



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**

**CENTRO DE TECNOLOGIA – CT**

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**MESTRADO - DOUTORADO**

**ANÁLISE EXERGOECONOMICA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA  
VINHAÇA.**

**por**

**RAFAEL FERNANDES DE MELO NETO**

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da  
Paraíba para obtenção do grau de Mestre.*

**JOÃO PESSOA – PB**

**março, 2025**

**RAFAEL FERNANDES DE MELO NETO**

**ANÁLISE EXERGOECONOMICA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA  
VINHAÇA.**

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como exigência  
para obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos

**JOÃO PESSOA – PB**

**março, 2025**

**Catalogação na publicação  
Seção de Catalogação e Classificação**

M528a Melo Neto, Rafael Fernandes de.  
Análise exergoeconómica da geração de biogás a partir da vinhaça / Rafael Fernandes de Melo Neto. - João Pessoa, 2025.  
99 f. : il.

Orientação: Carlos Antônio Cabral dos Santos.  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Biogás. 2. Exergia. 3. Exergoeconomia. 4. Vinhaça. I. Santos, Carlos Antônio Cabral dos. II. Título.

UFPB/BC

CDU 662.767.2 (043)

# **ANÁLISE EXERGOECONOMICA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA VINHAÇA.**

Por

**Rafael Fernandes de Melo Neto**

*Dissertação aprovada em 31 de março de 2025*

*Período letivo 2025.1*

## **BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** CARLOS ANTONIO CABRAL DOS SANTOS  
Data: 12/06/2025 11:38:01-0300  
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Prof. Dr. CARLOS ANTÔNIO CABRAL DOS SANTOS

*Orientador – UFPB*



Prof. Dr. ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO  
*Examinador Interno – UFPB*



Prof. Dr. JEAN PIERRE VERONESE  
*Examinador Externo – UFPB*

## **DEDICATÓRIA**

Com muito amor, dedico esta dissertação a minha esposa **Nayane Beatriz da Silva Leite** e aos meus filhos **Arthur Francisco Leite Fernandes de Melo** e **João Rafael Leite Fernandes de Melo**, por serem luz em minha vida e suportarem todo o processo ao meu lado me incentivando.

Com carinho, também dedico aos meus pais **Rafael Fernandes de Melo Júnior** e **Alba Valéria de Souza Nascimento Melo** que sempre me incentivaram e acreditaram no meu potencial, mesmo nos momentos mais desafiadores. Ao meu irmão **Rennan Fernandes de Souza Melo**, por toda a parceria ao longo da vida e por ser sempre meu melhor amigo. A **Ivanda Virgílio Cabral**, minha maior incentivadora por sempre me motivar a estudar e superar meus desafios.

Ao meu Orientador **Carlos Antônio Cabral do Santos**, cuja orientação e sabedoria foram fundamentais para a concretização deste trabalho.

E por fim, gostaria de dedicar a minha Tia **Edité de Souza Nascimento** (in memoria), aos meus avôs **Francisco Martins do Nascimento** (in memoria), **Rafael Fernandes de Melo** (in memoria) e a minha avó **Maria da Glória Gomes de Melo** (in memoria), vocês estariam muito felizes com esta conquista. A todos, o meu mais sincero agradecimento.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente Deus pelo Dom da vida, que sem Ele nada disso seria possível. Gostaria de agradecer a minha esposa Nayane Beatriz da Silva Leite, pela paciência e por me ajudar nos momentos mais difíceis desta caminhada. Aos meus pais, Rafael Fernandes de Melo Júnior e Alba Valéria de Souza Nascimento Melo, vocês foram incríveis renunciando tantas e tantas coisas para me proporcionar a melhor educação. Ao meu irmão, Rennan Fernandes de Souza Melo, parceiro de todas as horas e confidente em toda minha vida.

A todos os meus primos, primas, tios e tias, por me incentivarem e nunca me deixar desistir, aos meus avós que estiverem presentes em toda trajetória da minha vida.

Aos meus amigos e em especial a Joel Fernandes, Bruno de Souza, Abell Marcos, Douglas Mendonça, Felipe Perruci, por terem palavras de incentivo nos momentos difíceis.

Ao meu orientador Carlos Antônio Cabral dos Santos, pelos conselhos, por todo conhecimento transferido e ajuda no mestrado.

A todos os funcionários do programa de pós-graduação em engenharia mecânica da UFPB, pela paciência e pelas orientações necessárias. E por fim Agradeço à **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)** pelo apoio financeiro e pela confiança depositada em mim ao conceder a bolsa de estudos, sem a qual este trabalho não teria sido possível. O incentivo proporcionado pela CAPES foi fundamental para que eu pudesse dedicar-me integralmente à pesquisa e ao desenvolvimento desta dissertação.

# **ANÁLISE EXERGOECONOMICA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA VINHAÇA.**

## **RESUMO**

O presente estudo tem por objetivo apresentar uma análise exergoeconômica da geração de biogás a partir da vinhaça, buscando na literatura dados sobre análise exergético do biogás da vinhaça combinando com os dados de uma avaliação econômica do mesmo biogás. Esta combinação buscou identificar otimizações no processo através dos custos exergéticos dos componentes. A análise exergética é baseada na segunda lei da termodinâmica, evidenciando a qualidade da energia produzida pelo sistema térmico, esta análise é o pilar do estudo exergoeconômico. A aplicação do método SPECO, desenvolvida por Valero e Lozano, busca quantificar os custos dos combustíveis e produtos gerados através dos princípios de combustível (F) e produto (P). O estudo exergoeconômico analise os custos dos fluxos exergéticos e monetários, de cada componente da planta de digestão anaeróbica. Esta análise destacou os custos significativos do reator UASB, principalmente devido a destruição de exergia 0,107 R\$/s e os custos operacionais 76,74 R\$/s. A bomba e a torre de resfriamento apresentaram menores impactos econômicos, com fatores exergoeconômicos abaixo de 1,2%. Os resultados apontam para a destruição de exergia como o principal fator para o custo exergético, necessitando uma otimização através de novas tecnologias ou adição de outras matérias orgânicas. O sistema é tecnicamente viável, com sua viabilidade econômica dependendo destas reduções nas perdas exergéticas.

