – Etapas do processo de abate de suínos e uso da água (continuação).....	26
Quadro 2 – Fatores do processo produtivo que influenciam a composição dos efluentes .....	27
Quadro 3 – Principais fases da biodigestão anaeróbia .....	30
Quadro 4 – Fatores limitantes na biodigestão anaeróbia: faixas operacionais, efeitos microbianos e estratégias de controle .....	31
Quadro 5 – Fontes de geração de efluentes no processo industrial .....	52
Quadro 6 – Dados do biodigestor .....	59
Quadro 7 – Ações corretivas para evitar variações de pH no biodigestor.....	63
Quadro 8 – Checklist de inspeção e registro da ETEI.....	71
Quadro 9 – Diagnóstico do sistema de biodigestão anaeróbia do frigorífico avaliado .....	74
Quadro 10 – Possibilidades de aproveitamento energético do biogás .....	76
Quadro 11 – Principais desafios e soluções na operação do biodigestor .....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABPA	Associação Brasileira de Proteína Animal
AGCL	Ácidos graxos de cadeia longa
AGV/Alc	Relação ácidos graxos voláteis/alcalinidade
AI	Ácidos orgânicos de cadeia curta
AP	Alcalinidade
BMP	<i>Biochemical Methane Potential</i> - Potencial Bioquímico de Metano
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i> - Despesas de capital
COVA	Carga orgânica volumétrica aplicada
COV	Carga orgânica volumétrica
CT	Carbono total
DAF	<i>Dissolved Air Flotation</i> - Flotação por Ar Dissolvido
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
EPSD	Adsorção em leito regenerável com swing por potencial elétrico
EPIs	Equipamentos de proteção individual
ETE	Estação de tratamento de efluentes
ETEI	Estações de tratamento de efluentes industriais
FMEA	Análise de modos de falha e efeitos
GLP	Gás liquefeito de petróleo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
kcal	Quilocalorias
kJ	Kilojoules
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MJ	Megajoules
MOFs	<i>Metal-organic Frameworks</i> - Estruturas Metal-Orgânicas
NT	Nitrogênio total
NTK	Nitrogênio total Kjeldahl
OG	Óleos e graxas
OPEX	<i>Operational Expenditure</i> - Despesas operacionais
P+L	Produção Mais Limpa

PCI	Poder calorífico inferior
PSA	Adsorção por mudança de pressão
PSE	Pale, Soft and Exudative
P-total	Fósforo total
PVSA	Adsorção por pressão/vácuo
SF	Sólidos fixos
SIF	Serviço de Inspeção Federal
SS	Sólidos Sedimentáveis
SST	Sólidos Suspensos Totais
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i> - Reator anaeróbio de fluxo ascendente
$V_{\text{biodigestor}}$	Volume útil do biodigestor

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>11</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>12</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	18
1.2 QUESTÃO DE PESQUISA .....	19
1.3 OBJETIVOS .....	20
1.3.1 Geral .....	20
1.3.2 Específicos.....	20
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>21</b>
2.1 SUINOCULTURA NO BRASIL .....	21
2.2 ABATE DE SUÍNOS .....	24
2.2.1 Processo De Abate.....	25
2.3 EFLUENTES GERADOS EM FRIGORÍFICOS DE SUÍNOS.....	27
2.4 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES .....	27
2.5 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA.....	29
2.5.1 Fatores Limitantes Para A Biodigestão .....	30
2.6 BIODIGESTORES .....	33
2.6.1 Dimensionamento.....	35
2.7 ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E AMBIENTAL.....	36
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>38</b>
3.1 LOCAL DO ESTUDO DE CASO .....	38
3.2 COLETA E ANÁLISE DE DADOS .....	38
3.3 SISTEMA DE BIODIGESTÃO ANAERÓBIA .....	40
3.3.1 Monitoramento do pH E Temperatura.....	40
3.3.2 Volume Útil Do Biodigestor .....	40
3.3.3 Estimativa Da Produção De Biogás.....	41
3.3.4 Dimensionamento Do Reservatório De Biogás.....	42
3.3.5 Estimativa Do Potencial Energético Do Biogás .....	43
3.3.6 Comparação Energética Entre Biogás E GLP .....	44

3.3.7 Otimização Do Sistema De Biodigestão .....	45
3.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE.....	45
3.4.2 Viabilidade Ambiental.....	46
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>47</b>
4.1 PROCESSO INDUSTRIAL.....	47
4.1.1 Consumo De Água .....	49
4.1.2 Efluentes .....	51
4.2 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES .....	53
4.2.1 Peneiras Estáticas .....	55
4.2.2 Tanque de Equalização.....	56
4.2.3 Flotador.....	56
4.2.4 Biodigestor Anaeróbio.....	57
4.2.5 Lagoa De Digestato .....	58
4.3 SISTEMA DE BIODIGESTÃO ANAERÓBIA .....	58
4.3.1 Parâmetros Operacionais Do Biodigestor.....	59
4.3.2 Vazão De Alimentação: De Projeto E Real.....	60
4.3.3 pH e Temperatura .....	61
4.3.4 Estimativa Da Produção De Biogás.....	63
4.3.5 Dimensionamento Do Reservatório De Biogás.....	65
4.3.6 Estimativa Do Potencial Energético Do Biogás .....	67
4.3.7 Comparação Energética Entre Biogás E GLP .....	68
4.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE.....	69
4.4.1 Operação da Estação De Tratamentos De Efluentes Industriais .....	70
4.4.2 Integração Do Biodigestor.....	72
4.4.3 Possibilidades De Aproveitamento Do Biogás.....	75
4.4.4 Desafios Para Ampliação Ou Otimização Do Sistema.....	76
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>79</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>81</b>
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>99</b>
<b>APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO .....</b>	<b>100</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A suinocultura representa uma das principais atividades do agronegócio brasileiro, destacando-se tanto no abastecimento interno quanto na atuação estratégica no mercado internacional. A suinocultura representa uma das principais atividades do agronegócio brasileiro, destacando-se tanto no abastecimento interno quanto na atuação estratégica no mercado internacional. Segundo dados da Agrosustentar (2024), em 2023, a produção mundial de carne suína alcançou 116,3 milhões de toneladas, representando um crescimento de 5,4% em relação a 2022. A China manteve a liderança global, com 57,94 milhões de toneladas (aproximadamente 50% do total), seguida pela União Europeia e pelos Estados Unidos, que produziram 20,83 milhões e 12,39 milhões de toneladas, respectivamente. Nesse cenário, o Brasil se consolidou como o quarto maior produtor mundial, com 4,45 milhões de toneladas, o que equivale a 3,8% da produção global.

No contexto nacional, a atividade é caracterizada, em sua maioria, por sistemas de criação semi-intensivo e intensivo, enquanto o modelo extensivo ocorre em escala reduzida. A produção está concentrada, predominantemente, em pequenas propriedades rurais: mais de 80% provêm de unidades com até 100 hectares (Cesar, s.d), o que reforça a relevância dos pequenos produtores no fornecimento ao mercado interno e na promoção da sustentabilidade econômica e social no país. Apesar da contribuição positiva para a economia, a expansão da suinocultura também impõe desafios ambientais, especialmente devido à elevada geração de resíduos orgânicos pelas granjas.

Durante o processo industrial de abate de suínos, são geradas grandes quantidades de resíduos, tanto líquidos quanto sólidos, resultantes das diversas etapas operacionais. Os efluentes líquidos são provenientes principalmente das atividades de lavagem de pisos, equipamentos e instalações, além de conterem sangue, gordura, fezes, urina e fragmentos de tecidos e conteúdo intestinal. Esses efluentes apresentam elevada carga orgânica, além de nutrientes como nitrogênio e fósforo, sendo altamente poluentes se não tratados de forma adequada (Embrapa, 2024).

Os resíduos gerados na indústria de abate de suínos são encaminhados para as Estações de Tratamento de Efluentes Industriais (ETEI), onde passam por diferentes etapas de tratamento. Atualmente, tecnologias como a digestão anaeróbia têm se destacado por possibilitarem a valorização desses resíduos, convertendo parte da carga orgânica em biogás, o

que contribui significativamente para a sustentabilidade ambiental e para a redução do seu potencial poluidor.

Durante o tratamento dos efluentes líquidos, forma-se também o lodo, cuja gestão adequada é fundamental. O processo de tratamento normalmente se inicia com a etapa preliminar, responsável pela separação de substâncias sólidas grosseiras, como pelos, ossos, penas e vísceras. Na sequência, ocorre o tratamento primário, que utiliza processos físico-químicos como a flotação, para remover a matéria orgânica sedimentável e flutuante. Por fim, é realizado o tratamento secundário, baseado em sistemas biológicos, como reatores anaeróbios, lodos ativados e aeradores, os quais promovem a degradação da matéria orgânica remanescente por meio da ação de microrganismos (Multiágua, 2025).

Os resíduos gerados no processo de abate de suínos submetidos à digestão anaeróbia em biodigestores, geram biogás, principalmente metano, que apresenta poder calorífico entre 20,92 e 29,288 MJ/m<sup>3</sup>. Este gás pode ser utilizado para a substituição de fontes não renováveis como o gás liquefeito de petróleo (GLP), para a chamuscagem das carcaças suínas (Acsurs, 2019). A utilização do biogás em sistemas automáticos de chamuscagem, contribui para a sustentabilidade energética, a redução da pegada de carbono e a diminuição da dependência de combustíveis fósseis (Agrimídia, 2018).

Ademais, o biogás produzido pelo biodigestor pode fornecer uma fonte alternativa de CO<sub>2</sub> para atordoamento de suínos. No entanto, para que o uso do gás visando o bem-estar animal no abate, por reduzir o estresse e eliminar a necessidade de manejo individual (Semadesc, 2025), é necessário submetê-lo a processos de purificação. Dentre as alternativas tecnológicas disponíveis, destacam-se a adsorção por mudança de pressão (PSA), que utiliza materiais como carvão ativado ou zeólitas para capturar seletivamente o CO<sub>2</sub> sob alta pressão e liberá-lo sob baixa pressão (Castellanos-Sánchez et al., 2023); a adsorção em leito regenerável com swing por potencial elétrico (EPSD), que permite a regeneração in situ do adsorvente e acelera o ciclo de adsorção e dessorção (Farooq et al., 2023); e os sistemas baseados em Metal-organic Frameworks (MOFs, Estruturas Metal-Orgânicas) em processos PVSA (adsorção por pressão/vácuo), capazes de separar CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> com alta seletividade e eficiência energética (Shin et al., 2025). Uma alternativa é a aplicação de processos com múltiplas etapas de purificação, que combinam filtração, lavagem, compressão, condensação, secagem e resfriamento para a produção de CO<sub>2</sub> de qualidade alimentícia (food-grade), conforme reportado em estudos sobre plantas industriais de biogás (IEA Bioenergy, 2020).

Diante desse contexto, o aproveitamento energético dos resíduos gerados no abate de suínos por meio da biodigestão anaeróbia mostra-se estratégico, não apenas pela mitigação dos impactos ambientais associados ao lançamento de efluentes, mas também pelo potencial de substituição de fontes não renováveis nos próprios processos industriais do frigorífico. A utilização do biogás para a chuscagem e do CO<sub>2</sub> purificado para o atordoamento dos animais evidencia o alinhamento da atividade com os princípios de sustentabilidade, eficiência energética e atendimento às exigências ambientais e regulatórias.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O setor suinícola brasileiro ocupa posição de destaque mundial, porém sua intensificação em sistemas confinados resulta na geração de grandes volumes de resíduos com elevado potencial poluidor. Estima-se que, apenas no Brasil, sejam produzidas mais de 190 milhões de toneladas de dejetos anualmente, os quais, quando manejados de forma inadequada, podem provocar a contaminação do solo e dos recursos hídricos, além de intensificar as emissões de gases de efeito estufa, como CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O (Siqueira *et al.*, 2024). E nos abatedouros de suínos, esse cenário se torna ainda mais crítico devido ao elevado consumo de água no processo e à consequente geração de grandes volumes de efluentes ricos em carga orgânica e nutrientes, que precisam ser tratados antes do lançamento em corpos receptores ou de sua utilização na irrigação de florestas plantadas. Nesse contexto, a estação de tratamento de efluentes pode alcançar maior autonomia por meio da geração de biogás, seja pela biodigestão direta do efluente líquido, seja pela digestão anaeróbia dos resíduos sólidos provenientes do sistema de flotação, contribuindo tanto para a redução da carga poluidora quanto para a valorização energética dos resíduos.

Nesse contexto, a digestão anaeróbia destaca-se como alternativa tecnológica promissora, pois promove a estabilização da matéria orgânica e a conversão dos resíduos em biogás, composto predominantemente por 50 a 70% de metano e 25 a 45% de dióxido de carbono (Marcucci *et al.*, 2025). Estudos demonstram que, no estado do Paraná, o aproveitamento energético dos resíduos suínos, avícolas e bovinos confinados poderia gerar aproximadamente 2,23 TWh de eletricidade, correspondendo a cerca de 8% do consumo energético estadual (Marcucci *et al.*, 2025). Esses resultados evidenciam o potencial estratégico do biogás como vetor energético renovável para o setor agroindustrial brasileiro.

Adicionalmente, a co-digestão de dejetos com outras fontes orgânicas tem se mostrado eficiente para ampliar o rendimento do processo. A incorporação de carcaças de suínos, por exemplo, resultou em incremento de até 119% na produção de biogás e maior teor percentual de metano (Tápparo *et al.*, 2020). Entretanto, a eficiência operacional dos biodigestores depende fortemente das características físico-químicas dos substratos, como concentração de sólidos voláteis, relação carbono/nitrogênio, alcalinidade e pH, parâmetros que determinam tanto a estabilidade microbiológica do processo quanto o potencial de geração de biogás (Kunz, 2024; Tápparo *et al.*, 2020).

Apesar dos benefícios, o digestato produzido no processo de biodigestão permanece rico em nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, apresentando elevado potencial poluidor se descartado de forma inadequada. Dessa forma, torna-se indispensável a implementação de etapas de pós-tratamento, tais como nitrificação-desnitrificação e precipitação de fósforo na forma de estruvita, cuja eficiência depende diretamente das condições físico-químicas do efluente (Kunz, 2024; Tápparo *et al.*, 2020).

Por fim, estudos recentes apontam que a consolidação da cadeia do biogás depende não apenas da eficiência técnica e da viabilidade econômica, mas também de mecanismos de governança. Na região Oeste do Paraná, observa-se a transição de arranjos contratuais informais para modelos híbridos mais estruturados entre produtores e usinas de biogás, favorecendo a coordenação setorial e a segurança institucional (Cielo *et al.*, 2020). Assim, a integração do aproveitamento energético do biogás aos processos industriais configura-se como alternativa viável e estratégica, contribuindo para a sustentabilidade ambiental, a autossuficiência energética e a competitividade da cadeia suinícola brasileira.

## 1.2 QUESTÃO DE PESQUISA

Por isso, este trabalho pretende responder duas questões de pesquisa:

1. **Questão 1:** Quais parâmetros físico-químicos dos efluentes de um abatedouro de suínos impactam a eficiência operacional de um biodigestor de resíduos sólidos?
2. **Questão 2:** Quais critérios de desempenho do sistema de biodigestão anaeróbia devem ser controlados, para que seja viável a integração energética do biogás aos processos produtivos da indústria?

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho é identificar fatores que possam maximizar a produção de biogás, pelo biodigestor anaeróbio, e viabilizar sua integração como fonte de energia renovável aos processos produtivos da indústria, contribuindo para a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental.

### 1.3.2 Específicos

Para atingir o objetivo geral tem-se como objetivos específicos:

- Analisar, com base nos dados fornecidos pela empresa, as características dos efluentes industriais que podem impactar a biodigestão anaeróbia;
- Avaliar o desempenho atual do biodigestor a partir das informações operacionais, identificando fatores limitantes na produção de biogás;
- Identificar, a partir dos registros da empresa, quais características dos efluentes influenciam diretamente a eficiência do processo de biodigestão;
- Propor melhorias e otimizações no sistema de biodigestão existente, considerando a readequação de equipamentos e processos;
- Estimar, com base nos dados analisados, a produção potencial de biogás e o impacto de sua integração aos processos produtivos da indústria.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica tem como objetivo contextualizar os principais aspectos relacionados processo de abate, e geração de efluentes, em frigoríficos de suínos. Ademais, o uso do sistema de biodigestão anaeróbia para produção de biogás e gás carbônico, visando o uso na chamuscagem (metano) e atordoamento (gás carbônico) dos suínos.

### 2.1 SUINOCULTURA NO BRASIL

A suinocultura é uma das atividades mais relevantes do agronegócio brasileiro, desempenhando um papel essencial tanto no abastecimento do mercado interno quanto no comércio internacional. O Brasil se consolidou como um dos maiores produtores e exportadores mundiais de carne suína, graças a uma cadeia produtiva altamente estruturada, que envolve desde a criação dos animais até o processamento e distribuição dos produtos (BNDES, 2017). O setor tem passado por intensos processos de modernização, com avanços na genética animal, melhoria das práticas de manejo e evolução das condições sanitárias, permitindo maior eficiência na produção.

Nos últimos anos, a produção nacional de carne suína vem apresentando crescimento constante, impulsionada tanto pelo aumento do consumo interno quanto pela consolidação do Brasil como fornecedor estratégico para mercados internacionais. Segundo a ABPA, em 2024 o país alcançou a marca de 5,35 milhões de toneladas produzidas, o que representa um aumento de 3,8% em relação ao ano anterior. Esse crescimento reflete a capacidade de adaptação e expansão do setor diante das novas demandas de mercado.

Historicamente, as regiões Sul e Sudeste concentraram a maior parte da produção de suínos, devido à infraestrutura consolidada, disponibilidade de insumos e condições climáticas favoráveis. Entre os principais estados produtores destacam-se Santa Catarina, Paraná e Rio Grande do Sul, responsáveis por grande parte do volume de carne suína destinada ao mercado externo. Contudo, o avanço da fronteira agrícola nas últimas décadas promoveu o crescimento da atividade também na região Centro-Oeste, que hoje se destaca como um importante polo de expansão da suinocultura, como mostra os dados da Figura 1. Em 2023, os dados do IBGE mostraram que a região Sul foi responsável por 69% do abate nacional de suínos, seguida pelas regiões Sudeste (17%), Centro-Oeste (13%), Nordeste (1%) e Norte (0%).

**Figura 1 – Abate de suínos por região no Brasil para o ano referência 2023**



Fonte: IBGE, 2023.

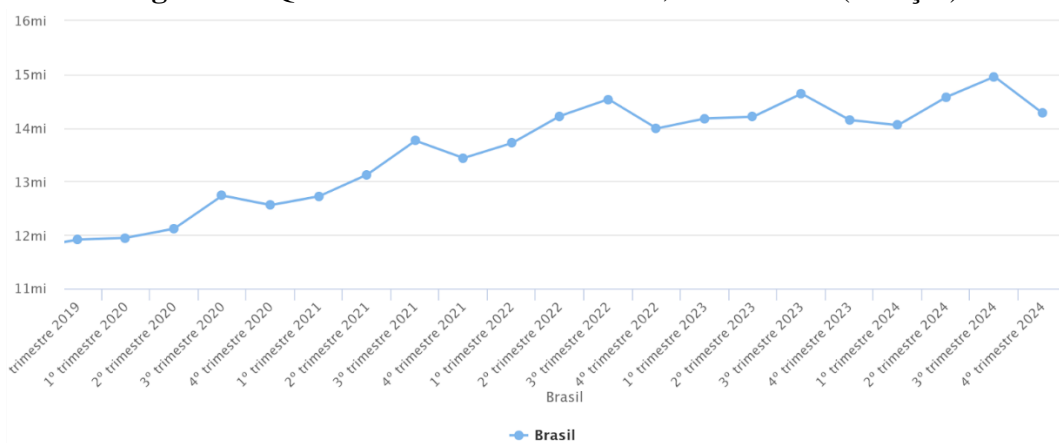
A evolução da quantidade de suínos abatidos entre o 1º trimestre de 2020 e o 4º trimestre de 2024 é apresentada na Figura 2. Além do crescimento anual, observa-se uma clara sazonalidade na atividade de abate, com destaque para o 3º trimestre de cada ano, que tende a apresentar os maiores volumes. Em 2024, por exemplo, esse período atingiu o pico de aproximadamente 15,4 milhões de cabeças abatidas, representando um aumento significativo em relação ao 1º trimestre do mesmo ano. Essa variação está relacionada a fatores como o ciclo produtivo da suinocultura, estratégias de mercado voltadas para o segundo semestre (especialmente para suprir a demanda de final de ano), além das condições climáticas que favorecem o ganho de peso dos animais no inverno.

Paralelamente à produção, o consumo de carne suína também tem crescido no Brasil. A aceitação desse tipo de proteína tem se ampliado entre os consumidores, favorecida pela diversificação dos cortes, pelo aumento da oferta de produtos industrializados e por campanhas que destacam seus benefícios nutricionais. Em 2023, o consumo per capita de carne suína foi de 20 kg, número que ainda é inferior à média mundial, mas representa um avanço importante em relação aos 12 kg registrados na década de 1990 (Embrapa, 2023).

As exportações têm se consolidado como uma estratégia fundamental para o setor, como mostra os dados da Tabela 1. Em 2023, cerca de 1,2 milhão de toneladas de carne suína foram exportadas, o equivalente a 23% da produção total do país. Os principais destinos

incluem a China, Hong Kong, Chile e Filipinas, sendo a China o maior comprador devido à alta demanda interna e às crises sanitárias que reduziram sua produção local. A competitividade da carne suína brasileira no mercado internacional está associada a fatores como o baixo custo de produção, a qualidade sanitária do rebanho e a ampla oferta de grãos para ração animal.

**Figura 2** – Quantidade de suínos abatidos, no trimestre (cabeças)



Fonte: IBGE - Pesquisa Trimestral do Abate de Animais, 2024.

**Tabela 1** – Destino das exportações de carne suína in natura brasileira (2023–2024)

Destino	3º trimestre de 2023		3º trimestre de 2024		Variação anual	
	(Ton)	(%)	(Ton)	(%)	(Ton)	(%)
Filipinas	34.157	11,7	74.383	22,3	40.226	117,8
China	91.459	31,3	47.520	14,3	-43.939	-48,0
Chile	21.540	7,4	31.973	9,6	10.434	48,4
Japão	10.783	3,7	27.684	8,3	16.901	156,7
Hong Kong	25.293	8,7	24.360	7,3	-933	-3,7
Cingapura	14.308	4,9	23.834	7,2	9.525	66,6
México	10.316	3,5	17.528	5,3	7.212	69,9
Vietnã	22.959	7,9	16.671	5,0	-6.287	-27,4
Estados Unidos	4.746	1,6	4.646	1,4	-100	-2,1
República Dominicana	27	0,0	5.397	1,6	5.369	19.826,6
Angola	4.051	1,4	4.637	1,4	586	14,5
Geórgia	6.791	2,3	4.063	1,2	-2.728	-40,2
Argentina	2.175	0,7	3.738	1,1	1.563	71,9
Emirados Árabes Unidos	4.500	1,5	3.700	1,1	-800	-17,8
Coréia do Sul	5.073	1,7	3.705	1,1	-1.369	-27,0
Libéria	1.761	0,6	3.570	1,1	1.809	102,7
Porto Rico	3.232	1,1	3.425	1,0	194	6,0
Demais destinos*	18.905	6,5	20.096	6,0	1.191	6,3
<b>Total</b>	<b>292.370</b>	<b>100,0</b>	<b>332.879</b>	<b>100,0</b>	<b>40.509</b>	<b>13,9</b>

\*Agregado dos destinos com participação menor que 1% = Não se aplica.

Fonte: IBGE, 2024.

A manutenção da competitividade depende diretamente da adoção de práticas sanitárias rigorosas, uma vez que surtos de doenças podem comprometer rapidamente a capacidade de exportação. O exemplo mais recente foi a crise da peste suína africana em países asiáticos, que, embora tenha causado instabilidade no mercado global, abriu oportunidades para que o Brasil expandisse seus envios ao exterior.

Outro fator essencial para o avanço do setor é o investimento em tecnologias sustentáveis. Muitas propriedades têm adotado sistemas de gestão ambiental que incluem o uso de biodigestores para tratamento de dejetos, reaproveitamento de água, manejo eficiente de resíduos e melhoria das condições de bem-estar animal. Essas práticas se mostram não apenas como resposta a pressões ambientais, mas também como uma vantagem competitiva frente a mercados internacionais cada vez mais exigentes em termos de sustentabilidade e responsabilidade social.

Em suma, a suinocultura no Brasil desempenha um papel estratégico no agronegócio, combinando crescimento econômico, presença internacional e esforços contínuos em modernização e sustentabilidade. O fortalecimento do setor passa pela manutenção dos investimentos em tecnologia, ampliação da competitividade global e aprofundamento das práticas sustentáveis, garantindo que a carne suína brasileira continue a ocupar posição de destaque nos mercados nacional e internacional.

