



UNIVERSIDADE DE UBERABA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E EXTENSÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
MESTRADO PROFISSIONAL

LEONARDO OTÁVIO CORONADO

VIABILIDADE ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE COMBUSTÍVEL PARA
EMPILHADEIRAS A PARTIR DE BIOGÁS GERADO EM TRATAMENTO DE
EFLUENTE INDUSTRIAL

UBERABA, MG

2026



LEONARDO OTÁVIO CORONADO

**VIABILIDADE ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE COMBUSTÍVEL PARA
EMPILHADEIRAS A PARTIR DE BIOGÁS GERADO EM TRATAMENTO DE
EFLUENTE INDUSTRIAL**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

Orientador (a):

Prof. Dr. Mauro Luiz Begnini

Coorientador (a):

Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer

UBERABA, MG

2026

Catálogo elaborado pelo Setor de Referência da Biblioteca Central UNIUBE

C816v Coronado, Leonardo Otávio.
Viabilidade econômica da geração de combustível para empilhadeiras a partir de biogás gerado em tratamento de efluente industrial / Leonardo Otávio Coronado. – Uberaba (MG), 2026.
59 f. : il., color.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Uberaba. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Mestrado Profissional.
Orientador: Prof. Dr. Mauro Luiz Begnini.
Coorientador: Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer.

1. Cerveja – Indústria. 2. Resíduos industriais. 3. Biogás. 4. Bactérias anaeróbias. I. Begnini, Mauro Luiz. II. Finzer, José Roberto Delalibera. III. Universidade de Uberaba. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Mestrado Profissional. IV. Título.

CDD 663.3068

Tatiane da Silva Viana – Bibliotecária – CRB-6/3171

LEONARDO OTÁVIO CORONADO

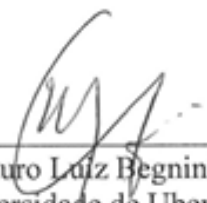
**VIABILIDADE ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE COMBUSTÍVEL PARA
EMPILHADEIRAS A PARTIR DE BIOGÁS GERADO EM TRATAMENTO DE
EFLUENTE INDUSTRIAL**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).


Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais

Aprovado em: 27/02/2026

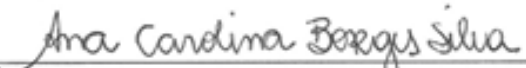
BANCA EXAMINADORA:



Prof(a). Dr(a). Mauro Luiz Begnini – Orientador(a)
Universidade de Uberaba



Prof(a). Dr(a). Ana Paula Silva Capuci
Universidade de Uberaba



Dr(a). Ana Carolina Borges Silva
USP – Universidade de São Paulo

Este trabalho é dedicado, primeiramente, a Deus, à minha família e aos amigos que me apoiaram durante a realização desta dissertação.

Dedico as pessoas que me acompanharam até aqui, minha mãe Helena, meu pai Antônio Carlos e minha namorada Júlia.

Dedico ao Mauro Luiz Begnini pela resiliência durante o presente trabalho.

RESUMO

O aproveitamento energético de resíduos industriais tem se destacado como estratégia relevante no contexto da sustentabilidade. As estações de tratamento de efluentes geram biogás por meio de processos anaeróbios, entretanto, grande parte desse gás ainda é descartada ou queimada sem aproveitamento energético. Todavia, observa-se a existência de lacunas na literatura quanto à avaliação integrada da viabilidade técnico-energética e operacional do uso desse biogás em aplicações industriais específicas, como o abastecimento de empilhadeiras, o que limita sua aplicação prática. Além disso, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade técnico-energética e operacional da utilização do biogás gerado em estação de tratamento de efluentes industriais como combustível alternativo para empilhadeiras movidas a gás. A metodologia adotada baseia-se em abordagem quantitativa aplicada, utilizando dados reais de uma indústria cervejeira, com coleta experimental de biogás, análise composicional por meio de equipamentos digitais, cálculo do poder calorífico inferior e estimativa da energia disponível e útil, considerando a eficiência do sistema. Adicionalmente, realizou-se análise comparativa entre o biometano e o gás natural veicular, com base na equivalência energética e nos custos operacionais. Os resultados indicaram produção média de biogás em torno de 1200 Nm³/dia, com teor de metano aproximado de 65%, evidenciando potencial energético significativo e capacidade de atendimento parcial ou total da demanda das empilhadeiras. Conclui-se que o aproveitamento do biogás como combustível veicular interno apresenta viabilidade técnica e operacional, além de potencial para redução de custos e impactos ambientais, configurando-se como alternativa promissora para valorização energética de resíduos industriais.

Palavras-chave: cervejaria; efluente; biogás; bactérias anaeróbias; viabilidade econômica.

ABSTRACT

The energy recovery of industrial waste has emerged as a relevant strategy within the context of sustainability. Effluent treatment plants generate biogas through anaerobic processes; however, a significant portion of this gas is still flared or released without energy recovery. Nevertheless, there are gaps in the literature regarding the integrated assessment of the technical, energetic, and operational feasibility of using this biogas in specific industrial applications, such as fueling forklifts, which limits its practical implementation. In this context, the present study aims to evaluate the technical-energetic and operational feasibility of using biogas generated in an industrial effluent treatment plant as an alternative fuel for gas-powered forklifts. The methodology is based on a quantitative applied approach using real data from a brewery, including experimental biogas sampling, compositional analysis through digital equipment, calculation of the lower heating value, and estimation of available and useful energy considering system efficiency. Additionally, a comparative analysis between biomethane and vehicular natural gas was performed based on energy equivalence and operational costs. The results indicated an average biogas production of approximately 1200 Nm³/day, with a methane content around 65%, demonstrating significant energy potential and the ability to partially or fully meet the forklifts' demand. It is concluded that the use of biogas as an internal vehicular fuel is technically and operationally feasible, with potential for cost reduction and environmental benefits, representing a promising alternative for the energetic valorization of industrial waste.

Keywords: brewery; effluent; biogas; anaerobic bacteria; economic feasibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do processo de fabricação de cerveja.	8
Figura 2 - Gradeamento metálico.	19
Figura 3 - Sistema de peneira rotativa utilizado no tratamento preliminar.	20
Figura 4 - Tanque de equalização do efluente industrial.	20
Figura 5 - Tanque de condicionamento do efluente industrial.	21
Figura 6 - Fluxograma do processo de tratamento de efluente.	22
Figura 7 - Reator anaeróbico para produção de biogás.	23
Figura 8 - Lagoa de aeração do efluente industrial.	23
Figura 9 - Decantador secundário do efluente industrial.	24
Figura 10 - Emissário do efluente industrial.	24
Figura 11 - Estação de tratamento do efluente industrial.	25
Figura 12 - Esquema Explicativo do Reator Biopaq IC (52-RE01).	26
Figura 13 - Biogás gerado em 15 meses em Nm ³ na unidade industrial estudada.	28
Figura 14 - Dreno na saída da tubulação do gasômetro.	32
Figura 15 – Procedimento de análise composicional do biogás.	32
Figura 16 - Modelo de empilhadeira da unidade.	36
Figura 17 - Fluxograma de um projeto de usina de biogás.	36
Figura 18 - Comparação do consumo de GNV e o biometano gerado.	52
Figura 19 - Biometano excedente gerado.	53
Figura 20 - Retorno financeiro do biometano excedente em diferentes escalas temporais, considerando preço médio constante do biometano.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição média do biogás.....	11
Tabela 2 - Consumo de gás natural e valor pago durante 15 meses.....	29
Tabela 3 – Característica do biogás.....	33
Tabela 4 - Características das empilhadeiras.....	35
Tabela 5 - Transformação do biogás com 65% de CH ₄ e 85% de eficiência da refinaria.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente

IC – *Internal Circulation* (Reator anaeróbio de circulação interna)

CIP – *Cleaning in Place* (Limpeza no local)

GNV – Gás Natural Veicular

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

ETDI – Estação de Tratamento de Dejetos Industriais

PCI – Poder Calorífico Inferior

DQO – Demanda Química de Oxigênio

Nm³ – Normal Metro Cúbico

VPL – Valor Presente Líquido

TIR – Taxa Interna de Retorno

PSA – *Pressure Swing Adsorption* (Adsorção por Variação de Pressão)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	4
2.1 Objetivos Específicos	4
3 JUSTIFICATIVA	6
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
4.1 Processo produtivo e etapas da produção de cerveja	7
4.2 Geração de efluentes	10
4.3 Biogás e suas características	10
4.4 Métodos de purificação e upgrading do biogás	13
4.5 Gás natural veicular	16
4.6 Fundamentação técnica do estudo em relação ao escopo da pesquisa	17
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	19
5.1 Funcionamento da estação de tratamento	19
5.2 Geração do biogás.....	25
5.3 Dados internos da unidade industrial estudada.....	27
5.4 Coleta de amostra do biogás	29
5.5 Análise do biogás.....	33
5.5.1 Determinação do poder calorífico inferior (PCI)	33
5.5.2 Cálculo da potência térmica disponível.....	34
5.5.3 Energia útil considerando eficiência global	34
5.5.4 Energia útil considerando eficiência operacional.....	34
5.5.5 Avaliação da incerteza energética	35
5.6 Especificações técnicas das empilhadeiras utilizadas.....	35
5.7 Projeto de implantação da usina de biogás	36
6 ANÁLISE ECONÔMICA OPERACIONAL.....	40
6.1 Determinação de produção potencial do biometano.....	40
6.2 Determinação da demanda energética veicular.....	41
6.3 Avaliação da cobertura energética	41
6.4 Estimativa de impacto econômico operacional.....	41
6.5 Considerações metodológicas	42
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
7.1 Caracterização da unidade industrial	43
7.2 Modelagem termodinâmica do biogás	43
7.3 Caracterização experimental do biogás	43
7.4 Poder calorífico do biogás	44
7.5 Balanço de energia – Primeira Lei da Termodinâmica.....	46

7.6 Análise pela Segunda Lei da Termodinâmica	47
7.7 Análise de incerteza	48
7.8 Avaliação dos componentes minoritários	48
7.8.1 Sulfeto de Hidrogênio (H ₂ S).....	48
7.8.2 Oxigênio (O ₂).....	49
7.9 Estimativa de produção.....	50
7.10 Transformação do biogás.....	50
7.11 Comparação energética excedente.....	51
7.12 Análise econômica.....	52
8 CONCLUSÕES	56
9 REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por uma produção sustentável e a competitividade por processos mais limpos têm impulsionado a busca por alternativas de reaproveitamento de resíduos industriais como fonte de energia. O biogás, gerado em estações de tratamento de efluentes por meio da digestão anaeróbia da matéria orgânica, destaca-se como uma dessas alternativas (CHERNICHARO, 1997; ARDOLINO et al., 2020).

Apesar do crescimento do uso de biodigestores no Brasil, há poucos estudos que avaliem de forma quantitativa o potencial de reaproveitamento energético do biogás em indústrias cervejeiras, considerando simultaneamente aspectos ambientais, econômicos e termodinâmicos. Adicionalmente, evidencia-se uma lacuna científica relacionada à análise integrada entre composição do biogás, eficiência de conversão energética e aplicação em escala industrial.

O problema científico deste estudo consiste em determinar sob quais condições operacionais, composicionais e energéticas o biogás gerado em estações de tratamento de efluentes industriais pode ser convertido em biometano com qualidade e escala energética suficientes para substituir o gás natural veicular em aplicações internas.

Como hipótese de pesquisa, propõe-se que o biogás gerado em escala industrial, quando submetido a processos adequados de purificação e considerando sua fração molar de metano, apresenta potencial energético suficiente para substituir parcial ou totalmente o gás natural veicular, com eficiência energética compatível às exigências operacionais.

O biogás é uma mistura gasosa composta predominantemente por metano (50 a 90%), sendo este o principal responsável pelo seu conteúdo energético (METCALF & EDDY, 2003; ARDOLINO et al., 2020; LÓPEZ et al., 2024). Sua composição varia conforme o tipo de substrato e as condições operacionais do processo anaeróbio.

No contexto da unidade industrial analisada, o conteúdo energético do biogás produzido pode ser diretamente correlacionado à fração molar de metano ($x\text{CH}_4$), uma vez que este constitui o principal componente combustível da mistura. Assim, o poder calorífico inferior (PCI) do biogás pode ser estimado a partir da contribuição energética do CH_4 puro, cujo valor volumétrico é da ordem de $35,8 \text{ MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$, associado à sua entalpia padrão de combustão ($\approx -890 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), (...), conforme descrito por (ÇENGEL; BOLES, 2013; MORAN et al., 2018). Entretanto, a conversão dessa energia química em trabalho útil é limitada pelas irreversibilidades inerentes aos processos reais de combustão e compressão, em conformidade

com a Primeira e a Segunda Leis da Termodinâmica, resultando em eficiências típicas entre 25% e 40% (BEJAN, 2016; ARDOLINO et al., 2020).

Para aplicações veiculares, como empilhadeiras movidas a gás, exige-se teor mínimo de metano superior a aproximadamente 90%, além de limites restritivos para CO₂, H₂S e umidade, caracterizando o biometano como combustível tecnicamente compatível com especificações de gás natural veicular (LÓPEZ et al., 2024; TOMCZAK et al., 2024).

A partir do poder calorífico inferior (PCI) estimado para o biogás da unidade e da respectiva fração molar de metano (x_{CH_4}), é possível determinar a escala energética efetiva do sistema com base na produção volumétrica média diária ($V_{biogás}$, Nm³·dia). Considerando uma produção média de aproximadamente 3.924,74 Nm³/dia de biogás na unidade industrial, a energia química disponível por dia pode ser estimada pela relação: $E_{diária} = V_{biogás} \times PCI_{biogás}$, em que o PCI da mistura é proporcional ao teor de metano presente. Considerando a eficiência global de conversão do sistema (η), que incorpora perdas associadas às etapas de purificação, compressão e utilização final, a energia útil efetivamente convertida pode ser expressa como: $E_{útil} = V_{biogás} \times PCI_{biogás} \times \eta$. Essa modelagem permite quantificar, para a realidade operacional da unidade industrial estudada, a energia disponível em MJ·dia⁻¹ ou kWh·dia⁻¹, bem como estabelecer sua equivalência energética frente a combustíveis convencionais, como diesel, GLP ou energia elétrica da rede. Adicionalmente, constrói-se uma base técnica consistente para análise integrada da viabilidade energética, econômica e ambiental do reaproveitamento do biogás gerado.

Entretanto, o biogás em sua forma bruta não apresenta especificações físico-químicas adequadas para utilização direta como combustível em empilhadeiras ou outros equipamentos industriais, em razão da presença de dióxido de carbono (CO₂), sulfeto de hidrogênio (H₂S), vapor d'água e demais contaminantes. Dessa forma, torna-se necessária etapa prévia de purificação (upgrading), visando adequação às normas técnicas de qualidade do gás combustível e garantia de operação segura e eficiente dos equipamentos (LÓPEZ et al., 2024; HIDALGO; MARTÍN-MARROQUÍN, 2025).