Palavras-Chave: Vinhaça, Biogás, Exergia, Exergoeconomia.

# **EXERGOECONOMIC ANALYSIS OF BIOGAS GENERATION FROM VINEYARD.**

## **ABSTRACT**

The present study aims to present an exergoeconomic analysis of biogas generation from vinasse, searching in the literature for data on exergy analysis of vinasse biogas combined with data from an economic evaluation of the same biogas. This combination sought to identify optimizations in the process through the exergy costs of the components. Exergy analysis is based on the second law of thermodynamics, highlighting the quality of the energy produced by the thermal system. This analysis is the pillar of the exergoeconomic study. The application of the SPECO method, developed by Valero and Lozano, seeks to quantify the costs of fuels and products generated through the principles of fuel (F) and product (P). The exergoeconomic study analyzes the costs of the exergy and monetary flows of each component of the anaerobic digestion plant. This analysis highlighted the significant costs of the UASB reactor, mainly due to exergy destruction 0.107 R\$/s and operating costs 76.74 R\$/s. The pump and cooling tower had lower economic impacts, with exergoeconomic factors below 1.2%. The results point to exergy destruction as the main factor for exergy cost, requiring optimization through new technologies or addition of other organic materials. The system is technically feasible, with its economic viability depending on these reductions in exergy losses.

Keywords: Vinasse, Biogas, Exergy, Exergoeconomic.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	15
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	15
1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO.....	18
1.3    OBJETIVOS .....	19
1.3.1 OBJETIVO GERAL.....	19
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	19
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	20
2.1 ESTADO DA ARTE .....	20
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
3.1 - CANA DE AÇÚCAR.....	23
3.2 PROCESSO INDUSTRIAL.....	25
3.2.1 RECEPÇÃO .....	25
3.2.2 PREPARO .....	27
3.2.3 EXTRAÇÃO .....	28
3.2.4 PRODUÇÃO DE AÇÚCAR .....	31
3.2.5 PRODUÇÃO DE ETANOL.....	34
3.2.6 RESÍDUOS DA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA.....	36
3.3 VINHAÇA .....	37
3.4 BIOGÁS.....	40
3.5 DIGESTÃO ANAERÓBICA.....	43

3.6 FATORES QUE INFLUENCIAM A PRODUÇÃO DE BIOGÁS .....	43
3.7 TIPOS DE BIOGESTORES .....	44
3.7.1 BIODIGESTOR INDIANO .....	44
3.7.2 BIODIGESTOR CHINÊS .....	45
3.7.3 BIODIGESTOR CANADENSE .....	46
3.7.4 BIODIGESTOR UASB.....	47
3.8 EXERGIA .....	48
3.9 CUSTO EXERGÉTICO.....	51
3.10 – ANÁLISE EXERGOECONÔMICA .....	55
3.10.1 – TCE – TEORIA DO CUSTO EXERGÉTICO .....	56
3.10.2 – MÉTODO SPECO.....	57
METODOLOGIA .....	60
4.1 – ANÁLISE EXERGETICA.....	60
4.2 - AVALIAÇÃO ECONÔMICA.....	68
4.3 – AVALIAÇÃO EXERGOECONÔMICA .....	71
APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....	77
INTRODUÇÃO .....	77
ANÁLISE EXERGOECONÔMICA NA BOMBA .....	77
ANÁLISE EXERGOECONÔMICA NA TORRE DE REFRIGERAÇÃO.....	78
ANÁLISE EXERGOECONÔMICA NO REATOR UASB .....	79
ANÁLISE EXERGOECONÔMICA .....	80
CONCLUSÃO .....	82
APÊNDICE A.....	95
CÁLCULO EXERGOECONÔMICO .....	95
1.BOMBA.....	95
2.TORRE DE RESFRIAMENTO .....	97
3. REATOR UASB.....	99

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Resumo de composição química da cana-de-açúcar .....	25
Figura 2 - Descarreço do caminhão na casa de cana – usina giasa ltda.....	26
Figura 3 - Mesa alimentadora 2 – usina giasa ltda.....	27
Figura 4 - Esteira metálica – usina giasa ltda .....	28
Figura 5 - Setor extração (moendas) – usina giasa ltda .....	29
Figura 6 - Peneira rotativa – usina giasa ltda .....	30
Figura 7 - Caixas evaporadoras.....	31
Figura 8 - Cristalizadores .....	32
Figura 9 - Fabrica de açúcar .....	33
Figura 10 - Destilaria de etanol da cana-de-açúcar.....	35
Figura 11 - Biodigestor em propriedade rural.....	41
Figura 12 - Vista de cima da planta de biogás usina cocal – sp.....	41
Figura 13 - Etapas de produção do biogás na digestão anaeróbica .....	43
Figura 14 - Biodigestor indiano .....	45
Figura 15 - Biodigestor chinês.....	46
Figura 16 - Biodigestor canadense.....	47
Figura 17 - Biodigestor uasb.....	48
Figura 18 - Exemplificação da definição de exergia .....	49
Figura 19 - Custos dos componentes do sistema térmico .....	53
Figura 20 - Esquema do modelo da unidade de tratamento .....	61
Figura 21 - Fluxo de exergia do processo de fabricação do etanol.....	63
Figura 22 - Diagrama de fluxo exergético para a produção de biogás .....	65
Figura 23 - Diagrama dos fluxos de exergia no volume de controle .....	72
Figura 24 - Análise dos fluxos na bomba .....	73
Figura 25 - Análise dos fluxos na torre de refrigeração.....	74
Figura 26 - Análise dos fluxos no reator uasb .....	75