## 2.2 ABATE DE SUÍNOS

A produção de carne e derivados, de suínos, no Brasil se destaca como uma das mais importantes do agronegócio, especialmente na região Sul, que se consolida como o principal polo de abate do país. Em 2024, o setor alcançou um recorde histórico, com o abate de 57,86 milhões de cabeças, um aumento de 1,2% em relação ao ano anterior (Melo, 2025).

Essa liderança é resultado do desempenho de três estados: Santa Catarina contribuindo com 29,1% do abate nacional; Paraná com 21,5% de participação nacional; e o Rio Grande do Sul com 17,1% de participação (Melo, 2025).

Para atender esta demanda de abate de animais, é necessário um grande número de frigoríficos, com capacidades produtivas e tecnologias diferentes, que precisam atender tanto questões ambientais quanto o bem-estar animal. Para entender o contexto do trabalho e como o biogás gerado pelo biodigestor pode ser utilizado no próprio processo industrial, será apresentado a seguir, o processo de abate de suínos.

### 2.2.1 Processo De Abate

O processo de abate de suínos em frigoríficos é composto por diversas etapas sequenciais, cada uma com funções específicas e requisitos técnicos, sanitários e ambientais. Tradicionalmente, o abate de suínos no Brasil ocorre quando os animais atingem peso entre 90 e 120 kg (Oliveira, 2011). O consumo de água e a geração de efluentes estão presentes em praticamente todas as fases, variando em intensidade de acordo com a natureza da operação. O Quadro 1 apresenta uma síntese das principais etapas do processo industrial, destacando suas características, exigências operacionais e aspectos relacionados ao uso e tratamento da água.

**Quadro 1 – Etapas do processo de abate de suínos e uso da água**

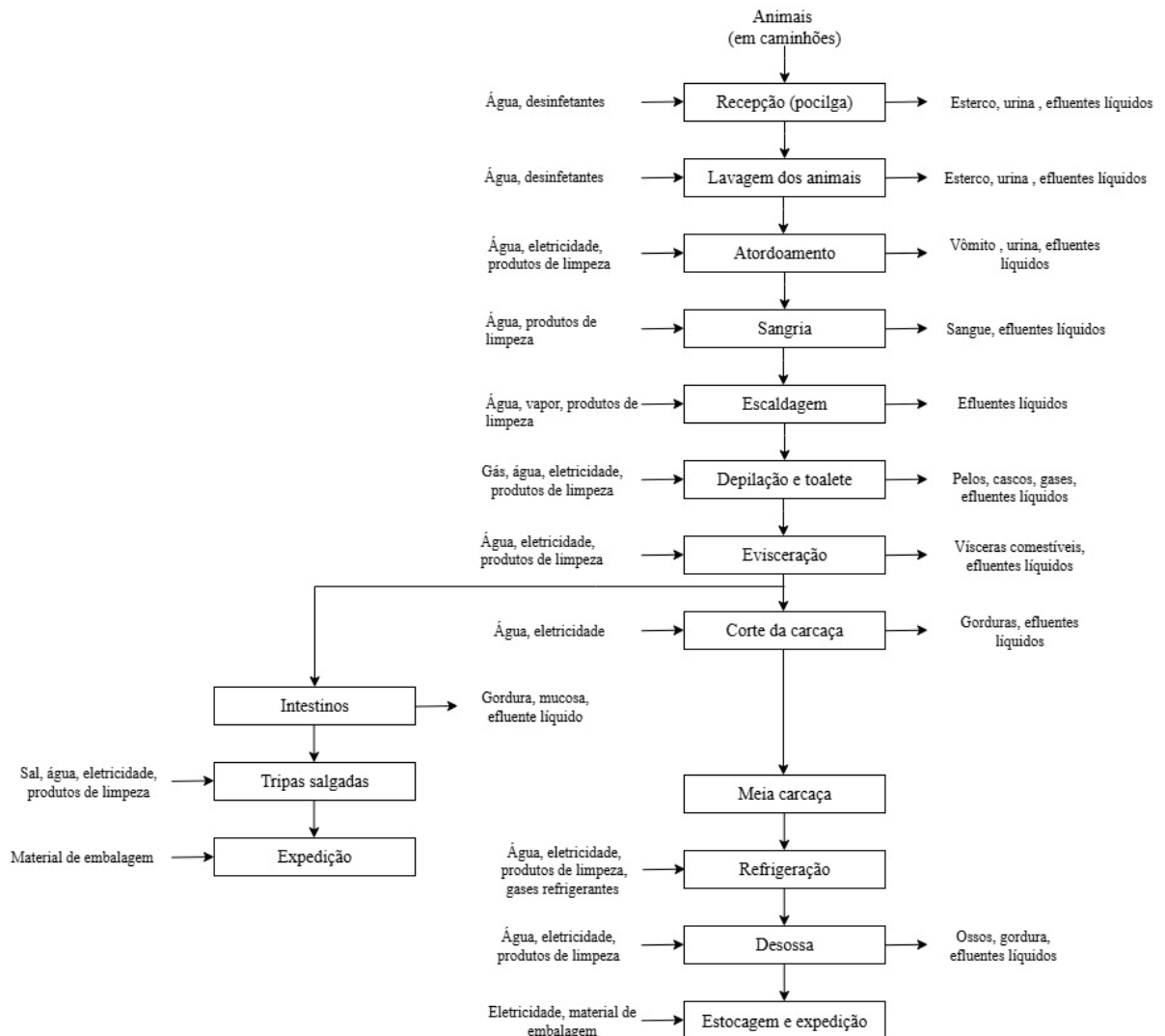
<b>Etapa</b>	<b>Descrição</b>
Pocilga	O início do processo industrial acontece na recepção, manejo e acomodação dos suínos vivos antes do abate, atendendo as normas de bem-estar animal e higiene, para minimizar o estresse (PSE – Pale, Soft, Exudative, que em português significa Pálida, Mole e Exsudativa) e evitar mortes no descarregamento ou nas baias. Os animais são separados por lotes e em jejum total de 18 a 24 h (8 a 12 h na granja) com água disponível para consumo, higienização e controle de temperatura. Respeito à densidade mínima de 1 m <sup>2</sup> /suíno até 100 kg (Portaria nº 711/1995 – MAPA). Descanso de aproximadamente 3 h antes do abate (Costa et al., s.d.). Estrutura com ventilação, sombreamento, aspersão de água e limpeza das baias para evitar contaminação das carcaças (Costa et al., s.d.). Os efluentes produzidos nesta etapa correspondem são denominados efluentes da linha verde.
Abate (Área suja)	Esta etapa inicia com a insensibilização (mais utilizada: elétrica) e sangria, com corte na jugular inferior a 5 cm para preservar qualidade da carne (Costa et al., s.d.). A sangria deve ser rápida e eficiente para garantir a exsanguinação completa. Após isso, a carcaça passa por escaldagem, depiladeira, rependuramento, depilação (toalete 1), chamuscagem e nova depilação (toalete 2). A limpeza inclui a remoção de pelos, pálpebras e higienização de pés e garganta. Os efluentes produzidos nesta etapa correspondem são denominados efluentes da linha vermelha.
Abate (Área limpa)	Após a sangria, inicia-se a abertura da carcaça, etapa que consiste na divisão longitudinal para inspeção interna realizada pelo médico veterinário do Serviço de Inspeção Federal (SIF). Nesse momento ocorre a retirada de papada, língua, cabeça e órgãos internos (evisceração). As carcaças aprovadas seguem para a remoção de pés, papada, banha, medula e tecidos defeituosos, enquanto as reprovadas são destinadas à graxaria ou ao processamento de subprodutos. Em seguida, realiza-se o resfriamento em câmaras frias, onde as carcaças são submetidas a circulação de ar com velocidade entre 0,5 e 1,5 m/s, umidade relativa de 85 a 95% e temperatura próxima a 2 °C, durante 24 horas. Nessa condição, pode ocorrer perda de peso entre 1,9 e 2,8% da carcaça (Gomide <i>et al.</i> , 2016). Ressalta-se que os efluentes gerados nesta etapa apresentam elevada carga microbiológica, além de concentrações significativas de proteínas e gorduras.
Tripária (Área suja)	Recebimento, higienização e separação de vísceras brancas (estômago, intestino delgado/grosso, bexiga etc.). Apesar de vir da área limpa, é considerada área suja pelo alto risco de contaminação. Uso intenso de água para remoção do conteúdo intestinal, lavagem do reto e limpeza das tripas. Intestino delgado segue para beneficiamento e depois para salga na tripária da área limpa. Os resíduos gerados nesta etapa possuem alta carga orgânica.
Salas anexas	As salas anexas englobam a desossa de cabeça e o processamento de miúdos internos e externos. O uso de água destina-se principalmente à higienização e ao resfriamento em chillers. Na desossa de cabeça, retira-se carne de bochechas e outras partes comestíveis. Os miúdos internos (como diafragma e língua) passam por chillers para conservação, com consumo de água moderado. Já os miúdos externos (pés, orelhas, máscara) exigem maior volume de água para lavagem criteriosa, representando uma fração significativa da demanda hídrica desta etapa.

**Quadro 2 – Etapas do processo de abate de suínos e uso da água (continuação)**

Etapa	Descrição
Higienização e lavanderia	A higienização parcial entre turnos e limpeza terminal no fim do expediente, visa garantir a segurança alimentar e biossegurança. Os equipamentos e pisos são limpos com água sob alta pressão e temperatura, além de produtos químicos alimentícios. E a lavanderia lava e desinfeta uniformes e EPIs, com separação entre áreas sujas e limpas. Operações geram efluentes com alta carga orgânica e produtos químicos.

Fonte: Adaptado de Costa *et al.* (s.d.), Portaria nº 711/1995 – MAPA e Autoras (2025).

A caracterização do processo industrial é uma etapa fundamental para compreender a dinâmica operacional do frigorífico (Figura 3). O fluxograma do processo industrial permite identificar os pontos críticos de consumo de água, geração de resíduos e produção de carga orgânica que influenciam diretamente no dimensionamento e na eficiência de sistemas de tratamento, principalmente no biodigestor anaeróbio.

**Figura 3 – Diagrama de Blocos do Processo Industrial do Frigorífico**

Fonte: Adaptado de Pacheco (2006).

### 2.3 EFLUENTES GERADOS EM FRIGORÍFICOS DE SUÍNOS

A utilização de água em frigoríficos de suínos é intensiva e abrangente, compreendendo desde a dessedentação dos animais, lavagem de caminhões e pocilgas, até processos industriais como escaldagem, lavagem de vísceras e carcaças, transporte de produtos e resíduos, e a fabricação de diversos itens. A água também é empregada na limpeza e esterilização de facas, equipamentos e pisos, na higienização dos funcionários, no resfriamento de compressores, condensadores, e como alimentação para caldeiras (UNEP, 2000).

Essa extensa utilização resulta em uma geração elevada de efluentes industriais. Estima-se que entre 80% e 95% da água utilizada nessas indústrias se transformem em efluentes (UNEP, 2000). Esses resíduos líquidos se caracterizam por uma alta carga orgânica poluente, contendo elementos como esterco, gorduras e sangue. Além disso, dependendo dos processos produtivos específicos da indústria, podem ser encontradas pequenas quantidades de fosfatos, nitratos e sais (UNEP, 2000). Em termos de volume e impacto, os efluentes representam o principal tipo de resíduo gerado pelos frigoríficos (SENAI, 2006).

A qualidade e o volume dos efluentes gerados são diretamente influenciados por fatores como a quantidade de animais abatidos, as características do processo produtivo e os turnos de produção do frigorífico, o Quadro 2 apresenta os fatores que influenciam na composição dos efluentes e conseqüentemente, o desempenho do biodigestor.

**Quadro 3 – Fatores do processo produtivo que influenciam a composição dos efluentes**

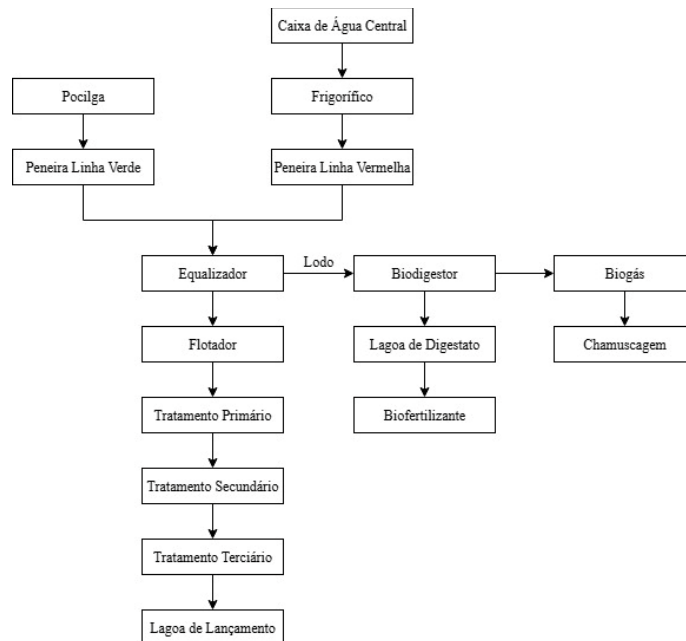
<b>Fatores</b>	<b>Efeitos</b>	<b>Referências</b>
Processo Produtivo	A fabricação de produtos como linguiças e banha gera efluentes ricos em óleos e graxas, que durante a digestão anaeróbia se transformam em ácidos graxos de cadeia longa (AGCL). Esses compostos podem inibir microrganismos, reduzir a eficiência do processo e a produção de biogás. A variação diária da produção impacta a composição dos efluentes, reforçando a importância do monitoramento contínuo.	Orrico et al., 2015; Rosero, 2017
Mix de Produção	Alterações entre linhas de produção (cortes nobres, embutidos, produtos processados) afetam as características físico-químicas dos efluentes, dificultando a adaptação da microbiota. Produtos ricos em gordura elevam a carga lipídica e a formação de AGCL, prejudicando a produção de CH <sub>4</sub> . Pré-tratamentos como flotação e decantação ajudam a reduzir esses impactos. Cortes nobres geram efluentes mais estáveis e menos carregados, favorecendo o equilíbrio do biodigestor.	Alves; Pereira; Mota, [s.d.]
Turnos de Produção	Produção concentrada em poucos turnos gera picos de carga orgânica que podem sobrecarregar o biodigestor e reduzir a eficiência. A produção contínua mantém carga estável, favorece a adaptação da microbiota e otimiza a geração de biogás, minimizando riscos de inibição do processo.	D'aquino et al., 2018; Embrapa, 2024

### 2.4 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

A estação de tratamento de efluentes em um frigorífico de suínos visa remover poluentes dos efluentes gerados pelo processo industrial, para que o efluente tratado possa ser reutilizado ou descartado de forma segura no meio ambiente.

A Figura 4 apresenta o as etapas de uma estação de tratamento de efluentes genérica para um frigorífico de suínos. O fluxograma apresentado descreve um sistema de tratamento de efluentes proveniente de pocilgas, frigoríficos e caixas de água central. Inicialmente, os efluentes passam por peneiras que atuam como pré-tratamento físico, removendo sólidos grosseiros e evitando sobrecarga nos processos posteriores (Idrica, 2021).

**Figura 4** – Estação de tratamento de efluentes genérica para um frigorífico de suínos



Fonte: Autoras, 2025.

Após o peneiramento, os efluentes são encaminhados para o equalizador, que homogeneiza a vazão e a carga orgânica, prevenindo choques hidráulicos e variações bruscas na composição. Em seguida, ocorre a flotação, processo que remove sólidos suspensos e materiais oleosos por meio de microbolhas de ar, caracterizando parte do tratamento primário. Nessa etapa, é possível remover entre 50% e 70% dos sólidos suspensos e até 40% da DBO (Idrica, 2021).

Para remoção da matéria orgânica são utilizados microrganismos, no tratamento secundário. Os sistemas mais utilizados incluem lagoas anaeróbias ou facultativas, reatores, lodos ativados e lagoas aeradas. As lagoas anaeróbias, por exemplo, são atrativas em regiões rurais por sua simplicidade operacional e capacidade de tratamento. Elas apresentam

tempos de retenção hidráulica superiores a 20 dias, favorecendo a estabilização do lodo e a redução de patógenos (Amaral *et al.*, 2004).

Quando necessário, o efluente tratado pode passar pelo tratamento terciário, também conhecido como polimento. Essa etapa tem como finalidade a remoção de contaminantes residuais, como nutrientes (nitrogênio e fósforo), turbidez, cor e microrganismos patogênicos, garantindo o cumprimento dos padrões de lançamento estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011. As tecnologias mais comuns incluem filtros de areia, carvão ativado, desinfecção com cloro ou radiação ultravioleta, além de sistemas de membranas, especialmente em casos que visam o reúso da água (Cremonini, 2018).

O tratamento de efluentes também gera lodo, que é encaminhado ao biodigestor, onde corre a digestão anaeróbia. Processo no qual microrganismos degradam a matéria orgânica na ausência de oxigênio, resultando na produção de biogás. O resíduo estabilizado, denominado digestato, pode ser armazenado em lagoas ou aplicado como biofertilizante agrícola, contribuindo para a economia circular (Kuosi, 2024; Unam, 2012; Save the water, 2022). Por fim, o efluente tratado segue para a lagoa de lançamento, local destinado à disposição final em conformidade com padrões ambientais.

## 2.5 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

A biodigestão anaeróbia é considerada uma forma importante de tratamento, pois reduz a carga poluente presente nos nutrientes, matéria orgânica e patógenos (Halmeman *et al.*, 2014). Este processo requer condições anaeróbias (potencial redox menor que - 200 mV) (Kunz *et al.*, 2019), onde as bactérias, na ausência de oxigênio (O<sub>2</sub>), transformam compostos orgânicos complexos em compostos mais simples, como CH<sub>4</sub> e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Campos, 1999). Além disso, permite a geração de renda por meio do aproveitamento de subprodutos de alto valor agregado, que podem ser convertidos em energia elétrica ou térmica e biofertilizantes, oferecendo ganhos econômicos significativos (Costa e Soto, 2018; Soares *et al.*, 2022).

A biodigestão anaeróbia é dividida em quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. O Quadro 3 apresenta a descrição das fases e as reações envolvidas.

### 2.5.1 Fatores Limitantes Para A Biodigestão

A eficiência da biodigestão anaeróbia está diretamente associada às condições físico-químicas e operacionais do sistema, que influenciam o metabolismo dos microrganismos e o equilíbrio das etapas microbiológicas envolvidas. Fatores como pH, temperatura, relação carbono/nitrogênio (C/N), concentração de sólidos, teor de umidade, carga orgânica e tempo de retenção hidráulica são determinantes para o bom desempenho do processo, impactando na conversão da matéria orgânica e na produção de biogás.

O Quadro 4 descreve os principais fatores limitantes, destacando suas faixas operacionais ideais, os efeitos sobre as populações microbianas e as estratégias de controle recomendadas com base na literatura técnica.

**Quadro 4** – Principais fases da biodigestão anaeróbia

Fase	Descrição	Reações
Hidrólise	Bactérias liberam enzimas extracelulares que quebram partículas grandes em moléculas menores e solúveis. Essa etapa é essencial para matéria orgânica complexa e de difícil degradação, limitando a velocidade do processo. O tempo de hidrólise varia conforme o substrato, sendo mais rápido para carboidratos e mais lento para proteínas e lipídios.	$(C_6H_{10}O_5)_n + nH_2O \rightarrow nC_6H_{12}O_6 + nH_2$
Acidogênese	Monômeros formados na hidrólise são degradados por bactérias anaeróbias e facultativas em ácidos orgânicos de cadeia curta, álcoois, óxidos de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, hidrogênio e dióxido de carbono.	$C_6H_{12}O_6 \leftrightarrow 2CH_3CH_2OH + 2CO_2$ $C_6H_{12}O_6 + 2H_2 \leftrightarrow 2CH_3CH_2COOH + 2H_2O$ $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CH_3COOH$
Acetogênese	Bactérias acetogênicas convertem os produtos da acidogênese em acetato, dióxido de carbono e hidrogênio.	$CH_3CH_2COO^- + 3H_2O \leftrightarrow CH_3COO^- + H^+ + HCO_3^- + 3H_2$ $C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \leftrightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$ $CH_3CH_2OH + 2H_2O \leftrightarrow CH_3COO^- + 3H_2 + H^+$
Metanogênese	Arqueas metanogênicas, em ambiente anaeróbio, convertem o carbono da biomassa em CH <sub>4</sub> e dióxido de carbono, que compõem a maior parte do biogás produzido.	$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$ $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$ $2CH_3CH_2OH + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2CH_3COOH$

Fonte: Adaptado de Arruda et al., 2002; Bacca e Zenatti, 2020; Kunz et al., 2019; Uddin, 2023.

**Quadro 5** – Fatores limitantes na biodigestão anaeróbia: faixas operacionais, efeitos microbianos e estratégias de controle

(continua)

<b>Fator limitante</b>	<b>Referências</b>	<b>Faixa operacional ideal</b>	<b>Efeitos sobre populações microbianas</b>	<b>Estratégias de controle recomendadas</b>
pH	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Faria, 2012</li> <li>– Rowse, 2011</li> <li>– Raposo <i>et al.</i>, 2011</li> <li>– Pecora, 2006</li> <li>– Bazara <i>et al.</i>, 2003</li> <li>– Rittmann e McCarty, 2001</li> <li>– Lema e Méndez, 1997</li> <li>– Grady e Lim, 1980</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Faixa operacional recomendada: 6,0–8,0 (geral);</li> <li>– Metanogênicas: 6,5–7,5;</li> <li>– Bactérias fermentativas ~7,2–7,4;</li> <li>– Acetogênicas: 6,0–6,2.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Acúmulo de ácidos orgânicos reduz o pH (&lt;6,0) e prejudica fortemente as arqueas metanogênicas, provocando queda ou paralisação da produção de CH<sub>4</sub>;</li> <li>– Flutuações fora da faixa 6 a 8 comprometem a atividade microbiana e podem levar ao colapso pela acumulação de ácidos graxos voláteis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Monitoramento contínuo de pH e alcalinidade; manter alcalinidade total entre 2.500 a 5.000 mg CaCO<sub>3</sub>/L) e tamponamento com bicarbonatos.</li> <li>– Controle da carga orgânica para evitar acumulação de AGV;</li> <li>– Correções com alcalinizantes e recirculação de digestato quando necessário.</li> </ul>
Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Pereira Neto, 1994</li> <li>– Speece, 1996</li> <li>– Bidone e Povinelli, 1999</li> <li>– Rittmann e McCarty, 2001</li> <li>– Kiehl, 2004</li> <li>– Rodrigues <i>et al.</i>, 2006</li> <li>– Salomon, 2007</li> <li>– Deublein e Steinhauser, 2008</li> <li>– Lettinga <i>et al</i> 2011</li> <li>– Faria, 2012</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Faixas microbianas: psicrófilos: 5–10 °C, mesófilos: 25–45 °C (processos mesofílicos típicos em ~35 °C), termófilos: 45–65 °C;</li> <li>– Processos mesofílicos são mais estáveis; termofílicos exigem controle térmico mais rigoroso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Variações térmicas reduzem a taxa de crescimento e a eficiência metabólica: uma queda de apenas 5 °C pode reduzir a atividade microbiana em até 34%;</li> <li>– Temperaturas abaixo do ideal levam a acúmulo de AGV e queda da produção de biogás; temperaturas &gt;70 °C inibem metanogênicos e aumentam perda de nitrogênio por volatilização.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Manter isolamento térmico e sistema de aquecimento/controlador (quando necessário);</li> <li>– Dimensionamento e carga compatíveis para retenção de calor;</li> <li>– Operar mesofílico para maior estabilidade ou termofílico apenas com controle rigoroso;</li> <li>– Monitorar temperatura e ajustar alimentação/recirculação para evitar oscilações.</li> </ul>
Relação C/N	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Zucconi e Bertoldi, 1986</li> <li>– Lopez-Real, 1994</li> <li>– Bidone, 2001</li> <li>– Nunes, 2003</li> <li>– Von Sperling, 2006</li> <li>– Batista e Batista, 2007</li> <li>– Chernicharo, 2007</li> <li>– Maragno <i>et al.</i>, 2007</li> <li>– Zhu, 2007</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Faixa ideal para biodigestão: 20:1 – 30:1</li> <li>– Para compostagem: 25:1–35:1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– C/N muito baixo → excesso de N → formação de amônia tóxica para microrganismos;</li> <li>– C/N muito alto → deficiência de N → limita crescimento microbiano e reduz velocidade de decomposição;</li> <li>– Afeta estabilidade e velocidade de conversão.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ajuste por mistura de resíduos ricos em carbono (palha, serragem) com fontes de N (esterco, restos frescos)</li> <li>– Monitorar CT e NT para calcular C/N;</li> <li>– Uso de co-substratos e recargas balanceadas para manter C/N dentro da faixa alvo</li> </ul>

Fonte: Autoras 2025.