No contexto brasileiro, observa-se crescente implantação de reatores e biodigestores anaeróbios para tratamento de esgoto doméstico, efluentes industriais e dejetos agropecuários, ampliando o potencial de recuperação energética do biogás como fonte alternativa renovável (LOBATO, 2010).

O metano (CH₄), principal componente responsável pelo conteúdo energético do biogás, é formado durante a degradação biológica anaeróbia da matéria orgânica, juntamente com dióxido de carbono, amônia, hidrogênio, monóxido de carbono, nitrogênio, compostos

orgânicos voláteis e sulfetos (COSTA, 2006; GARCILASSO et al., 2008). A proporção entre esses constituintes depende do tipo de substrato e das condições operacionais do tratamento biológico, podendo variar conforme a natureza do resíduo — urbano, doméstico, industrial ou agropecuário — e o regime de operação do reator (GARCILASSO et al., 2008; VENKATESCH & ELMI, 2013).

Diversos fatores influenciam o poder calorífico inferior (PCI) do biogás, destacando-se a temperatura de operação do reator (faixa ideal entre 32 e 37 °C para digestão mesofílica), a biodegradabilidade da carga orgânica afluyente, o equilíbrio nutricional (nitrogênio, fósforo e enxofre), o pH do meio (idealmente entre 6,0 e 8,0) e a fração volumétrica de CO₂ e vapor d'água na mistura gasosa (COSTA, 2006; FARIA, 2012). A elevação da concentração de CO₂ implica redução direta da densidade energética volumétrica do gás, uma vez que esse componente não contribui para a combustão.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe avaliar o reaproveitamento do biogás gerado na estação de tratamento de efluentes industriais da unidade estudada, considerando sua adequação técnica às especificações de combustível veicular e sua contribuição para atendimento às resoluções CONAMA nº 08/1990 e nº 382/2006, que estabelecem diretrizes para controle de emissões atmosféricas.

A partir do estudo aplicado à unidade industrial estudada em Uberaba–MG, busca-se evidenciar não apenas o potencial ambiental da substituição de combustível fóssil por biometano produzido internamente, mas também os ganhos operacionais e econômicos associados à valorização energética de um subproduto anteriormente destinado à queima em *flare*.

2 OBJETIVOS

Avaliar a viabilidade técnico-energética e operacional da utilização do biogás gerado no processo de tratamento de efluentes industriais como fonte alternativa para abastecimento de empilhadeiras movidas a gás em unidade industrial localizada no interior de Minas Gerais, considerando parâmetros operacionais dos equipamentos, características físico-químicas do biogás produzido, eficiência global de conversão energética e potencial de redução de custos associados ao consumo de gás natural veicular.

O escopo da pesquisa restringe-se à análise técnico-energética e à avaliação econômica comparativa do aproveitamento do biogás gerado na estação de tratamento de efluentes da unidade estudada, especificamente para aplicação como combustível veicular em empilhadeiras. A investigação contempla a caracterização composicional do biogás, com ênfase na fração molar de metano (x_{CH_4}), a determinação do poder calorífico inferior (PCI) da mistura e a estimativa da energia química disponível, bem como sua conversão em energia útil, considerando a eficiência global do sistema. Não constitui objeto deste estudo a modelagem detalhada de investimentos de capital (CAPEX), custos completos de operação e manutenção (OPEX) ou a aplicação de indicadores financeiros clássicos, como Valor Presente Líquido (VPL) ou Taxa Interna de Retorno (TIR), concentrando-se a análise econômica na dimensão operacional do combustível e na estimativa de economia decorrente da substituição energética.

O método adotado fundamenta-se em abordagem quantitativa aplicada, estruturada em etapas sequenciais: (i) levantamento de dados operacionais da estação de tratamento de efluentes e do consumo energético das empilhadeiras; (ii) determinação da composição do biogás e cálculo do conteúdo energético disponível por meio da relação entre produção volumétrica média ($V_{biogás}$) e poder calorífico inferior (PCI); (iii) estimativa da energia útil convertida ($E_{diária} = V_{biogás} \times PCI_{biogás} \times \eta$), considerando os limites impostos pela Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica; e (iv) conversão da energia útil em equivalência energética frente a combustíveis convencionais, permitindo estimar o potencial de redução de custos operacionais e a racionalização do uso de recursos energéticos na unidade industrial.

2.1 Objetivos Específicos

- Caracterizar tecnicamente o modelo de empilhadeira utilizada, determinando sua potência nominal, regime de operação, fator de carga e consumo energético específico ($kWh \cdot h^{-1}$ ou $Nm^3 \cdot h^{-1}$ de GNV), a fim de estabelecer a demanda energética diária e anual do

sistema.

- Quantificar o potencial de geração de biogás a partir dos resíduos disponíveis na unidade industrial, considerando produção volumétrica média diária ($\text{Nm}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$), composição química, fração molar de metano ($x\text{CH}_4$) e respectivo poder calorífico inferior (PCI).
- Estimar o volume de biometano necessário para suprir integral ou parcialmente a demanda energética das empilhadeiras, com base na equivalência energética entre o PCI do GNV e o PCI do biometano produzido, considerando a eficiência global de conversão do sistema.
- Realizar análise econômica comparativa fundamentada na equivalência energética entre combustíveis, determinando o custo específico por unidade de energia útil (R\$/MJ ou R\$/kWh) para o GNV atualmente utilizado e para o biometano produzido internamente, permitindo estimar a economia operacional potencial decorrente da substituição energética.
- Avaliar o potencial de comercialização do biogás ou biometano excedente, a partir do balanço entre produção e demanda energética interna, estimando sua equivalência energética e valor econômico de mercado com base em preços médios regionais de combustíveis substitutos.

3 JUSTIFICATIVA

A crescente preocupação com a sustentabilidade industrial e a necessidade de diversificação da matriz energética têm impulsionado a valorização de fontes renováveis e alternativas de energia. Portanto, o reaproveitamento de resíduos industriais assume papel estratégico, não apenas pela redução de impactos ambientais, mas também pela possibilidade de geração de valor econômico a partir de subprodutos anteriormente considerados passivos operacionais.

O biogás gerado em estações de tratamento de efluentes industriais destaca-se como uma fonte energética promissora, especialmente em setores com elevada carga orgânica, como a indústria cervejeira. Entretanto, apesar do seu potencial reconhecido, ainda existem limitações quanto à sua utilização eficiente, principalmente no que se refere à conversão em biometano com qualidade adequada para aplicações energéticas mais exigentes, como combustível veicular.

Assim, justifica-se a realização deste estudo pela necessidade de aprofundar a compreensão sobre o potencial energético do biogás em condições reais de operação industrial, considerando sua composição, poder calorífico e eficiência de conversão, bem como sua adequação às normas técnicas vigentes. A análise integrada desses fatores contribui para reduzir incertezas relacionadas à viabilidade técnica e operacional do aproveitamento energético em escala industrial.

Além disso, a substituição de combustíveis fósseis por biometano produzido internamente pode proporcionar benefícios ambientais relevantes, como a redução das emissões de gases de efeito estufa, além de vantagens econômicas associadas à diminuição de custos operacionais e ao aumento da autonomia energética das indústrias.

Portanto, este trabalho se justifica por sua contribuição científica e aplicada, ao propor uma avaliação integrada do aproveitamento energético do biogás, oferecendo subsídios técnicos para a tomada de decisão em ambientes industriais e contribuindo para o avanço de práticas mais sustentáveis no setor produtivo.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresentam-se os fundamentos teóricos e técnicos que subsidiam o desenvolvimento da presente pesquisa. Inicialmente, contextualiza-se o processo produtivo de cerveja, chopp e bebidas não alcoólicas, com ênfase na geração de efluentes industriais. Em seguida, descreve-se o funcionamento da estação de tratamento, destacando-se o processo anaeróbio e a formação do biogás a partir da degradação da matéria orgânica. Por fim, são abordados conceitos e parâmetros técnicos relevantes para a análise energética e econômica proposta no estudo.

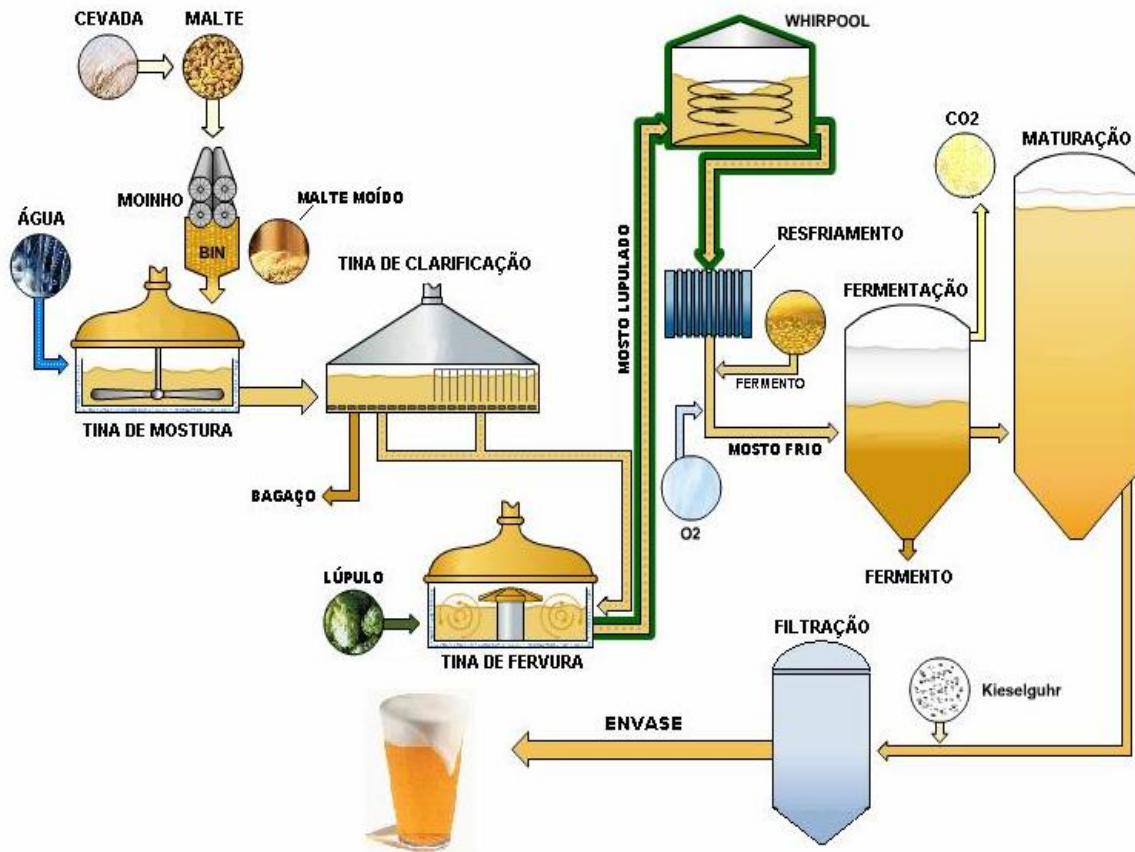
4.1 Processo produtivo e etapas da produção de cerveja

As matérias-primas utilizadas na produção de cerveja são, basicamente, água, malte, lúpulo e levedura. Ingredientes adicionais empregados além desses são denominados adjuntos, incluindo, por exemplo, cereais como trigo e milho, além de frutas, chocolate, café e castanhas.

A composição final da bebida depende da formulação adotada, sendo influenciada tanto pela seleção dos insumos quanto pelas condições de processamento. As variações no tipo de cada ingrediente, em suas proporções relativas e nas etapas do processo produtivo, resultam na ampla diversidade de cervejas disponíveis no mercado (MULT CONSULTORIA, 2023).

As etapas do processo produtivo da cerveja estão apresentadas na Figura 1, devendo ser seguidas de forma sequencial para garantir a qualidade do produto final. O processo compreende as seguintes etapas: maltagem, moagem, brassagem, filtração, fervura, clarificação, resfriamento e oxigenação, fermentação, maturação, filtração, estabilização, envase e pasteurização (MULT CONSULTORIA, 2023).

Figura 1 - Fluxograma do processo de fabricação de cerveja.



Fonte: Unidade industrial estudada (2024).

O malte utilizado no processo vem de uma malteria no Uruguai por navios e chega nos portos de Santos e do Espírito Santo. Após a sua chegada, eles fazem o restante do trajeto por caminhões que seguem destino rumo a Uberaba-MG. Chegando na unidade, o malte é descarregado em um tombador, onde um equipamento é acoplado na carreta, fazendo com que ela seja inclinada em até 45 °C para todo cereal ser descarregado e alojado em tanques específicos para grãos.

A etapa seguinte consiste no transporte do malte até os moinhos por meio de elevadores de canecas, onde ocorre a moagem controlada. Essa operação tem como finalidade promover a ruptura do endosperma do grão, preservando parcialmente a casca, de modo a favorecer a extração enzimática subsequente e aumentar a eficiência da filtração do mosto (KUNZE, 2014; BRIGGS et al., 2004).

A água empregada no processo é proveniente de cinco poços artesianos instalados na

própria unidade, com profundidade aproximada de 500 metros e espaçamento médio de 1 km entre si. A captação em aquíferos profundos contribui para maior estabilidade físico-química da água, reduzindo a necessidade de tratamentos intensivos e favorecendo a padronização do perfil sensorial da cerveja (KUNZE, 2014).

Na etapa de mosturação, água e malte moído são combinados na tina de mostura, onde ocorre a ativação enzimática responsável pela conversão do amido em açúcares fermentescíveis. O processo é conduzido sob rampas controladas de temperatura, iniciando-se tipicamente em torno de 52 °C, associada à atividade de proteases, e podendo alcançar aproximadamente 78 °C, temperatura na qual ocorre a inativação enzimática, ao longo de cerca de duas horas. Essa etapa é fundamental para a definição do rendimento fermentativo e do perfil final da bebida (BRIGGS et al., 2004; KUNZE, 2014).

Após a mosturação, o mosto é transferido para a tina filtro, equipamento destinado à separação da fração líquida (mosto doce) dos sólidos residuais do malte, denominados bagaço. A separação ocorre por meio de fundo falso ou placas perfuradas, que permitem a percolação do líquido enquanto retêm o material sólido, formando um leito filtrante natural. Essa etapa pode ser complementada pela lavagem do bagaço (sparging), técnica que aumenta a eficiência de extração dos açúcares remanescentes e eleva o rendimento global (BRIGGS et al., 2004).