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Ciclo anual da cana-de-açúcar.....	24
Tabela 2 - Características físico-química da vinhaça proveniente de diferentes fontes do processo .....	38
Tabela 3 - Composição do biogás.....	42
Tabela 4 - Parâmetros iniciais da vinhaça.....	62
Tabela 5 - Dados da digestão anaeróbica.....	62
Tabela 6 - Densidades.....	63
Tabela 7 - Dados de Vazão e Fluxo Massico.....	66
Tabela 8 - Dados da exergia específica.....	66
Tabela 9 - Destruição de exergia .....	67
Tabela 10 - Eficiência exergetica.....	68
Tabela 11 - Dados de produção do etanol.....	69
Tabela 12 - Composição do custo do Etanol .....	69
Tabela 13 - Custo de Investimento, manutenção e operação.....	70
Tabela 14 - Custo Anual dos equipamentos.....	70
Tabela 15 - Custo mensal, diário e por hora .....	71
Tabela 16 - Apresentação dos resultados na bomba .....	77
Tabela 17 - Apresentação dos resultados na torre de refrigeração.....	78
Tabela 18 - Apresentação dos resultados no reator UASB .....	79
Tabela 19 - Resumo dos resultados por componente da planta .....	81

## LISTA DE SIMBOLOS

$R\$$  - Real

$\Sigma$  - Somatório

$C$  – Taxa de Custo (R\$/s)

$E$  – Taxa de Exergia (kW)

$ART$  – Açúcar Retido Total

$ATR$  – Açúcar Total Recuperável

$c_f$  – Custo monetário por exergia do combustível (R\$/kJ)

$c_p$  – Custo monetário por exergia do produto (R\$/kJ)

$c_D$  – Custo Monetário por exergia destruída (R\$/kJ)

$CAPEX$  – Valor do orçamento para a aquisição/investimentos (R\$)

$CRF$  – Fator de recuperação de capital

$DBO$  – Demanda Biologica de Oxigênio

$DQO$  – Demanda Química de Oxigênio

$E_f$  – Exergia Física (kJ/s)

$E_{cinética}$  – Exergia Cinética (kJ/s)

$E_{CH}$  – Exergia química (kJ/s)

$E_{potencial}$  – Exergia potencial (kJ/s)

$e$  – Exergia específica (kJ/kg)

$f_k$  – Fator Exergoeconômico (%)

$g_0$  – Gravidade (m/s<sup>2</sup>)

$h_n$  – Entalpia específica (kJ/kg)

$m$  – Fluxo Mássico (kg/s)

$OPEX$  – Custo de manutenção e operação dos equipamentos (R\$)

$\varphi$  – Fator de Manutenção

$PCI$  – Poder calorífico inferior (kJ/kg)

$Q_n$  – Calor específico (kJ/kg)

$r_k$  – Diferença relativa entre custos do produto e o custo do combustível (%)

$s_n$  – Entropia específica (kJ/kg)

$T_0$  – Temperatura do estado de referência (°C)

$TRH$  – Tempo de retenção hidráulica

$v_0$  – Velocidade (m/s)

$Z_0$  – Diferença de altura (m)

$Z$  – Custo com despesas totais (R\$/s)

$Z_n$  – Custo de aquisição do equipamento (R\$)

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com uma previsão de colheita na safra 2023/2024 de 713,2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, gerando 29,69 bilhões de litros de etanol e 45,68 milhões toneladas de açúcar (CONAB, 2024).

Os grandes volumes gerados nos processos produtivos atuais geram muitos discursos sobre seu reaproveitamento, sobre esta temática temos os resíduos gerados pela cana-de-açúcar, como incentivar o melhor aproveitamento desses resíduos, gerando mais lucro e diminuindo os impactos ambientais?

Está problemática acompanha todo setor industrial e não apenas o setor sucroalcooleiro. Abaixo será exposto dados do baixo aproveitamento dos resíduos do processo produtivo que envolve a cana-de-açúcar, resíduos estes que são, o bagaço, a vinhaça, a palha dentre outros.

Segundo Silva, Gomes, Alsina (2007) estima-se que para cada 1 tonelada de cana-de-açúcar moída é gerado 280 kg de bagaços, na usina Giasa LTDA, localizada na cidade de Pedras de Fogo no estado da Paraíba, teve uma safra no ano de 2023/2024 de 1.118.721,21 toneladas de cana-de-açúcar obtendo-se aproximadamente 332.562 mil toneladas de bagaço.

O bagaço ainda é utilizado na queima para geração de vapor nas caldeiras, porém em volume ainda inferior ao produzido, gerando um grande volume de bagaço nos pátios, que ficam aguardando destinação, seja para venda ou para consumo interno como o início da moagem do ano subsequente.

Segundo Freire e Cortez (2000), para cada 1 litro de etanol produzidos, são gerados de 10 a 15 litros de vinhaças, levando em conta os dados obtidos da última safra na usina Giasa , foram produzidos 74.815.597,00 litros de etanol, por consequência foram produzidos em média de 748 milhões a 1,122 bilhões de litros de vinhaça.

Cabello et al. (2009), realizou um estudo sobre a importância do tratamento da vinhaça antes da sua aplicação, destacando seu alto poder poluente e fertilizante. Com isso surge a sua aplicação para geração de biogás, um processo que leva a purificação da vinhaça reduzindo os impactos ambientais de sua aplicação e garantido a mesma força na fertilização da cana.

A busca por combustíveis renováveis aumenta a expansão do setor sucroalcooleiro por áreas de novos plantios, aumentando o volume de resíduos gerado a partir dessa expansão, dentre esses resíduos destacam-se o bagaço, a vinhaça, a torta de filtro, a palha da cana-de-açúcar, dentre outros.

Os biocombustíveis que tem por definição todo combustível de origem biológica desde que não sejam fosseis, destacam-se o etanol e o biogás. Uma das formas de obtenção do biogás vem através dos resíduos da cana-de-açúcar, um tema amplamente estudado e pesquisado em todo mundo.

O biogás vem tornando-se uma das linhas de pesquisas mais recorrente ao longo dos últimos anos, visto que sua fonte de produção se dá através de biomassa, um recurso altamente produzido pela humanidade.