**Quadro 4** – Fatores limitantes na biodigestão anaeróbia: faixas operacionais, efeitos microbianos e estratégias de controle

(conclusão)

Fator limitante		Faixa operacional ideal	Efeitos sobre populações microbianas	Estratégias de controle recomendadas
Concentração de sólidos (ST/SV/SF)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Leite e Povinelli, 1999</li> <li>– Mator, 2005</li> <li>– Bley Jr <i>et al.</i>, 2003</li> <li>– Li <i>et al.</i>, 2011</li> <li>– Labiogás, 2013</li> <li>– Pessuti <i>et al.</i>, 2015</li> <li>– Yang <i>et al.</i>, 2015</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ST (base úmida) entre 5 a 8%, valor superior a 10% ST favorece sedimentação e problemas operacionais.</li> <li>– Fração SV (volátil) correlaciona ao potencial de CH<sub>4</sub>;</li> <li>– SV tipicamente ~80% dos ST em dejetos animais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ST elevados → formação de camada de sólidos sedimentáveis, entupimento, acúmulo no fundo, diminuição da liberação de biogás e eficiência de conversão;</li> <li>– SF (fixos) são inertes e em excesso prejudicam processo; redução do SV reduz potencial metanogênico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Controle por diluição (adição de água) e mistura adequada; pré-peneiração e retirada de grossos;</li> <li>– Monitorar SV/SF e concentração de ST;</li> <li>– Dimensionamento do TRH considerando sólidos;</li> <li>– Evitar cargas afluentes com ST muito altas.</li> </ul>
Teor de água/ Umidade	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Bidone e Povinelli, 1999</li> <li>– Richard <i>et al.</i>, 2002</li> <li>– Smith; Hughes, 2004</li> <li>– Pecora, 2006</li> <li>– Banegas <i>et al.</i>, 2007</li> <li>– Maragno <i>et al.</i>, 2007</li> <li>– Fernández, 2008;</li> <li>– Dongala, 2010</li> <li>– Neves, 2010</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Biodigestão líquida: 60%–90% umidade recomendada; umidade &lt; 40% limitam microrganismos; &gt; 85 a 90% dilui substrato e aumenta risco de sobrecarga hidráulica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Umidade baixa: transporte de nutrientes comprometido, ressecamento e baixa atividade microbiana;</li> <li>– Umidade excessiva: diluição do substrato, menor eficiência de produção de biogás e risco de sobrecarga hidráulica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ajustar umidade com co-substratos secos/estruturantes (serragem, casca de arroz, bagaço) para melhorar porosidade e C/N;</li> <li>– Recirculação de digestato ou adição de água conforme necessário;</li> <li>– Garantir qualidade da água (evitar cloro/desinfetantes);</li> <li>– Prevenção de crostas e zonas mortas.</li> </ul>
Tempo de Retenção Hidráulica (TRH)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– De la Torre, 2008</li> <li>– Khanal, 2009</li> <li>– Lima, 2011</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Depende de temperatura e grupo microbiano. Valores típicos: Psicrófila (15–18 °C) → &gt; 100 dias; Mesófila (28–33 °C) → 30–60 dias; Termófila (50–60 °C) → 10–16 dias.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– TRH curto → conversão incompleta, risco de arraste de sólidos e menor produção de biogás; TRH longo → subutilização do volume e menor produtividade por unidade de tempo; TRH interage com temperatura (temperatura maior → TRH menor necessário)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Definir TRH com base no substrato, tecnologia de reator e temperatura operacional;</li> <li>– Ajustar taxa de alimentação e mistura;</li> <li>– Monitorar desempenho (produção de biogás, VFA, sólidos) e adaptar TRH conforme necessidade.</li> </ul>
Carga orgânica volumétrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Chernicharo, 2007</li> <li>– Lima, 2024</li> <li>– Kunz <i>et al.</i>, 2019</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Expressa em kg DQO·m<sup>-3</sup>·dia (ou kg SV·m<sup>-3</sup>·dia). Para sistemas contínuos mesofílicos (30–40 °C) recomenda-se 1,0 – 6,0 kg DQO·m<sup>-3</sup>·dia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– COV elevada: sobrecarga orgânica, acidificação, inibição de metanogênicos e instabilidade;</li> <li>– COV muito baixa: subutilização do reator e baixa produção de biogás.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Monitorar DQO/SV e manter COV dentro da faixa recomendada; ajustar carga por diluição, redução de afluente, codigestão com substratos de menor DQO ou aumentar volume útil/TRH;</li> <li>– Acompanhamento contínuo para evitar picos de carga.</li> </ul>

Fonte: Autoras, 2025.

## 2.6 BIODIGESTORES

Os biodigestores, concebidos como reatores hermeticamente fechados para impedir a entrada de oxigênio, representam uma tecnologia fundamental para otimizar a transformação da matéria orgânica em gases a partir da digestão anaeróbia. Os biodigestores funcionam como câmaras estanques, projetadas para a decomposição da matéria orgânica por meio de processos microbiológicos que ocorrem em condições anaeróbias. Esses equipamentos se distinguem pela sua capacidade de gerar tanto biogás quanto biofertilizantes, contribuindo de forma significativa para a sustentabilidade ambiental e energética das atividades agropecuárias.

Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2016), o biogás resultante desse processo é composto principalmente por metano, com uma concentração que varia entre 54% e 80%; dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), presente em proporções de 20% a 45%; sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) em torno de 3%; e nitrogênio (N<sub>2</sub>), também com cerca de 3%. Uma das vantagens significativas dos biodigestores reside na possibilidade de capturar o biogás gerado, que, após passar por um processo de purificação, pode ser integrado a um ciclo de economia circular, sendo reutilizado em diversas aplicações dentro das próprias granjas suínícolas.

A alimentação dos biodigestores pode ser conduzida de duas maneiras distintas: em batelada ou de forma contínua (Kothari *et al.*, 2014). Os biodigestores em batelada caracterizam-se por serem sistemas de operação simples e com baixa demanda operacional. Sua instalação pode ocorrer como um único tanque anaeróbio ou em múltiplos tanques dispostos em série. Essencialmente, são compostos por uma câmara de biodigestão, geralmente construída em alvenaria, e por um dispositivo para a medição do gás produzido, denominado gasômetro. Este tipo de biodigestor é carregado com o material orgânico em uma única etapa, permanecendo em fermentação por um período predefinido, com a descarga do material ocorrendo somente ao término da produção de biogás.

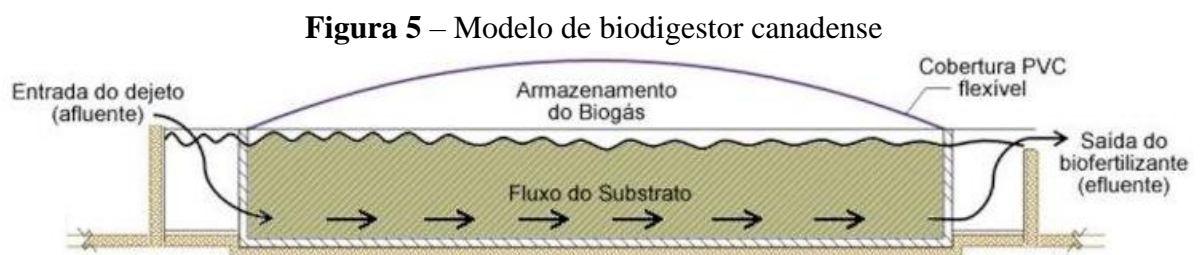
A produção de biogás tende a declinar aproximadamente entre 40 e 60 dias após o início do processo, indicando a decomposição da maior parte da matéria orgânica (Silva, 2020). Devido à sua natureza de operação com alimentação única, é comumente utilizado em locais com produção intermitente de biomassa, como em granjas avícolas de corte, onde o esterco é removido durante os ciclos de limpeza (Emas, 2020; Deganutti *et al.*, 2013).

Conseqüentemente, este modelo não se mostra adequado para granjas de suínos, onde a geração de esterco é um processo contínuo.

Em contrapartida, os biodigestores contínuos são constituídos por uma caixa de carga, um recipiente de digestão e uma caixa de descarga (Rizzoni, 2012). Eles são projetados para receber adições regulares de matéria orgânica, o que possibilita uma produção constante de biogás. Neste sistema, observa-se um fluxo contínuo de entrada do substrato e de saída do material digerido. A descarga do material ocorre por meio da caixa de descarga, sem a necessidade de abrir o biodigestor, garantindo a continuidade da produção de biogás.

Em virtude da vasta gama de materiais que podem ser biodegradados em ambientes anaeróbicos, existe uma variedade de modelos de biodigestores contínuos. A seleção do modelo mais apropriado depende de diversos fatores, como a necessidade específica de tratamento, o tipo de substrato a ser utilizado, a disponibilidade de espaço físico e o custo total do projeto (Bacca e Zenatti, 2020; Santos e Guimarães, 2023).

No contexto brasileiro, o biodigestor canadense (Figura 5) se destaca como o modelo mais utilizado, especialmente por grandes produtores, sendo considerado o mais indicado para o tratamento de grandes volumes de dejetos (Lindemeyer, 2008).



Fonte: Lima, 2011.

O biodigestor canadense opera com alimentação contínua e é composto por uma câmara de digestão subterrânea, revestida com lona polimérica, e um reservatório de biogás inflável localizado na parte superior, exposto à radiação solar. À medida que o biogás é gerado, o gasômetro se infla e acumula o gás, formando a estrutura de armazenamento. O modelo também inclui uma caixa de saída para o efluente, um registro para a saída do biogás e um queimador, conectado ao registro de saída do gás. Uma característica distintiva deste modelo é a exposição ao sol, que eleva a temperatura interna, otimizando as reações de biodigestão (Silva, 2020; Schiavo e Belonia, 2025).

### 2.6.1 Dimensionamento

O dimensionamento de biodigestores é uma etapa fundamental para garantir a eficiência do processo de biodigestão anaeróbia, sendo diretamente influenciado por variáveis como o tipo de substrato, volume diário de dejetos, tempo de retenção hidráulica, temperatura de operação e capacidade de produção de biogás. A escolha do modelo de biodigestor, como o tipo indiano, chinês ou tubular (plug-flow), depende tanto do tipo de resíduo quanto da escala de produção. Para resíduos de suínos, por exemplo, que apresentam alta carga orgânica e baixa proporção de fibras, o biodigestor tubular tem se mostrado eficiente, principalmente pela simplicidade construtiva e fácil manutenção. A Embrapa (2020) destaca que o teor de sólidos totais ideal para biodigestores varia entre 8 % e 12 %, sendo que a diluição correta dos dejetos é essencial para o desempenho microbiológico do sistema.

O dimensionamento do volume útil do biodigestor baseia-se na quantidade de substrato gerado diariamente, incluindo a fração líquida de diluição, e deve ser suficiente para manter a biomassa em condições adequadas de conversão da matéria orgânica em metano. Esse volume pode ser obtido pelo produto entre a vazão diária de alimentação do efluente e o tempo de retenção hidráulica (Chernicharo, 2007; Metcalf e Eddy, 2014), conforme a Equação 1.

$$V_{biodigestor} = TRH \times Q_{substrato} \quad (\text{Equação 1})$$

onde:

$V_{biodigestor}$  = volume útil do biodigestor (m<sup>3</sup>);

TRH = tempo de retenção hidráulica (dias);

$Q_{substrato}$  = volume diário de substrato alimentado (m<sup>3</sup>/dia).

O tempo de retenção hidráulica, por sua vez, corresponde ao período médio de permanência do substrato no interior do reator e é obtido pela razão entre o volume útil do biodigestor e a vazão diária de alimentação (Jordão e Pessôa, 2017; Von Sperling, 2014), conforme a Equação 2.

$$THR = \frac{V_{biodigestor}}{Q_{substrato}} \quad (\text{Equação 2})$$

O tempo de retenção hidráulica, que geralmente varia entre 30 e 45 dias em sistemas contínuos, podendo ultrapassar 60 dias em sistemas de batelada. Essa estimativa,

segundo Macedo *et al.* (2014), deve considerar ainda a carga orgânica volumétrica, a produção esperada de CH<sub>4</sub> e a temperatura média de operação, especialmente em regiões de clima subtropical ou temperado.

Além do volume, é necessário projetar a geometria do biodigestor de forma a garantir estabilidade térmica e boa separação das fases líquida e gasosa. Estudos como o de Ribeiro (2011) recomendam que a proporção da câmara de gás seja inferior a 40 % do volume total para evitar sobrepessão e falhas operacionais. Outro fator essencial no dimensionamento é a inoculação do sistema. A introdução de lodo digerido como inóculo pode reduzir significativamente o TRH necessário para atingir a máxima produção de biogás, como demonstrado por Xavier e Lucas Júnior (2010), que observaram a possibilidade de redução de até 50 % no tempo de retenção quando se utilizou 40 % de inóculo em biodigestores batelada.

A produção de biogás estimada por animal varia conforme a espécie e dieta. Contudo, a sazonalidade da produção, as variações de temperatura e o controle de parâmetros operacionais como pH e teor de sólidos devem ser constantemente monitorados, pois afetam diretamente a eficiência energética e a estabilidade do sistema.

O dimensionamento adequado do biodigestor também exige o conhecimento dos fatores microbiológicos e ambientais que afetam o desempenho do sistema. Como destaca a Embrapa (2020), o sucesso da biodigestão anaeróbia está ligado à compatibilidade entre o projeto técnico e as características reais dos resíduos, sendo recomendável a realização de análises laboratoriais do substrato antes da construção do biodigestor. Além disso, estudos reforçam a importância do monitoramento contínuo e da assistência técnica para ajustes operacionais que garantam eficiência energética, longevidade do sistema e retorno econômico (Aparecido *et al.*, 2024).

## 2.7 ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E AMBIENTAL

A avaliação da viabilidade técnica e ambiental da implantação de biodigestores em frigoríficos de suínos exige uma análise integrada de aspectos operacionais, estruturais e ecológicos. A biodigestão anaeróbia surge como uma alternativa tecnológica viável, capaz de transformar esses resíduos em biogás e biofertilizante, reduzindo os impactos ambientais e agregando valor à cadeia produtiva.

Do ponto de vista técnico, a viabilidade do sistema depende da adequação entre o volume de resíduos gerado e a capacidade do biodigestor. Parâmetros como carga

orgânica volumétrica, tempo de retenção hidráulica, temperatura e pH são determinantes para a eficiência do processo. Segundo Macedo *et al.* (2014), biodigestores projetados para tratar dejetos suínos apresentaram produção potencial de metano entre 0,051 e 0,124 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> por animal por dia, dependendo da composição e volume dos dejetos. Esses valores permitem prever a geração energética e a capacidade do sistema de atender demandas internas, como aquecimento de água ou fornecimento de energia elétrica em pequena escala.

Do ponto de vista ambiental, o uso de biodigestores permite a redução significativa da carga poluidora dos efluentes, com diminuição nos níveis de DQO e DBO. Além disso, contribui para a mitigação da emissão de gases de efeito estufa, especialmente CH<sub>4</sub> que seria emitido se os resíduos fossem armazenados ou descartados sem tratamento adequado. A substituição parcial de combustíveis fósseis pelo biogás gerado também representa um ganho ambiental importante, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade ambiental e economia circular.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia utilizada neste trabalho, que compreende a caracterização do local onde foi realizado o estudo de caso, a coleta e análise dos dados do processo industrial e da estação de tratamento de efluentes, bem como a avaliação técnica e ambiental da implementação das melhorias propostas no sistema de biodigestão anaeróbia do frigorífico de suínos.

#### 3.1 LOCAL DO ESTUDO DE CASO

O estudo foi realizado em um frigorífico de suínos localizado na região Oeste do Paraná. A unidade industrial estudada está inserida no contexto da Indústria 4.0 desde 2024, conta com cerca de 1.300 colaboradores e opera com dois turnos de abate por dia, resultando em produção expressiva de cortes suínos destinados ao mercado interno e à exportação, atendendo aos padrões sanitários e de qualidade exigidos nacional e internacionalmente.

#### 3.2 COLETA E ANÁLISE DE DADOS

Na etapa de coleta de dados, foi realizado por meio do levantamento dos documentos do frigorífico (planilhas, registros operacionais e relatórios técnicos) e observações diretas no local.

A análise das informações coletadas auxiliou a descrição de todas as etapas e identificação dos principais pontos de geração dos efluentes e resíduos sólidos. Foram coletados resultados das análises dos efluentes dos parâmetros DBO, DQO, pH, ST, óleos e graxas, nitrogênio e fósforo total. Esses dados foram utilizados para estimar a concentração de matéria orgânica biodegradável, o potencial poluidor dos efluentes e a adequação do substrato às condições ideais para digestão anaeróbia.

A partir dos dados coletados foi calculada a vazão média diária; relação efluente/água consumida na planta industrial e vazão específica por animal abatido. Esses resultados são essenciais para o dimensionamento do volume útil do biodigestor, assegurando que o tempo de retenção hidráulica seja compatível com a carga orgânica aplicada e com a eficiência esperada do sistema. A análise da relação entre o volume de água consumido e o efluente gerado também permite avaliar a eficiência hídrica da planta, identificando potenciais

oportunidades para reuso e redução de perdas.

A vazão média diária de efluentes foi estimada com base em dados operacionais, considerando o número de suínos abatidos por dia, o consumo médio de água por animal e os registros de vazão obtidos na calha Parshall instalada na saída do flotor. A vazão diária de efluente foi determinada pela Equação 3.

$$Q_{dia} = Q_{hora} \times t_{op} \quad (\text{Equação 3})$$

onde:

$Q_{dia}$  = vazão diária de efluente ( $m^3/dia$ );

$Q_{hora}$  = vazão horária média ( $m^3/h$ );

$t_{op}$  = tempo diário de operação ( $h/dia$ ).

A partir das vazões de efluentes calculados, foi estimada a relação efluente/água consumida na planta industrial, a partir do consumo médio de água por suíno, utilizando a Equação 4.

$$Relação_{efluente/água} = \frac{Q_{efluente}}{Q_{água}} \quad (\text{Equação 4})$$

onde:

$Relação_{efluente/água}$  = representa quanto do consumo de água retorna como efluente, refletindo a eficiência no uso hídrico do processo;

$Q_{efluente}$  = vazão diária de efluente consumido ( $m^3/dia$ );

$Q_{água}$  = vazão diária de água consumida ( $m^3/dia$ ), estimado a partir do consumo médio por suíno.

A determinação da vazão específica por animal abatido foi realizada pela Equação 5.

$$Vazão_{suíno} = \frac{Q_{efluente}}{N_{suínos}} \quad (\text{Equação 5})$$

onde:

$Vazão_{suíno}$  = volume médio de efluente gerado por suíno ( $L/suíno$ );

$N_{\text{suínos}}$  = número de suínos abatidos por dia.

### 3.3 SISTEMA DE BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

A avaliação do sistema de biodigestão anaeróbia foi realizada a partir dos resultados das análises físico-químicas dos efluentes e das informações operacionais. Foram realizadas análises adicionais como o monitoramento do pH e temperatura. E a seguir encontram-se descritos como foram realizados os cálculos do volume útil do biodigestor, estimativa de produção de biogás, dimensionamento do sistema de armazenamento de biogás, dimensionamento do reservatório de biogás, estimativa do potencial energético do biogás, comparação energética entre o biogás e o GLP e otimização do sistema de biodigestão.

#### 3.3.1 Monitoramento do pH E Temperatura

As medições de temperatura e pH foram realizadas com termômetro digital e medidor portátil de pH devidamente calibrado, durante dez dias consecutivos, em dois turnos diários (6h00 e 14h00), a fim de capturar eventuais oscilações térmicas relacionadas à exposição dos tanques ao ambiente externo. A escolha dos horários foi baseada nas variações típicas de radiação solar e temperatura ambiente, que impactam diretamente os sistemas não isolados termicamente (Souza, 1984).

As análises buscavam identificar eventuais desvios que comprometessem a eficiência do processo, além de embasar propostas de melhorias operacionais, como controle térmico passivo ou ativo, e automação do monitoramento em tempo real.

#### 3.3.2 Volume Útil Do Biodigestor

O volume útil do biodigestor ( $V_{\text{biodigestor}}$ ) foi estimado com base no TRH adotado para o processo e na vazão diária de substrato disponível para alimentação do reator, conforme apresentado na Equação 1. Essa equação é amplamente utilizada no dimensionamento de reatores contínuos operando em regime hidrostático.

Essa equação permite determinar o volume necessário para garantir tempo de residência adequado à digestão microbiológica do material orgânico, assegurando a estabilidade operacional do sistema e a maximização da conversão da carga orgânica em biogás. A seleção

do TRH considerou a faixa mesofílica de operação e a natureza físico-química do substrato, conforme discutido nos tópicos anteriores.

### 3.3.3 Estimativa Da Produção De Biogás

A DQO é usada como parâmetro para estimar o potencial de produção de biogás na digestão anaeróbia. A DQO representa a quantidade de oxigênio necessária para oxidar quimicamente a matéria orgânica presente em uma amostra e, portanto, reflete a carga orgânica biodegradável disponível no substrato. Como o biogás é resultado da conversão microbiana dessa matéria orgânica, a DQO se correlaciona diretamente com o volume de CH<sub>4</sub> passível de ser gerado no processo (Hamilton, 2005; Harika, *et al.* 2023).

Essa abordagem se associa à fundamentação teórica da Equação de Buswell e Neave, utilizada para prever, com base na fórmula empírica do substrato (C<sub>a</sub>H<sub>β</sub>O<sub>c</sub>N<sub>d</sub>), a composição e a quantidade de gases produzidos (CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>) durante a digestão anaeróbia. Embora essa equação exija dados de composição elementar do substrato, em estudos aplicados utiliza-se a DQO como alternativa prática, uma vez que sua determinação é mais acessível em análises de rotina e fornece uma estimativa confiável da fração orgânica passível de biodegradação (Nordberg, 2017).

A estimativa da produção de biogás foi realizada a partir da DQO disponível no efluente alimentado ao biodigestor e na aplicação de um rendimento médio de conversão bioquímica da matéria orgânica em CH<sub>4</sub>. A conversão típica de 0,40 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por quilograma de DQO removida em substratos com biodegradabilidade moderada (Hamilton, 2005; Harika, *et al.* 2023).

Dessa forma, a carga orgânica diária (DQO, em kg/dia) foi determinada a partir da concentração de DQO no substrato (em kg/m<sup>3</sup>) e da vazão diária de alimentação do biodigestor (m<sup>3</sup>/dia), conforme a Equação 6.

$$\text{Carga de DQO} = C_{DQO} \times Q_{\text{alimentação}} \quad (\text{Equação 6})$$

onde:

Carga de DQO = carga orgânica diária (kg/dia);

C<sub>DQO</sub> = concentração de DQO no substrato (kg/m<sup>3</sup>);

Q<sub>alimentação</sub> = vazão diária de alimentação do biodigestor (m<sup>3</sup>/dia).

Adicionalmente, foi estimada a Carga Orgânica Volumétrica (COV), parâmetro que expressa a quantidade de matéria orgânica aplicada por unidade de volume útil do reator e por unidade de tempo. Essa variável é fundamental para o controle operacional do sistema, pois relaciona a carga de DQO aplicada ao volume do reator, conforme:

$$COV = \frac{Carga\ de\ DQO(kg/dia)}{V_{biodigestor}\ (m^3)} \quad \text{(Equação 7)}$$

A determinação da Carga Orgânica Volumétrica (COV) permitiu avaliar se o sistema opera dentro dos limites recomendados pela literatura para reatores anaeróbios em regime mesofílico. De acordo com Metcalf e Eddy (2016), a faixa operacional típica situa-se entre 1,0 e 6,0 kg DQO/m<sup>3</sup>·dia para sistemas convencionais, podendo alcançar valores mais elevados (até 15 kg DQO/m<sup>3</sup>·dia) em configurações com maior eficiência de retenção de biomassa. Assim, a COV constitui um parâmetro essencial, pois reflete diretamente a intensidade de alimentação orgânica aplicada ao reator e o grau de aproveitamento de sua capacidade volumétrica.

Com base na carga de DQO calculada, a produção diária de biogás foi estimada utilizando-se o rendimento médio de 0,40 m<sup>3</sup> de biogás por quilograma de DQO removida. Este valor é compatível com substratos de biodegradabilidade moderada (Hamilton, 2005; Harika et al., 2023), e o cálculo foi realizado conforme a Equação 8.

$$Produção\ de\ biogás = Carga\ de\ DQO \times Y_{biogás} \quad \text{(Equação 8)}$$

onde:

$Y_{biogás}$  = rendimento de produção de biogás (0,40 m<sup>3</sup>/kg DQO removida).