O bagaço de malte resultante é geralmente destinado à alimentação animal, em razão de seu teor residual de fibras e proteínas, constituindo coproduto relevante do processo cervejeiro.

Na etapa de fervura, o mosto é aquecido até a ebulição (aproximadamente 100 °C à pressão atmosférica), permanecendo em fervura vigorosa por um período entre 60 e 90 minutos, conforme o perfil de produção. Nessa fase ocorre a adição do lúpulo, responsável pelo amargor, aroma e propriedades antimicrobianas da bebida. A fervura promove ainda a esterilização do mosto, a volatilização de compostos indesejáveis, como o dimetilsulfeto (DMS), a coagulação de proteínas (hot break) e a concentração parcial do extrato (KUNZE, 2014; BRIGGS et al., 2004).

Após a etapa de fervura, o mosto é submetido a resfriamento rápido até a faixa de temperatura adequada ao tipo de levedura utilizada. Em seguida, ocorre a inoculação da levedura cervejeira, e o mosto é transferido para tanques fermentadores, onde se inicia a fase de fermentação alcoólica.

Durante a fermentação, os açúcares fermentescíveis do mosto — principalmente maltose, glicose e maltotriose — são metabolizados por leveduras do gênero *Saccharomyces*, resultando na produção de etanol e dióxido de carbono como produtos principais. Paralelamente, são formados compostos secundários em baixas concentrações, como ésteres,

álcoois superiores e ácidos orgânicos, que exercem influência significativa no perfil sensorial da cerveja (BRIGGS et al., 2004; KUNZE, 2014).

Concluída a fermentação primária, a cerveja segue para a etapa de maturação, na qual ocorre a redução de compostos indesejáveis e melhoria da estabilidade do produto.

A etapa subsequente de filtração tem como finalidade remover partículas remanescentes em suspensão, incluindo leveduras residuais e coloides não sedimentados, conferindo maior limpidez e estabilidade visual à bebida.

Antes do envase, a cerveja é armazenada em tanques pressurizados, mantendo atmosfera controlada e evitando a incorporação de oxigênio dissolvido, fator crítico para preservação do sabor e da estabilidade oxidativa.

Por fim, o produto é envasado em latas, garrafas ou barris, seguindo para distribuição e consumo.

4.2 Geração de efluentes

Após as etapas de produção de cerveja, chopp e bebidas não alcoólicas, são realizadas operações sistemáticas de limpeza e sanitização dos equipamentos, especialmente durante trocas de produto e encerramento de ciclos produtivos. Essas atividades, comumente conduzidas por sistemas CIP (*Cleaning in Place*), geram volumes significativos de efluentes líquidos contendo resíduos orgânicos, detergentes e soluções sanitizantes.

Os efluentes resultantes dessas operações são coletados por meio de ralos e drenos interligados a sistemas de tubulação que os conduzem até a estação de tratamento de efluentes industriais (ETDI).

Além dos resíduos provenientes das etapas de limpeza, o processo produtivo também gera contribuições adicionais de carga poluidora, incluindo lubrificantes utilizados em esteiras transportadoras, sujidades removidas nas lavadoras de garrafas, perdas de produto decorrentes de falhas no envase e descartes ocasionais de lotes fora de especificação.

Esses efluentes apresentam elevada carga orgânica, expressa principalmente pela Demanda Química de Oxigênio (DQO), constituindo substrato potencialmente favorável à digestão anaeróbia e à consequente geração de biogás.

4.3 Biogás e suas características

Estudos técnicos e científicos indicam que, embora o biogás seja uma fonte renovável

promissora, sua utilização energética direta é limitada pela presença de contaminantes. Entre os principais, destacam-se o sulfeto de hidrogênio (H_2S), composto corrosivo e tóxico responsável por odores característicos e por processos de degradação em tubulações e equipamentos metálicos, e os siloxanos, compostos organossiliconados voláteis frequentemente originados de produtos de higiene e efluentes industriais.

Durante a combustão, os siloxanos podem ser convertidos em dióxido de silício (SiO_2), formando depósitos abrasivos que comprometem o desempenho e reduzem a vida útil de motores, turbinas e sistemas de compressão.

Assim, a presença de vapor d'água na corrente gasosa reduz o poder calorífico volumétrico do biogás e favorece a formação de condensados, potencializando fenômenos corrosivos, especialmente na presença de H_2S .

Adicionalmente, a caracterização composicional do biogás é etapa fundamental para avaliação de sua aplicabilidade energética. A composição média típica do biogás está apresentada na Tabela 1.

A literatura especializada destaca que, para viabilizar tecnicamente o uso energético do biogás, são necessárias etapas de purificação, incluindo processos de adsorção, remoção de umidade por condensação e tecnologias de separação por membranas ou adsorção por variação de pressão (PSA), de modo a elevar o teor de metano e reduzir contaminantes a níveis compatíveis com aplicações industriais e veiculares.

Tabela 1 - Composição média do biogás.

Composto	Faixa típica (% v/v)
Metano (CH_4)	50 a 80
Dióxido de Carbono (CO_2)	20 a 40
Hidrogênio (H_2)	0 a 3
Nitrogênio (N_2)	0 a 3
Sulfeto de hidrogênio (H_2S)	0 a 1 (até milhares de ppm)
Vapor d'água (H_2O)	Saturado à temperatura do processo

Fonte: Adaptado de Coldebella (2006), com base em La Farge (1979).

Do ponto de vista termodinâmico, o biogás pode ser modelado como uma mistura gasosa ideal sob pressões próximas à atmosférica, permitindo a aplicação da Lei de Dalton para determinação das pressões parciais e da contribuição energética de cada componente. A entalpia

molar da mistura pode ser expressa como:

$$h_{mix} = \sum_i y_i h_i(T)$$

Onde y_i representa a fração molar do componente i e $h_i(T)$ sua entalpia molar à temperatura T .

A fração molar de metano (x_{CH_4}) constitui o principal parâmetro determinante do conteúdo energético do biogás, uma vez que o dióxido de carbono e o nitrogênio são praticamente inertes do ponto de vista da combustão. O poder calorífico inferior (PCI) da mistura pode ser estimado por:

$$PCI_{biogás} = x_{CH_4} \cdot PCI_{CH_4}$$

Sendo o PCI do metano aproximadamente $35,8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ em condições normais (ÇENGEL; BOLES, 2013). Assim, variações composicionais impactam diretamente a densidade energética volumétrica do gás e sua viabilidade de uso.

Do ponto de vista físico, o biogás apresenta densidade inferior à do ar quando possui elevada fração de metano, o que reduz o risco de acúmulo em ambientes abertos, diferentemente de gases mais densos, como butano e propano. Por outro lado, sua baixa densidade energética volumétrica implica a necessidade de maiores volumes para armazenamento de energia equivalente, além de dificultar processos de liquefação (COLDEBELLA, 2006).

Sob condições normais de operação, o biogás apresenta baixa toxicidade direta devido ao reduzido teor de monóxido de carbono. Contudo, pode tornar-se corrosivo em razão da presença de sulfeto de hidrogênio (H_2S), que reage com metais como cobre, latão e aço, especialmente em ambientes úmidos (ZACHOW, 2003). Em concentrações elevadas — próximas a 1%, situação incomum em digestores estáveis — o H_2S é altamente tóxico. Durante a combustão, pode ser oxidado a dióxido de enxofre (SO_2), composto prejudicial ao sistema respiratório (YOKOMIZO, 2008).

Do ponto de vista energético, o PCI do biogás varia tipicamente entre 20,9 e 29,3 $\text{MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$, dependendo da fração molar de metano presente (METCALF; EDDY, 2003; VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994). Essa faixa reforça a necessidade de modelagem composicional para estimativa precisa da energia disponível.

A presença de vapor d'água também influencia o conteúdo energético efetivo, podendo o PCI em base úmida ser estimado por:

$$PCI_{úmido} = PCI_{seco} \cdot (1 - y_{H_2O})$$

Onde y_{H_2O} representa a fração molar de vapor na mistura. Assim, quanto maior for a umidade, menor a energia útil disponível por unidade volumétrica.

Além do poder calorífico, a variabilidade composicional afeta a exergia química do

combustível. Considerando que o CO₂ possui exergia praticamente nula em relação ao ambiente de referência, o aumento de sua fração molar reduz a qualidade termodinâmica do biogás. A exergia química da mistura pode ser expressa por:

$$Ex_{química} = \sum_i y_i ex_i + \sum_i RT_0 \sum_i y_i \ln y_i$$

Conforme descrito por BEJAN (2016), demonstra-se que a qualidade energética do biogás depende fortemente da proporção de metano.

Sob essa perspectiva, a caracterização físico-química e a modelagem termodinâmica do biogás são etapas fundamentais para avaliação de sua viabilidade energética, dimensionamento de sistemas de purificação e comparação técnica com combustíveis convencionais.

4.4 Métodos de purificação e upgrading do biogás

Considerando a variabilidade composicional do biogás e a presença de contaminantes, a etapa de purificação torna-se fundamental para ampliar sua aplicabilidade energética e garantir compatibilidade com sistemas de conversão. Dependendo da finalidade de uso — combustão direta em caldeiras, geração de energia elétrica ou substituição do gás natural veicular — são requeridos diferentes níveis de tratamento e especificações de qualidade.

O conjunto de processos destinados à remoção de impurezas (como H₂S, CO₂, vapor d'água e compostos traço) e ao aumento da fração molar de metano é denominado *upgrading*. Esse procedimento resulta na obtenção de biometano, combustível com teor de CH₄ tipicamente superior a 90–95%, tornando-o tecnicamente equivalente ao gás natural para aplicações industriais e veiculares.

Remoção de H₂S (dessulfurização)

A remoção do sulfeto de hidrogênio (H₂S) constitui etapa prioritária no tratamento do biogás, devido ao seu elevado potencial corrosivo e à formação de dióxido de enxofre (SO₂) durante a combustão, composto ambientalmente prejudicial. Além disso, a presença de H₂S compromete a integridade de compressores, tubulações e sistemas de purificação subsequentes, especialmente em condições de elevada umidade.

Os principais métodos de dessulfurização incluem:

- **Adsorção em carvão ativado** – processo físico-químico baseado na retenção

superficial do H_2S em meio poroso, podendo envolver impregnação com compostos alcalinos ou óxidos metálicos para aumento da capacidade de remoção;

- **Lavagem química** – utilização de soluções alcalinas (como NaOH) ou óxidos metálicos que promovem reação química com o H_2S , formando sulfetos estáveis;
- **Processos biológicos** – oxidação biológica do H_2S por bactérias sulfuroxidantes, convertendo-o em enxofre elementar ou sulfato.

Conforme relatado na literatura, sistemas adequadamente dimensionados podem atingir eficiências de remoção superiores a 99%, sendo a adsorção em carvão ativado uma das tecnologias mais difundidas em instalações industriais de pequeno e médio porte, devido à sua simplicidade operacional e elevada eficiência (OKORO, 2019).

Remoção de CO_2 (Upgrading para Biometano)

A remoção do dióxido de carbono (CO_2) constitui etapa central no processo de *upgrading*, uma vez que o CO_2 atua como componente inerte do ponto de vista da combustão, reduzindo o poder calorífico volumétrico e a exergia química do biogás. A elevação da fração molar de metano resulta em aumento direto da densidade energética do combustível e maior compatibilidade com especificações de gás natural veicular.

Entre as principais tecnologias, destacam-se:

1. Absorção química (aminas)

Baseia-se na reação química reversível entre CO_2 e soluções aquosas de aminas, como monoetanolamina (MEA) ou dietanolamina (DEA). Apresenta elevada eficiência de remoção e alta pureza de metano no produto final. Entretanto, requer aporte energético significativo para regeneração térmica do solvente, o que impacta o consumo específico do sistema.

2. Absorção física (lavagem com água sob pressão)

Explora a maior solubilidade do CO_2 em água sob pressão elevada. O processo não envolve reação química, sendo baseado em equilíbrio físico de solubilidade. É amplamente aplicado comercialmente devido à relativa simplicidade operacional, embora exija sistemas de compressão e recirculação de água.

3. Adsorção por variação de pressão (PSA – Pressure Swing Adsorption)

Utiliza materiais adsorventes seletivos, como zeólitas ou carvão ativado, que retêm

preferencialmente o CO₂ sob condições de alta pressão e o liberam durante etapas de depressurização cíclica. O PSA apresenta elevada modularidade e é amplamente utilizado em plantas de pequeno e médio porte, sendo adequado para aplicações descentralizadas.

4. Separação por membranas

Baseia-se na diferença de permeabilidade entre CH₄ e CO₂ através de membranas poliméricas ou cerâmicas. O CO₂ permeia preferencialmente, enriquecendo a corrente retentada em metano. Trata-se de tecnologia compacta e escalável, com consumo energético predominantemente associado à compressão do gás de alimentação.

5. Processos criogênicos

Promovem a separação por condensação fracionada em baixas temperaturas, explorando diferenças nos pontos de liquefação dos componentes. São mais indicados para plantas de maior porte ou quando se deseja recuperação de CO₂ de alta pureza, apresentando maior complexidade operacional e investimento inicial elevado.

Os sistemas de adsorção por variação de pressão (PSA) e de separação por membranas apresentam relação favorável entre eficiência de separação e custo operacional, especialmente em aplicações industriais descentralizadas e de médio porte (RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011).

A seleção da tecnologia de *upgrading* deve considerar fatores como escala de produção, pureza requerida do biometano, consumo energético específico e disponibilidade de energia auxiliar, não havendo uma solução universalmente ótima, mas alternativas mais adequadas a cada contexto operacional (AWE et al., 2017).

Remoção de siloxanos e umidade

Os siloxanos são usualmente removidos por processos de adsorção ou condensação, sendo as principais tecnologias:

- Adsorção em carvão ativado;
- Sílica gel;
- Condensação térmica.

A umidade, por sua vez, é geralmente removida por resfriamento seguido de condensação ou por secadores por adsorção. A redução do teor de vapor d'água é fundamental para evitar

processos corrosivos, formação de condensados ácidos e perdas energéticas, uma vez que o poder calorífico inferior (PCI) em base úmida é inferior ao PCI em base seca.

Implicações termodinâmicas da purificação

A purificação altera diretamente a composição molar da mistura, elevando a fração de metano (x_{CH_4}). Como consequência, verifica-se:

$$PCI_{biometano} > PCI_{biogás\ bruto}$$

e

$$Ex_{biometano} > Ex_{biogás\ bruto}$$

A remoção de CO_2 aumenta tanto o conteúdo energético volumétrico quanto a exergia química do combustível, uma vez que o dióxido de carbono possui contribuição energética desprezível e exergia praticamente nula em relação ao ambiente de referência.

Conforme discutido por Bejan (2016), o aumento da exergia do combustível está associado a maior potencial teórico de conversão em trabalho útil, implicando melhoria na eficiência termodinâmica dos sistemas de conversão.