Almança (1994), realizou uma dissertação de mestrado intitulada avaliação do uso da vinhaça da cana-de-açúcar na geração de energia elétrica, onde usou a vinhaça para geração de biogás e por consequência em conversão em eletricidade.

Já Brito (2011), traz como tema de pesquisa Biodigestão anaeróbica em duplo estágio do bagaço de cana-de-açúcar para obtenção de biogás. Koschier et al., 2019, apresenta um artigo com tema produção de biogás via biodigestão anaeróbica utilizando casca de cana-de-açúcar: aproveitamento de resíduo.

Esta linha de pesquisa é constante no meio científico a busca por uma produção de biogás mais eficiente. Souza (2018), pesquisou a análise exergética da vinhaça para produção de biogás.

O Brasil devido a sua imensidão territorial possui um enorme potencial de geração de biogás. Segundo Zanette (2009), o potencial de brasileiro de geração de biogás supera os 50 milhões de metros cúbicos por dia.

O biogás é obtido através da digestão anaeróbica onde no transcorrer do processo os componentes orgânicos são degradados e metabolizados principalmente em metano (média de 50% a 70%) e o restante em composição gasosa destacando-se principalmente a presença do dióxido de carbono (média de 25% a 40%) (LINS, MITO, FERNADES, 2015).

Sobre a composição do biogás e sua obtenção podemos afirmar:

Composto majoritariamente por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>), o biogás é o resultado de uma série complexa de reações bioquímicas que degrada material orgânico em ambientes sem oxigênio (anaeróbico). Por meio de cinco fases (hidrólise, acidogênese, acetogênese, metanogênese e sulfetogênese), a matéria orgânica complexa (carboidratos, lipídeos e proteínas) é gradualmente degradada, resultando em biogás e em efluente estabilizado denominado digestor ou digerido (CARVALHO et. al., 2019, p.17).

Buscando-se aumentar a eficiências dos processos que envolve a geração do biogás, Souza (2018), realizou um estudo sobre as eficiências exergeticas da geração do biogás obtido através da biodigestão da vinhaça.

Moran et. al. (2013), definiu a exergia como sendo a maior quantidade de energia possível de um sistema que se pode converter em trabalho útil através das interações com ambiente, ou seja, é o máximo de trabalho teórico. A exergia não poder conservada e sim destruída por causa das irreversibilidades.

Sobre a exergia temos:

A exergia é uma combinação da primeira com a segunda lei da termodinâmica. A primeira lei aborda o princípio da conservação de energia, e a segunda afirma que a energia tem qualidade, bem como quantidade, e que os processos ocorrem na direção da redução da qualidade energética (CAVALCANTI, 2018, p. 10).

A Exergia também pode ser entendida como um parâmetro de poluição, uma vez que possui como referência um índice de desequilíbrio em relação ao meio ambiente. Ao busca-se uma diminuição sobre a destruição de exergia, há uma prevenção na emissão de poluentes (PELLEGRINI, 2009).

Na análise exergética é possível estabelecer o consumo das energias, e a eficiência exergética dos subcomponentes e de todo o processo de produção, tornando assim, sua de suma importância pois aponta os locais aonde serão necessários uma melhora em sua eficiência. (DINCER e ROSEN, 2007; Barrera et al., 2016).

Exergoeconomia combina a análise exergética e princípios econômicos para

proporcionar informações cruciais ao projeto e operação de um sistema de custo efetivo, informações essas que ao realizar análises energéticas e econômicas convencionais não ficam disponíveis. Com isso o principal objetivo de um estudo exergoeconômico é a diminuição dos custos exergéticos (TSATSARONIS; LIN; PISA, 1993).

## 1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A frenética busca por fontes de energia renováveis tem impulsionado as pesquisas científicas ao redor do mundo na descoberta de novas tecnologias voltadas para o aproveitamento dos resíduos industriais, nesse contexto destacasse o setor sucroalcooleiro. Entre os resíduos, temos a vinhaça, um subproduto originado da destilação do mosto do caldo, com alto impacto ambiental e seu elevador poder energético. Neste sentido, surge o biogás como uma alternativa de tratamento biológico contribuindo para uma mitigação dos impactos ambientais e para geração de uma energia renovável.

O potencial de geração do biogás depende dentro outros fatores, da quantidade de matéria orgânica a ser digerida nos biodigestores. O biogás bruto, é utilizado especialmente para a produção de energia elétrica, utilizada na própria planta ou vendida para as concessionárias. Quando purificado consegui atingir até 96% de CH<sub>4</sub>, podendo ser usado como substituto do GNV, do Diesel (MILANEZ et. al., 2018).

Com isso análises técnicas, econômicas e energéticas faz-se necessários para garantir a tomada de decisão estratégicas a fim de garantir a viabilidade do aproveitamento da vinhaça em escala neste processo. Com isso surge, a análise exergoeconômica uma poderosa ferramenta, que visa permitir a avaliação integrada dos custos energéticos e econômicos, proporcionando uma quantificação abrangente das perdas, eficiência e custos associados à geração de biogás.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral deste trabalho é fazer uma análise exergética e econômica da geração do biogás a partir da vinhaça, verificando sua sustentabilidade e identificando possíveis otimização deste processo.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar uma revisão bibliográfica da análise exergética do biogás da vinhaça;
- Realizar uma revisão bibliográfica dos custos de implantação de uma planta de biogás;
- Fazer uma análise exergoeconômica da biogás da vinhaça;
- Identificar os maiores custos exegéticos e suas otimizações.;

## **1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação possui 6 capítulos em sua estruturação e as referências bibliográficas. No capítulo 1, é apresentado a introdução do tema estudado, junto com seus objetivos. No capítulo 2 é apresentado um Estado Arte, como forma de referência bibliográfica.

No capítulo 3 é abordado uma fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do estudo. No capítulo 4, é abordado a metodologia e modelagem do presente estudo.