### 3.3.4 Dimensionamento Do Reservatório De Biogás

O dimensionamento do reservatório de biogás tem por objetivo garantir o armazenamento adequado do volume diário gerado, considerando as flutuações na produção e no consumo, além de oferecer segurança operacional em caso de interrupções no uso imediato do biogás. Para tanto, na escolha do valor do fator de segurança foi considerado o regime de operação da planta, a regularidade da produção de biogás, o tipo de aplicação energética e a

autonomia desejada para o sistema. Valores mais conservadores (próximo a 2,0) são indicados quando há incertezas na demanda ou risco de interrupções no consumo (Energypedia, 2023). Para os cálculos desse trabalho, utilizou-se um fator de segurança de 1,5.

O volume do reservatório, necessário de armazenamento do biogás foi determinado pela Equação 9.

$$V_{\text{reservatório}} = \text{Fator}_{\text{segurança}} \times V_{\text{biogás}} \quad (\text{Equação 9})$$

onde:

$V_{\text{reservatório}}$  = volume do reservatório de biogás (m<sup>3</sup>);

$\text{Fator}_{\text{segurança}}$  = fator de segurança (adimensional), usualmente entre 10-20% conforme o perfil de consumo (Energypedia, 2023) = 1,5;

$V_{\text{biogás}}$  = volume máximo diário de biogás produzido (m<sup>3</sup>/dia).

### 3.3.5 Estimativa Do Potencial Energético Do Biogás

A estimativa do potencial energético do biogás gerado a partir da digestão anaeróbia dos efluentes industriais foi realizada com base na composição do gás e nas propriedades físico-químicas associadas ao CH<sub>4</sub>, principal componente energético do biogás. O objetivo deste cálculo é quantificar a energia térmica disponível diariamente, expressa em kilojoules (kJ), megajoules (MJ) e quilocalorias (kcal), a fim de subsidiar a análise de viabilidade do uso energético do biogás na planta frigorífica.

Embora, neste estudo, os valores de composição do biogás tenham sido fornecidos pela empresa, destaca-se que a determinação do teor de CH<sub>4</sub> é comumente realizada por cromatografia gasosa, técnica que separa e quantifica os componentes do biogás, permitindo estimar seu poder calorífico (Campos *et al.*, 2013).

Neste trabalho, utilizou-se como referência a composição média do biogás produzido pela empresa, cuja proporção de CH<sub>4</sub> serviu de base para a estimativa do Poder Calorífico Inferior (PCI) gravimétrico, conforme valores estabelecidos por Avellar (2001). Para a conversão do PCI para base volumétrica, adotou-se a densidade média do biogás compatível com o teor de metano informado, conforme determinado por Zank *et al.* (2020). O PCI volumétrico foi calculado segundo a Equação 10.

$$PCI_{volumetrico} = V_{biogás} \times PCI_{gravimétrico} \quad (\text{Equação 10})$$

onde:

$PCI_{volumetrico}$  = poder calorífico inferior em base volumétrica (kJ/m<sup>3</sup>);

$PCI_{gravimétrico}$  = poder calorífico inferior em base mássica (kJ/kg);

$\rho$  = densidade do biogás (kg/m<sup>3</sup>).

A partir do valor do PCI calculado (Equação 10), foi calculada a energia térmica total disponível por dia (Equação 11).

$$E_{térmica} = V_{biogás} \times PCI_{volumetrico} \quad (\text{Equação 11})$$

onde:

$E_{térmica}$  = energia térmica total diária (kJ/dia);

$V_{biogás}$  = volume diário de biogás produzido (m<sup>3</sup>/dia).

### 3.3.6 Comparação Energética Entre Biogás E GLP

A fim de avaliar a viabilidade energética do sistema de biodigestão anaeróbia implantado na unidade frigorífica, foi realizada uma comparação entre o potencial energético do biogás gerado e o consumo térmico diário de GLP, atualmente utilizado no processo de chamuscagem. Essa análise permite verificar a possibilidade de substituição parcial ou total do combustível fóssil por uma fonte energética renovável gerada internamente, com base em dados empíricos de consumo e produção.

A comparação baseou-se na estimativa da energia térmica diária suprida pelo GLP, calculada por meio do consumo médio informado pela empresa (em kg/dia) e do PCI do combustível, conforme apresentado na Equação 12.

$$E_{GLP} = m_{GLP} \times PCI_{GLP} \quad (\text{Equação 12})$$

onde:

$E_{GLP}$  = energia térmica fornecida pelo GLP (kJ/dia);

$m_{GLP}$  = massa de GLP consumida diariamente (kg/dia);

$PCI_{GLP}$  = poder calorífico inferior do GLP (kJ/kg).

A energia térmica fornecida pelo GLP (determinada pela Equação 11) foi comparada com a energia térmica disponível a partir do biogás (determinada no item 3.3.5 Estimativa Do Potencial Energético Do Biogás).

Foram considerados na análise dois cenários: a) cenário real de operação do biodigestor, com base na vazão atualmente encaminhada ao sistema; e b) cenário potencial, assumindo o aproveitamento integral da carga orgânica dos efluentes industriais.

Essa análise comparativa tem por finalidade indicar o grau de cobertura da demanda energética atual pela produção de biogás da planta, servindo como base para decisões técnicas sobre redimensionamento do sistema, viabilidade de adaptação dos queimadores e redução do consumo de combustíveis fósseis. O percentual de substituição energética foi determinado pela Equação 13.

$$Substituição(\%) = \left( \frac{E_{biogás}}{E_{GLP}} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 13})$$

### 3.3.7 Otimização Do Sistema De Biodigestão

Com base nos resultados do dimensionamento e nas condições observadas na unidade, foram avaliadas possibilidades de aprimoramento do sistema de biodigestão existente, com ênfase na infraestrutura física e na operação. Essa avaliação contemplou o fluxo de efluentes até o biodigestor, a integração do sistema com as atividades industriais e o método de aproveitamento energético do biogás gerado.

Foram analisados parâmetros como temperatura, pH, vazão de alimentação, TRH, COV, produção volumétrica e composição do biogás. Esses dados foram obtidos a partir de registros operacionais da empresa, provenientes do monitoramento rotineiro realizado pela equipe responsável pelo sistema de tratamento de efluentes.

## 3.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE

Nesta etapa, as melhorias propostas foram avaliadas sob duas perspectivas principais: técnica e ambiental, fornecendo um panorama completo da sua viabilidade e impacto.

#### 3.4.1 Viabilidade Técnica

No estudo de viabilidade técnica foram avaliadas as condições necessárias para a implementação das melhorias propostas no sistema de biodigestão anaeróbia do frigorífico de suínos estudado. Foi realizada a análise das tecnologias disponíveis para o tratamento de resíduos orgânicos por biodigestão anaeróbia, considerando as características específicas do substrato gerado nas atividades industriais da unidade. Foram avaliadas as informações relativas à composição do material encaminhado ao biodigestor, bem como potenciais estratégias para otimizar a eficiência de produção de biogás e a possibilidade de substituição parcial ou total do GLP, em processos como chamuscagem.

A partir dessa análise, estabeleceu-se um diagnóstico técnico preliminar sobre a viabilidade de aprimoramento da estação de biodigestão anaeróbia, fundamentado em critérios de adequação técnica, confiabilidade operacional, eficiência energética e compatibilidade com o contexto industrial da unidade.

#### 3.4.2 Viabilidade Ambiental

No estudo de viabilidade ambiental foram analisados os potenciais ganhos ambientais decorrentes da integração operacional do biodigestor anaeróbio ao sistema de tratamento de efluentes já existente na unidade (ETEI). Neste estudo foram utilizados os dados técnicos e operacionais fornecidos da empresa.

Além disso, também foi examinada a integração física e operacional entre o biodigestor e a ETEI, considerando aspectos de compatibilidade hidráulica, segurança ambiental e atendimento às exigências normativas. Por fim, definiram-se os indicadores ambientais a serem utilizados na comparação entre cenários, contemplando a diminuição da geração de lodo excedente e a redução no consumo de insumos químicos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, são apresentados os resultados, e discussão, da caracterização do frigorífico, quanto ao processo industrial e estação de tratamento de efluentes; o desempenho do sistema de biodigestão anaeróbia; as potencialidades do aproveitamento energético do biogás gerado, bem como os desafios e limitações operacionais observados no sistema avaliado.

### 4.1 PROCESSO INDUSTRIAL

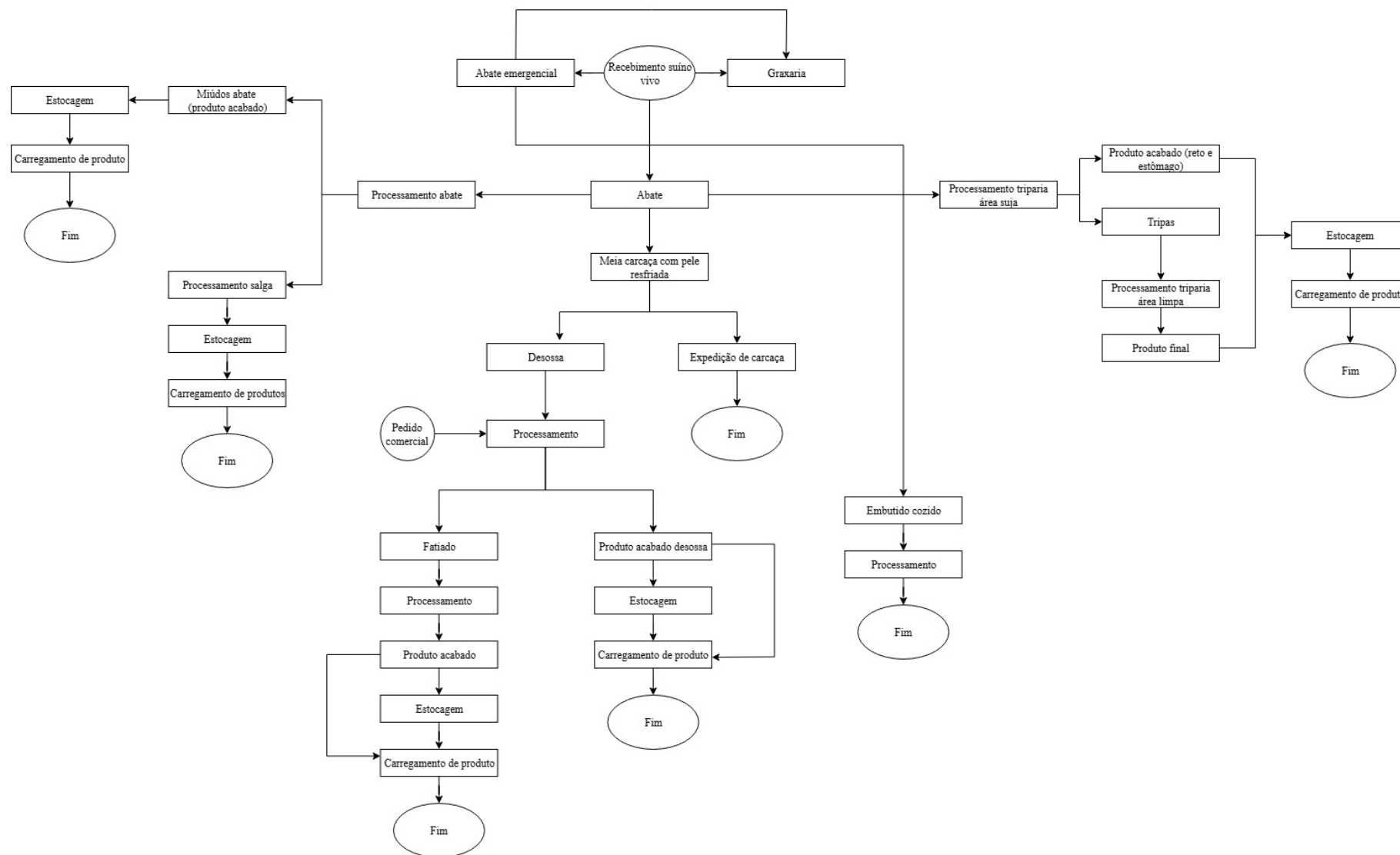
A planta frigorífica possui capacidade de abate de aproximadamente 4.500 suínos/dia, distribuídos em dois turnos de 8,8 horas cada, totalizando 17,6 horas diárias de operação. Os animais abatidos apresentam peso médio entre 120 e 140 kg, e cada carcaça gera, em média, 5 kg de resíduos orgânicos destinados ao tratamento, o que representa mais de 22,5 toneladas por dia.

O processo de abate (Figura 6) tem início com o recebimento dos suínos vivos nas pocilgas. Após essa etapa, os animais seguem para o abate, resultando na obtenção da meia carcaça com pele resfriada, a qual é direcionada para diferentes fluxos, conforme o tipo de produto a ser obtido.

Uma das rotas possíveis é a expedição direta da carcaça, encerrando o processo para essa linha. Outra possibilidade envolve a desossa, que pode seguir dois caminhos: o processamento direto para a obtenção de produtos acabados ou o atendimento de pedidos comerciais, que ocorrem além do cronograma diário da empresa. Nesses casos, há a programação regular de abate com a inclusão de pedidos externos. Os produtos da desossa podem, portanto, ser finalizados diretamente ou fatiados conforme a demanda. Em ambos os casos, os itens seguem para o processamento, gerando o produto acabado, que é posteriormente estocado e carregado para expedição.

Paralelamente, os miúdos provenientes do abate, como pés traseiros e dianteiros, máscaras e rabos, são classificados em duas categorias: produtos acabados ou destinados à salga. Em ambos os casos, após o processamento específico, seguem para estocagem e carregamento. O processamento da triparia é dividido em duas etapas: a área suja, onde são processados os intestinos brutos, e a área limpa, responsável pelo acabamento. A partir da área suja, obtêm-se produtos acabados como o reto e o estômago, além de tripas que seguem para a área limpa, resultando no produto, que também é estocado e posteriormente carregado.

**Figura 6** – Diagrama de blocos do processo industrial do estudo de caso



Fonte: Adaptado de dados da empresa, 2025.

Outra linha de produção importante é a dos embutidos cozidos, que seguem diretamente do abate para o setor de processamento, encerrando-se como produto. Por fim, os resíduos não aproveitáveis são encaminhados para a graxaria, completando o aproveitamento integral dos subprodutos gerados no processo.

#### 4.1.1 Consumo De Água

O consumo de água foi monitorado entre janeiro e maio de 2025, resultando em média de 515,4 litros por suíno/dia, com variação mensal entre 511 e 521 litros. Os dados operacionais da planta industrial são apresentados na Tabela 2, E o consumo específico de água por suíno e a projeção do consumo diário total, considerando a capacidade de abate da planta, na Tabela 3.

**Tabela 2** – Dados operacionais planta frigorífica

Parâmetro	Valor/Informação
Capacidade de abate	4.500 suínos/dia
Peso médio dos suínos	120 - 140 kg
Geração de resíduos orgânicos	5 kg/carcaça
Total de resíduos para tratamento	>22,5 T/dia
Turnos de operação	2 turnos/dia
Duração total de operação	17,6 h/dia (2 x 8,8 h)
Separação de sangue	Tanque específico
Consumo médio de água	515,4 L/suíno.dia (variação: 511-521)
Setores com maior consumo de água	Pocilga, abate (área suja e limpa), higienização, triparia
Base do cálculo de consumo hídrico	Volume total diário de água / nº de suínos abatidos por dia

Fonte: Autoras, 2025.

**Tabela 3** – Consumo específico de água por suíno (L/suíno.dia)

Mês/2025	Volume médio diário (L/suíno)	Volume médio diário (m <sup>3</sup> /suíno)	Número de suínos abatidos (suínos/dia)	Consumo de água (m <sup>3</sup> /dia)
Janeiro	521	0,5210	4.500	2.344,5
Fevereiro	511	0,5110	4.500	2.299,5
Março	516	0,5160	4500	2.322
Abril	519	0,5190	4500	2.335,5
Maio	519	0,5190	4500	2.335,5
Média	515,4	0,5154	4500	2.319,30

Fonte: Dados da empresa (2025).

O consumo médio de 515,4 L/suíno.dia observado entre janeiro e maio de 2025 (Tabela 3) está dentro da faixa reportada na literatura para frigoríficos de suínos

de grande porte, que varia entre 450 e 600 L/suíno.dia (Von sperling, 2014; Costa *et al.*, 2020). Esse resultado confirma que a planta avaliada apresenta índices compatíveis com padrões industriais, embora ainda acima de benchmarks internacionais mais eficientes, que relatam valores próximos de 400 L/suíno.dia (Clarke e Smith, 2011).

A análise da distribuição do consumo de água por etapa do processo produtivo é essencial, pois o volume e a carga orgânica dos efluentes estão diretamente associados ao uso hídrico. A Tabela 4 apresenta a estimativa de consumo diário em um frigorífico com capacidade de abate de aproximadamente 4.500 suínos/dia, cujo consumo médio total é de 2.319,30 m<sup>3</sup>/dia.

**Tabela 4** – Gasto de água por etapa do processo

Setor	% sobre o total	Consumo (m <sup>3</sup> /dia)
Pocilga	4,14%	96,11
Abate área suja	17,26%	400,44
Abate área limpa	13,81%	320,35
Tripária área suja	8,29%	192,21
Salas Anexas	6,91%	160,18
Higienização	30%	695,79
Lavanderia	0,96%	21,75

Fonte: Autoras, 2025.

Em termos absolutos, a demanda hídrica alcança aproximadamente 2.319 m<sup>3</sup>/dia, valor considerável quando comparado a unidades de abate de menor porte. Esse volume implica não apenas em altos custos operacionais relacionados à captação, tratamento e descarte, mas também em pressão ambiental, visto que a disponibilidade hídrica é cada vez mais crítica.

Observa-se que a higienização — que inclui a limpeza terminal ao final dos turnos e as lavagens intermediárias durante os intervalos operacionais — representa a maior fração do consumo, cerca de 30% do total. Em seguida, destacam-se as etapas de abate (áreas suja e limpa), tripária e pocilga. A lavanderia, embora necessária, apresenta participação reduzida no volume total consumido.

A distribuição setorial (Tabela 4) evidencia que a higienização concentra a maior fração do consumo (30%), seguida pelas áreas de abate suja (17,26%) e abate limpa (13,81%). Esse padrão indica que as rotinas de limpeza representam um dos principais pontos de atenção. Embora sejam imprescindíveis para garantir qualidade sanitária, tais práticas também constituem o maior potencial de racionalização, seja por

uso de tecnologias de alta pressão, reúso de água em etapas não críticas ou otimização de protocolos de limpeza (Jordão e Pessôa, 2017).

Outro aspecto relevante é a contribuição da triparia (8,29%) e da pocilga (4,14%). Nessas áreas, o uso hídrico está diretamente associado ao manejo dos animais e à remoção de material orgânico, resultando em efluentes com alta carga poluidora. Assim, além do impacto sobre o consumo total, há um reflexo direto na qualidade do efluente gerado.

#### 4.1.2 Efluentes

A geração de efluentes líquidos em frigoríficos de suínos está diretamente associada às etapas do processo produtivo, as quais demandam elevada utilização de água para lavagem, escaldagem, evisceração, higienização e sanitização de equipamentos e ambientes. Esses efluentes apresentam composição complexa, incluindo sangue, fezes, urina, gorduras, restos orgânicos, além de detergentes, desinfetantes e outros compostos químicos empregados nas rotinas de limpeza industrial.

A identificação da origem e da composição desses resíduos é fundamental para compreender a variabilidade da carga poluidora ao longo da planta e, conseqüentemente, subsidiar a escolha e o dimensionamento de tecnologias de tratamento adequadas. No caso da biodigestão anaeróbia, parâmetros como carga orgânica, presença de nutrientes e teor de sólidos são determinantes para o desempenho microbiológico e energético do processo.

O Quadro 5 apresenta os tipos de efluentes gerados em um frigorífico de suínos, composição e a faixa estimada de DBO associada ao setor (Von Sperling, 2005). Setores como área suja do abate e triparia concentram as maiores cargas orgânicas, apresentando elevado potencial energético quando seus efluentes brutos são destinados ao biodigestor. Enquanto, setores como lavanderia e higienização geram efluentes com menor carga orgânica, mas com presença significativa de detergentes e agentes químicos, que podem exigir controle de dosagem para evitar impactos negativos sobre a microbiota metanogênica.

A gestão eficiente da água e dos efluentes em frigoríficos é essencial para garantir a sustentabilidade ambiental e a otimização operacional. Entre os indicadores-chave, destaca-se a vazão média de efluente por suíno abatido (L/suíno), que subsidia o dimensionamento de unidades de tratamento, como biodigestores e lagoas de

estabilização, além de permitir avaliar a eficiência hídrica da planta ao relacionar o consumo de água ao volume de efluente gerado.

**Quadro 6** – Fontes de geração de efluentes no processo industrial

Origem do Efluente	Composição	Carga Orgânica Estimada (mg/L DBO)
Pocilga	Fezes, urina, água de lavagem	1.500 a 3.000
Abate – Área Suja	Sangue, gordura, pelos, água de escaldagem	6.000 a 12.000
Tripária – Área Suja	Conteúdo intestinal	5.000 a 10.000
Abate – Área Limpa	Água de limpeza, carne e gordura	800 a 2.000
Higienização	Detergentes, gordura, matéria orgânica	500 a 1.500
Lavanderia	Detergentes, sangue, gordura, alvejantes	200 a 1.000

Fonte: Adaptado de Von Sperling, 2005.

No frigorífico avaliado, a medição da vazão foi realizada em uma calha Parshall instalada imediatamente após o flotador, na saída do tratamento físico-químico primário. As leituras registradas variaram de 69,28 a 90,15 m<sup>3</sup>/h. Considerando dois turnos em operação contínua (17,6 h/dia), a vazão diária de efluente foi determinada pela Equação 3. A partir dessas vazões calculadas, estimou-se a relação efluente/água consumida na planta industrial com base no consumo médio de água por suíno, utilizando a Equação 4. Os resultados consolidados estão apresentados na Tabela 5, e o detalhamento dos cálculos encontra-se no Apêndice A – Memorial de Cálculo (Eq. A1 e Eq. A2).

**Tabela 5** – Vazão de efluente gerado pelo processo

Cenário	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Vazão de efluente estimado (m <sup>3</sup> /dia)	Relação efluente/água
Mínimo	69,28	1239,33	0,53
Máximo	90,15	1586,64	0,68

Fonte: Autoras, 2025.

Os resultados indicaram valores entre 1.239,33 m<sup>3</sup>/dia (cenário mínimo) e 1.586,64 m<sup>3</sup>/dia (cenário máximo), com relações efluente/água de 0,53 e 0,68, respectivamente. A relação efluente/água obtida (53% a 68%) está abaixo da faixa de 80% a 95% reportada pelo *United Nations Environment Programme* (UNEP, 2000) para frigoríficos, mas permanece dentro de valores aceitáveis para a realidade industrial brasileira, segundo a Embrapa (2019). Essa diferença pode estar associada à incorporação de água ao produto, perdas por evaporação ou utilização em processos não ligados ao

sistema de coleta de efluentes, como resfriamento, caldeiras ou limpeza externa. Também pode refletir práticas de reúso interno ou maior eficiência no consumo hídrico.

A partir dos volumes diários estimados e considerando a média de 4.500 suínos/dia, a vazão específica de efluente por animal foi determinada pela Equação 5. Os valores obtidos variaram entre 271 L/suíno (cenário mínimo) e 353 L/suíno (cenário máximo), conforme apresentado na Tabela 6. O detalhamento dos cálculos encontra-se no Apêndice A – Memorial de Cálculo (Eq. A3).

**Tabela 6** – Vazão de efluente por suíno no frigorífico avaliado

Cenário	Vazão de efluente (m <sup>3</sup> /dia)	Suínos/dia	Vazão específica (L/suíno)
Mínimo	1.219,33	4.500	271
Máximo	1.587,00	4.500	353

Fonte: Autoras, 2025.