Portanto, a etapa de purificação não apenas amplia a aplicabilidade técnica do biogás, mas também eleva sua viabilidade energética e econômica, ao aproximar suas propriedades das especificações do gás natural convencional.

4.5 Gás natural veicular

O gás natural é um combustível fóssil encontrado em reservatórios subterrâneos, podendo ocorrer tanto em ambientes terrestres quanto marítimos. Pode ser classificado como gás associado, quando ocorre conjuntamente com petróleo em reservatórios petrolíferos, ou gás não associado, quando se encontra predominantemente isolado, com pequena ou nenhuma presença de óleo (BARBOSA, 1996).

Sua formação está relacionada a processos geológicos de longa duração, envolvendo a decomposição anaeróbia da matéria orgânica e a transformação térmica de hidrocarbonetos sob elevadas condições de pressão e temperatura ao longo de milhões de anos (MAXWELL, 1995; GASNET, 2018).

Do ponto de vista composicional, o gás natural é constituído majoritariamente por

metano (CH₄), cuja concentração pode variar tipicamente entre 85% e 99%, dependendo do campo produtor. Em menores proporções, podem estar presentes hidrocarbonetos mais pesados, como etano (C₂H₆), propano (C₃H₈) e butano (C₄H₁₀), além de componentes inertes ou diluentes, como nitrogênio (N₂), dióxido de carbono (CO₂) e traços de hidrogênio (MAXWELL, 1995; UNICH et al., 1993).

Quando comprimido e destinado ao abastecimento veicular, o gás natural é denominado Gás Natural Veicular (GNV), apresentando especificações de pureza e composição estabelecidas por normas técnicas e regulatórias, de modo a garantir segurança, desempenho e estabilidade da combustão.

4.6 Fundamentação técnica do estudo em relação ao escopo da pesquisa

A contextualização do processo produtivo da cervejaria permite compreender a origem e a natureza dos efluentes industriais gerados, os quais apresentam elevada carga orgânica, expressa principalmente pela Demanda Química de Oxigênio (DQO). No sistema adotado pela unidade industrial, a fração biodegradável da matéria orgânica é convertida, no reator anaeróbio, em biogás composto predominantemente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂).

Conforme descrito anteriormente, entre 75% e 85% da DQO removida pode ser convertida em biogás, estabelecendo uma base energética potencialmente aproveitável.

Sob a perspectiva termodinâmica, a energia química contida no biogás é função direta da fração molar de metano (x_{CH_4}), sendo o poder calorífico inferior (PCI) da mistura proporcional à contribuição energética do CH₄. Assim, a produção média mensal de 119.265 Nm³ de biogás, correspondente a aproximadamente 3.924,74 Nm³·dia⁻¹, representa um fluxo energético significativo, cuja energia disponível pode ser estimada por:

$$E = V_{biogás} \cdot PCI_{biogás}$$

Considerando valores típicos de PCI entre 20 e 25 MJ·Nm⁻³ para biogás bruto, o potencial energético diário situa-se na ordem de dezenas de milhares de megajoules, evidenciando capacidade relevante de substituição parcial ou total de combustíveis fósseis utilizados internamente.

Paralelamente, os dados de consumo de Gás Natural Veicular (GNV) indicam demanda anual superior a 500.000 m³, com custo acumulado próximo a três milhões de reais no período

analisado. Como o GNV apresenta composição majoritariamente metânica (89–99% de CH₄), seu poder calorífico é superior ao do biogás bruto, porém energeticamente comparável ao biometano obtido por processos de purificação.

Assim, a equivalência energética entre biometano e GNV pode ser estabelecida a partir da relação:

$$V \text{ biometano necessário} = \frac{\text{Demanda energética das empilhadeiras}}{\text{PCI biometano}}$$

A análise conjunta entre oferta energética (produção de biogás), qualidade energética (fração molar de metano), eficiência de conversão e demanda operacional das empilhadeiras fundamenta tecnicamente o escopo da presente pesquisa.

A necessidade de purificação, discutida anteriormente, não se restringe a aspectos operacionais, mas constitui requisito termodinâmico e tecnológico para elevação do conteúdo energético volumétrico do gás e compatibilização com as especificações do GNV. A remoção de CO₂ aumenta o PCI e a exergia química do combustível, enquanto a remoção de H₂S e umidade previne corrosão e perdas energéticas. Assim, a etapa de *upgrading* representa não apenas adequação qualitativa, mas incremento quantitativo na densidade energética do combustível produzido.

Assim, a viabilidade do reaproveitamento do biogás gerado na estação de tratamento industrial está fundamentada em três pilares:

1. Disponibilidade volumétrica contínua, comprovada pelos dados históricos da unidade;
2. Potencial energético compatível com a demanda interna de GNV;
3. Possibilidade técnica de purificação para obtenção de biometano com características equivalentes ao gás natural veicular.

A integração entre processo produtivo, tratamento de efluentes, geração de biogás e consumo energético interno justifica cientificamente a presente investigação, que busca avaliar a substituição parcial ou total do GNV por biometano produzido na própria unidade industrial, sob critérios termodinâmicos e de equivalência energética.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Funcionamento da estação de tratamento

A Estação de Tratamento de Resíduos Industriais (ETDI) da unidade foi implantada há aproximadamente cinco anos e opera com sistema de tratamento predominantemente anaeróbio, apresentando capacidade nominal de tratamento da ordem de $7.300 \text{ Nm}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$.

O sistema é estruturado em três níveis de tratamento: primário, secundário e terciário, conforme representado no fluxograma da Figura 2.

1º nível – Tratamento Primário:

Compreende as etapas de remoção física de sólidos e equalização da carga orgânica:

- Gradeamento;
- Peneira rotativa;
- Tanque de equalização/ Acidificação;
- Tanque de emergência;
- Tanque de condicionamento.

A seguir estão descritas as etapas de tratamento do efluente gerado:

I. Gradeamento metálico elevatório inicial, Figura 3: O gradeamento possui a finalidade de remover materiais grosseiros. Ex: rótulos, garrafas, pedras, latas, tampas, etc.

Figura 2 - Gradeamento metálico.



II. Peneiras Rotativas: As peneiras rotativas, Figura 4, têm a finalidade de remover materiais finos que no gradeamento não foram capazes de retirar. Ex: Bagaço de malte, canudos plásticos, etc.

Figura 3 - Sistema de peneira rotativa utilizado no tratamento preliminar.



Fonte: Unidade industrial estudada (2024).

III. Tanque de Equalização: o tanque de equalização possui a finalidade de homogeneizar os despejos oriundos das duas etapas básicas do processo produtivo (despejo diluído do envasamento e concentrado da fabricação) e regularizar a vazão do efluente do sistema de tratamento de efluentes, Figura 5.

Figura 4 - Tanque de equalização do efluente industrial.



Fonte: Unidade industrial estudada (2024).

IV. Tanque de condicionamento: o tanque de condicionamento recebe o efluente equalizado do tanque de equalização. Permite a correção do pH do efluente, com agente alcalino/ácido, minimizando a dosagem de acordo com a recirculação entre o reator anaeróbio e o tanque de condicionamento. Além disso, permite a correção da concentração de nitrogênio e fósforo do despejo com dosagem de ureia, de modo a atender às necessidades de desenvolvimento da flora microbiana, atuante na biodigestão anaeróbia, Figura 6.

Figura 5 - Tanque de condicionamento do efluente industrial.



Fonte: Unidade industrial estudada (2024).

2º nível – Tratamento Secundário:

- Reator Anaeróbio (IC);
- Gasômetro;
- *Flare*.

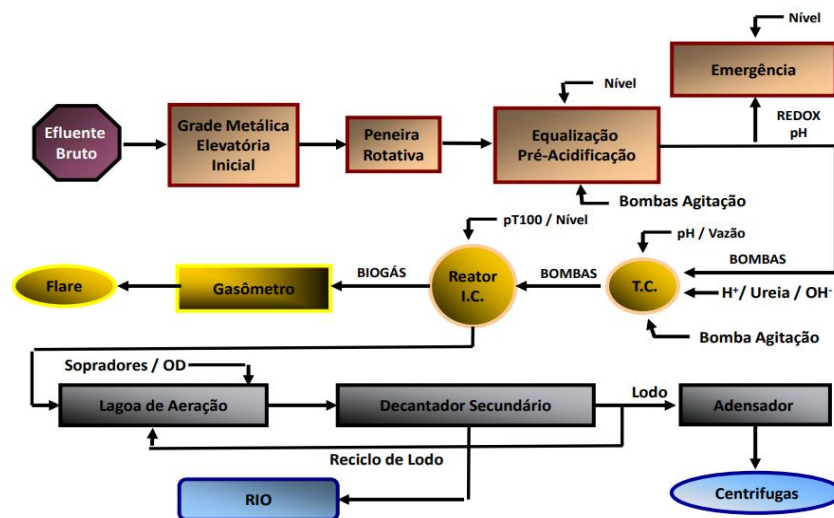
3º nível – Tratamento Terciário:

- Lagoa de Aeração (Lodo ativado);

- Decantador;
- Caixa de contato.

Todo efluente gerado no processo produtivo da fábrica é direcionado para a estação de tratamento, por sistemas de tubulações conforme demonstração no fluxograma abaixo, Figura 6.

Figura 6 - Fluxograma do processo de tratamento de efluente.



Fonte: Unidade industrial estudada (2024).

V. **Reator Anaeróbio:** no reator anaeróbio, a matéria orgânica poluente é convertida pelas bactérias anaeróbias em biogás, ocorrendo a geração de pequenas quantidades de lodo excedente. Da quantidade total de DQO (Demanda Química de Oxigênio), de 75% a 85% é transformado em biogás (CH_4 e CO_2), 5% a 10% permanece no efluente e será degradado no pós-tratamento aeróbio, Figura 7.

Figura 7 - Reator anaeróbico para produção de biogás.



Fonte: Unidade industrial estudada (2024).

VI. Lagoa de aeração: na lagoa de aeração ocorre a oxidação da matéria orgânica. A oxidação é realizada por uma cadeia de micro-organismos, predominantemente aeróbios, que floculam agregando os sólidos presentes, e são mantidos em suspensão pela constante agitação do sistema de aeração (sopradores de ar). Com a presença de oxigênio dissolvido, ocorre o metabolismo da matéria orgânica com a geração de compostos mais simples e estáveis, com consequência a liberação de energia para síntese de novas células, Figura 8.

Figura 8 - Lagoa de aeração do efluente industrial.



Fonte: Unidade industrial estudada (2024).

VII. Decantador secundário: o decantador tem a finalidade de permitir a sedimentação dos sólidos gerados no processo, buscando enquadrar o efluente tratado dentro das exigências do órgão de controle ambiental, Figura 9.

Figura 9 - Decantador secundário do efluente industrial.



Fonte: Unidade industrial estudada (2024).

VIII. Emissário: devolver a água para o rio após o tratamento completo realizado pela estação de tratamento de despejo industrial, Figura 10.

Figura 10 - Emissário do efluente industrial.



Fonte: Unidade industrial estudada (2024).

Na Figura 11, pode-se visualizar a estação de tratamento de dejetos industriais.

Figura 11 - Estação de tratamento do efluente industrial.



Fonte: Unidade industrial estudada (2024).

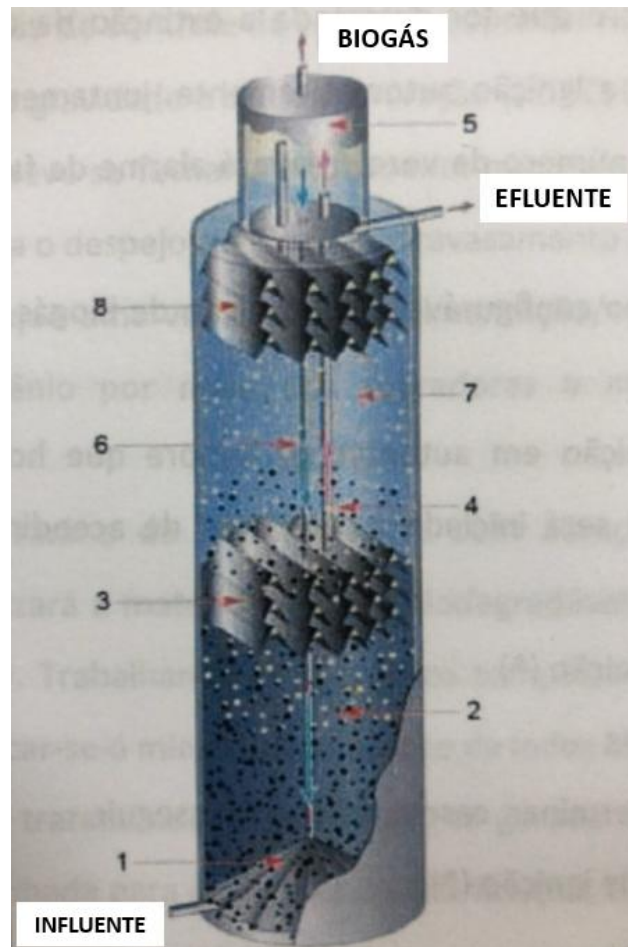
5.2 Geração do biogás

A Figura 12 apresenta o esquema interno do reator anaeróbio do tipo IC (*Internal Circulation*), conforme manual técnico do equipamento modelo 52-RE01 da fabricante BIOPAQ® (2014).

O reator IC caracteriza-se por elevada eficiência na remoção de carga orgânica, operando com biomassa granular de alta atividade e recirculação interna induzida pela formação de biogás.

O funcionamento pode ser descrito nas seguintes etapas:

Figura 12 - Esquema Explicativo do Reator Biopaq IC (52-RE01).



Fonte: BIOPAQ@IC, 2014

I. Alimentação do Reator

O efluente proveniente das etapas anteriores é bombeado para a base do reator (1), contendo matéria orgânica biodegradável que servirá de substrato para os microrganismos anaeróbios presentes no lodo granular.

II. - Zonas de Contato e Mistura

Nas zonas de contato (2 e 3), ocorre a mistura do efluente afluente com a biomassa ativa já estabelecida no interior do reator.

Nessa região iniciam-se as etapas bioquímicas da digestão anaeróbia:

- **Hidrólise** – conversão de compostos orgânicos complexos (proteínas, carboidratos e lipídios) em moléculas menores solúveis;

- **Acidogênese** – formação de ácidos orgânicos voláteis (ácido acético, propiônico, butírico, entre outros), além de H_2 e CO_2 .

III. Conversão Intermediária (Acetogênese)

Na etapa subsequente (4), os ácidos orgânicos intermediários são convertidos em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono por bactérias acetogênicas, preparando o substrato para a etapa final de produção de metano.