No capítulo 5 é discutido os resultados e no último capítulo é apresentado a conclusão do estudo, bem como apresentar ideias para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo, será apresentado um panorama atualizado sobre o biogás e suas diversas fontes de geração, além de fontes e estudos referente ao tema da dissertação. O principal objetivo desta seção é expor as pesquisas mais recentes relacionadas ao assunto, destacando trabalhos desenvolvidos por diferentes pesquisadores, tanto dentro quanto fora do Laboratório de Energia Sustentável (LABES).

POVEDA (2014), buscou alternativas para o aproveitamento energético da vinhaça, buscando diminuir os seus impactos ambientais, estou 4 cenários para o uso destes resíduos, o primeiro foi a concentração, o segundo a biodigestão, o terceiro foi a incineração com a produção de energia elétrica. O mesmo avaliou além dos impactos ambientais, seu aproveitamento econômico, chegando a conclusão na época que apenas o primeiro seria viável economicamente, pois eram necessários incentivos monetários para o reuso da vinhaça, como premiação pela baixa emissão de carbono, redução no consumo de água e diminuição dos gases de efeito estufa.

CALEGARI (2017), estudou sobre a produção de biogás a partir da vinhaça concentrada, utilizou a dois reatores UASB de fluxo ascendente e manta de lodo, seu objetivo era a produção de biogás além da redução de DQO, devido a sua carga poluente. Como resultado conseguiu uma alta eficiência na remoção do DQO aliado a uma alta produção de biogás, devido a vinhaça concentrada possuir uma alta carga orgânica.

FERNANDES (2017), traz em seu estudo o potencial energético da geração de biogás a partir da vinhaça, mostrando suas principais tecnologias e seu aproveitamento para geração de eletricidade. A realização da pesquisa se deu através de um estudo de caso em uma usina sucroenergetica no estado do Goiás, em uma unidade que possui apenas fabricação de etanol hidratado.

Em seu trabalho Souza (2018), realizou uma análise exergética da geração de biogás da vinhaça, realizou uma modelagem no Microsoft Excel, usando como biogestor o UASB, de maneira satisfatória chegou aos resultados de 10.336, 5 GJ de exergia recuperada do qual foi convertida em 4.916,8 GJ em biogás. De modo geral a autora traz uma ferramenta útil da no tratamento da vinhaça.

NAKASHIMA (2018), aplicou uma análise exergética na vinhaça e no biogás produzido por ela, utilizando um método chamado ADM e recalculando a exergia química. O estudo faz aproximações dos compostos químicos da vinhaça com a água, a fim de determinas suas propriedades. Com isso conseguiu um resultado de recuperação da exergia da vinhaça na faixa de 44% a 52%, com uma maior eficiência na TRH prologado, utilizar altos volumes de vinhaça se torna mais eficaz. Em resumo o estudo reforça a importância do aproveitamento de resíduos orgânicos por meio da produção de biogás.

BISPO (2022), pesquisou sobre os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), buscando uma forma de tratamento energético e ambiental. Analisou o ciclo de vida (ACV) e também uma avaliação termodinâmica do biogás gerado através do aterro sanitário Metropolitano em João Pessoa PB, verificou que o ciclo de Rankine com reaquecimento possuí o melhor rendimento energético e a maior produtividade para extrair energia elétrica do processo.

VAZ (2022), realizou um estudo termoeconômico do biogás integrado a um sistema de fertirrigação, usando como combustíveis dejetos da suinocultura, mostrando uma autossuficiência do sistema como um todo. Além disso explica que o investimento econômico calculados através das receitas e custo de todo o sistema se torna viável, não só pela autossuficiência do sistema energético, mas principalmente da venda do biofertilizante líquido.

OLIVEIRA (2023), o estudo realizado no LABES da UFPB, atráis uma análise energética e exergoeconomica da cogeração utilizando o biometano como combustível. O conjunto utilizado contou com um biodigestor, um gerador de potência 100 kW e refrigerador por absorção. Alcançou um resultado de conversão de 96,5 % gerando 17,417 m<sup>3</sup> de biogás e uma quantidade de 292,47 kg de biofertilizantes, além disso conseguiu

produzir 32,0396 kWh de energia elétrica de 23,9093 kWh de frio. De maneira geral demostrou a capacidade de aproveitamento dos resíduos diminuindo o tempo sobre o retorno do investimento.

SOUSA (2023), estudou o aproveitamento dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) como fonte de energia para diferentes tipos, dentre eles o biometano produzido através da digestão anaeróbica. Foram avaliados os ciclos de vida e uma análise exergética, chegando a conclusão que o biometano produzido poderia suprir até 40% da demanda de energia térmica de uma produção de lacticínios evitando o desmatamento de 137,12 ha usados como combustíveis em caldeiras a biomassa.

MELO NETO (2025), realizou um estudo exergoeconômico do biogás gerado a partir da vinhaça produzido na indústria sucroalcooleiro. Foram avaliados os custos exergéticos por equipamento identificando os principais pontos de otimização na planta de biogás, com resultado, o autor identificou que os maiores custos estão associados ao reator UASB e suas destruições de exergia.

## CAPÍTULO III

### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para assegurar uma compreensão completa deste trabalho, este capítulo oferece uma breve discussão dos principais tópicos relacionados ao objeto de estudo. Considerando que a produção de vinhaça está intimamente ligada à produção de etanol, fornecendo uma contextualização do setor e de seus processos, dedicando a uma descrição detalhada da vinhaça, incluindo uma revisão dos estudos recentes sobre sua caracterização físico-química. Também serão apresentadas tópicos sobre exergia, eficiência exergética e a exergoeconomia.

#### 3.1 - CANA DE AÇÚCAR

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é uma cultura de grande importância socioeconômica no Brasil, sendo cultivada desde a época colonial. Devido à alta demanda a produção brasileira de cana-de-açúcar cresceu significativamente. Na safra 2023/24, o Brasil produziu 713,2 milhões de toneladas dessa matéria-prima. (CONAB, 2024).