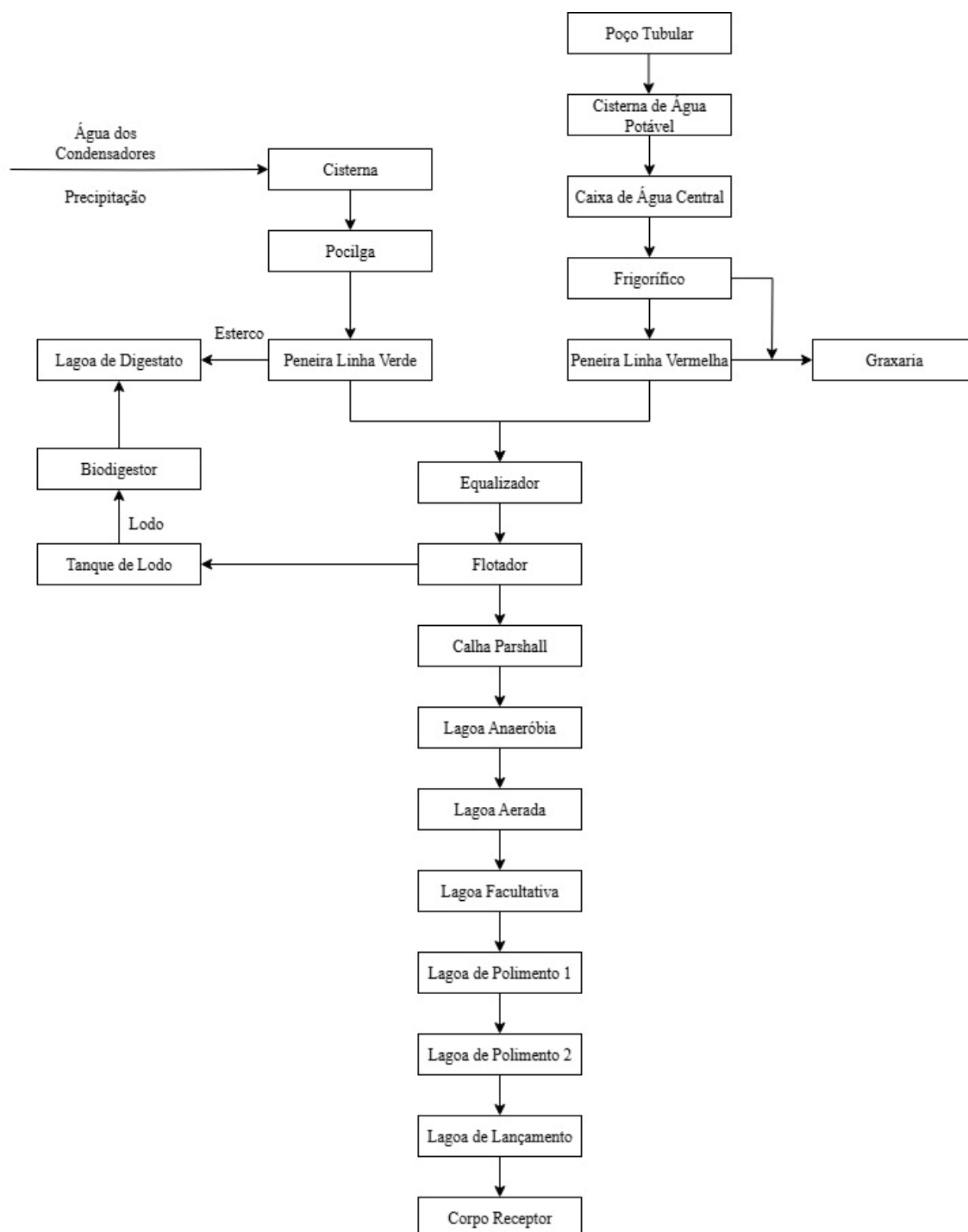
A variação observada está relacionada ao desempenho da bomba de recalque, cuja performance é influenciada por instabilidades na rede elétrica. Em períodos de alta geração de efluentes, a bomba pode atingir sua capacidade máxima, exigindo paradas temporárias para evitar sobrecarga no sistema de equalização da ETEI.

A estabilidade da vazão e da carga orgânica afluyente é fundamental para o bom desempenho da ETEI e do biodigestor anaeróbio. Reduções no consumo de água não apenas diminuem o volume de efluente, mas também aumentam a concentração de matéria orgânica, favorecendo a eficiência da biodigestão e a produção de biogás por metro cúbico tratado. Entretanto, conforme Chernicharo (2007), a carga orgânica deve permanecer dentro dos limites operacionais do sistema para evitar sobrecargas, acidificação do meio ou formação excessiva de espuma, que podem comprometer a estabilidade e a eficiência do tratamento biológico.

## 4.2 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

A ETEI (Figura 7) do frigorífico envolve diversas etapas unitárias, que atuam de forma integrada para promover a remoção de cargas orgânicas e sólidos suspensos. Os principais componentes do sistema incluem peneiras estáticas, tanque equalizador, flotador, biodigestor anaeróbio e lagoa de digestato, cujas funções e características operacionais são descritas a seguir.

**Figura 7** – Estação de Tratamentos de Efluentes Industriais da empresa



Fontes: Adaptado de dados da empresa, 2025.

As dimensões dos equipamentos que compõem a ETEI são apresentadas na Tabela 7. Observa-se que o equipamento de interesse, biodigestor, além de ser capaz de comportar 427,5 m<sup>3</sup>, também apresenta comprimento de 19m, largura de 7,5 m e profundidade de 3 m.

**Tabela 7** – Dimensionamento dos equipamentos da estação de tratamento de efluentes

Unidade operacional	Unidade	Capacidade projetada	Condição operacional atual	Tempo de retenção
Peneiras estáticas	m <sup>3</sup> /h	3,5	3,3	Não se aplica
Equalizador	m <sup>3</sup>	750	250	Não se aplica
Flotador	m <sup>3</sup> /h	60,5	60,5	Não se aplica
Tanque de lodo 1	m <sup>3</sup>	5,35	2,675	Não se aplica
Tanque de lodo 2	m <sup>3</sup>	5,35	2,675	Não se aplica
Biodigestor	m <sup>3</sup>	427,5	427,5	22,8 dias
Lagoa de digestato	m <sup>3</sup>	525	525	27 dias

Fonte: Dados da empresa, 2025.

#### 4.2.1 Peneiras Estáticas

O tratamento preliminar dos efluentes industriais do frigorífico tem início nas peneiras estáticas, responsáveis pela remoção dos sólidos grosseiros. As peneiras estáticas (Figura 8) estão divididas em duas linhas: linha verde (à esquerda) e linha vermelha (à direita).

**Figura 8** – Peneiras estáticas

Fonte: Autoras, 2024.

A linha verde recebe os efluentes oriundos da pocilga, composto majoritariamente por esterco suíno, apresentando elevada carga orgânica e significativa concentração de sólidos. E a linha vermelha recebe os efluentes provenientes do abate e do processamento dos suínos, os quais são predominantemente compostos por material proteico e gorduroso. Estima-se que a linha vermelha concentre entre 80% e 85% da vazão total de efluentes gerados pela indústria.

Os sólidos retidos nas telas estáticas são direcionados para um tanque

de resíduos sólidos, de onde são posteriormente removidos por uma empresa terceirizada especializada no transporte e destinação final desses materiais. O efluente peneirado, por sua vez, segue para o tanque equalizador, etapa crucial para a homogeneização da carga orgânica e do volume, conferindo maior estabilidade aos processos subsequentes de tratamento.

#### 4.2.2 Tanque de Equalização

O tanque de equalização visa neutralizar despejos ácidos e alcalinos, minimizar variações de vazão e concentração, diluir compostos tóxicos e garantir um fluxo contínuo para as etapas posteriores do tratamento (Werjen, 2024). Por isso, o equalizador (Figura 9) é equipado com um misturador, que mantém o líquido em constante agitação, assegurando a homogeneidade do efluente. Dessa forma, evita-se a sedimentação de sólidos com diâmetro inferior à gramatura do sistema de peneiramento e garante-se a uniformidade de parâmetros como sólidos suspensos totais (SST), pH, DBO e DQO, contribuindo para o eficiente desempenho nas etapas subsequentes do tratamento.

**Figura 9 – Equalizador**



Fonte: Autoras, 2024.

#### 4.2.3 Flotador

Após a etapa de equalização, o efluente é direcionado para o sistema de flotação por ar dissolvido (FAD) (Figura 10), no qual são removidos sólidos suspensos finos, óleos e graxas. O FAD utilizado na empresa não utiliza produtos químicos. Quando

operado sem o uso de produtos químicos, o flotador apresenta uma eficiência de remoção de sólidos em suspensão entre 40% e 54% (Multiágua, 2024). O lodo removido pelos raspadores do flotador é direcionado para os tanques de lodo e, posteriormente, encaminhado ao biodigestor anaeróbio.

**Figura 10** – Flotador



Fontes: Autoras, 2024.

#### 4.2.4 Biodigestor Anaeróbio

No biodigestor anaeróbio tipo lona (Figura 11), o lodo passa pelo processo de decomposição anaeróbia, no qual os microrganismos degradam a matéria orgânica na ausência de oxigênio, transformando-a em biogás, composto principalmente por  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ . Durante esse processo, além da produção de biogás, ocorre a formação do digestato, um resíduo semissólido e líquido que permanece após a biodigestão.

A eficiência da biodigestão e a qualidade do digestato dependem de fatores como composição do substrato, TRH, temperatura e equilíbrio entre carbono e nitrogênio.

**Figura 11** – Biodigestor tipo lona



Fonte: Autoras, 2024.

#### 4.2.5 Lagoa De Digestato

A lagoa de digestato (Figura 12) desempenha um papel fundamental no manejo adequado desse resíduo, evitando contaminação do solo e dos recursos hídricos. O digestato ainda contém nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, além de matéria orgânica não degradada, podendo ser aproveitado como biofertilizante.

**Figura 12** – Lagoa de digestato



Fonte: Autoras, 2024.

#### 4.3 SISTEMA DE BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

Nesta seção, apresenta-se a análise do sistema de biodigestão anaeróbia existente na planta frigorífica. Foi considerado os dados reais dos documentos consultados, permitindo uma verificação detalhada dos parâmetros técnicos, operacionais e ambientais do processo de biodigestão anaeróbia implantado.

#### 4.3.1 Parâmetros Operacionais Do Biodigestor

A etapa de digestão anaeróbia é realizada em uma lagoa coberta, funcionando como um biorreator de fluxo contínuo. A operação é conduzida em modo semi-contínuo, com uma vazão média de alimentação de 5,4 m<sup>3</sup>/dia e tempo de retenção hidráulica de 22,8 dias, valores compatíveis com o porte da unidade e com o tipo de substrato empregado.

O Quadro 6 apresenta os dados incluem composição do substrato, parâmetros físico-químicos e condições ambientais locais. Esses parâmetros influenciam diretamente o desempenho microbiológico do reator, a eficiência na conversão da matéria orgânica e a estabilidade do processo, sendo fundamentais para a análise da viabilidade e do potencial de produção de biogás.

**Quadro 7 – Dados do biodigestor**

<b>Categoria</b>	<b>Dado</b>
Tipo de substrato	Efluente/lodo
Produção diária de substrato	Efluente 3,15 m <sup>3</sup> /dia e lodo 2,25 m <sup>3</sup> /dia
Teor de sólidos totais (ST)	16.390 mg/L
Relação C/N	20:1
pH inicial	7,47
Temperatura do substrato	30,6°C
Tempo de retenção hidráulica (TRH)	22,8 dias
DQO	6.250 mg/L
DBO	2.500 mg/L
Taxa de carga orgânica (TCO)	3,0 kg DQO/m <sup>3</sup> .dia
Tipo de operação	Semi-contínua
Tipo de biodigestor	Lagoa coberta
Temperatura média ambiente	32°C
Altitude	251 m
Pressão atmosférica	1019 hPa
Volume útil do biodigestor	427,5 m <sup>3</sup>
Material de construção	Geomembrana PVC
Sistema de agitação	Sistema de recirculação interna
Destinação final do digestato	Lagoa de digestato

Fonte: Dados da empresa, 2025.

O Quadro 7 apresenta um resumo das principais características do substrato, das condições ambientais e operacionais do sistema, bem como aspectos estruturais e recomendações técnicas observadas na literatura especializada. Estes dados demonstram que as condições operacionais são satisfatórias e alinhadas às boas práticas

de projeto e operação de biodigestores anaeróbios. Os parâmetros avaliados indicam um processo tecnicamente viável, tanto sob a ótica sanitária quanto energética, desde que mantidos os controles operacionais essenciais à estabilidade do sistema.

**Quadro 7** – Características do sistema de biodigestão anaeróbia

<b>Parâmetro/Aspecto</b>	<b>Informação</b>
Tipo de substrato	Mistura de efluente líquido e lodo
Carga orgânica total	5,4 m <sup>3</sup> /dia
DQO média	6.250 mg/L
DBO média	2.500 mg/L
Sólidos totais	16.390 mg/L
Razão DBO/DQO	0,4 (biodegradabilidade moderada)
C/N	20:1
pH inicial	7,47
Temperatura do substrato	30,6 °C
Faixa de operação	Mesofílica
Taxa de carga orgânica	3,0 kg DQO/m <sup>3</sup> -dia
Estrutura do biodigestor	Geomembrana de PVC, 427,5 m <sup>3</sup> de volume útil
Temperatura ambiente média	32°C
Altitude / Pressão	251 m/1.019 hPa
Mistura interna	Natural (liberação de biogás + alimentação contínua)
Eficiência esperada de remoção de DBO	50% a 60%
Destinação do digestato	Armazenado em lagoa específica para possível uso como biofertilizante

Fonte: Dados da empresa, 2025.

#### 4.3.2 Vazão De Alimentação: De Projeto E Real

A vazão de alimentação de projeto do biodigestor, foi determinada pela Equação 1, pois durante o levantamento das informações, não estava disponível o projeto da ETEI. Considerando o volume útil de 427,5 m<sup>3</sup> e o TRH de 22,8 dias, obteve-se uma vazão projetada de 18,75 m<sup>3</sup>/dia, conforme detalhado no Apêndice A – Memorial de Cálculo (A4). Entretanto, a vazão de alimentação real corresponde a 5,4 m<sup>3</sup>/dia, sendo composta por 3,15 m<sup>3</sup>/dia de efluente tratado e 2,25 m<sup>3</sup>/dia de lodo (Quadro 7), o que equivale a 28,8 % da capacidade de projeto, conforme demonstrado no Apêndice A – Memorial de Cálculo (Equação A5).

A Tabela 8 apresenta o percentual de utilização, evidenciando significativa subutilização. Essa condição pode decorrer da disponibilidade limitada de substrato, de restrições operacionais ou de uma estratégia deliberada de carga reduzida,

adotada para prevenir sobrecargas e instabilidades. Embora um TRH mais elevado favoreça a estabilização microbiológica e a degradação da matéria orgânica, também reduz a produtividade volumétrica de biogás.

**Tabela 8** – Comparativo entre vazão ideal e real de alimentação do biodigestor

Vazão (m <sup>3</sup> /dia)	Projeto	Real
	18,75	5,4
% utilização da vazão de projeto	-	28,8 %

Fonte: Autoras, 2025.

De acordo com Cheremicharo (2007), a taxa de alimentação e o TRH devem ser ajustados de forma a equilibrar a carga aplicada, o tempo de digestão e a produção de biogás, respeitando as características de cada sistema. No presente estudo, o biodigestor operou de forma estável e compatível com o perfil do substrato disponível, sem sinais de sobrecarga. Contudo, a diferença entre o projetado e o real demonstra potencial para incremento controlado da carga afluenta.

Recomenda-se a realização de testes operacionais para aumento gradual da vazão de alimentação, com acompanhamento contínuo de parâmetros como alcalinidade e produção de biogás, por sua facilidade de medição e sensibilidade a variações no processo (*United States Environmental Protection Agency, 2020; Drogg, 2013*), visando otimizar o aproveitamento energético e a capacidade instalada.

#### 4.3.3 pH e Temperatura

Com o objetivo de identificar ajustes operacionais e melhorias no processo de biodigestão, foram monitorados o pH e temperatura do lodo direcionado ao biodigestor (entrada). Essas variáveis são essenciais para a eficiência microbiológica e a estabilidade do sistema. As medições (Tabela 9) foram realizadas entre 1º e 10 de julho de 2025, em dois períodos diários (6h00 e 14h00), visando captar variações térmicas naturais.

O pH oscilou entre 6,7 e 7,2, com média de 6,9, mantendo-se dentro da faixa considerada ideal para a atividade das bactérias metanogênicas (6,6 a 7,4), segundo Bohrs (2010). Essa estabilidade indica que o meio reacional é adequado à digestão anaeróbia, favorecendo a degradação da matéria orgânica e a produção de CH<sub>4</sub>.

**Tabela 9** – Análise de pH e temperatura do lodo direcionado ao biodigestor

<b>Data</b>	<b>Hora</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
01/07/2025	6h00	6,8	28,5
	14h00	7,1	34,2
02/07/2025	6h00	6,9	29,0
	14h00	7,0	35,0
03/07/2025	6h00	6,7	27,8
	14h00	7,2	36,1
04/07/2025	6h00	6,8	28,0
	14h00	7,0	35,5
05/07/2025	6h00	6,9	29,5
	14h00	7,1	36,5
06/07/2025	6h00	6,8	28,3
	14h00	7,0	35,8
07/07/2025	6h00	6,7	27,5
	14h00	7,1	36,2
08/07/2025	6h00	6,9	29,2
	14h00	7,0	35,6
09/07/2025	6h00	6,8	28,0
	14h00	7,2	36,0
10/07/2025	6h00	6,7	27,9
	14h00	7,1	35,9
<b>Média</b>	<b>-</b>	<b>6,9</b>	<b>32,0</b>

Fonte: Autoras, 2025.

A temperatura apresentou uma variação de 9°C, oscilando entre 27,5°C nas primeiras horas da manhã e 36,5°C no período da tarde, com média de 32,0°C. Os valores mais baixos, registrados nas manhãs frias de inverno, ficaram abaixo da faixa mesofílica ideal (35°C a 37°C), conforme Souza (1984), o que pode reduzir a taxa de metanogênese e a conversão da matéria orgânica em biogás. E as temperaturas vespertinas se aproximaram das condições ótimas, melhorando pontualmente o desempenho microbiológico, embora de forma não compensatória.

As oscilações térmicas observadas resultam da exposição dos tanques às condições ambientais externas, tornando o sistema vulnerável a perdas de calor durante a madrugada e aquecimento excessivo durante o dia. Essa instabilidade compromete a constância e a eficiência do processo.

Para mitigar esses efeitos, recomenda-se a adoção de estratégias de controle térmico, como isolamento dos tanques, instalação de coberturas ou aproveitamento de calor residual e energia solar térmica para aquecimento auxiliar. A automação do monitoramento de pH e temperatura, por meio de sensores, também é

indicada para permitir ajustes em tempo real, aumentando a estabilidade e o rendimento do biodigestor.

Considerando o elevado volume de lodo gerado diariamente pelo abate de 4.500 suínos, manter os parâmetros físico-químicos dentro das faixas ideais é fundamental para assegurar a qualidade do efluente tratado e maximizar a produção de biogás. Assim, embora o pH se mantenha adequado, a variação térmica constitui um fator limitante relevante, demandando ações corretivas e preventivas na unidade industrial. Nesse contexto, o Quadro 7 apresenta as principais ações corretivas recomendadas para prevenir variações de pH no biodigestor, com base em referências técnicas consolidadas.

**Quadro 8** – Ações corretivas para evitar variações de pH no biodigestor

<b>Ação corretiva</b>	<b>Descrição resumida</b>	<b>Referência</b>
Monitoramento contínuo	Uso de sensores de pH e alarmes para detectar oscilações rapidamente.	FAO, 1996
Adição de agentes tamponantes	Uso de bicarbonato de sódio ou carbonato de cálcio para manter estabilidade.	FAO, 1996
Controle da carga orgânica	Evitar sobrealimentação que gere excesso de ácidos voláteis.	Chernicharo, 2007
Mistura adequada	Garantir homogeneização do conteúdo para evitar zonas ácidas.	Chernicharo, 2007
Estabilização térmica	Manter temperatura operacional estável: mesofílica 20–40°C.	Koster e Lettinga, 1984

Fonte: Autoras, 2025.

#### 4.3.4 Estimativa Da Produção De Biogás

A estimativa do potencial de produção de biogás a partir da carga orgânica presente nos efluentes do frigorífico de suínos constitui uma etapa estratégica na avaliação da viabilidade energética do sistema de biodigestão anaeróbia. Essa análise baseou-se na determinação da carga orgânica afluenta ao biodigestor, expressa em termos de DQO, e no volume diário efetivamente encaminhado à unidade de tratamento, permitindo inferir a massa de substrato disponível para conversão microbiológica em CH<sub>4</sub>.

A caracterização físico-química do substrato indicou concentração média de DQO igual a 6,25 kg/m<sup>3</sup> (Quadro 7). Considerando a vazão real de alimentação do biodigestor, a carga orgânica diária de DQO (kg/dia) foi determinada a partir da concentração de DQO no substrato (kg/m<sup>3</sup>) e da vazão de alimentação (m<sup>3</sup>/dia), conforme a Equação 6.

Com base na carga de DQO calculada, a produção diária de biogás foi estimada utilizando o rendimento médio de 0,40 m<sup>3</sup> de biogás/kg de DQO removida, que é compatível com substratos de biodegradabilidade moderada (Campos, 1999; Chernicharo, 2007). O detalhamento dos cálculos encontra-se no Apêndice A – Memorial de Cálculo.

Ressalta-se que este cálculo possui caráter estimativo, fundamentando-se em parâmetros médios da literatura, sem medições diretas da eficiência de remoção de DQO ou da composição e vazão real do biogás. A aplicação de métodos mais precisos, como balanços de massa baseados na remoção efetiva de DQO e monitoramento contínuo do biogás, demandaria dados operacionais não disponibilizados pela empresa. Dessa forma, os valores apresentados têm finalidade comparativa e de avaliação preliminar do potencial energético.

Também foi estimado um cenário potencial, considerando o volume médio diário de efluente bruto da planta, de 1.403,2 m<sup>3</sup> (item 4.3.4), mantendo a concentração de DQO e o mesmo rendimento de conversão. A produção de biogás para esse cenário foi estimada com base nos cálculos descritos no Apêndice A – Memorial de Cálculo (Equação A7). Os resultados indicam um potencial de produção significativamente superior ao cenário real, cuja viabilização, entretanto, dependeria de adequações estruturais no sistema.

A eficiência operacional foi avaliada por meio da COV, parâmetro que expressa a quantidade de matéria orgânica aplicada por unidade de volume útil do reator e por unidade de tempo. Essa variável é fundamental para o controle do processo, pois relaciona a carga de DQO afluente ao volume do biodigestor, conforme a Equação 6.

No cenário real, os resultados apontam valores significativamente abaixo da faixa recomendada para sistemas contínuos em regime mesofílico (Chernicharo, 2007), evidenciando a subutilização da capacidade instalada. Já no cenário potencial, a COV ultrapassa os limites operacionais seguros, indicando a necessidade de redimensionamento do reator para possibilitar o tratamento integral do efluente bruto.

Para esse cenário, também foi calculado o volume ideal do biodigestor, a partir do TRH e da vazão média de efluente, conforme a Equação 1. O detalhamento dos cálculos encontra-se no Apêndice A – Memorial de Cálculo.

A Tabela 10 sintetiza os principais resultados obtidos para os cenários real e potencial, reunindo os cálculos de produção de biogás, carga orgânica volumétrica (COV) e volume ideal do biodigestor. Essa consolidação evidencia de forma comparativa

a discrepância entre o desempenho atual do sistema e o potencial energético que poderia ser explorado mediante adequações estruturais.

Em termos quantitativos, observa-se que o cenário potencial apresenta uma produção de biogás várias ordens de grandeza superior à verificada atualmente, o que demonstra a expressiva oportunidade de incremento na autossuficiência energética da planta. Essa disparidade reforça que, embora o sistema opere de maneira estável, encontra-se subaproveitado, justificando a necessidade de estratégias de ampliação da carga afluyente e otimização do desempenho operacional.

**Tabela 10** – Estimativas de produção de biogás nos cenários real e potencial

Parâmetro	Unidade	Cenário	
		Real	Potencial
Volume total alimentado	m <sup>3</sup> /dia	5,4	1.403,2
Concentração de DQO	kg/m <sup>3</sup>	6,25	6,25
Carga Orgânica	kg DQO/dia	33,75	8.770,0
Rendimento de biogás	m <sup>3</sup> /kg DQO	0,40	0,40
Produção estimada de biogás	m <sup>3</sup> /dia	13,5	3.508
COV estimada	kg DQO/m <sup>3</sup> . dia	0,079	20,52
Volume ideal necessário	m <sup>3</sup>	-	31.991

Fonte: Autoras, 2025.

#### 4.3.5 Dimensionamento Do Reservatório De Biogás

O dimensionamento do sistema de armazenamento de biogás é etapa fundamental para assegurar a continuidade do suprimento energético da planta, mesmo diante de variações na produção ou no consumo do biocombustível. Um volume de reserva adequado atua como amortecedor frente a flutuações na carga orgânica afluyente, paradas operacionais não programadas ou oscilações na demanda interna, garantindo a operação ininterrupta de sistemas térmicos ou elétricos alimentados por biogás.

Com base nas estimativas de produção diária de biogás obtidas nos dois cenários analisados (Seção 4.3.4), o volume de armazenamento foi calculado aplicando-se um fator de segurança sobre a geração diária, conforme a Equação 8.

No cenário real, cuja produção média estimada é de 13,5 m<sup>3</sup>/dia, adotou-se fator de segurança igual a 1,5, valor recomendado para sistemas de consumo estável e baixa complexidade operacional (Energypedia, 2023). O cálculo resultou em um volume mínimo recomendado de 20,25 m<sup>3</sup> para o reservatório, conforme demonstrado no Apêndice A – Memorial de Cálculo.