IV. Metanogênese

Ainda na zona reacional, ocorre a **metanogênese**, na qual arqueias metanogênicas convertem acetato e hidrogênio em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), promovendo a estabilização da matéria orgânica e a geração de biogás.

V. Separação de Fases – Sólidos e Líquido

Na região superior do reator (6 e 7), inicia-se a separação de fases, permitindo a sedimentação do lodo granular ativo e o retorno da biomassa ao leito reacional. O líquido clarificado segue para o pós-tratamento aeróbio.

VI. Separador Trifásico

Na etapa final (8), o separador trifásico promove a divisão entre:

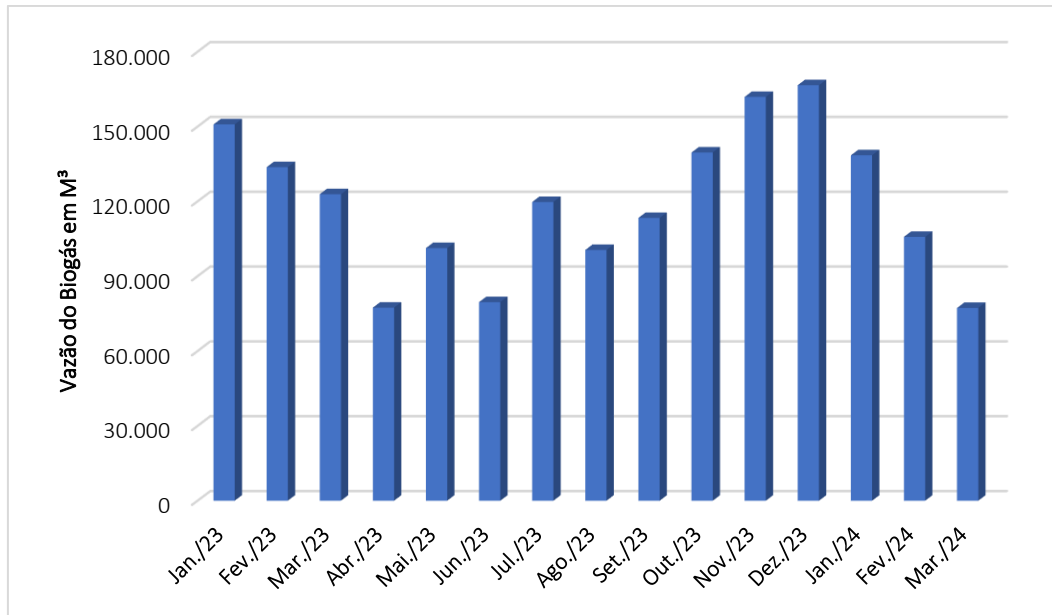
- Biogás;
- Lodo biológico;
- Efluente tratado.

O biogás desloca-se para a parte superior do reator, sendo direcionado ao gasômetro para armazenamento temporário e posterior aproveitamento energético ou queima controlada em flare.

5.3 Dados internos da unidade industrial estudada

O monitoramento da produção de biogás foi realizado ao longo de 15 meses, com base em dados operacionais internos da unidade industrial (Figura 13).

Figura 13 - Biogás gerado em 15 meses em Nm³ na unidade industrial estudada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os resultados indicam produção média mensal de 119.265 Nm³, correspondente a aproximadamente 3.924,74 Nm³·dia⁻¹ e 163,53 Nm³·h⁻¹, considerando operação contínua.

Observa-se redução da produção nos meses de abril a junho, associada à sazonalidade do mercado cervejeiro. Nesse período, a diminuição do volume de produção implica menor geração de efluentes e, conseqüentemente, redução da carga orgânica afluenta ao reator anaeróbio, refletindo diretamente na produção de biogás.

Essa variação evidencia a correlação entre atividade produtiva, carga orgânica aplicada ao sistema biológico e potencial energético disponível, aspecto relevante para o dimensionamento do sistema de aproveitamento energético proposto.

Em contrapartida, o consumo de Gás Natural Veicular (GNV) manteve-se relativamente constante ao longo dos 15 meses analisados, refletindo a demanda operacional contínua das empilhadeiras e demais aplicações internas que utilizam esse combustível.

Diferentemente da produção de biogás, que apresentou variação sazonal associada ao volume produtivo da cervejaria, o consumo de GNV mostrou baixa oscilação volumétrica mensal.

Entretanto, observou-se variação no valor unitário do combustível ao longo do período, o que resultou em aumento significativo do custo total de contratação do serviço, mesmo na ausência de crescimento expressivo do consumo físico.

O levantamento foi igualmente realizado com base em dados internos da empresa, abrangendo um período de 15 meses, cujos resultados consolidados encontram-se apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Consumo de gás natural e valor pago durante 15 meses.

Mês	Consumo de GNV (Nm ³)	Valor Unitário	Valor total pago
Jan./23	30.371	5,24	R\$ 159.144,04
Fev./23	30.396	5,24	R\$ 159.275,04
Mar./23	29.279	5,24	R\$ 153.421,96
Abr./23	29.029	5,24	R\$ 152.111,96
Mai./23	30.983	5,24	R\$ 162.350,92
Jun./23	29.692	5,24	R\$ 155.586,08
Jul./23	31.146	5,24	R\$ 163.205,04
Ago./23	31.170	5,24	R\$ 163.330,80
Set./23	31.667	5,67	R\$ 179.551,89
Out./23	34.195	5,88	R\$ 201.066,60
Nov./23	36.363	6,37	R\$ 231.632,31
Dez./23	54.282	6,86	R\$ 372.374,52
Jan./24	56.535	7,19	R\$ 406.486,65
Fev./24	28.000	6,36	R\$ 178.080,00
Mar./24	23.500	6,37	R\$ 149.695,00
Σ(total)	506.608	-	R\$ 2.987.312,81

Fonte: Unidade industrial estudada (2024).

5.4 Coleta de amostra do biogás

A caracterização da composição do biogás foi realizada na unidade industrial estudada em Uberaba–MG, no mês de junho de 2023. A medição ocorreu diretamente na linha de saída do gasômetro do reator anaeróbio, seguindo boas práticas de amostragem recomendadas para sistemas de digestão anaeróbia, a fim de garantir representatividade e confiabilidade dos dados obtidos. Os volumes de biogás e gás natural foram expressos em condições normalizadas de 0 °C e 1 atm (Nm³),

garantindo consistência com os valores de poder calorífico inferior utilizados nas análises energéticas.

A campanha amostral foi estruturada de modo a contemplar três medições independentes realizadas em dias distintos, buscando capturar a variabilidade temporal associada às condições operacionais da estação de tratamento e às oscilações na carga orgânica afluyente ao reator. Para cada campanha, foram efetuadas leituras em duplicata, permitindo avaliar a repetibilidade do método e reduzir incertezas instrumentais.

A análise composicional foi realizada por leitura direta utilizando analisador portátil de biogás modelo IC-1014, fabricado pela Instrucorp. O procedimento consistiu na conexão de mangueira flexível ao ponto de amostragem localizado no dreno da tubulação de saída do gasômetro, acoplando-a ao equipamento. Após a conexão, procedeu-se à abertura controlada do dreno, permitindo fluxo contínuo de biogás através do analisador, com registro em tempo real dos principais parâmetros de interesse, conforme ilustrado na Figura 15.

Previamente à estabilização das leituras, realizou-se a purga inicial da linha de amostragem, descartando-se o volume inicial de gás contido na mangueira, a fim de evitar interferência de ar atmosférico ou de possíveis condensados acumulados no trecho de coleta. Esse procedimento é recomendado para assegurar que a amostra analisada represente efetivamente o gás produzido no interior do reator anaeróbio.

Durante o procedimento, foram observadas as seguintes boas práticas de amostragem:

- Verificação da ausência de infiltração de ar no ponto de coleta;
- Garantia de fluxo contínuo e estável antes do registro das leituras;
- Posicionamento do equipamento em local protegido de intempéries;
- Monitoramento da presença de condensado na linha;
- Tempo mínimo de estabilização do sensor antes da consolidação dos dados.
- Realização de medição em duplicata para verificação de repetibilidade.

Os valores finais utilizados nas análises energéticas corresponderam à média aritmética das duplicatas válidas.

Para o tratamento estatístico, foram calculados:

- Média amostral (\bar{x})
- Desvio padrão amostral (s)

- Erro padrão da média ($EP = s/\sqrt{n}$), considerando $n = 3$ medições independentes.

A confiabilidade da estimativa foi avaliada por meio do intervalo de confiança de 95%, determinado pela distribuição t de *Student* para pequeno número de amostras:

$$IC = \bar{x} \pm t(0,975; n-1) \cdot s/\sqrt{N}$$

Essa abordagem permitiu quantificar a incerteza associada à fração molar de metano e fornecer base estatística formal para os cálculos de poder calorífico inferior e estimativa do potencial energético.

A escolha do ponto de amostragem no dreno da tubulação de saída do gasômetro assegura que o gás analisado corresponda ao biogás efetivamente acumulado após o processo de digestão anaeróbia, minimizando interferências associadas a zonas de baixa circulação interna no reator.

O reator anaeróbio operou em regime contínuo durante o período de coleta, sem interrupções operacionais relevantes, garantindo estabilidade do processo biológico. As condições operacionais de temperatura e pressão foram mantidas dentro das faixas típicas de operação do sistema anaeróbio mesofílico, com temperatura controlada entre aproximadamente 32 e 37 °C e pressão próxima à atmosférica, sem variações significativas durante as medições.

O reator utilizado na unidade é do tipo BIOPAQ® IC (*Internal Circulation*), operando em regime contínuo com circulação interna induzida pelo próprio biogás gerado. Esse arranjo favorece a estabilidade hidráulica e a elevada retenção de biomassa, conforme descrito no manual técnico do fabricante (BIOPAQ®, 2014).

Apesar dessa estabilidade operacional, variações na composição do efluente afluente podem refletir em pequenas oscilações na fração molar de metano, justificando a realização de medições distribuídas temporalmente.

Os parâmetros monitorados incluíram fração volumétrica de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), concentração de sulfeto de hidrogênio (H₂S) e oxigênio residual (O₂).

A determinação da fração molar de metano (x_{CH_4}) é particularmente relevante para o presente estudo, pois constitui o principal parâmetro termodinâmico para estimativa do poder calorífico inferior (PCI) do biogás e, conseqüentemente, da energia química disponível para conversão em trabalho útil ou substituição energética do Gás Natural Veicular (GNV).

A adoção das boas práticas metodológicas descritas, associada ao tratamento estatístico dos dados experimentais e à consideração do regime operacional contínuo do reator anaeróbio IC, confere maior robustez às análises de viabilidade energética e à avaliação de equivalência

com o GNV, reduzindo as incertezas associadas à variabilidade composicional do biogás.

A Figura 14 apresenta o ponto de coleta localizado no dreno da tubulação de saída do gasômetro.

Figura 14 - Dreno na saída da tubulação do gasômetro.



Fonte: Unidade industrial estudada (2024).

Enquanto a Figura 15, ilustra o procedimento de medição realizado com o analisador portátil utilizado na campanha amostral.

Figura 15 – Procedimento de análise composicional do biogás.



Fonte: Unidade industrial estudada (2024).

5.5 Análise do biogás

Após a passagem do biogás pelo aparelho, foi obtido o resultado abaixo na Tabela 3:

Tabela 3 – Característica do biogás.

CARACTERÍSTICA DO BIOGÁS	
Parâmetro	Quantidade
Volume de biogás	163 Nm ³ /h
CH ₄	65%
H ₂ S	461 PPM
O ₂	0,50%
N ₂	1,00%
Siloxano	0%
Amônia	0%

Fonte: Unidade industrial estudada (2024).

A vazão volumétrica média medida foi de 163 Nm³·h⁻¹, sendo o biogás composto majoritariamente por metano (65%), componente responsável pelo conteúdo energético da mistura.

As frações remanescentes correspondem principalmente a dióxido de carbono, além de pequenas concentrações de N₂ e O₂, que não contribuem significativamente para o poder calorífico.

5.5.1 Determinação do poder calorífico inferior (PCI)

O poder calorífico inferior do biogás foi estimado com base na fração molar de metano, utilizando a relação:

$$PCI_{biogás} \approx x_{CH_4} \cdot PCI_{CH_4}$$

Considerando:

$$PCI_{CH_4} = 35,8 \text{ MJ} \cdot \text{h}^{-1} \text{Nm}^{-3}$$

Tem-se:

$$PCI_{biogás} = 0,65 \times 35,8$$

$$PCI_{biogás} = 23,27 \text{ MJ}\cdot\text{h}^{-1} \text{ Nm}^{-3}$$

5.5.2 Cálculo da potência térmica disponível

A potência térmica associada ao fluxo de biogás foi determinada por:

$$\dot{E}_{térmica} = V_{biogás} \cdot PCI_{biogás}$$

$$\dot{E}_{térmica} = 163 \times 23,27$$

$$\dot{E}_{térmica} = 3.793 \text{ MJ}\cdot\text{h}^{-1}$$

Convertendo para unidade de potência elétrica equivalente:

$$\dot{E}_{térmica} = 1.053 \text{ kW}$$

Esse valor representa a potência energética bruta disponível no biogás produzido pelo reator anaeróbio.

5.5.3 Energia útil considerando eficiência global

Considerando eficiência global de 85% da unidade de purificação e compressão (eficiência energética global de 85%), a energia útil disponível foi estimada por:

$$\dot{E}_{útil} = \dot{E}_{térmica} \times 0,85$$

$$\dot{E}_{útil} = 3.223 \text{ MJ}\cdot\text{h}^{-1}$$

$$\dot{E}_{útil} \approx 895 \text{ kW}$$

5.5.4 Energia útil considerando eficiência operacional

Produção diária estimada:

$$V_{dia} = 163 \times 24 = 3.912 \text{ MJ}\cdot\text{h}^{-1}$$

Produção mensal estimada:

$$V_{mensal} = 3.912 \times 30 = 117.360 \text{ Nm}^3 \text{ MJ} \cdot \text{h}^{-1}$$

5.5.5 Avaliação da incerteza energética

Considerando incerteza instrumental de ± 1 ponto percentual na fração molar de metano (65% $\pm 1\%$), o PCI pode variar entre:

- 22,91 MJ·Nm⁻³ (64% CH₄)
- 23,63 MJ·Nm⁻³ (66% CH₄)

Impacto na potência térmica:

- Mínimo: 3.735 MJ·h⁻¹
- Máximo: 3.850 MJ·h⁻¹

Correspondendo à variação relativa aproximada de $\pm 1,5\%$.

5.6 Especificações técnicas das empilhadeiras utilizadas

Para a modelagem energética e estimativa de consumo de biometano, foram consideradas as empilhadeiras empregadas nas operações de movimentação interna da unidade industrial. As características técnicas dos equipamentos utilizados estão descritas na Tabela 1.