A cana-de-açúcar é uma planta ereta com um caule cilíndrico, extremamente liso e de cor variada. Ela é rizomatosa, formando touceiras, e é considerada semiperene. A cana-de-açúcar também é uma planta que brota perfilhos (RIPOLI et al., 2006). Esses perfilhos são brotos que surgem após a germinação e se desenvolvem na parte subterrânea. No caso da cana-de-açúcar, o perfilhamento é limitado, exceto em algumas variedades da espécie *S. spontaneum*, que possuem perfilhamento ilimitado (CASAGRANDE e VASCONCELOS, 2008).

Na tabela 1, é apresentado o plantio da cana-de-açúcar que pode ser dividido em três

épocas: Plantio de Ano, Plantio de ano-e-meio e Plantio de Inverno (ROSSETTO et al., 2019). No Plantio de ano-e-meio, a cana é plantada entre janeiro e março, pois é neste intervalo que se apresenta condições ideais de temperatura e umidade para o crescimento da planta, garantindo o seu pleno desenvolvimento, entre o período de plantio até a maturação (colheita) é em torno de 18 meses, por isso ano-e-meio. No Plantio de Ano, o cultivo ocorre entre outubro e novembro, durante os meses de março e abril, o desenvolvimento da planta é interrompido, e nos meses seguindo se dá início o processo de maturação da planta. Já o Plantio de inverno acontece em manejos que utilizam a irrigação, pois o mesmo acontece no período de seca, mesmo assim, este tipo de plantio possibilita uma alta produtividade já no primeiro ano, devido ao controle da disponibilidade de água no solo (REHAGRO, 2018).

Tabela 1 - Ciclo anual da cana-de-açúcar

	Ano 1												Ano 2											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
A													Plantio	Desenvolvimento				Maturação			Colheita			
B	Plantio	Repouso				Desenvolvimento						Maturação			Colheita									
C				Plantio	Desenvolvimento			Maturação			Colheita													

Legenda: A – Cana de ano; B – Cana de ano e meio; C – Cana de inverno

J- Janeiro; F- fevereiro; M- março; A- Abril; M- maio; J- junho;

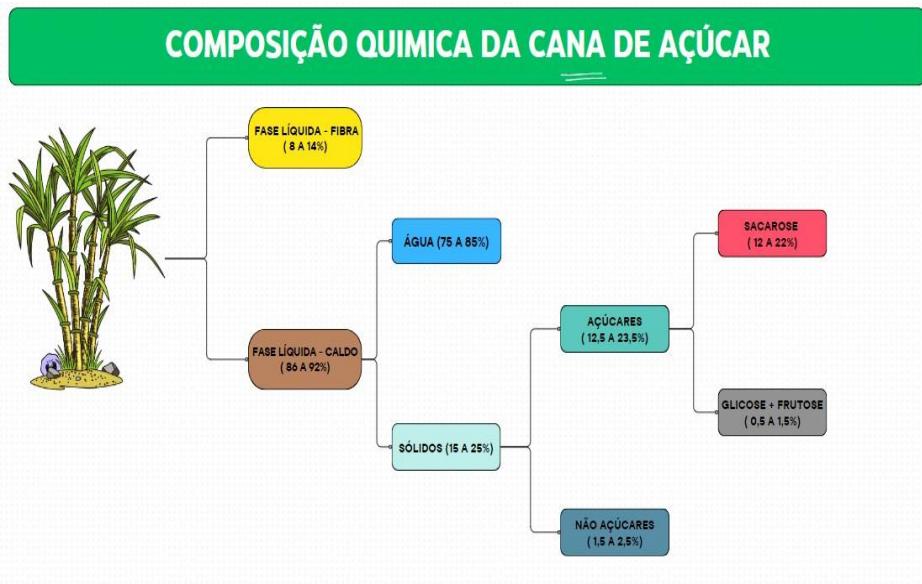
J- Julho; A- agosto; S- setembro; O- outubro; N- novembro; D- dezembro;

*Fonte: Adaptado de Nakashima (2018)*

Os principais constituintes da cana-de-açúcar são fibras, água, não-açúcar e sacarose (REIN, 2007). A fase sólida da cana (fibra) representa de 8 á 14% do peso da cana, a fase líquida (caldo) representa de 86 á 92% do peso da cana. O caldo é composto de 75 á 85% de água e de 15 á 25% de sólidos, estes sólidos estão divididos entre 12,5 á 23,5 % de açúcares e 1,5 a 2,5% de não-açúcares, os açúcares são divididos em dois grupos, a sacarose que representa de 12 a 22% e de 0,5 a 1,5% de glicose + frutose. Os não açúcares são compostos por sais minerais, ácidos, amidos, gomas, ceras, graxas, corantes, etc... (REIN, 2007).

Na figura 1, é apresentado o resumo da composição química da cana-de-açúcar, citado no parágrafo anterior.

Figura 1 - Resumo de composição química da cana-de-açúcar



Fonte: Próprio Autor (2025).

Estima-se que um colmo típico de cana-de-açúcar contém cerca de 12,5% de fibra e 87,5% de caldo. O Colmo da cana-de-açúcar é composto por 25,0% de partes rígidas, com os nós e a casca, e os restantes 75,0% correspondem às partes mais macias, que são formados pelos entrenós (CASTRO E ANDRADE, 2006).

### 3.2 PROCESSO INDUSTRIAL

O processo industrial envolvendo a cana-de-açúcar, é dividido em algumas etapas até a saída do produto final, são elas: Recepção, preparo, extração, geração de vapor, UTE (unidade de transformação elétrica), fabricação de açúcar e destilaria.

#### 3.2.1 RECEPÇÃO

O processo inicia-se na chegada da cana-de-açúcar vinda do campo, na entrada das usinas existe uma balança para se efetuar a pesagem da matéria-prima vinda do campo, após

isto, uma sonda, retira uma amostra da cana-de-açúcar para análise no laboratório, a fim de quantificar a quantidade de sacarose presente na planta, esta quantidade é usada como base para o pagamento a fornecedores de cana-de-açúcar, os famosos PCTS (pagamento de cana por Teor de Sacarose).