Para o cenário potencial, que considera o aproveitamento integral do

efluente bruto gerado pela planta, manteve-se o fator de segurança de 1,5. Nessa condição, a capacidade requerida para o gasômetro seria de aproximadamente 5.262 m<sup>3</sup> (Apêndice A – Memorial de Cálculo). A implantação dessa capacidade demandaria o redimensionamento completo das unidades de captação, compressão e estocagem, além de adequações estruturais e operacionais voltadas ao aproveitamento energético pleno da carga orgânica tratada.

Ressalta-se que este dimensionamento possui caráter estimativo, fundamentando-se em parâmetros médios da literatura e nas projeções de produção de biogás apresentadas na Seção 4.3.4. A determinação de volumes ideais com maior precisão exigiria informações detalhadas sobre o perfil de consumo energético da planta, flutuações horárias na geração de biogás, pressão de operação e taxa de compressão, dados que não foram disponibilizados pela empresa. Assim, os valores apresentados devem ser interpretados como referência preliminar para subsidiar análises de viabilidade técnica e econômica.

A Tabela 11 apresenta o volume mínimo recomendado de armazenamento de biogás para os cenários real e potencial, calculado a partir das estimativas de produção diária e do fator de segurança adotado.

**Tabela 11** – Estimativa do volume necessário de armazenamento de biogás

Parâmetro	Cenário	
	Real	Potencial
Produção de biogás (m <sup>3</sup> /dia)	13,5	3.508
Fator de segurança adotado	1,5	1,5
Volume recomendado do reservatório (m <sup>3</sup> )	20,25	5.262

Fonte: Autoras, 2025.

Os resultados evidenciam que, embora o sistema atual atenda minimamente às demandas térmicas de pequena escala, a transição para o cenário potencial exigiria investimentos significativos em infraestrutura de armazenagem e segurança operacional. O volume elevado de biogás a ser estocado implicaria na adoção de medidas adicionais de monitoramento de pressão, controle de vazamentos e atendimento às normas de segurança para gases combustíveis.

O dimensionamento adequado do reservatório configura-se como elemento estratégico para a integração do biogás a sistemas de cogeração ou para a substituição integral do GLP, viabilizando não apenas a autossuficiência energética, mas também ganhos econômicos e ambientais. Nesse contexto, a estocagem eficiente

representa componente essencial para consolidar a biodigestão anaeróbia como alternativa tecnológica viável e sustentável no setor industrial.

#### 4.3.6 Estimativa Do Potencial Energético Do Biogás

Com base na estimativa de produção de biogás apresentada na Seção 4.3.4, verificou-se que o aproveitamento integral da carga orgânica presente nos efluentes da planta frigorífica permitiria a geração de aproximadamente 3.508 m<sup>3</sup>/dia de biogás no cenário potencial, enquanto no cenário real a produção observada foi de apenas 13,5 m<sup>3</sup>/dia (Tabela 12).

Segundo informações fornecidas pela empresa, esse biogás apresenta composição média de 60 % de CH<sub>4</sub> e 40 % de CO<sub>2</sub>, proporção típica de sistemas de digestão anaeróbia estabilizados. A partir dessa composição, o PCI gravimétrico foi estimado em 17.706,7 kJ/kg, com base em Avellar (2001). Considerando ainda a densidade média de 1,2039 kg/m<sup>3</sup> para biogás contendo 60 % de CH<sub>4</sub> (Zank et al., 2020), obteve-se o PCI volumétrico de 21.323,1 kJ/m<sup>3</sup>, conforme cálculo descrito na Equação 9 (Apêndice A – Memorial de Cálculo).

Com o PCI volumétrico definido, a energia térmica total disponível foi calculada multiplicando-se esse valor pela produção diária de biogás em cada cenário, conforme a Equação 10 (Apêndice A – Memorial de Cálculo). Os resultados indicaram 74.780,37 MJ/dia para o cenário potencial e apenas 287,78 MJ/dia no cenário real, conforme consolidado na Tabela 12.

**Tabela 12** – Parâmetros físico-químicos e energéticos do biogás considerado

Parâmetro	Cenário		Fonte
	Potencial	Real	
Teor de CH <sub>4</sub> (% v/v)	60	60	Dados da empresa
Densidade média do biogás (kg/m <sup>3</sup> )	1,203	1,203	Zank et al. (2020)
PCI gravimétrico (kJ/kg)	17.706,7	17.706,7	Avellar (2001)
PCI volumétrico (kJ/m <sup>3</sup> )	21.323,1	21.323,1	Cálculo (Apêndice A)
Produção de biogás (m <sup>3</sup> /dia)	3.508	13,5	Seção 4.3.4
Energia térmica total disponível (MJ/dia)	74.780,37	287,78	Cálculo (Apêndice A)

Fonte: Autoras, 2025.

Esses resultados demonstram que o cenário potencial representa uma oportunidade estratégica para o atendimento de demandas térmicas internas do frigorífico, como escaldagem, insensibilização, chamuscagem e aquecimento de água de lavagem. A

substituição parcial ou total do GLP pelo biogás gerado in situ pode reduzir significativamente os custos operacionais e agregar valor energético aos resíduos orgânicos do processo produtivo.

Cabe ressaltar que os valores apresentados têm caráter estimativo, baseando-se em parâmetros médios da literatura e no teor de CH<sub>4</sub> informado pela empresa. A determinação precisa do PCI e da energia disponível demandaria análises laboratoriais da composição do biogás e medições contínuas de produção, dados que não foram disponibilizados.

#### 4.3.7 Comparação Energética Entre Biogás E GLP

Atualmente, o processo de chamuscagem no frigorífico consome aproximadamente 1.150 kg/dia de GLP, utilizado como principal fonte de energia térmica, conforme informações fornecidas pela empresa. Considerando o PCI médio do GLP igual a 46.000 kJ/kg (Pinheiro, 1999), a energia térmica total suprida diariamente por esse combustível foi estimada em 52.900 MJ/dia, conforme a Equação 11 (cálculo apresentando no Apêndice A – Memorial de Cálculo).

Por outro lado, conforme discutido na seção 4.3.6, o potencial energético do biogás gerado por meio da biodigestão dos efluentes pode ser avaliado em dois cenários: (i) o cenário real de operação, limitado à vazão atual de alimentação do biodigestor, e (ii) o cenário potencial, considerando o aproveitamento integral da carga orgânica gerada pela planta.

No cenário real, a produção diária de biogás é de aproximadamente 13,5 m<sup>3</sup>/dia. Utilizando o PCI volumétrico de 21.323,10 kJ/m<sup>3</sup>, essa produção corresponde a 287,86 MJ/dia, valor que representa apenas 0,54 % da demanda atualmente suprida pelo GLP. E no cenário potencial, com produção estimada de 3.508 m<sup>3</sup>/dia, o biogás poderia fornecer aproximadamente 74.803 MJ/dia (Tabela 12), valor que corresponde a cerca de 141,4 % da demanda térmica atualmente suprida pelo GLP. Os cálculos realizados estão no Apêndice A – Memorial de Cálculo.

A Tabela 13 sintetiza a comparação energética entre os dois combustíveis nos cenários avaliados. Os resultados evidenciam que, embora o sistema atual de biodigestão apresente capacidade limitada, a planta possui potencial técnico para atingir autossuficiência energética no processo de chamuscagem. Para isso, é necessário

redimensionar o sistema de alimentação do biodigestor, de forma a permitir o tratamento integral dos efluentes e maximizar a produção de biogás.

A substituição do GLP por biogás produzido *in situ*, além de representar uma alternativa economicamente vantajosa, promove a valorização de resíduos e reforça o compromisso ambiental da empresa. Assim, a ampliação e otimização do sistema de biodigestão se mostram alinhadas às diretrizes de sustentabilidade, eficiência energética e economia circular aplicáveis ao setor frigorífico.

**Tabela 13** – Comparação energética: GLP *versus* biogás

Parâmetro	Unidade	GLP	Biogás	
			Real	Potencial
Volume diário	kg/dia (GLP)/m <sup>3</sup> /dia (biogás)	1.150	13,5	3.508
PCI	kJ/kg (GLP)/kJ/m <sup>3</sup> (biogás)	46.000	21.323,10	21.323,10
Energia térmica total	MJ/dia	52.900	287,86	74.803
% demanda suprida pelo biogás	–	–	0,54%	141,4%

Fonte: Autoras, 2025.

A integração dos dados físico-químicos e volumétricos possibilita estimar a concentração média dos principais poluentes, a carga orgânica diária e índices como a razão DBO/DQO, determinantes para o correto dimensionamento do reator anaeróbio. Contudo, a forma mais precisa de confirmar se o efluente apresenta fração volátil suficiente para sustentar uma produção significativa de CH<sub>4</sub> seria complementar a caracterização com a determinação de SV, obtidos pela diferença entre ST e SF conforme *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012), e com a realização de testes de *Biochemical Methane Potential* (BMP, Potencial Bioquímico de Metano), que medem a produção específica de CH<sub>4</sub> por unidade de SV ou DQO aplicada, conforme metodologia descrita por Filer (2019). Tais análises, amplamente reconhecidas como referência internacional, não foram realizadas no presente estudo devido à ausência desses dados por parte da empresa, sendo indicadas como recomendação para estudos futuros, a fim de reduzir incertezas e aprimorar a estimativa do potencial metanogênico do substrato.

#### 4.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE

Esta seção apresentou uma avaliação técnica e operacional da ETEI do frigorífico, considerando tanto os sistemas convencionais de tratamento quanto a

integração com o biodigestor anaeróbio existente. Primeiramente, foi realizada uma análise do funcionamento da estação de tratamento, observando sua eficiência em remover cargas poluentes e atender aos padrões ambientais vigentes. Em seguida, avaliou-se a integração física e operacional do biodigestor com a estrutura da ETEI, identificando o grau de sinergia entre os sistemas e eventuais gargalos operacionais. Também se exploraram as possibilidades de aproveitamento energético do biogás gerado, destacando seu potencial como fonte renovável dentro da unidade industrial. A análise incluiu ainda uma investigação sobre o rendimento e desempenho do biodigestor, bem como suas principais limitações operacionais. Por fim, discutiram-se os desafios relacionados à ampliação ou otimização do sistema de tratamento e biodigestão, considerando aspectos técnicos, estruturais e econômicos, com vistas à sustentabilidade e eficiência do processo como um todo.

#### 4.4.1 Operação da Estação De Tratamentos De Efluentes Industriais

A eficiência da ETEI influencia diretamente o desempenho do biodigestor, uma vez que a qualidade e a estabilidade do afluente encaminhado para digestão anaeróbia determinam a manutenção das condições microbiológicas ideais para o processo.

Durante a observação das rotinas operacionais, constatou-se a necessidade de aprimorar o monitoramento sistemático da ETEI, de modo a identificar precocemente desvios operacionais e minimizar impactos no rendimento energético do sistema. Nesse sentido, propôs-se a adoção de um protocolo estruturado de inspeção e registro (checklist), contemplando todas as etapas da estação, incluindo peneiras estáticas, tanque equalizador, flotador e biodigestor, com avaliação simultânea das condições mecânicas dos equipamentos e dos parâmetros operacionais, como pH, temperatura, vazão e integridade das estruturas.

O checklist proposto (Quadro 8) foi elaborado para sintetizar as variáveis críticas de operação, servindo como ferramenta para registrar de forma sistemática as condições verificadas. A aplicação desse instrumento com periodicidade mínima de três vezes por semana possibilitaria a criação de um histórico operacional confiável, a agilização da comunicação de anomalias, a execução mais rápida de reparos e a prevenção de instabilidades na alimentação do biodigestor, além de fornecer subsídios para comparações com resultados laboratoriais.

**Quadro 9** – Checklist de inspeção e registro da ETEI

Verificador:		Data: / /	
Peneiras estáticas	As peneiras estão limpas?	<input type="checkbox"/> sim	<input type="checkbox"/> não
	RQ de limpeza preenchido corretamente?	<input type="checkbox"/> sim	<input type="checkbox"/> não
	Média de chutes da peneira linha vermelha (ver RQ de chutes)		
	Vazão efluente linha verde (m <sup>3</sup> /h)		
	Vazão efluente linha vermelha (m <sup>3</sup> /h)		
	pH linha verde		
	pH linha vermelha		
	Temperatura (°C) linha verde		
	Temperatura (°C) linha vermelha		
Equalizador	Agitadores funcionando?	<input type="checkbox"/> sim	<input type="checkbox"/> não
	Nº de agitadores em funcionamento		
	Bombas funcionando?	<input type="checkbox"/> sim	<input type="checkbox"/> não
	Nº de bombas funcionando		
	Eficiência da bomba		
	pH entrada do equalizador		
	pH saída do equalizador		
	Presença de corpos estranhos no equalizador?	<input type="checkbox"/> sim	<input type="checkbox"/> não
	Se sim, quais?		
Temperatura (°C) equalização			
Flotador	Flotador em funcionamento normal?	<input type="checkbox"/> sim	<input type="checkbox"/> não
	RQ de controle e operação está sendo preenchido corretamente?	<input type="checkbox"/> sim	<input type="checkbox"/> não
	Vazão (m <sup>3</sup> /h)		
	pH saída do flotador		
	Temperatura (°C) flotador		
Biodigestor	Lonas de biodigestão infladas?	<input type="checkbox"/> sim	<input type="checkbox"/> não
	Flare em funcionamento?	<input type="checkbox"/> sim	<input type="checkbox"/> não
	Lodo está sendo mandado pro biodigestor?	<input type="checkbox"/> sim	<input type="checkbox"/> não
	Quantas vezes?		
	Vazão mandada (m <sup>3</sup> /h)		
	Boilers em funcionamento?	<input type="checkbox"/> sim	<input type="checkbox"/> não
	Temperatura (°C) lodo		
	Temperatura (°C) biodigestor		

Fonte: Autoras, 2025.

Além das inspeções visuais e verificações de rotina, recomendou-se a implementação e manutenção de um programa de automonitoramento laboratorial, com coletas realizadas em pontos estratégicos da ETEI e no afluente destinado ao biodigestor. Entre os parâmetros sugeridos para acompanhamento estão a DQO, SST, OG, AGV/Alc, teor de CH<sub>4</sub> e concentração de H<sub>2</sub>S no biogás. A frequência dessas análises deve ser definida com base nos condicionantes estabelecidos nas licenças ambientais vigentes, devendo ainda ser revisada periodicamente para se adequar às características operacionais do sistema.

A comparação periódica dos resultados obtidos internamente com análises executadas por laboratórios externos credenciados constitui uma medida adicional para assegurar a confiabilidade dos dados. A adoção desse conjunto de práticas permite alinhar o monitoramento da ETEI às exigências regulatórias e às necessidades do controle de processo, garantindo que o efluente enviado ao biodigestor apresente condições estáveis e previsíveis. Dessa forma, a estação de tratamento cumpriu simultaneamente seu papel ambiental e sua função estratégica no suporte à viabilidade técnica e energética do sistema de biodigestão.

#### 4.4.2 Integração Do Biodigestor

A análise do biodigestor instalado no frigorífico evidenciou que sua integração ao processo produtivo ocorreu de forma funcional, especialmente no que se referia ao direcionamento dos efluentes gerados nas etapas de abate e processamento. Os resíduos orgânicos, compostos predominantemente por lodo e águas residuais, eram conduzidos ao reator por meio de tubulações dedicadas, permitindo-se alimentação contínua e controlada. A infraestrutura da planta incluiu bombas de transferência e linhas específicas para entrada e saída do material tratado, assegurando o fluxo regular entre a estação de tratamento de efluentes e o biodigestor.

Embora o sistema apresentasse condições adequadas de operação, sua concepção original não teve como objetivo primário a geração de biogás para aproveitamento energético interno, diferindo da proposta desta pesquisa. Nesse contexto, a maximização da produção de biogás requereu ajustes operacionais e estruturais, entre os quais se destacou a implementação de um sistema de aquecimento. Tal recurso permitiu manter a temperatura interna do reator dentro da faixa ótima para a atividade das bactérias metanogênicas, favorecendo a estabilidade do processo e a eficiência da conversão da matéria orgânica em CH<sub>4</sub>.

O biodigestor dispôs de um reservatório para armazenamento do biogás, o que possibilitou o acúmulo e eventual utilização energética, embora a ausência de sistemas de aproveitamento efetivo tenha limitado o potencial de substituição de fontes fósseis. Do ponto de vista operacional, a integração do reator à rotina industrial demandou adequações na gestão do processo e no monitoramento de variáveis críticas, como temperatura, pH e volume de efluente afluente. Também se constatou a necessidade de

manutenção preventiva e corretiva dos equipamentos periféricos, incluindo bombas e válvulas, para assegurar a confiabilidade operacional.

A equipe responsável pela operação demonstrou conhecimento técnico compatível com as demandas do processo, o que sugeriu capacitação direcionada ao manejo da biodigestão anaeróbia. No entanto, a inexistência de registros sistemáticos sobre o impacto do biodigestor no layout da planta e sobre indicadores de desempenho energético impediu uma avaliação mais aprofundada de sua contribuição à autossuficiência térmica do frigorífico. Ainda assim, observou-se que o sistema se encontrava devidamente incorporado à dinâmica produtiva, com infraestrutura mínima estabelecida e rotinas de operação que permitiam sua continuidade, embora com potencial de otimização para atender plenamente aos objetivos propostos de geração e aproveitamento energético do biogás.

A avaliação do sistema de biodigestão anaeróbia implantado na planta frigorífica evidenciou um potencial energético expressivo, ainda não explorado em sua totalidade. Embora o projeto apresentasse dimensionamento adequado e as condições operacionais se mantivessem compatíveis com a atividade microbiológica mesofílica, o biodigestor se encontrava substancialmente subutilizado, o que comprometeu o rendimento energético e reduziu os benefícios ambientais esperados.

O Quadro 9 sintetizou as principais informações levantadas, relacionando dados de projeto, condições atuais de operação, desempenho real e prováveis causas da subalimentação. Observou-se que o sistema possuía parâmetros ambientais e construtivos favoráveis à atividade metanogênica, incluindo pH médio de 6,94, temperatura de 32,0 °C e relação C/N de 20:1, todos dentro da faixa ideal para digestores mesofílicos. O teor de sólidos totais e a recirculação interna também se apresentaram adequados para garantir homogeneização e evitar zonas mortas no reator. No entanto, a vazão real de alimentação, de 5,4 m<sup>3</sup>/dia, representou apenas 28,8% da capacidade projetada de 18,75 m<sup>3</sup>/dia, o que resultou em uma produção diária de cerca de 13,5 m<sup>3</sup> de biogás, valor muito inferior ao potencial de 3.508 m<sup>3</sup>/dia estimado no projeto.

Entre as causas identificadas para essa subutilização estiveram a baixa geração de lodo estabilizado, decorrente do redirecionamento de parte do efluente bruto para outras etapas do tratamento, a operação inicial em regime cauteloso com vazões reduzidas, a utilização parcial dos tanques intermediários, que operaram com aproximadamente metade da capacidade funcional, a presença de óleos e graxas em concentrações capazes de causar instabilidade e a operação aquém do previsto de

equipamentos da ETEI, como o equalizador. Apesar de a composição estimada do biogás, com 60% de CH<sub>4</sub> e 40% de dióxido de carbono, estar de acordo com o padrão típico da digestão mesofílica, não houve monitoramento regular de sulfeto de hidrogênio, o que limitou o aproveitamento do gás em aplicações energéticas mais exigentes.

**Quadro 10** – Diagnóstico do sistema de biodigestão anaeróbia do frigorífico avaliado

Aspecto	Diagnóstico	Análise
Potencial energético do projeto	Projeto dimensionado para 8.770 kg DQO/dia e geração de até 3.508 m <sup>3</sup> /dia de biogás, com rendimento estimado em 0,40 m <sup>3</sup> /kg DQO removida.	O rendimento adotado de 0,40 m <sup>3</sup> biogás/kg DQO foi extraído e justificado pela literatura para substratos de biodegradabilidade moderada (Hamilton, 2005; Harika et al., 2023), sendo compatível com efluente de frigorífico de suínos. Assim, o potencial projetado é fisicamente plausível para operação estável.
Condições operacionais atuais	pH médio 6,94; temperatura 32,0 °C; relação C/N 20:1; sólidos totais 16.390 mg/L; presença de recirculação interna.	Parâmetros adequados para digestão mesofílica, garantindo estabilidade. Contudo, boas condições físico-químicas não são suficientes para manter desempenho se a carga afluente for muito inferior à de projeto.
Desempenho real do sistema	Vazão real de 5,4 m <sup>3</sup> /dia (28,8% da capacidade de 18,75 m <sup>3</sup> /dia). Produção real de biogás ≈ 13,5 m <sup>3</sup> /dia.	Indica subutilização severa: a produção real de biogás (≈13,5 m <sup>3</sup> /dia) corresponde a apenas 0,4% do potencial projetado de 3.508 m <sup>3</sup> /dia, ou seja, quase 260 vezes inferior.
Qualidade do biogás esperado	Estimado em 60% CH <sub>4</sub> e 40% CO <sub>2</sub> .	Composição típica, mas ausência de monitoramento de H <sub>2</sub> S limita uso energético direto. Para aplicações mais exigentes seria necessária dessulfurização.
Principais causas da subutilização	Redirecionamento de efluente bruto para outras etapas; operação inicial cautelosa; tanques intermediários com 50% da capacidade; presença de óleos e graxas (13,52 mg/L); suboperação de equipamentos da ETEI.	Esses fatores reduzem a carga orgânica disponível e comprometem a estabilidade. O excesso de OG pode gerar instabilidade em UASB, conforme já documentado em frigoríficos de suínos e bovinos (Miranda et al., 2005).

Fonte: Autores, 2025.

Para que o sistema atingisse o rendimento projetado, foi necessário promover o aumento gradual da vazão de alimentação, priorizando-se o envio da carga orgânica disponível ao biodigestor. A otimização do pré-tratamento, com a adoção de medidas para a redução de óleos e graxas, e a utilização plena dos tanques intermediários e equipamentos da ETEI foram igualmente essenciais. O monitoramento contínuo de parâmetros como vazão, pH, temperatura, composição do biogás e concentração de sulfeto de hidrogênio possibilitou a detecção de desvios operacionais em tempo hábil, viabilizando-se ajustes estratégicos e manutenção preventiva. Com a adoção dessas

medidas, o biodigestor pôde operar próximo ao seu potencial máximo, tendo-se tornado uma fonte estável e sustentável de energia térmica e elétrica e consolidando-se sua relevância no contexto industrial da planta frigorífica.

#### 4.4.3 Possibilidades De Aproveitamento Do Biogás

O aproveitamento energético do biogás gerado no processo de biodigestão constituiu um dos principais benefícios da adoção dessa tecnologia no setor frigorífico, tanto pela capacidade de substituir combustíveis fósseis quanto pelo potencial de reduzir custos e emissões atmosféricas. Em função de sua elevada concentração de CH<sub>4</sub>, o biogás apresentou valor calorífico significativo, que pôde ser empregado em diferentes aplicações energéticas, desde usos térmicos diretos até sistemas de cogeração. A definição da estratégia de aproveitamento mais adequada deveria considerar as demandas energéticas específicas da planta, a viabilidade técnica e econômica de implementação e a qualidade do biogás produzido.

O Quadro 10 apresenta um resumo das principais alternativas identificadas para frigoríficos de suínos, abrangendo desde a substituição do GLP na chamuscagem de carcaças até possibilidades futuras, como o uso do biogás purificado no processo de insensibilização com dióxido de carbono.

Cada uma dessas alternativas envolveu etapas que, quando estruturadas dentro de um ciclo de melhoria contínua, aumentaram as chances de sucesso da implementação. Por exemplo, na substituição do GLP na chamuscagem, a fase de planejamento compreendeu a análise do consumo térmico e a adequação dos queimadores; a execução incluiu a adaptação das linhas de suprimento e integração ao sistema existente; a verificação envolveu o monitoramento do desempenho térmico e da economia gerada; e a ação corretiva contemplou ajustes operacionais para otimizar o rendimento e minimizar perdas.

De forma semelhante, a adoção de sistemas de cogeração requereu estudos preliminares para dimensionamento adequado, instalação e integração de motores-geradores ou caldeiras, monitoramento da eficiência elétrica e térmica obtida e ajustes para otimização do desempenho e manutenção preventiva. Já o uso do biogás em sistemas térmicos, como aquecimento de água, demandou adaptações menos complexas,

mas igualmente se beneficiou de um acompanhamento contínuo dos indicadores de consumo e eficiência.