Tabela 4 - Características das empilhadeiras

CARACTERÍSTICA DAS EMPILHADEIRAS	
Parâmetro	Descrição
Marca	LINDE
Modelo	LINDE H40D
Tipo de combustível	GNV
Capacidade de carga	4.000 kg (4 toneladas)
Tempo médio de operação	24 horas/dia por equipamento
Consumo de GNV por empilhadeira.	40,11 Nm ³ de GNV por dia
Quantidade de unidades	29 empilhadeiras

Na Figura 16, pode-se visualizar o modelo utilizado de empilhadeira na unidade fabril.

Figura 16 - Modelo de empilhadeira da unidade.

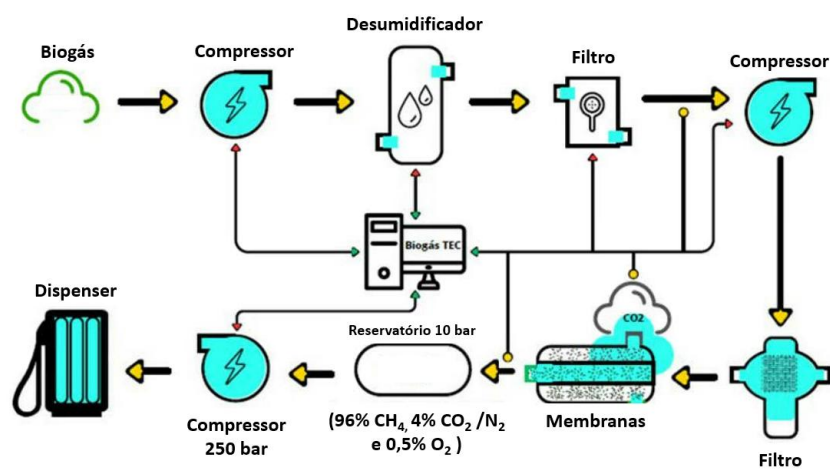


Fonte: Unidade industrial estudada (2024).

5.7 Projeto de implantação da usina de biogás

A Figura 17 consiste em um exemplo de uma usina de transformação de biogás em combustíveis.

Figura 17 - Fluxograma de um projeto de usina de biogás.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O biogás bruto proveniente do reator anaeróbio é inicialmente direcionado a um compressor primário, cuja função é elevar sua pressão e promover o transporte controlado ao longo da linha de tratamento. A compressão inicial garante vazão estável e pressão adequada para as etapas subsequentes de purificação, além de favorecer a eficiência dos processos de separação físico-química. Considerando a vazão média experimental de $163 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, recomenda-se que o compressor primário seja dimensionado para capacidade nominal mínima de $170 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, contemplando margem operacional de segurança e variações sazonais de produção. Dessa forma, a capacidade operacional inicial da usina de tratamento de biogás é estabelecida com base em vazão contínua de até $170 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ na etapa de compressão primária.

Na sequência, o biogás é conduzido ao desumidificador, equipamento responsável pela remoção de vapor d'água presente na mistura gasosa. A etapa de desumidificação é fundamental, uma vez que a presença de umidade reduz o poder calorífico volumétrico do gás e favorece processos corrosivos nas tubulações e equipamentos. Além disso, o sulfeto de hidrogênio (H_2S), composto tóxico e de odor característico, pode reagir com água formando ácido sulfúrico (H_2SO_4), substância altamente corrosiva que compromete a integridade mecânica da planta e reduz a vida útil dos componentes metálicos. A remoção da umidade contribui, portanto, para aumentar a estabilidade operacional e a segurança do sistema.

Após a desumidificação, o biogás segue para um filtro de carvão ativado, cuja função é realizar o polimento do gás por meio de adsorção física dos contaminantes remanescentes, especialmente H_2S residual, compostos orgânicos voláteis e possíveis traços de siloxanos. O gás é introduzido na parte inferior do leito adsorvente e atravessa as camadas de carvão ativado, onde ocorre retenção superficial dos contaminantes. A eficiência do sistema depende da concentração de impurezas, da vazão de operação e da capacidade de adsorção do meio filtrante, sendo necessária manutenção periódica e substituição do material adsorvente conforme o nível de saturação.

Posteriormente, o biogás pré-tratado é direcionado a um segundo estágio de compressão, elevando sua pressão para a etapa de upgrading por membranas. Com base na produção disponível e na demanda interna média de aproximadamente $47 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, recomenda-se que a unidade de upgrading seja dimensionada para capacidade nominal entre 120 e $140 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, permitindo aproveitamento energético otimizado, cobertura integral da demanda veicular e flexibilidade para absorção de excedentes. Assim, define-se como capacidade operacional nominal da usina de transformação o valor aproximado de $140 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ para o sistema de upgrading, mantendo margem técnica frente à vazão média medida de $163 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Nessa fase, o gás é conduzido ao sistema de membranas seletivas, responsável pela separação

do dióxido de carbono (CO_2) da corrente gasosa. O processo baseia-se na diferença de permeabilidade molecular entre CH_4 e CO_2 , permitindo a obtenção de biometano com teor aproximado de 96% de metano, além de pequenas frações residuais de CO_2 , N_2 e O_2 . A remoção do CO_2 eleva significativamente o poder calorífico inferior e a exergia química da mistura, aproximando suas características às do gás natural veicular.

Durante essa etapa de upgrading, ocorrem perdas energéticas inerentes ao processo, associadas principalmente ao chamado “ CH_4 slip” (arraste de metano no fluxo de rejeito) e ao consumo energético do sistema de compressão e separação. Em sistemas industriais modernos, a perda de metano situa-se tipicamente entre 1% e 5%, dependendo da tecnologia empregada (membranas, PSA ou lavagem com água).

Dessa forma, o processo demanda energia elétrica específica entre 0,20 e 0,35 $\text{kWh}\cdot\text{Nm}^{-3}$ para operação dos compressores, bombas e sistemas auxiliares. Considerando simultaneamente a perda de metano e o consumo energético do sistema, a eficiência global do upgrading situa-se tipicamente entre 85% e 95%.

No presente estudo, adotou-se de forma conservadora eficiência global de 85%, implicando perda energética aproximada de 15% da energia contida no biogás bruto. Para a vazão média experimental de $163 \text{ Nm}^3\cdot\text{h}^{-1}$ e potência térmica bruta de $3.792 \text{ MJ}\cdot\text{h}^{-1}$, a energia útil disponível após o upgrading foi estimada em $3.223 \text{ MJ}\cdot\text{h}^{-1}$, valor efetivamente considerado nas análises de viabilidade energética e econômica.

O biometano purificado é então armazenado em um reservatório intermediário a aproximadamente 10 bar, garantindo estabilidade de pressão e regularidade no suprimento. Recomenda-se que o reservatório intermediário seja dimensionado para capacidade equivalente a 4 a 6 horas de produção nominal da planta, correspondendo a volume entre 500 e 700 Nm^3 equivalentes, assegurando amortecimento de flutuações operacionais e estabilidade no abastecimento. Adicionalmente, estabelece-se como volume de armazenamento operacional recomendado faixa entre 500 e 700 Nm^3 , garantindo autonomia mínima de aproximadamente 4 horas em regime nominal. A partir desse reservatório, o gás passa por um compressor de alta pressão (≈ 250 bar), adequado às especificações técnicas de abastecimento veicular. O compressor de alta pressão pode ser dimensionado para vazão entre 50 e 70 $\text{Nm}^3\cdot\text{h}^{-1}$, suficiente para atendimento contínuo da demanda das empilhadeiras.

Considerando vazão média de enchimento de $60 \text{ Nm}^3\cdot\text{h}^{-1}$ e capacidade típica de abastecimento de 15 a 20 Nm^3 por empilhadeira, o tempo médio de enchimento estimado situa-se entre 15 e 20 minutos por equipamento, garantindo operação contínua da frota sem interrupções significativas.

Por fim, o biometano comprimido é direcionado ao dispenser, permitindo o abastecimento das empilhadeiras da unidade industrial, substituindo o gás natural veicular convencional.

6 ANÁLISE ECONÔMICA OPERACIONAL

A análise econômica operacional foi conduzida com base na substituição parcial ou total do gás natural veicular (GNV) consumido pelas empilhadeiras da unidade industrial pelo biometano produzido internamente a partir do biogás gerado na estação de tratamento de efluentes.

A metodologia adotada foi composta pelas seguintes etapas:

6.1 Determinação de produção potencial do biometano

A produção volumétrica de biometano foi estimada a partir da vazão média experimental de biogás medida na saída do gasômetro do reator anaeróbio, correspondente a:

$$V_{biogás} = 163 \text{ MJ}\cdot\text{h}^{-1}$$

A produção diária foi determinada considerando operação contínua em regime permanente:

$$V_{dia} = V \times 24$$

A produção mensal foi estimada assumindo 30 dias de operação:

$$V_{mês} = V_{dia} \times 30$$

Para a obtenção do volume efetivo de biometano disponível, foi aplicada a eficiência global do processo de upgrading igual a 85%, valor compatível com sistemas industriais de purificação por membranas ou PSA descritos na literatura (RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011; AWE et al., 2017).

$$V_{biometano} = V_{mês} \times \eta$$

onde:

$$\eta=0,85$$

6.2 Determinação da demanda energética veicular

O consumo histórico de GNV foi obtido a partir de registros internos da unidade industrial, considerando um período de 15 meses. A demanda média mensal foi calculada por:

$$V_{GNV} = V_{total} / \eta$$

onde:

- V_{total} = volume total consumido no período
- η = número de meses analisados

Essa média foi utilizada como parâmetro de comparação com a produção estimada de biometano.

6.3 Avaliação da cobertura energética

A capacidade de atendimento da demanda foi determinada por meio da razão entre o volume mensal estimado de biometano e o consumo médio mensal de GNV:

$$\text{Índice de Cobertura} = V_{biometano} / V_{GNV}$$

Esse indicador permite avaliar a suficiência energética do sistema e identificar eventual excedente operacional.

6.4 Estimativa de impacto econômico operacional

A análise do impacto econômico foi conduzida considerando:

- Valor unitário médio pago pelo GNV no período analisado;
- Volume médio mensal consumido;
- Volume potencialmente substituído por biometano.

A economia operacional mensal foi estimada por:

$$\text{Economia} = V_{GNV} \times \text{Preço}_{GNV}$$

Nos casos de excedente energético, estimou-se potencial de valorização considerando preço de referência de mercado para o biometano.

Importante destacar que esta análise contempla exclusivamente custos operacionais diretos associados ao combustível, não incluindo investimentos iniciais (CAPEX), custos detalhados de operação e manutenção (OPEX) ou métricas financeiras de retorno (VPL, TIR ou payback), uma vez que o foco deste estudo reside na viabilidade operacional e energética.

6.5 Considerações metodológicas

A abordagem adotada baseia-se em:

- Modelagem volumétrica em regime permanente;
- Aplicação de eficiência global conservadora;
- Utilização de dados históricos reais de consumo;
- Comparação direta entre produção interna e demanda energética.

Essa metodologia permite avaliar, de forma objetiva e tecnicamente fundamentada, o potencial de substituição do combustível fóssil por biometano gerado internamente.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Caracterização da unidade industrial

A unidade industrial em estudo tem como principal atividade a produção e o engarrafamento de bebidas, com destaque para cervejas e chopes destinados ao abastecimento dos mercados das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. As principais matérias-primas empregadas no processo produtivo incluem malte, maltose, lúpulo e água. As cervejas produzidas são predominantemente do tipo pilsen, apresentando teor alcoólico médio de aproximadamente 4%, em conformidade com os padrões descritos na literatura especializada (KUNZE, 2005).

7.2 Modelagem termodinâmica do biogás

Sob a ótica termodinâmica, o biogás gerado no reator anaeróbio pode ser modelado como uma mistura gasosa ideal em condições próximas à atmosférica, permitindo a aplicação da Lei de Dalton para determinação das pressões parciais e da contribuição energética individual de cada componente.

Admitindo-se comportamento de gás ideal, a fração molar dos constituintes pode ser considerada equivalente à fração volumétrica, possibilitando a correlação direta entre composição do biogás e propriedades energéticas em base volumétrica (ÇENGEL; BOLES, 2013).

A energia química disponível na mistura está diretamente associada à entalpia padrão de combustão do metano (CH_4), principal componente energético do biogás. Dessa forma, a fração molar de metano constitui o parâmetro determinante para a estimativa do poder calorífico e da energia disponível para conversão em trabalho útil.

7.3 Caracterização experimental do biogás

Com base na caracterização experimental realizada em junho de 2023, foi determinada uma vazão média de biogás de $163 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, com fração molar de metano (CH_4) de 65%, concentração de H_2S de 461 ppm, O_2 de 0,50% e N_2 de 1,00%, não sendo detectados siloxanos ou amônia.

O valor da fração molar de metano encontra-se dentro da faixa típica de 50% a 75%

reportada para reatores anaeróbios industriais operando em regime estável, indicando consistência com os valores descritos na literatura e adequado desempenho microbiológico do reator IC da unidade (RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011; AWE et al., 2017).

Valores semelhantes de fração molar de metano têm sido reportados em estudos com reatores anaeróbios industriais operando sob condições estáveis, com variações típicas entre 60% e 70%, o que reforça a consistência dos dados obtidos neste estudo em relação a sistemas reais comparáveis.

Entretanto, destaca-se que a composição do biogás pode variar significativamente em função da carga orgânica afluyente, temperatura e regime operacional do reator, constituindo uma limitação inerente à extrapolação direta dos resultados para outras unidades industriais.

Nesse contexto, o valor de 65% posiciona o sistema na faixa intermediária superior dessa distribuição, indicando condições operacionais favoráveis à atividade metanogênica e ao aproveitamento energético do biogás gerado (IEA BIOENERGY, 2023; LÓPEZ et al., 2024).

Do ponto de vista fenomenológico, a fração molar de metano observada está diretamente associada à atividade das arqueias metanogênicas, responsáveis pela conversão de intermediários da digestão anaeróbia, como ácidos orgânicos e hidrogênio, em CH₄, refletindo o equilíbrio entre as etapas acidogênica, acetogênica e metanogênica do processo.

7.4 Poder calorífico do biogás

Do ponto de vista quantitativo, biogás com 60% de CH₄ apresenta PCI típico da ordem de 21,5 MJ·Nm⁻³, enquanto concentrações próximas a 70% elevam o PCI para aproximadamente 25 MJ·Nm⁻³. O valor obtido neste estudo (65%) posiciona a unidade no intervalo médio dessa faixa, indicando estabilidade da fase metanogênica e eficiência adequada na conversão da matéria orgânica.

Considerando o valor médio da faixa reportada na literatura (≈ 23 MJ·Nm⁻³), o resultado obtido neste estudo (23,27 MJ·Nm⁻³) apresenta diferença inferior a 2%, evidenciando elevada concordância com dados experimentais de sistemas anaeróbios industriais.