Após esta análise o caminhão carregado segue para as mesas alimentadores e/ou as casas de cana, estoque para cana inteira (cana de corte manual). Estas mesas possuem inclinações entre de 27º e 45º graus, nesta etapa é feita a lavagem da cana-de-açúcar para diminuir as impurezas minerais e vegetais no processo de extração, também deve-se evitar, lavar cana picadas para que não haja diminuições no teor de açúcar. (HUGOT, 1996).

Na figura 2, é apresentado uma imagem de um caminhão no tombador (hilo) para descarreço da cana-de-açúcar na casa de cana (estoque).

Figura 2 - Descarreço do caminhão na casa de cana – Usina Giasa LTDA



Fonte: Próprio Autor (2025).

### **3.2.2 PREPARO**

Após passar pelo processo de recepção, a cana-de-açúcar é cortada em pedaços menores, sendo preparada para o próximo processo que é a extração. Esta redução é feita normalmente por facas rotativas ao longe da esteira alimentadora, e pelo desfibrador, que é composto por martelos moveis. A eficiência e a capacidade da extração dependem da qualidade de preparação da cana para entrega na usina (REIN, 2007).

Na figura 3, é apresentado uma foto da mesa-alimentadora 2, que recebe as canas do estoque (casa de cana).

Figura 3 - Mesa alimentadora 2 – Usina Giasa LTDA



Fonte: Próprio Autor (2025).

Ademais os equipamentos que fazem parte no preparo da cana, consome em média 25% de toda a demanda de potência da planta. Com isso o tipo de acionamento escolhido são pontos essências neste processo. Além disso, é utilizado um conjunto de facas niveladoras no transporte de cana inteira dentro da esteira alimentadora, para que as mesmas cheguem na altura adequada para serem cortadas (REIN, 2007).

Na figura 4, é apresentado a esteira metálica, responsável pela alimentação da cana para o processo de desfibramento.

Figura 4 - Esteira metálica – Usina Giasa LTDA



Fonte: Próprio Autor (2025).

### 3.2.3 EXTRAÇÃO

A extração consiste na separação caldo rico em sacarose do restante da cana (fibra da cana), este processo é definido como a parcela de sacarose que é extraída pelas moendas do caldo bruto da cana-de-açúcar (REIN, 2007).

A extração do caldo ocorre em moendas e/ou difusores. As moendas são formadas por rolos que esmagam a cana liberando o caldo rico em sacarose. Já os difusores efetuam a extração por meio da lixiviação, no qual o colchão de cana picada é submetida a uma passagem de água quente, e por meio da diferença de concentração (REIN, 2007).

Na Figura 5, é apresentado uma foto vista de cima do setor das moendas, onde é feita a extração do caldo da cana-de-açúcar.

Figura 5 - Setor Extração (Moendas) – Usina Giasa LTDA



Fonte: Próprio Autor (2025).

Durante essa etapa, ocorre a redução da umidade do bagaço por meio da retirada do caldo, que será utilizado na produção de açúcar e na destilaria. O colchão de cana (nome dado ao volume de cana desfibrada no processo de preparação) por um conjunto de cinco ou seis ternos de moendas, onde o processo resulta na separação do caldo e do bagaço, sendo este último encaminhado para a caldeira. O caldo extraído é direcionado para um tanque de mistura e, posteriormente, bombeado para a peneira rotativa. (HUGOT, 1996).

Na figura 6, é apresentado a peneira de caldo rotativa, utilizada para o processo de purificação do caldo.

Figura 6 - Peneira rotativa – Usina Giasa LTDA



Fonte: Próprio Autor (2025).

As partículas sólidas presentes no caldo retornam às moendas por meio de um transportador helicoidal, enquanto o líquido segue para uma segunda filtragem realizada em uma peneira vibratória (HUGOT, 1996).

Esta etapa é fundamental para remover impurezas sólidas, microrganismos e alguns compostos indesejáveis para o processo, que podem até comprometer a qualidade do açúcar e álcool. Em seguida, inicia-se o processo de tratamento químico do caldo, com a adição de cal (leite de cal), que ajuda a coagular e precipitar impurezas que precisam ser removidas nas etapas seguintes (HAMERSKI *et. al.*, 2011).

Além do processo de clarificação, o caldo passa por um processo de aquecimento para eliminar gases dissolvidos melhorando a eficiência dos processos em sequência. Esta purificação garante que apenas a sacarose e as substâncias desejáveis continuem no líquido (TAVARES, 2023).

### **3.2.4 PRODUÇÃO DE AÇÚCAR**

O processo de fabricação de açúcar, inicia-se com o caldo purificado seguindo para a evaporação, nesta etapa a água é removida aumentando a concentração da sacarose. Este processo ocorre em evaporados de múltiplos estágios, onde o calor gerando em uma câmara é reutilizado nas câmaras seguintes, melhorando assim o consumo de energia (vapor). Ao final deste processo, passa-se a ter um xarope com alto teor de sacarose (açúcar) (ALEIXO, 2012).

Na figura 7, é apresentado uma foto das caixas evaporadoras em uma fabricação de açúcar localizado no Nordeste brasileiro.

Figura 7 - Caixas evaporadoras



Fonte: Próprio Autor (2025).