**Quadro 11** – Possibilidades de aproveitamento energético do biogás

Aspecto	Descrição	Vantagens
Substituição de GLP na chamuscagem de carcaças	O GLP, normalmente utilizado para a remoção de pelos na chamuscagem, pode ser substituído pelo biogás, que fornece energia térmica contínua e suficiente para essa etapa.	Redução de 30% a 50% nos custos com combustíveis fósseis, menor dependência externa, e valorização de resíduos orgânicos internos (SANTOS <i>et al.</i> , 2020).
Geração de calor e eletricidade (cogeração)	O biogás pode ser usado em motores ou caldeiras para gerar simultaneamente energia térmica e elétrica, atendendo parte das demandas da planta industrial.	Aumento da eficiência energética da planta, economia com energia elétrica da concessionária e menor impacto ambiental.
Uso em sistemas térmicos diversos (caldeiras, aquecimento de água)	Pode alimentar caldeiras e sistemas de aquecimento de água utilizados na limpeza, esterilização ou processos térmicos.	Aproveitamento integral do biogás, redução no consumo de outras fontes energéticas e viabilidade técnica simples.
Uso no processo de insensibilização dos suínos com CO <sub>2</sub>	Em frigoríficos que utilizam CO <sub>2</sub> no processo de insensibilização, o biogás pode ser purificado e enriquecido para uso nesse sistema.	Possibilidade futura, com foco em bem-estar animal e valorização total do biogás; exige purificação e controle de composição. Ainda pouco comum no Brasil.

Fonte: Autores, 2025.

Por fim, a utilização do biogás purificado e enriquecido em processos de insensibilização animal, embora ainda pouco aplicada no Brasil, representou uma possibilidade de inovação alinhada às práticas de bem-estar animal e à valorização integral do recurso. Sua viabilidade técnica dependeu de sistemas robustos de purificação e de controle de composição, além de validações operacionais que assegurassem a segurança e a eficácia do processo.

A análise integrada dessas opções evidenciou que o aproveitamento do biogás pôde ser ampliado gradualmente, seguindo um modelo de gestão que combinou planejamento, execução, verificação e ações corretivas, garantindo-se ganhos econômicos e ambientais de forma sustentável.

#### 4.4.4 Desafios Para Ampliação Ou Otimização Do Sistema

A viabilidade plena do sistema de biodigestão anaeróbia em frigoríficos dependeu diretamente da capacidade de superar entraves operacionais e estruturais que limitaram seu desempenho. Apesar do potencial energético expressivo e das condições

construtivas favoráveis, ainda persistiram barreiras que comprometeram a estabilidade do processo e a maximização da produção de biogás. Entre os aspectos mais críticos esteve a instabilidade na alimentação do biodigestor, ocasionada pela variação na geração de lodo e na carga orgânica afluyente. Essa irregularidade interferiu na estabilidade microbiológica e reduziu a previsibilidade da produção energética. A presença de óleos e graxas no substrato, mesmo em concentrações moderadas, agravou a situação, uma vez que pôde formar barreiras físicas à ação microbiana e induzir a formação de compostos tóxicos, resultando em queda de eficiência.

Outro fator limitante esteve relacionado à subutilização de elementos da infraestrutura já existente, como tanques intermediários e equalizadores, cuja operação parcial reduziu a vazão regular de alimentação e comprometeu o equilíbrio hidráulico do sistema. Além disso, a ausência de monitoramento automatizado de variáveis críticas, como pH, temperatura e composição do biogás, dificultou a identificação precoce de desvios e impediu a adoção de medidas corretivas em tempo hábil. Os principais desafios identificados e as possíveis soluções técnicas para cada caso encontraram-se sintetizados no Quadro 11.

**Quadro 12 – Principais desafios e soluções na operação do biodigestor**

<b>Desafio</b>	<b>Efeito no Sistema</b>	<b>Possíveis Soluções</b>
Variação na carga orgânica	Instabilidade na alimentação do biodigestor	Padronização do fluxo e da composição dos efluentes
Presença de óleos e graxas	Inibição da atividade microbiológica e formação de compostos tóxicos	Implantação de sistemas de flotação e uso de coagulantes para pré-tratamento
Tanques intermediários subutilizados	Vazão irregular e acúmulo de lodo	Redimensionamento dos tanques e equalizadores
Falta de monitoramento automatizado	Dificuldade em identificar falhas e instabilidades do processo	Instalação de sensores de pH, temperatura e analisadores de biogás
Baixo aproveitamento energético	Perda de potencial de produção de energia	Adoção da co-digestão com resíduos orgânicos compatíveis
Subaproveitamento do digestato	Descarte inadequado de nutrientes	Avaliação para uso como biofertilizante, considerando a legislação ambiental
Custo elevado de implantação	Dificuldade de replicação em pequenas plantas	Busca por financiamento e comprovação de retorno econômico pela substituição de GLP

Fonte: Autoras, 2025.

A análise do quadro evidenciou que a superação desses obstáculos requereu um conjunto articulado de ações que se inseriram naturalmente em um ciclo contínuo de melhoria. O planejamento envolveu a padronização do fluxo e da composição

dos efluentes, a reavaliação da capacidade dos tanques e equalizadores e o estudo de viabilidade da co-digestão com resíduos orgânicos compatíveis. A execução contemplou a implantação de sistemas complementares de pré-tratamento, como flotores com adição de coagulantes para remoção de óleos e graxas, a instalação de sensores e analisadores para monitoramento em tempo real e a adequação do layout hidráulico para garantir alimentação constante e homogênea do biodigestor. A fase de verificação baseou-se no acompanhamento sistemático de indicadores operacionais e de qualidade do biogás, permitindo-se identificar tendências de melhoria ou de queda de desempenho. Por fim, a ação corretiva, fundamentada nos dados coletados, direcionou ajustes operacionais, manutenção preventiva e revisões periódicas do plano de operação, com vistas à maximização do rendimento e à consolidação da estabilidade do sistema.

Paralelamente à identificação desses desafios, a caracterização técnica do frigorífico, realizada a partir de dados primários obtidos por visitas técnicas, entrevistas e observações diretas, bem como de dados secundários oriundos de relatórios, planilhas internas e referências da literatura, possibilitou quantificar o volume diário de resíduos orgânicos gerados, determinar suas características físico-químicas e avaliar a capacidade disponível para a instalação e ampliação do sistema. Essa base de informações sustentou a identificação de oportunidades concretas para o reaproveitamento energético e a valorização dos resíduos, estabelecendo um cenário consistente para a tomada de decisão. Ainda que não tenham sido utilizados modelos estatísticos avançados, a abordagem seguiu parâmetros operacionais reconhecidos, garantindo a robustez técnica das conclusões.

Dessa forma, a adoção de uma estratégia integrada, pautada na otimização do processo, no aproveitamento máximo do potencial energético e no atendimento aos requisitos legais e ambientais, apresentou-se como elemento-chave para assegurar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da biodigestão anaeróbia no contexto industrial de frigoríficos de suínos.

## 5 CONCLUSÃO

A avaliação da viabilidade de implementação e otimização de um sistema de biodigestão anaeróbia em um frigorífico de suínos permitiu atingir os objetivos específicos e responder às questões de pesquisa, demonstrando o potencial estratégico dessa tecnologia para a sustentabilidade do setor.

A caracterização dos efluentes revelou elevada carga orgânica, presença de nutrientes, sangue, gordura e sólidos, com parâmetros médios de pH 6,94, temperatura de 32,0 °C e relação C/N de 20:1, adequados para digestores mesofílicos. A razão DBO/DQO de 0,4 indicou biodegradabilidade moderada, confirmando a necessidade de controle operacional para assegurar maior eficiência na conversão da matéria orgânica em metano.

A análise do desempenho demonstrou que o biodigestor opera em apenas 28,8 % da capacidade projetada, com vazão média de alimentação de 5,4 m<sup>3</sup>/dia em relação ao potencial de 18,75 m<sup>3</sup>/dia. Como consequência, a produção de biogás é limitada a 13,5 m<sup>3</sup>/dia, suprimindo apenas 0,54 % da demanda diária de GLP da planta. Os fatores limitantes identificados incluem a subutilização da capacidade instalada, as variações de temperatura (27,5 °C a 36,5 °C), a ausência de uso pleno dos tanques intermediários e a carência de monitoramento automatizado de parâmetros críticos.

Foram propostas melhorias operacionais e estruturais, como o aumento gradual e padronizado da vazão de alimentação, o uso integral dos tanques intermediários da ETEI, a adoção de estratégias de isolamento térmico, a implementação de automação para monitoramento contínuo de variáveis essenciais e a investigação da co-digestão com resíduos orgânicos compatíveis. Tais medidas podem elevar a estabilidade do processo, aumentar a Carga Orgânica Volumétrica (COV) aplicada e, conseqüentemente, maximizar a produção de biogás.

A estimativa de potencial energético indicou que, com o aproveitamento integral da carga orgânica disponível, seria possível alcançar até 3.508 m<sup>3</sup>/dia de biogás, equivalentes a 74.780 MJ/dia, volume capaz de substituir integralmente o GLP consumido nos processos de chamuscagem e atordoamento de suínos. Além disso, esse excedente poderia viabilizar sistemas de cogeração térmica e elétrica, conduzindo à autossuficiência energética da planta e à mitigação significativa das emissões de gases de efeito estufa.

As perguntas de pesquisa foram respondidas ao se identificar os parâmetros físico-químicos determinantes para a eficiência do processo (pH, temperatura, relação C/N, sólidos totais), bem como os critérios de desempenho que devem ser controlados (COV, TRH, taxa e composição do biogás). E foi evidenciando que a biodigestão anaeróbia, quando devidamente dimensionada e otimizada, é tecnicamente viável, ambientalmente segura e energeticamente promissora.

Como trabalhos futuros, recomendam-se: a realização de estudos técnico-econômicos abrangentes (CAPEX, OPEX, tempo de retorno e análise de sensibilidade); a execução de ensaios de BMP para quantificação precisa da produção de CH<sub>4</sub>; a avaliação da viabilidade de co-digestão com outros resíduos orgânicos; a implementação de automação e monitoramento contínuo do processo; e a adoção de estratégias de isolamento térmico para maior estabilidade operacional.

## REFERÊNCIAS

ACSURS. **Biogás vem sendo usado na chamuscagem de suínos.** 2019. Disponível em: <<https://acsurs.com.br/noticia/biogas-vem-sendo-usado-na-chamuscagem-de-suinos/>>. Acesso em: 26 jun. 2025.

AGROSUSTENTAR. **Maiores produtores de carne suína.** Disponível em: <<https://agrosustentar.com.br/agronegocio/maiores-produtores-de-carne-suina/>>. Acesso em: 24 fev. 2025.

ALVES, M.; PEREIRA, A.; MOTA, M. **Digestão anaeróbia de gorduras: problemas e soluções.** Braga: Universidade do Minho, [s.d.]. Disponível em: <<https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/25738/1/DigestaoAnaerobicaDeGordurasindustriaeambiente.pdf>>. Acesso em: 22 fev. 2025.

AMARAL, C. *et al.* **Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica.** Ciência Rural, Biodigestão, v. 34, n. 6, p. 1897-1902, dez. 2004.

APARECIDO, G. D. P.; QUADROS, L. A. D.; SILVA, W. C. **Sistema de monitoramento: biodigestor.** RevistaFT, v. 28, n. 138, 30 set. 2024. DOI: <https://doi.org/10.69849/revistaft/ma10202409301003>. Disponível em: <<https://revistaft.com.br/sistema-de-monitoramento-biodigestor/>>. Acesso em: 28 ago. 2025.

APHA – American Public Health Association. **Standard methods for examination of water and wastewater.** 22st. ed. Washington: APHA, 2012.

ARRUDA, M. H.; AMARAL, L. D. P.; PIRES, O. P. J.; BARUFT, C. R. V. **Dimensionamento de biodigestor para geração de energia alternativa.** Revista Científica Eletrônica de Agronomia, v. 2, p. 1-8, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL (ABPA). **Relatório Anual 2024.** Disponível em: <<https://www.3tres3.com.br/guia333/empresas/associac%C3%A3>>

o-brasileira-de-proteina-animal/not%C3%ADcias/suinocultura-cresce-em-2024-e-projeta-avancos-em-2025\_5028/>. Acesso em: 11 fev. 2025.

AVELLAR, L. H. N. **A valorização dos subprodutos agroindustriais visando a cogeração e a redução da poluição ambiental.** 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista – UNESP, Guaratinguetá, SP.

BACCA, L. A. M.; ZENATTI, DILCEMARA CRISTINA. **Estudo de caso: acompanhamento de biodigestor no município de pato bragado.** Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, Pato Bragado, v. 9, n. esp., p. 586-598, maio 2020.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). **Suinocultura no Brasil: estrutura da cadeia produtiva e panorama do setor.** Rio de Janeiro: BNDES, 2017. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/web/bndes/-/1408/11794>>. Acesso em: 18 fev. 2025.

BANEGAS, V. *et al.* **Composting anaerobic and aerobic sewage sludges using two proportions of sawdust.** Waste Management, v. 27, n. 10, p. 1317–1327, 2007.

BATISTA, J. G. F.; BATISTA, E.R.B. **Compostagem: Utilização de compostos em horticultura.** Universidade dos Açores - Centro de Investigação e Tecnologias Agrárias dos Açores, 2007.

BAZARA, X.; GALIMANY, F.; TORRES, R. **Digestión anaerobia en el tratamiento de efluentes y lodos residuales.** Tecnología del Agua, v. 233, p. 34–46, 2003.

BGS. **Fatores que influenciam a produção de biogás.** Disponível em: <<https://www.bgsequipamentos.com.br/fatores-que-influenciam-producao-biogas/#:~:text=Tecnicamente%20falando%2C%20os%20principais%20fatores,%C3%A1gua%20e%20concentra%C3%A7%C3%A3o%20de%20nutrientes>>. Acesso em: 23 jan. 2025.

BIDONE, F. R. A. **Resíduos sólidos provenientes de coletas especiais: Eliminação e valorização.** Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES. Rio de Janeiro. Brasil. 2001.

BIDONE F. R. A. e POVINELLI J. **Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos.** São Carlos. EESC/USP, 1999. 120p.

BLEY JUNIOR, C. J. **Projeto de controle da contaminação ambiental decorrente da suinocultura no Estado do Paraná.** Curitiba: Ministério do Meio Ambiente, 2003. 162p.

CAMPOS, J. (1999). **Tratamento de esgoto sanitário por processo anaeróbico e disposição controlada no solo.** Rio de Janeiro

CAMPOS, C. M. M.; PRADO, M. A. C.; PEREIRA, E. L. **Anaerobic digestion of wastewater from coffee and chemical analysis of biogas produced using gas chromatography: quantification of methane, and potential energy gas exchanger.** Bioscience Journal, Uberlândia, MG, v. 29, n. 3, p. 570-581, 2013. Disponível em: <<https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/13973>>. Acesso em: 13 ago. 2025.

CASTELLANOS-SÁNCHEZ, J. E.; AGUILAR-AGUILAR, F. A.; HERNÁNDEZ-ALTAMIRANO, R.; VENEGAS, J. A. V.; ARYAL, DEB, R. **Biogas purification processes: review and prospects.** *Biofuels*, [S. l.], 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/17597269.2023.2223801>>. Acesso em: 15 ago. 2025.

CESAR, G. N. **Uso de biodigestores para fins energéticos em propriedades rurais.** [S.l.: s.n.], [s.d.]. Disponível em: <[https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/versao\\_final\\_tcc.pdf](https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/versao_final_tcc.pdf)>. Acesso em: 8 ago. 2025.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios.** 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2007. 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; v. 5).

CIELO, I. D.; RIBEIRO, M. C. P.; ROCHA JÚNIOR, W. F. D.; FRAGOSO, R. M. D. S.; SCHMIDT, C. M. **Geração de energia renovável (biogás) na região oeste do Paraná/Brasil: um estudo multicaso do ponto de vista dos contratos.** Sustainability, Basel, v. 15, n. 2, p. 1458, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15021458>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/2/1458>. Acesso em: 15 fev. 2025.

CLARKE, R. M.; SMITH, A. J. **Water and wastewater management in the meat processing industry.** Meat Science, v. 88, n. 2, p. 196–202, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.01.027>. Acesso em: 25 fev. 2025.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011.** Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/aguasresiduais/resolucoes/resolucao-conama-no-430-de-13-de-maio-de-2011>.> Acesso em: 24 maio 2025.

COSTA, A. A.; SOTO, F. R. M. (2018). **Tratamento do dejetos de suíno por biodigestão anaeróbia.** Revista Em Agronegócio E Meio Ambiente, 11(3), 801–823. Disponível em: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2018v11n3p801-823>. Acesso em: 24 fev. 2025.

COSTA, C. B. B.; PINTO, A. L.; OLIVEIRA, A. P. N. **Gestão ambiental em frigoríficos: consumo de água e geração de efluentes.** Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 25, n. 5, p. 835-845, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020190035>. Acesso em: 24 fev. 2025.

COSTA, O. A. D. *et al.* **Dicas de como realizar um jejum dos suínos adequado na granja e reduzir as perdas no manejo pré-abate.** Distrito Federal: Governo Federal, s.d. 2 slides, color. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1062056/1/final8382.pdf>. Acesso em: 24 maio 2025.

CREMONINI, J. NEDEL, T. HIGARASHI, M. M. **Tratamento De Efluentes Da Indústria De Frigoríficos.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 12, Vol. 04, pp. 124-138 Dezembro de 2018. ISSN:2448-0959

D'AQUINO, C. A. *et al.* **Efeito da variação da carga orgânica volumétrica natural na produção de biogás a partir de dejetos suíno em diferentes tempos de retenção hidráulica.** São Paulo, v. 24, n. 3, p. 613-617, maio 2018. Disponível em: <[https://www.scielo.br/j/esa/a/MHYSzcysDWJSkN\\_x4NwkKwzg/](https://www.scielo.br/j/esa/a/MHYSzcysDWJSkN_x4NwkKwzg/)> Acesso em: 17 abr. 2025.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R.; SANTOS, C. **Biodigestores Rurais: Modelo indiano, chinês e batelada.** Bauru: UNESP, FAAC, 2013.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources: an introduction.** Weinheim: Wiley-VCH, 2008.

DE LA TORRE, N. D. A. E. C. R. **Digestión anaerobia en comunidades rurales.** 2008. 140 f. Tese (Engenharia Térmica e de Fluidos) – Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior, 2008.

DIAS, C. P.; LEITÃO, F. O.; COSER, F.; SILVA, W. H. D.; OLIVEIRA, P. A. V. D. **Tecnologias para o tratamento de dejetos suínos com vistas à sustentabilidade.** In: Seminário técnico científico de aves e suínos – Avesui, 15., 2016, Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis: CentroSul, 2016.

DROSG, B. **Process monitoring in biogas plants.** Paris: IEA Bioenergy, 2013. ISBN 978-1-910154-03-8. Disponível em: <<https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/Process-Monitoring-in-Biogas-Plants.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2025.

DONGALA, A. M. **Projeto de biodigestor para geração de bioenergia em sistemas de produção de suínos: um estudo de caso da região de Icolo e Bengo – Angola.** Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

EMAS. **Tipos de biodigestor: entenda o funcionamento e qual é o melhor para você.** 2020. Disponível em: <<https://emasjr.com.br/blog/entenda-os-tipos-de-biodigestor-e-qual-e-o-mais-adequado-para-voce/#:~:text=Recomenda%>>

C3%A7%C3%B5es, apenas%20quando%20acontece%20a%20limpeza.> Acesso em: 20 jan. 2025.

EMBRAPA. **Biodigestores – Tecnologias para produção de biogás a partir de resíduos orgânicos.** Embrapa Agroenergia, 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacaotecnologica/tematicas/agroenergia/residuos/biogas/biodigestores>>. Acesso em: 25 jul. 2025.

EMBRAPA SUÍNOS E AVES. **Boas Práticas de Manejo para o Bem-estar de Suínos.** 2022. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/suinos-e-aves/bem-estar-animal>>. Acesso em: 20 jul. 2025.

EMBRAPA SUÍNOS E AVES. **Gestão ambiental na suinocultura.** Editor técnico: Milton Antonio Seganfredo. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2012. E-book. ISBN 978-85-7035-094-7. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/984939/gestao-ambiental-na-suinocultura>>. Acesso em: 21 maio 2025.

EMBRAPA. **Gestão dos resíduos da produção animal.** Brasília. 2024. 283 p.

EMBRAPA. **Indicadores de desempenho ambiental na suinocultura e no processamento de carne suína.** Circular Técnica, n. 184, 2019.

ENERGYPEDIA. **Sizing of the Biogas Plant.** 2023 Disponível em: <[https://energypedia.info/wiki/Sizing\\_of\\_the\\_Biogas\\_Plant](https://energypedia.info/wiki/Sizing_of_the_Biogas_Plant)>. Acesso em: 31 jul. 2025.

FAO. **Biogas Technology – A Training Manual for Extension.** FAO, 1996.

FARIA, R. A. P. **Avaliação do potencial de geração de biogás e de produção de energia a partir da remoção da carga orgânica de uma estação de tratamento de esgoto – Estudo de caso.** 2012. 63 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

FAROOQ, M.; REHMAN, AT. U.; ANWER, I.; IMRAN, M.; PETTINAU, A.; ANDRESEN, J. M. **Towards net-zero: CO<sub>2</sub> capture and biogas purification through**

**electric potential swing desorption to achieve SDGs 7 and 13.** *Frontiers in Energy Research*, Lausanne, v. 11, 01 nov. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1276733>>. Acesso em: 15 ago. 2025.

FERNÁNDEZ, H. T. M. **Producción de biofertilizantes por degradación microbiológica de residuos orgánicos.** In: *Microorganismos e Agrobiodiversidade: o novo desafio para a agricultura*. São Paulo: Agro Livros, 2008. p. 353–373.

FILER, J.; DING, H. H.; CHANG, S. **Biochemical methane potential (BMP) assay method for anaerobic digestion research.** *Water*, [S.l.], v. 11, n. 5, p. 921, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11050921>. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/11/5/921>>. Acesso em: 13 ago. 2025.

GOMIDE, L. A. M.; RAMOS, E. M.; FONTES, P. R. **Tecnologia de abate e tipificação de carcaças.** Viçosa: Editora UFV, 2006. p. 370.

GRADY, C. P. L. J.; LIM, H. C. **Biological waste treatment.** New York: Marcel Dekker Inc., 1980.

HALMEMAN, M. C. R.; STACHISSINI, M. G.; DAMACENO, F. M.; GABRIEL FILHO, L. R. A.; CREMASCO, C. P.; PUTTI, F. F. **The deployment of biodigester systems in rural properties.** *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*. v. 8, n. 4, p. 351-360, 2014.

HAMILTON, D. W. **Anaerobic digestion of animal manures: methane production potential of waste materials.** BAE-1762. Oklahoma Cooperative Extension Service, Oklahoma State University, 2005. Disponível em: <<http://osufacts.okstate.edu>>. Acesso em: 30 jul. 2025.

HARIKA, B.; PRASAD, S. BALA; SARADHI, VIJAYA; ABHILASH, N. **Comparison of formulas to calculate biogas production.** *Journal of Harbin Engineering University*, Harbin, v. 44, n. 12, dez. 2023. ISSN 1006-7043.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estatística da produção pecuária: jul.-set. 2024**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <[https://ftp.ibge.gov.br/Producao\\_Pecuaria/Fasciculo\\_Indicadores\\_IBGE/abate-leite-couro-ovos\\_202403caderno.pdf](https://ftp.ibge.gov.br/Producao_Pecuaria/Fasciculo_Indicadores_IBGE/abate-leite-couro-ovos_202403caderno.pdf)>. Acesso em: 16 abr. 2025.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores IBGE: Estatística da Produção Pecuária, abr.-jun. 2024**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <[https://ftp.ibge.gov.br/Producao\\_Pecuaria/Fasciculo\\_Indicadores\\_IBGE/abate-leite-couro-ovos\\_202402caderno.pdf](https://ftp.ibge.gov.br/Producao_Pecuaria/Fasciculo_Indicadores_IBGE/abate-leite-couro-ovos_202402caderno.pdf)>. Acesso em: 30 nov. 2024.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Trimestral do Abate de Animais**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9203-pesquisas-trimestrais-do-abate-de-animais.html?=&t=series-historicas>>. Acesso em: 15 abr. 2025.

IDRICA. **The four stages of wastewater treatment plants**. 2021. Disponível em: <<https://www.idrica.com/blog/stages-of-wastewater-treatment-plants/>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

IEA BIOENERGY. **Production of food grade sustainable CO<sub>2</sub> from a large biogas facility: GO'CO<sub>2</sub> at The Korskro Biogas Plant, Denmark**. Case Story, Task 37, n. 11, 2020. Disponível em: <<https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/11/CS-37-11-Korskro.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2025.

INDUSTRIAL, Suinocultura. **Brasil abateu 13,38 milhões de cabeças de suínos no quarto trimestre de 2021**. 2022. Disponível em: <<https://acsurs.com.br/noticia/brasil-abateu-1338-milhoes-de-cabecas-de-suinos-no-quarto-trimestre-de-2021/>>. Acesso em: 15 abr. 2025.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 6. ed. v. 1. Rio de Janeiro: ABES, 2011. 994 p.

KHANAL, S. **Anaerobic biotechnology for bioenergy production**. [S. l.]: Wiley-Blackwell, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/9780813804545>>. Acesso em: 19 jul. 2025.

KIEHL, E. J. **Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto**. 4. ed. Piracicaba: E. J. Kiehl, 2004.