Resultados semelhantes são reportados na literatura para sistemas anaeróbios industriais, nos quais o PCI do biogás situa-se tipicamente entre 20 e 25 MJ·Nm⁻³, dependendo da composição do substrato e das condições operacionais, corroborando a representatividade dos dados obtidos neste trabalho (SCARLAT et al., 2018; IEA BIOENERGY, 2023).

Adicionalmente, esse valor representa uma densidade energética compatível com

aplicações industriais, permitindo o aproveitamento energético do biogás de forma tecnicamente viável, embora ainda inferior ao gás natural em sua forma pura (SCARLAT et al., 2018; IEA BIOENERGY, 2023).

Considerando que a entalpia padrão de combustão do metano é aproximadamente $-890 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, e que o poder calorífico inferior do CH_4 em base volumétrica é $35,8 \text{ MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$, o poder calorífico inferior da mistura pode ser estimado por:

$$PCI_{\text{biogás}} \approx x_{\text{CH}_4} \cdot PCI_{\text{CH}_4}$$

$$PCI_{\text{biogás}} = 0,65 \times 35,8$$

$$PCI_{\text{biogás}} = 23,27 \text{ MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$$

Do ponto de vista físico-químico, essa relação decorre do fato de que o metano é o principal componente combustível da mistura, sendo responsável pela maior parte da energia liberada no processo de combustão, enquanto os demais gases atuam majoritariamente como diluentes.

Assumindo comportamento de gás ideal, a fração molar de metano pode ser considerada equivalente à fração volumétrica, o que justifica a aplicação direta dessa relação para estimativa do poder calorífico do biogás (ÇENGEL; BOLES, 2013).

Do ponto de vista fenomenológico, essa relação decorre do fato de que o metano é o principal componente combustível da mistura, sendo responsável pela maior parte da energia liberada na combustão, enquanto os demais gases, como CO_2 , atuam predominantemente como diluentes, reduzindo a densidade energética do biogás.

Dessa forma, a fração molar de metano atua como principal variável de controle do potencial energético do biogás, sendo diretamente proporcional ao poder calorífico e à exergia disponível, o que reforça sua relevância na avaliação de viabilidade energética do sistema.

O poder calorífico inferior obtido ($23,27 \text{ MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$) encontra-se dentro da faixa de $20,9$ a $29,3 \text{ MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$ reportada na literatura para biogás com teor de metano entre 55% e 70% , evidenciando consistência entre os dados experimentais e os parâmetros clássicos da engenharia sanitária (METCALF; EDDY, 2003; VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994).

Além disso, esse resultado confirma que o biogás produzido apresenta potencial energético significativo, podendo ser utilizado como fonte alternativa de energia em aplicações térmicas e veiculares, desde que associado a etapas adequadas de purificação e

condicionamento (IEA BIOENERGY, 2023; SCARLAT et al., 2018).

7.5 Balanço de energia – Primeira Lei da Termodinâmica

Aplicando-se a Primeira Lei da Termodinâmica para sistema aberto em regime permanente, e desprezando variações de energia cinética e potencial, a taxa de energia química associada ao escoamento é dada por:

$$\dot{E}_{t\acute{e}rmica} = V_{biog\acute{a}s} \cdot PCI_{biog\acute{a}s}$$

$$\dot{E}_{t\acute{e}rmica} = 163 \times 23,27$$

$$\dot{E}_{t\acute{e}rmica} = 3.793 \text{ MJ}\cdot\text{h}^{-1}$$

O que corresponde a aproximadamente 1.053 kW de potência térmica disponível.

Com base no poder calorífico inferior adotado para o biogás (23,27 MJ·Nm⁻³) e na vazão média de 163 Nm³·h⁻¹, a energia química total disponível no sistema é da ordem de 3.793 MJ·h⁻¹ (≈1.053 kW), representando o potencial energético bruto do biogás gerado.

Do ponto de vista fenomenológico, essa energia corresponde à liberação da energia química armazenada nas ligações moleculares do metano durante o processo de combustão, sendo convertida em energia térmica disponível, conforme descrito pela Primeira Lei da Termodinâmica, que estabelece a conservação da energia em sistemas abertos.

Esse resultado representa a taxa de energia química fornecida pelo biogás, sendo consistente com o balanço de energia para sistemas abertos em regime permanente, conforme estabelecido na Primeira Lei da Termodinâmica (ÇENGEL; BOLES, 2013).

Entretanto, a energia efetivamente disponível para uso útil é limitada pela eficiência global do sistema, que incorpora perdas nas etapas de purificação, compressão e utilização final do biogás. Essas irreversibilidades, associadas a processos reais de conversão energética, implicam que apenas uma fração da energia química pode ser convertida em trabalho útil (BEJAN, 2016).

Considerando a eficiência global do sistema (η), a energia útil pode ser estimada pela relação: $\dot{E}_{\acute{u}til} = V_{biog\acute{a}s} \times PCI_{biog\acute{a}s} \times \eta$. Adotando-se uma eficiência típica de 30%, a energia efetivamente disponível para uso útil é da ordem de 1.138 MJ·h⁻¹ (≈316 kW), evidenciando a redução do potencial energético devido às irreversibilidades do processo.

A potência térmica estimada (1,05 MW) é compatível com plantas industriais de biogás com produção entre 150 e 200 Nm³·h⁻¹, que apresentam potência típica entre 0,9 e 1,2 MW, indicando coerência entre a vazão volumétrica e o conteúdo energético calculado (AWE et al., 2017).

Considerando o valor médio de potência reportado na literatura ($\approx 1,0$ MW), o resultado obtido neste estudo apresenta desvio inferior a 5%, reforçando a consistência dos cálculos energéticos e a representatividade dos dados experimentais.

Estudos semelhantes indicam que unidades com vazões equivalentes apresentam desempenho energético comparável, reforçando a validade dos resultados obtidos neste trabalho em relação a sistemas industriais reais.

Entretanto, a conversão dessa energia em trabalho útil depende diretamente da eficiência global do sistema, a qual pode variar significativamente em função da tecnologia empregada e das condições operacionais, representando uma limitação prática para o aproveitamento integral do potencial energético disponível.

A partir da energia útil estimada, pode-se determinar o volume equivalente de gás natural veicular (GNV) passível de substituição, considerando um poder calorífico inferior de aproximadamente 35 MJ·Nm⁻³. Assim, o volume substituível é da ordem de 32,5 Nm³·h⁻¹, evidenciando o potencial do biogás como substituto energético em aplicações industriais.

Além disso, esse nível de potência evidencia que o sistema possui capacidade energética suficiente para atender à demanda interna de equipamentos consumidores, bem como potencial para geração de excedente energético, reforçando sua viabilidade prática em aplicações industriais (IEA BIOENERGY, 2023).

7.6 Análise pela Segunda Lei da Termodinâmica

Do ponto de vista da Segunda Lei da Termodinâmica, essa energia não é integralmente convertível em trabalho útil, devido às irreversibilidades associadas à combustão, fricção, transferência de calor finita e perdas mecânicas. A qualidade energética do combustível pode ser analisada em termos de exergia química, que para o metano é próxima ao seu poder calorífico inferior, uma vez que o CO₂ presente na mistura possui exergia praticamente nula em relação ao ambiente de referência.

Para o metano (CH₄), a exergia química é próxima ao seu poder calorífico inferior, enquanto o dióxido de carbono (CO₂), por se encontrar em estado termodinâmico próximo ao equilíbrio com o ambiente, apresenta exergia praticamente nula (BEJAN, 2016; ÇENGEL;

BOLES, 2013).

Do ponto de vista fenomenológico, essa limitação decorre do fato de que parte da energia liberada durante a combustão é dissipada na forma de calor não aproveitável e aumento de entropia, reduzindo a fração de energia efetivamente convertível em trabalho útil, conforme estabelecido pela Segunda Lei da Termodinâmica.

Apesar do elevado potencial energético associado ao metano, a presença de CO₂ na mistura reduz significativamente a qualidade da energia disponível, exigindo etapas adicionais de purificação para maximizar o aproveitamento energético do biogás em aplicações de maior eficiência.

Sob essa perspectiva, o aumento da fração molar de metano eleva diretamente a exergia do biogás, ampliando seu potencial de conversão em trabalho útil, enquanto o aumento da fração de CO₂ reduz a qualidade energética do combustível e sua eficiência de aproveitamento em aplicações práticas.

7.7 Análise de incerteza

Admitindo incerteza instrumental de ± 1 ponto percentual na fração molar de CH₄, a energia pode variar entre 3.734 e 3.851 MJ·h⁻¹, representando incerteza aproximada de $\pm 1,5\%$ no conteúdo energético, o que demonstra estabilidade composicional e confiabilidade metrológica dos dados utilizados na modelagem. Essa faixa de variação é considerada reduzida para sistemas biológicos de produção gasosa, indicando regime operacional estável do reator anaeróbico e consistência experimental dos dados obtidos.

Embora a incerteza observada seja reduzida, é importante considerar que sistemas biológicos estão sujeitos a variações operacionais ao longo do tempo, o que pode impactar a composição do biogás e, conseqüentemente, seu conteúdo energético em cenários distintos de operação.

7.8 Avaliação dos componentes minoritários

7.8.1 Sulfeto de Hidrogênio (H₂S)

Em relação ao sulfeto de hidrogênio (H₂S), a concentração medida de 461 ppm situa-se dentro da faixa típica de 100 a 3.000 ppm reportada para digestores industriais.

Considerando o limite operacional inferior a 50 ppm para sistemas de purificação por

membranas ou PSA, o biogás analisado requer eficiência de remoção superior a aproximadamente 89%, evidenciando a necessidade de etapa robusta de dessulfurização para viabilizar seu uso energético.

Entretanto, a literatura técnica indica que sistemas de membranas ou PSA requerem concentrações inferiores a 50 ppm para operação segura e durável, o que implica necessidade de eficiência de remoção superior a 89% na etapa de dessulfurização.

Quantitativamente, concentrações acima de 500 ppm já são consideradas potencialmente críticas para compressores e membranas devido ao risco de corrosão e degradação de materiais, evidenciando a importância estratégica do estágio de carvão ativado no projeto da usina.

Do ponto de vista fenomenológico, o H_2S atua como agente corrosivo ao reagir com a umidade presente no sistema, formando compostos ácidos que promovem a degradação de superfícies metálicas e comprometem a durabilidade dos equipamentos.

Estudos indicam que concentrações elevadas de H_2S podem impactar significativamente os custos operacionais devido à necessidade de sistemas de remoção mais eficientes, o que deve ser considerado na avaliação econômica global do processo.

7.8.2 Oxigênio (O_2)

No que se refere ao oxigênio (0,50%), a literatura indica que valores inferiores a 1% são comuns em sistemas industriais e geralmente associados a pequenas infiltrações. Do ponto de vista energético, essa concentração representa impacto inferior a 0,2% no PCI da mistura, sendo energeticamente desprezível.

Do ponto de vista de segurança, destaca-se que a faixa de inflamabilidade do metano no ar situa-se aproximadamente entre 5% e 15% em volume, de modo que a presença de oxigênio, ainda que em baixas concentrações, pode representar risco potencial em situações de vazamento e mistura com o ar atmosférico.

Contudo, sob a perspectiva de segurança, deve-se considerar que o limite inferior de inflamabilidade do metano no ar é aproximadamente 5%. Embora o biogás produzido não esteja em faixa inflamável dentro do sistema fechado, eventuais misturas com ar em caso de vazamento podem atingir condições críticas, justificando monitoramento contínuo e dispositivos de segurança operacional.

Do ponto de vista fenomenológico, a presença de oxigênio altera o equilíbrio da mistura gasosa e pode favorecer reações de combustão caso sejam atingidas condições críticas de

inflamabilidade, aumentando o risco operacional do sistema.

Apesar do impacto energético desprezível, a presença de oxigênio pode indicar pontos de infiltração no sistema, os quais devem ser monitorados para garantir segurança operacional e integridade do processo.

7.9 Estimativa de produção

A partir da vazão horária média medida de $163 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, estima-se produção diária de aproximadamente $3.912 \text{ Nm}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ e produção mensal da ordem de $117.360 \text{ Nm}^3 \cdot \text{mês}^{-1}$, valores que fundamentam os cálculos de transformação apresentados na Tabela 5.

7.10 Transformação do biogás

Tabela 5 - Transformação do biogás com 65% de CH_4 e 85% de eficiência da refinaria.

Mês	(65% CH_4)	(65% CH_4) Nm ³ /Mês	Vazão de biometano
	Nm ³ Dia Vazão de biometano		com (85% de eficiência) Nm ³ /Mês
Jan./23	2692	83445	70934
Fev./23	2639	73885	62808
Mar./23	2188	67825	57654
Abr./23	1419	42565	36185
Mai./23	1803	55904	47509
Jun./23	1472	44156	37536
Jul./23	2135	66181	56257
Ago./23	1790	55493	47167
Set./23	2082	62455	53091
Out./23	2493	77279	65691
Nov./23	2984	89505	76092
Dez./23	2970	92077	78260
Jan./24	2466	76457	64979
Fev./24	2016	56435	47981
Mar./24	1379	42750	36337

Σ (total)	32527	1008330	838479
μ (média)	2168 μ	65761 μ	55899 μ

Fonte: Unidade industrial estudada (2024).

7.11 Comparação energética excedente

Considerando a energia horária disponível de aproximadamente 1.053 kW, observa-se que o potencial energético do biogás supera significativamente a demanda energética média das empilhadeiras.

A etapa de upgrading promove o aumento da fração molar de metano, elevando o poder calorífico e a exergia do combustível, tornando o biometano energeticamente equivalente ao gás natural veicular.

Em termos termodinâmicos, a densidade energética volumétrica do biometano produzido aproxima-se da do gás natural veicular, justificando tecnicamente a substituição parcial ou total do combustível fóssil.

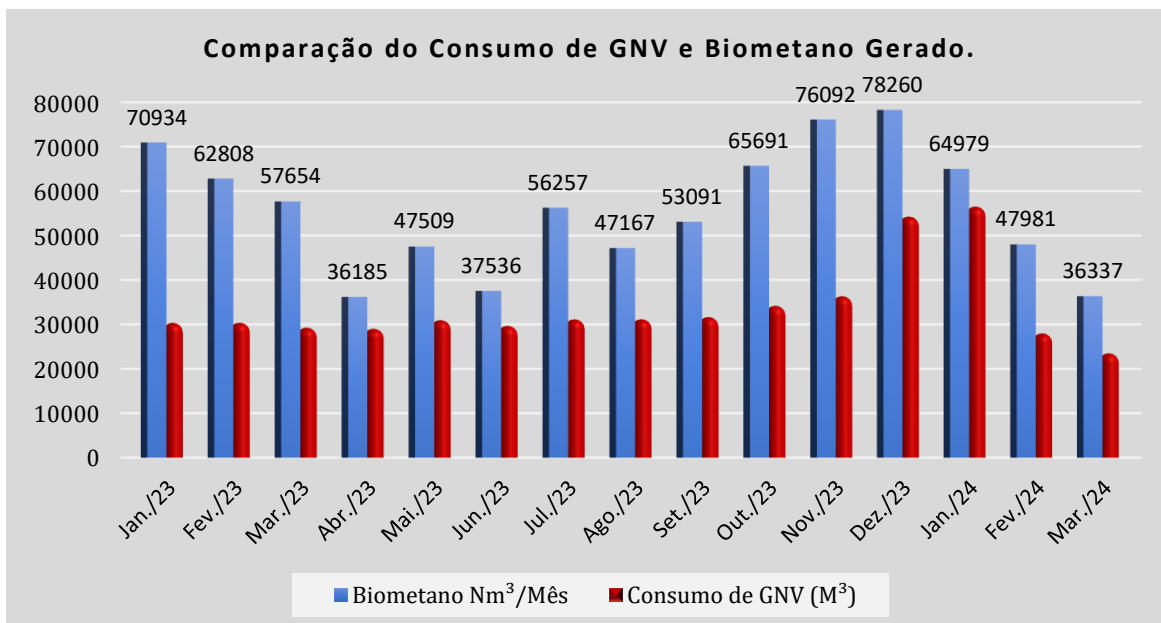
Resultados semelhantes têm sido observados em estudos recentes de aproveitamento energético de biogás, nos quais o biometano apresenta desempenho comparável ao gás natural veicular, reforçando a viabilidade técnica da substituição de combustíveis fósseis.

A análise comparativa apresentada na Figura 18 demonstra que, mesmo considerando perdas de upgrading e incerteza composicional, o sistema apresenta um balanço energético positivo robusto. Destaca-se que o PCI do biometano com teor superior a 95% de CH₄ aproxima-se de 35 MJ·Nm⁻³, valor comparável ao do gás natural veicular comercial, reforçando a equivalência energética entre os combustíveis.

Entretanto, a viabilidade prática dessa substituição depende da eficiência do sistema de purificação e da infraestrutura disponível para utilização do biometano.

A Figura 19 evidencia o excedente energético, que pode ser interpretado como disponibilidade de energia adicional no sistema produtivo.

Figura 18 - Comparação do consumo de GNV e o biometano gerado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

7.12 Análise econômica

A estimativa econômica associada à comercialização do excedente energético incorpora diretamente a variabilidade termodinâmica do sistema, uma vez que a receita projetada é proporcional ao conteúdo energético volumétrico do biometano. A incerteza de $\pm 1,5\%$ no PCI impacta linearmente a estimativa de receita, mantendo, contudo, margem de segurança operacional adequada.

Esse comportamento evidencia a forte correlação entre a qualidade energética do combustível e seu valor econômico, demonstrando que variações na fração molar de metano influenciam diretamente o desempenho financeiro do sistema.

Portanto, foi realizada uma análise de sensibilidade simplificada, considerando variações no preço do biometano ($\pm 20\%$) e na eficiência do sistema de purificação ($\pm 10\%$), evidenciando que a receita projetada apresenta comportamento linear em relação ao preço do combustível e dependência direta da eficiência energética global.

Dessa forma, os resultados demonstram coerência termodinâmica entre composição, conteúdo energético e potencial de aplicação, confirmando que o reaproveitamento do biogás permite a conversão eficiente da energia química em trabalho útil dentro das limitações impostas pelas leis da termodinâmica.

Adicionalmente, essa integração entre análise energética e econômica reforça a viabilidade técnica do sistema e evidencia o potencial do biometano como substituto competitivo ao gás natural em aplicações industriais.

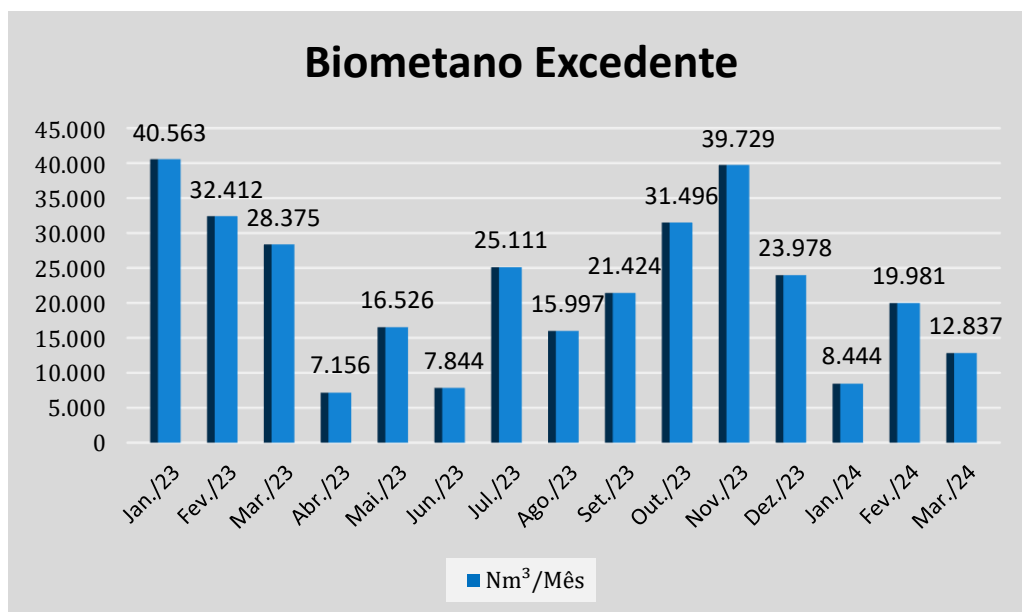
Do ponto de vista de risco, destaca-se que a viabilidade econômica do sistema está sujeita a variáveis externas, como flutuações no preço do gás natural, custos de operação e manutenção dos sistemas de purificação e variações na produção de biogás ao longo do tempo. Essas incertezas podem impactar diretamente o retorno financeiro do projeto.

Apesar da robustez econômica observada, deve-se considerar que variações no preço do biometano e nos custos operacionais podem influenciar diretamente a viabilidade financeira do sistema, representando uma incerteza externa ao modelo termodinâmico adotado.

Estudos recentes indicam que sistemas de aproveitamento energético de biogás apresentam viabilidade econômica mais consistente em escalas industriais superiores a 1.000 $\text{Nm}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$, condição atendida pela unidade analisada, reforçando a representatividade dos resultados obtidos (IEA BIOENERGY, 2023; SCARLAT et al., 2018).

Adicionalmente, estudos semelhantes indicam que a viabilidade econômica do biogás está fortemente associada à escala de produção e à eficiência do sistema de purificação, fatores que devem ser considerados em análises futuras e em possíveis expansões do sistema.

Figura 19 - Biometano excedente gerado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 19 apresenta a estimativa de retorno financeiro proveniente da comercialização do excedente de biogás convertido em biometano, considerando como referência o excedente energético destinado ao abastecimento das empilhadeiras da unidade industrial. Para a modelagem econômica, adotou-se o valor médio de R\$ 2,77 por metro cúbico de biometano, com base em indicador de mercado disponível em plataforma especializada (INVESTING.COM, 2023), utilizado como referência aproximada para precificação do biometano no contexto nacional.

Destaca-se que esse valor pode apresentar variações em função de fatores regionais, contratuais e condições de mercado, constituindo uma incerteza externa ao modelo adotado.

A estimativa econômica considera como base a produção mensal média calculada a partir da vazão medida e da eficiência do sistema de purificação, incorporando a incerteza energética associada à variação da fração molar de metano ($\pm 1,5\%$), a qual impacta proporcionalmente a receita projetada.

Adicionalmente, a análise de incerteza econômica indica que a variação combinada entre preço do biometano e eficiência do sistema pode resultar em oscilações superiores a $\pm 25\%$ na receita mensal, evidenciando a importância da estabilidade operacional e das condições de mercado para a viabilidade do projeto.

Apesar dessa variabilidade, os resultados indicam robustez econômica do sistema, uma vez que a oscilação do conteúdo energético não compromete significativamente a viabilidade financeira do aproveitamento do biogás.

Entretanto, ressalta-se que a ausência de uma análise econômica aprofundada, incluindo indicadores como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e payback descontado, constitui uma limitação do presente estudo, devendo ser abordada em trabalhos futuros.

Figura 20 - Retorno financeiro do biometano excedente em diferentes escalas temporais, considerando preço médio constante do biometano.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 20 apresenta a estimativa de retorno financeiro em diferentes escalas temporais (diária, mensal e anual), evidenciando o impacto direto da produção de biometano na geração de receita. Observa-se comportamento linear entre volume produzido e retorno econômico, uma vez que o modelo adotado considera preço unitário constante.

Entretanto, destaca-se que essa representação não incorpora variações de mercado, custos operacionais ou incertezas associadas à eficiência do sistema, devendo ser interpretada como um cenário base para avaliação econômica.

8 CONCLUSÕES

A presente pesquisa demonstrou, de forma quantitativa e aplicada, a viabilidade técnico-energética da utilização do biogás gerado na estação de tratamento de efluentes industriais como combustível alternativo para empilhadeiras, evidenciando seu potencial como vetor de eficiência energética e descarbonização no ambiente industrial.

Com base na caracterização experimental e na modelagem termodinâmica desenvolvida, verificou-se que a produção média de biogás, associada a uma fração molar de metano de aproximadamente 65%, resulta em conteúdo energético suficiente para suprir integralmente a demanda das 29 empilhadeiras da unidade, além de gerar excedente energético aproveitável. A equivalência energética estabelecida entre o biometano e o gás natural veicular confirmou a compatibilidade técnica do combustível produzido com os requisitos operacionais dos equipamentos.

Do ponto de vista termodinâmico, os resultados evidenciaram coerência entre composição, poder calorífico e energia disponível, demonstrando que a fração molar de metano atua como principal variável de controle do potencial energético do biogás. A análise baseada na Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica permitiu quantificar não apenas a energia química disponível, mas também as limitações impostas pelas irreversibilidades do sistema, refletidas na eficiência global de conversão energética.

Sob a perspectiva econômica, a substituição do gás natural veicular pelo biometano produzido internamente mostrou-se altamente vantajosa, com redução significativa dos custos operacionais e potencial de geração de receita adicional a partir da comercialização do excedente energético. A análise de sensibilidade indicou que o desempenho econômico do sistema está diretamente relacionado ao preço do biometano e à eficiência do processo de purificação, caracterizando esses parâmetros como variáveis críticas para a viabilidade financeira do projeto.

Adicionalmente, o estudo evidenciou que a presença de contaminantes, como H_2S e CO_2 , impacta diretamente a qualidade energética e operacional do biogás, reforçando a importância das etapas de purificação (*upgrading*) para viabilizar seu uso em aplicações de maior exigência energética e tecnológica.

Apesar dos resultados positivos, destaca-se que a viabilidade do sistema está sujeita a variabilidades operacionais, como flutuações na composição do biogás, eficiência do sistema de purificação e condições de mercado do biometano, constituindo limitações inerentes à extrapolação dos resultados para outras unidades industriais.

Sob essa perspectiva, conclui-se que o aproveitamento do biogás como combustível veicular interno representa uma solução tecnicamente viável, economicamente atrativa e ambientalmente sustentável, contribuindo para a valorização energética de resíduos industriais e redução da dependência de combustíveis fósseis.

Por fim, como perspectiva futura, recomenda-se a ampliação da análise para sistemas de geração de energia elétrica a partir do biogás, bem como a incorporação de indicadores econômicos mais robustos, como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e análise de risco, de modo a aprofundar a avaliação da viabilidade do sistema em diferentes cenários operacionais.

9 REFERÊNCIAS

ARDOLINO, Francesco et al. Biogas-to-biomethane upgrading: a comparative review in a life cycle perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 139, p. 110588, 2020.

AWE, Olugbenga W. et al. A review of biogas utilisation, purification and upgrading technologies. *Waste and Biomass Valorization*, v. 8, p. 267–283, 2017.

BEJAN, Adrian. *Advanced engineering thermodynamics*. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.

BRIGGS, D. E. et al. *Brewing: science and practice*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2004.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. Belo Horizonte: UFMG, 1997.

COLDEBELLA, P. F. *Estudo da viabilidade técnica e econômica da produção de biogás em granjas suínolas*. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

COSTA, Rodrigo Henrique Rezende. *Tratamento de efluentes industriais*. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. *Thermodynamics: an engineering approach*. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2013.

FARIA, Roberto A. *Tratamento de efluentes líquidos*. São Paulo: Edgard Blücher, 2012.

GARCILASSO, Valeria et al. Anaerobic digestion of industrial effluents: fundamentals and applications. *Bioresource Technology*, v. 99, p. 721–731, 2008.

GASNET. Gás natural. Disponível em: <http://www.gasnet.com.br>. Acesso em: 10 jan.

2018.

IEA BIOENERGY. *Outlook for biogas and biomethane: prospects for organic growth*. Paris: IEA Bioenergy, 2023.

INVESTING.COM. Biometano: nasce o primeiro indicador de preço. Disponível em: <https://br.investing.com/analysis/biometano-nasce-o-primeiro-indicador-de-preco-200463206>. Acesso em: 6 out. 2025.

KUNZE, Wolfgang. *Technology brewing and malting*. Berlin: VLB, 2005.

LOBATO, Luiz Carlos Santos. *Aproveitamento energético de biogás*. Belo Horizonte: UFMG, 2010.

LÓPEZ, Antonio F. et al. From biogas to biomethane: an in-depth review of upgrading technologies. *Applied Sciences*, v. 14, n. 1, 2024.

METCALF & EDDY. *Wastewater engineering: treatment and reuse*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

MORAN, Michael J. et al. *Fundamentals of engineering thermodynamics*. 8. ed. Hoboken: Wiley, 2018.

OKORO, O. V. Desulphurisation of biogas: a systematic review. *Sustainability*, v. 11, n. 1, 2019.

RYCKEBOSCH, Evelien; DROUILLON, Michel; VERVAEREN, Henk. Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, p. 1633–1645, 2011.

SCARLAT, N.; DALLEMAND, J. F.; FAHL, F. Biogas: developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, v. 129, p. 457–472, 2018.

TOMCZAK, Wojciech et al. Biogas upgrading using membrane systems: a review. *Membranes*, v. 14, n. 1, 2024.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. *Anaerobic sewage treatment*. New York: Wiley, 1994.

VENKATESH, G.; ELMI, R. Economic–environmental analysis of biogas recovery. *Energy*, v. 58, p. 131–141, 2013.