KOTHARI, R., PANDEY, A., KUMAR, S., TYAGI, V., TYAGI, S. (2014). **Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, pp.174-195.

KOSTER, I. W.; LETTINGA, G. **Anaerobic digestion at low temperature**. *Water Science and Technology*, v. 17, n. 1, p. 59–71, 1984.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. A. V. D. **Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás**. *Revista de Política Agrícola*, Brasília, ano XV, n. 3, p. 28-35, jul./set. 2006.

KUNZ, A. *et al.* **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2019. 214 p. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1108617> > Acesso em: 21 jan. 2025.

KUNZ, A. **Gestão dos resíduos da produção animal: gestão e tratamento dos dejetos na suinocultura**. Brasília, DF: Embrapa; Concórdia: Sbera, 2024. 208 p. ISBN 978-65-88155-11-0.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; BORTOLI, M. **Separação sólido-líquido em efluentes da suinocultura**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 14, n. 11, p. 1165–1171, nov. 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1415-43662010001100012>>. Acesso em: 29 abr. 2025.

KUOSI EQUIPMENT. **Digester wastewater treatment**. 2024. Disponível em: <<https://kuosiequipment.com/blogs/digester-wastewater-treatment/>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

LABIOGÁS. **Documentos internos**. Foz do Iguaçu: CIBiogás – ER, 2013.

LEITE, V. D.; POVINELLI, J. **Comportamento dos sólidos totais no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e industriais**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 3, n. 2, p. 229-232, 1999. Acesso em: 10 abr. 2025.

LEMA, J. M.; MÉNDEZ, R. J. **Tratamientos biológicos anaerobios**. Oviedo, España, v. III, 1997.

LETTINGA, G.; REBAC, S.; ZEEMAN, G. **Desafios do tratamento anaeróbio de águas residuárias psicrófilas**. Trends in Biotechnology, v. 19, n. 9, p. 363–370, 2011.

LIMA, H. Q. **Avaliação dos modelos Hashimoto e AMS-III.D para produção de metano com dejetos de suínos**. 2011. 83 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal do ABC, Santo André, SP, 2011.

LIMA, H. Q. **O que é carga orgânica volumétrica (COV)?** 2024. Disponível em: <<https://biogaseenergia.com.br/o-que-e-carga-organica-volumetrica-cov>>. Acesso em: 05 maio 2025.

LINDEMEYER, R. M. **Análise da viabilidade econômico-financeira do uso do biogás como fonte de energia elétrica**. 2008. 105f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Administração) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

LOPEZ -REAL, J. **Composting through the ages**. Conference Down to Earth Composting. Dundee, 1994.

MACEDO, F. J. **Dimensionamento de biodigestores para tratamento de dejetos da produção suína.** Monografia (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis-SC, 117p, 2013.

MACEDO, F. J. de; TAVARES, J. M. R.; BELLI FILHO, P. *et al.* **Dimensionamento, avaliação potencial de produção de metano e análise de custo de digestores anaeróbios para tratamento de dejetos produzidos na suinocultura.** Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Monterrey, México, 2014. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1033052>>. Acesso em: 10 maio 2025.

MARAGNO, E. S.; TROMGIN, D. F.; VIANA, E. **O uso da serragem no processo de minicompostagem.** Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 12, n. 4, p. 355–360, 2007.

MARCUCCI, S. M. P.; ROSA, R. A.; LENZI, G. G.; BALTHAZAR, J. M.; FUZIKI, M.E. K.; TUSSET, A. M. **Biogas overview: global and Brazilian perspectives with emphasis on Paraná State.** Sustainability, Basel, v. 17, n. 321, p. 1-23, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17010321>. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/17/1/321>>. Acesso em: 15 ago. 2025.

MELO, P. **Saiba os Estados que lideraram os abates de bovinos, suínos e frango no Brasil em 2024.** Movimento Pecuário, 18 mar. 2025. Disponível em: <<https://movimentopecuario.com.br>> Acesso em: 23 jul. 2025.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery.** 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2016.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Suinocultura de baixa emissão de carbono: tecnologias de produção mais limpa e aproveitamento econômico dos resíduos da produção de suínos.** Brasília. 2016.

MIRANDA, L. A. S.; HENRIQUES, J. A. P.; MONTEGGIA, L. O. **A full-scale UASB reactor for treatment of pig and cattle slaughterhouse wastewater with a high oil**

**and grease content.** *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 22, n. 4, p. 601-610, 2005. DOI: <<https://doi.org/10.1590/S0104-66322005000400013>>. Acesso em: 05 maio 2025.

**MULTIAGUA. O uso do flotor no tratamento de efluentes.** Disponível em: <<https://multiagua.com.br/o-uso-do-flotor-no-tratamento-de-efluentes/>>. Acesso em: 07 jan. 2025.

**MULTIAGUA. Tratamento de efluentes para frigoríficos e abatedouros.** Disponível em: <<https://multiagua.com.br/solucoes-industriais/tratamento-de-efluentes/tratamento-de-efluentes-para-frigorificos-e-abatedouros/>>. Acesso em: 07 jan. 2025.

**NEVES, V. L. V. Construção de biodigestor para produção de biogás a partir da fermentação de esterco bovino.** 2010. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia de Agronegócio) – Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Araçatuba, 2010.

**NORDBERG, Å. Biogas production – theoretical and practical calculations.** Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences – Dept of Energy & Technology, 2017. Disponível em: <[https://slunik.slu.se/kursfiler/TN0320/20107.1718/Biogas\\_production%E2%80%93theoretical\\_and\\_practical\\_calculations\\_TN0320\\_2017.pdf](https://slunik.slu.se/kursfiler/TN0320/20107.1718/Biogas_production%E2%80%93theoretical_and_practical_calculations_TN0320_2017.pdf)> Acesso em: 31 jul. 2025.

**NUNES, M. L. A. Avaliação de procedimentos operacionais na compostagem de dejetos de suínos.** 2003. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2003.

**OLIVEIRA, E. A. D. Peso ótimo de abate de suínos.** 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Veterinárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/bitstream/handle/1884/27408/R%20-%20D%20-%20OLIVEIRA%2c%20EDUARDO%20ALEXANDRE%20DE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em: 15 abr. 2025.

ORRICO, A C. A. *et al.* **Codigestão anaeróbia de dejetos de suínos e níveis de inclusão de óleo de descarte.** Journal Of The Brazilian Association Of Agricultural Engineering Anaeróbia de Dejetos de Suínos e Níveis de Inclusão de Óleo de Descarterazilian Association Of Agricultural Engineering. Jaboticabal, p. 657-664. ago. 2015. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/eagri/a/cffwjVBVqgVpXNT4R5x9pmy/?format=pdf&lang=pt.>> Acesso em: 15 abr. 2025.

PACHECO, J. W.; YAMANAKA, H. T. Guia técnico ambiental de abates (bovino e suíno). São Paulo: CETESB, 2006. 98 p. (Série P+L). Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/consumosustentavel/wp-content/uploads/sites/20/2013/11/abate.pdf>> Acesso em: 20 fev. 2025.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de caso.** 2006. 152 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PEREIRA NETO, J. T. **Tratamento, reciclagem e impacto ambiental de dejetos agrícolas.** In: I Conferência sobre Agricultura e Meio Ambiente, 1994, Viçosa. Anais [...]. Viçosa: UFV, 1994. p. 61–74.

PESSUTI, C. A. A.; HERMES, E.; ZENATTI, D. C.; SILVA, R. P. **Remoção de sólidos e produção de metano na digestão anaeróbia de efluente de processamento de mandioca.** Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 4, p. 110–116, 2015.

PINHEIRO, P. C. D. C. **Combustão de combustíveis gasosos: engenharia térmica.** Relatório técnico. Belo Horizonte: Gerenciamento Consultoria Técnica e Informática LTDA, 1999. (Prof. Adjunto 4 do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG). Cliente: Thomson Tube Components – BH.

RAPOSO, F. *et al.* **Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: an overview relating to methane yields and experimental procedures.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, p. 861–877, 2011.

RIBEIRO, M. E. **Estudo de biodigestores tubulares como alternativa de tratamento de resíduos orgânicos em propriedades rurais de base familiar.** Revista Holos, v. 5, p. 88–102, 2011.

RICHARD, T. L. *et al.* **The science and engineering of composting.** The Cornell Composting Website, Cornell University, 2002.

RITTMANN, B. E.; MCCARTY, P. L. **Environmental biotechnology: principles and applications.** New York: McGraw-Hill, 2001.

RODRIGUES, M. S.; SILVA, F. C.; BARREIRA, L. P.; KOVACS, A. **Compostagem: reciclagem de resíduos sólidos orgânicos.** 2006.

ROSETO, H.; JENNY, C. **Digestão anaeróbia de resíduo de caixa de gordura de laticínio e bagaço de cana de açúcar pré-tratado com CO<sub>2</sub> sub e supercrítico.** 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2017. doi:10.11606/D.74.2017.tde-17082017-102806. Acesso em: 2025-04-15.

ROWSE, L. E. **Design of small-scale anaerobic digesters for application in rural developing countries.** 2011. 94 f. Thesis (Master of Science) – University of South Florida, 2011.

SALOMON, K. R.; TIAGO FILHO, G. L. **Biomassa.** Série Energias Renováveis. Itajubá: Editora UNIFEI, 2007.

SALOMON, K. R. **Produção de biogás e metano em biodigestores.** 2007. Disponível em: <[https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/18558/1/CT\\_CEER\\_I\\_2015\\_14.pdf](https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/18558/1/CT_CEER_I_2015_14.pdf)> Acesso em: 10 fev. 2025.

SANTOS, H. D. S. *et al.* **Biodigestor de baixo custo na produção de biofertilizantes e de biogás.** Peer Review, Pará, v. 5, n. 13, p. 179-191, jun. 2023.

SANTOS, R. D. F. D.; GUIMARÃES, C. C.. **Principais parâmetros para produção de biogás a partir de dejetos suínos**. *Ciência & Tecnologia*, [S. l.], v. 15, n. 1, p. e1518, 2023. Disponível em: < <https://doi.org/10.52138/citec.v15i1.271>>. Acesso em: 05 ago. 2025.

SANTOS, R. P. *et al.* **Tratamento de efluentes de frigoríficos: Caracterização e impacto ambiental**. *Revista Brasileira de Engenharia Ambiental*, v. 21, n. 3, p. 150-162, 2016.

SAVE THE WATER. **Biogas production from sewage sludge**. 2022. Disponível em: <<https://savethewater.org/biogas-production-from-sewage-sludge/>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

SCHIAVO, PABLO LOUZADA; BELONIA, RODRIGO CARDOSO. **Jornal pet: biodigestor**. Disponível em: <[https://petmecanica.ufes.br/sites/petengenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/jornal\\_pet\\_-\\_biodigestor.pdf](https://petmecanica.ufes.br/sites/petengenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/jornal_pet_-_biodigestor.pdf)>. Acesso em: 20 jan. 2025.

SEMADESC. **Abate com CO<sub>2</sub> para o bem-estar animal – Parte II**. 2016. Disponível em: <<https://www.semadesc.ms.gov.br/abate-com-co2-para-o-bem-estar-animal-parte-ii/>>. Acesso em: 29 jun. 2025.

SENAI. **Programa de Geração de Resíduos Sólidos na Indústria de Alimentos e Bebidas**. Rio de Janeiro: SENAI, 2006.

SHIN, C.; YOON, S.; CHUNG, Y G. **Evaluating Isoreticular Series of CALF-20 for Biogas Upgrading using a Pressure/Vacuum Swing Adsorption (PVSA) Process**. arxiv preprint, Ithaca: Cornell University, 20 jul. 2025. Disponível em: < <https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.21126>>. Acesso em: 15 ago. 2025.

SILVA, F. P. **Avaliação de parâmetros físico-químicos na operação de um biodigestor para tratamento de dejetos suínos**. 61 p. Monografia de Especialização (Pós-Graduação em Energias Renováveis com ênfase em biogás) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), Foz do Iguaçu, PR, 2013.

SILVA, J. P. *et al.* **Sistema de monitoramento: biodigestor.** Revista F&T, 2020. Disponível em: <<https://revistaft.com.br/sistema-de-monitoramento-biodigestor/>>. Acesso em: 11 fev. 2025.

SILVA, W. D. O. **Análise de viabilidade econômico-financeira da implantação e operação de um biodigestor caseiro para o aproveitamento de dejetos bovinos em uma comunidade rural no município de Aurora/CE.** 2020. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2020.

SIQUEIRA, D. D. *et al.* **Manejo de dejetos de suínos e aves: soluções sustentáveis para a produção animal.** Ciências Agrárias, v. 29, n. 140, nov. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.69849/revistaft/cl10202411301250>>. Acesso em: 15 ago. 2025.

SOUZA, M. E. D. **Fatores que influenciam a digestão anaeróbia.** Revista DAE, São Paulo, v. 44, n. 137, p. 88-94, jun. 1984.

SPEECE, R. E. **Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters.** Nashville: Archae Press, 1996.

TÁPPARO, D. C. *et al.* **Aspectos nutricionais, energéticos e sanitários da co-digestão de esterco suíno e carcaça.** Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, Lausanne, v. 8, p. 333, 29 abr. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00333>>. Acesso em: 15 jan. 2025.

UDDIN, M. M. *et al.* **Anaerobic digestion fundamentals, challenges, and technological advances.** Physical Sciences Reviews, vol. 8, no. 9, 2023, pp. 2819-2837. Disponível em: <<https://doi.org/10.1515/psr-2021-0068>>. Acesso em: 15 jan. 2025.

UNAM – Instituto de Ingeniería. **Guía sobre biodigestores y manejo de biogás.** 2012. Disponível em: <<https://proyectos2.iingen.unam.mx/LACClimateChange/docs/Guia.pdf>>. Acesso em: 23 ago. 2025.

UNEP. **Cleaner Production Assessment in Meat Processing**. Paris: United Nations Environment Programme, 2000.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME; DEPA – DANISH ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY; COWI. **Consulting Engineers and Planners AS, Denmark. Cleaner production assessment in meat processing**. Paris: UNEP, 2000. Disponível em: <<http://www.agrifood-forum.net/publications/guide/index.htm>>. Acesso em: 20 ago. 2025.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Anaerobic digester/biogas system operator guidebook: a guidebook for operating anaerobic digestion/biogas systems on farms in the United States**. Washington, D.C.: EPA, Nov. 2020. Disponível em: <<https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-11/documents/agstar-operator-guidebook.pdf>> Acesso em: 20 jul. 2025.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2005.

VON SPERLING, M. **Lagoas de estabilização**. v. 3. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. 134 p.

XAVIER, C. A. N.; LUCAS JÚNIOR, J. de **Avaliação do desempenho de biodigestores em batelada com diferentes concentrações de inóculo**. Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 30, n. 5, p. 912–921, 2010. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/eagri/a/ngnkXvLLKcpYg4RM4nBZcRR.>> Acesso em: 25 jul. 2025.

YANG, G. *et al.* **Technology in the co-digestion of rural organic solid wastes in China**. Energy, v. 93, n. 2, p. 2497–2502, 2015.

ZHU, N. **Effect of low initial C/N ratio on aerobic composting of swine manure with rice straw**. Bioresource Technology 9–13, 2007.

ZUCCONI, F.; BERTOLDI, M. **Organic waste stabilization throughout composting and its compatibility with agricultural uses.** In: WISE, D.L. Global bioconversions. Boca Raton: CRC Press, 1986. p. 109 137.

# APÊNDICE

## APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO

### A1 CÁLCULO DA VAZÃO MÍNIMA E MÁXIMA DE EFLUENTE

Dados

- Produção horária mínima ( $Q_{hora,min}$ ): 69,28 m<sup>3</sup>/h;
- Produção horária máxima ( $Q_{hora,max}$ ): 90,15 m<sup>3</sup>/h;
- Tempo de operação diária ( $t_{op}$ ): 17,6 h/dia.

$$Q_{dia} = Q_{hora} \times t_{op} \quad \text{Equação (A1)}$$

Cenário mínimo:  $Q_{mínima} = 69,28m^3/h \times 17,6h/dia = 1.219,33m^3/dia$

Cenário máximo:  $Q_{máxima} = 90,15 m^3/h \times 17,6 h/dia = 1.587,00 m^3/dia$

### A2 RELAÇÃO EFLUENTE/ÁGUA

Dados

- Vazão mínima: 1.219,33 m<sup>3</sup>/dia;
- Vazão máxima: 1.587,00 m<sup>3</sup>/dia;
- Consumo diário de água: 2.319,30 m<sup>3</sup>/dia.

$$Relação_{efluente/água} = \frac{Q_{efluente}}{Q_{água}} \quad \text{Equação (A2)}$$

Cenário mínimo:  $Relação_{efluente/água} = \frac{(1239,33m^3/dia)}{(2319,30m^3/dia)} = 0,53$

Cenário máximo:  $Relação_{efluente/água} = \frac{(1586,64m^3/dia)}{(2319,30m^3/dia)} = 0,68$

### A3 CÁLCULO DA VAZÃO ESPECÍFICA DE EFLUENTE POR SUÍNO

Dados

- Vazão mínima diária: 1.219,33 m<sup>3</sup>/dia;
- Vazão máxima diária: 1.587,00 m<sup>3</sup>/dia;
- Número médio de suínos abatidos: 4.500 suínos/dia.

$$Vazão\ média\ por\ suíno = \frac{(Vazão\ diária\ (m^3/dia))}{(n^{\circ}\ de\ suínos\ abatidos\ por\ dia\ (suíno/dia))} \quad \text{Equação (A3)}$$

$$\text{Cenário mínimo: } Q\ (m^3/suíno) = \frac{1219,33(m^3/dia)}{4500(suínos/dia)} = 0,271m^3/suíno = 271L/suíno$$

$$\text{Cenário máximo: } Q\ (m^3/suíno) = \frac{1587(m^3/dia)}{4500(suínos/dia)} = 0,353m^3/suíno = 353L/suíno$$

#### **A4 COMPARATIVO ENTRE VAZÃO IDEAL E VAZÃO REAL DE ALIMENTAÇÃO DO BIODIGESTOR**

Dados

- Volume útil do biodigestor ( $V_{\text{útil}}$ ): 427,5 m<sup>3</sup>;
- TRH: 22,8 dias;
- Vazão real de operação: 5,4 m<sup>3</sup>/dia.

$$V_{biodigestor} = TRH \times Q_{substrato} \quad \text{Equação (A4)}$$

$$Q_{substrato} = \frac{V_{biodigestor}}{TRH}$$

$$Q(m^3/dia) = \frac{427,5(m^3)}{22,8(dias)} = 18,75m^3/dia$$

$$\%_{utilização} = \frac{Q_{real}}{Q_{ideal}} \times 100 \quad \text{Equação (A5)}$$

$$\%_{utilização} = \frac{5,4(m^3/dia)}{18,75(m^3/dia)} \times 100 = 28,8\%$$

#### **A5 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E DA CARGA ORGÂNICA VOLUMÉTRICA**

##### **A5.1 CARGA DE DQO E PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Dados – Cenário Real

- Concentração de DQO: 6,25 kg/m<sup>3</sup>;
- Vazão alimentada: 5,4 m<sup>3</sup>/dia;
- Rendimento de biogás: 0,40 m<sup>3</sup>/kg DQO.

$$Carga\ de\ DQO = C_{DQO} \times Q_{alimentação} \quad \text{Equação (A6)}$$

$$\text{Carga de DQO (kg/dia)} = 6,25 \text{ kg/m}^3 \times 5,4 \text{ m}^3/\text{dia} = 33,75 \text{ kgDQO/dia}$$

$$\text{Produção de biogás} = \text{Carga de DQO} \times Y_{\text{biogás}} \quad \text{Equação (A7)}$$

$$\text{Produção de biogás} = 33,75 \text{ kgDQO/dia} \times 0,40 \text{ m}^3/\text{kg} = 13,5 \text{ m}^3 \text{ biogás/dia}$$

#### Dados – Cenário Potencial

- Concentração de DQO: 6,25 kg/m<sup>3</sup>;
- Vazão de efluente bruto: 1.403,2 m<sup>3</sup>/dia.

$$\text{Carga de DQO} = 6,25 \text{ kg/m}^3 \times 1403,2 \text{ m}^3/\text{dia} = 8770,0 \text{ kgDQO/dia}$$

$$\text{Produção de biogás} = 8770,0 \text{ kgDQO/dia} \times 0,40 \text{ m}^3/\text{kg} = 3508 \text{ m}^3 \text{ biogás/dia}$$

### A5.2 CÁLCULO DA CARGA ORGÂNICA VOLUMÉTRICA (COV)

$$\text{COV} = \frac{\text{Carga de DQO (kg/dia)}}{\text{Volume útil do biodigestor (m}^3\text{)}} \quad \text{Equação (A8)}$$

$$\text{Cenário real: } \text{COV}_{\text{real}} = \frac{(33,75 \text{ kg DQO/dia})}{(427,5 \text{ m}^3)} = 0,079 \text{ DQO/m}^3 \cdot \text{dia}$$

$$\text{Cenário potencial: } \text{COV}_{\text{potencial}} = \frac{(8770 \text{ kg DQO/dia})}{(427,5 \text{ m}^3)} = 20,25 \text{ DQO/m}^3 \cdot \text{dia}$$

### A5.3 VOLUME IDEAL DO REATOR NO CENÁRIO POTENCIAL

#### Dados

- TRH: 22,8 dias;
- Vazão de efluente bruto (Q<sub>subst</sub>): 1.403,2 m<sup>3</sup>/dia.

$$V_{\text{biodigestor}} = \text{TRH} \times Q_{\text{substrato}} \quad \text{Equação (A9)}$$

$$V_{\text{biodigestor}} = 22,8 \text{ dias} \times 1403,2 \text{ m}^3/\text{dia} = 31.991 \text{ m}^3$$

## A6 CÁLCULO DO VOLUME DO RESERVATÓRIO DE BIOGÁS

#### Dados

- Fator de segurança: 1,5;
- Produção de biogás (real): 13,5 m<sup>3</sup>/dia;
- Produção de biogás (potencial): 3.508 m<sup>3</sup>/dia.

$$V_{reservatório} = Fator_{segurança} \times V_{biogás} \quad \text{Equação (A10)}$$

Cenário real:  $V_{reservatório} = 1,5 \times 13,5 = 20,25m^3$

Cenário potencial:  $V_{reservatório} = 1,5 \times 3.508 = 5.262m^3$

## A7 ESTIMATIVA DE POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS

### A7.1 PCI VOLUMÉTRICO

Dados

- PCI mássico: 17.706,70 kJ/kg;
- Densidade: 1,2039 kg/m<sup>3</sup>.

$$PCI_{volumétrico} = V_{biogás} \times PCI_{gravimétrico} \quad \text{Equação (A11)}$$

$$PCI_{volumétrico} = 17.706,70kJ/kg \times 1,2039kg/m^3 = 21.317,10kJ/m^3$$

### A7.2 CENÁRIO POTENCIAL

Dados

- Produção de biogás: 3.508 m<sup>3</sup>/dia.

$$E_{térmica} = V_{biogás} \times PCI_{volumétrico} \quad \text{Equação (A12)}$$

$$E_{térmica} = \frac{3.508m^3}{dia} \times \frac{21.317,1kJ}{m^3} = \frac{74.780.373,22kJ}{dia}$$

### A7.2 CENÁRIO REAL

Dados

- Produção de biogás: 13,5 m<sup>3</sup>/dia.

$$E_{térmica} = \frac{13,5m^3}{dia} \times \frac{21.317,1kJ}{m^3} = \frac{287.780,8kJ}{dia}$$

## A8 COMPARAÇÃO ENERGÉTICA ENTRE O BIOGÁS GERADO E O CONSUMO DE GLP

### A8.1 ENERGIA FORNECIDA PELO GLP

## Dados

- Consumo diário de GLP: 1.150 kg/dia;
- PCI do GLP: 46.000 kJ/kg.

$$E_{GLP} = m_{GLP} \times PCI_{GLP} \quad \text{Equação (A13)}$$

$$E_{GLP} = \frac{1.150\text{kg}}{\text{dia}} \times \frac{46.000\text{kJ}}{\text{kg}} = \frac{52.900.000\text{kJ}}{\text{dia}}$$

## A8.2 PERCENTUAL DA DEMANDA ATENDIDA

$$\textit{Substituição}(\%) = \left( \frac{E_{biogás}}{E_{GLP}} \right) \times 100 \quad \text{Equação (A14)}$$

## A8.2.1 Cenário Real

## Dados

- Energia disponível no biogás real: 287,78 MJ/dia;
- Energia fornecida pelo GLP: 52.900 MJ/dia.

$$\textit{Substituição}(\%) = \frac{287,86}{52.900} \times 100 \approx 0,54\%$$

## A8.2.2 Cenário Potencial

## Dados

- Energia disponível no biogás potencial: 74.780,37 MJ/dia;
- Energia fornecida pelo GLP: 52.900 MJ/dia.

$$\%_{potencial} = \frac{74.803}{52.900} \times 100 \approx 141,4\%$$