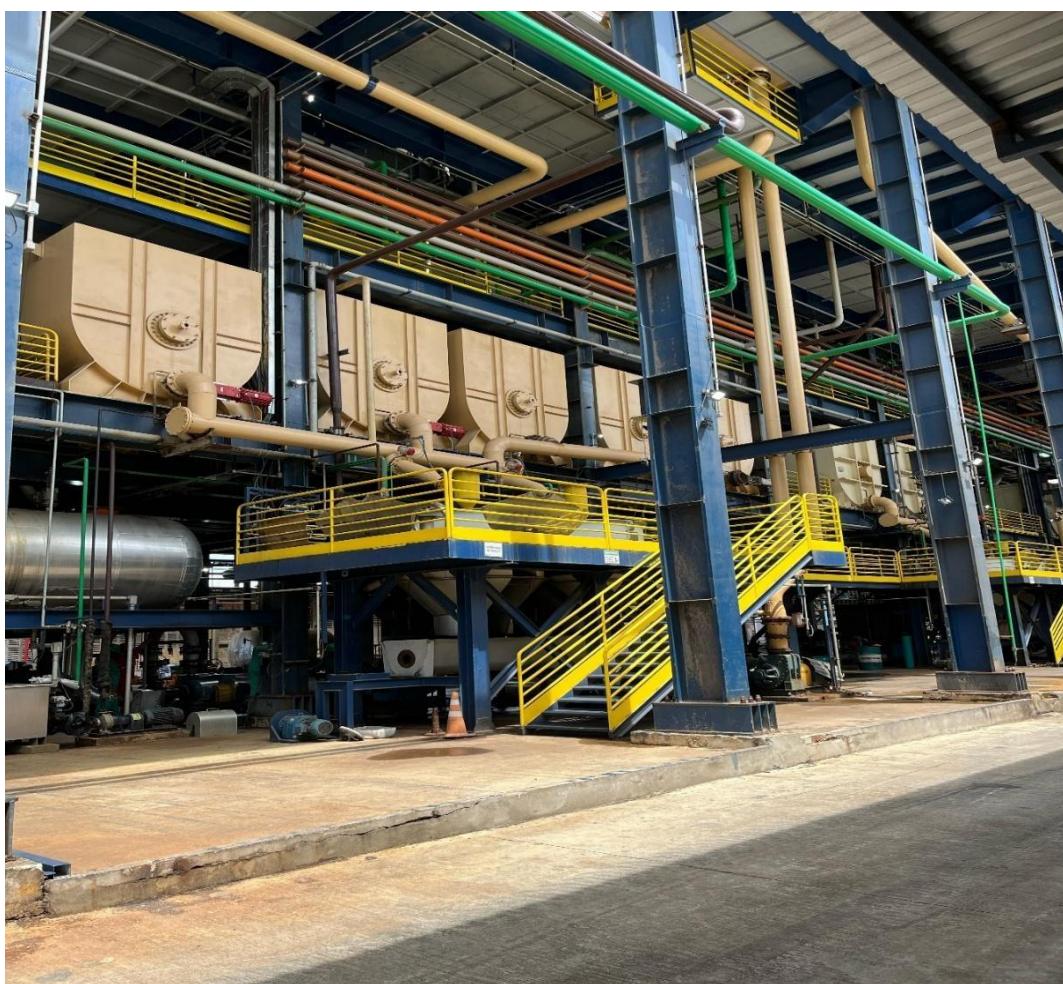
O processo de evaporação contém uma alta criticidade na produção, pois a concentração inadequada de sacarose, pode afetar no processo de cristalização. Além disso,

sistemas mais modernos buscam reduzir o consumo de energia e minimizar a emissão de poluentes, tornando a produção mais sustentável (REIN, 2007).

Após a etapa de evaporação, inicia-se o processo de cristalização, nela o xarope concentrado é resfriado e agitado em tachos a vácuo, facilitando a formação de cristais de açúcar. A cristalização ocorre com a adição de sementes de açúcar, induzindo a formação dos cristais, sendo rigorosamente controlado para que se obtenha cristais homogéneos e de tamanho adequado (MACHADO, 2012).

Na figura 8, é apresentado uma foto dos cristalizadores de açúcar, onde é feito o processo de formação dos cristais de açúcar.

Figura 8 - Cristalizadores



Fonte: Próprio Autor (2025).

Após o processo de cristalização, a massa cozida (Cristais e Mel) passam pelo processo de centrifugação, que separam os cristais do mel. O açúcar separado é lavado com

vapor para a remoção de impurezas, e na sequência, seco em leitos fluidizados ou em tambores rotativos, garantindo um açúcar com baixa umidade (MACHADO,2012).

O açúcar bruto extraído do processo de centrifugação pode passar por um processo de refinamento, a depender de sua destinação ou da configuração de vendas da empresa, ele é dissolvido novamente em água quente, filtrado e recristalizado para remoção de impurezas, obtendo assim, um novo açúcar mais fino e com alta taxa de pureza. O produto final é embalado e armazenado em locais secos e ventilados para evitar a absorção de umidade e manter sua qualidade (MACHADO, 2012).

Na figura 9, é apresentado uma foto da vista geral de uma fábrica de açúcar, para uma melhor compreensão dos processos já apresentado.

Figura 9 - Fábrica de açúcar



Fonte: Próprio Autor (2025).

O processo de fabricação do açúcar a partir da cana-de-açúcar passa por diversas etapas, desde a extração do caldo até o refinamento final, cada etapa é fundamental na garantia da eficiência e na redução dos impactos ambientais. O desenvolvimento de novas tecnologias buscando sustentabilidade e preservação do meio ambiente será essencial na garantia da longevidade do setor (MACHADO, 2012).

### **3.2.5 PRODUÇÃO DE ETANOL**

O processo de produção do Etanol inicia-se na fermentação do caldo extraído nas moendas/difusores, a fermentação alcoólica é uma etapa crucial na produção do etanol, pois é neste momento que os açúcares presentes no caldo da cana são convertidos em álcool etílico e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) por meio da adição de leveduras “*Saccharomyces cerevisiae*” (microrganismos fermentadores) (PACHECO, 2010).

O processo ocorre em tanques de fermentação, sua alimentação pode ser por batelada, alimentada ou contínua. Na Fermentação por batelada, o meio fermentativo é preparado, inoculado com as leveduras (microrganismos fermentadores) e deixado fermentar até o consumo total dos açúcares presentes. Já na fermentação alimentada e contínua, a adição de substrato ocorre de maneira controlada para extrair o máximo do rendimento e a produtividade de etanol (PACHECO, 2010).

Para garantir a máxima eficiência no processo de fermentação, é crucial controlar os parâmetros como, temperatura, pH e o teor de nutrientes do meio. A temperatura de trabalho ideal está na faixa de 28 °C a 34 °C, o pH na faixa de 4,0 e 5,0, evitando a proliferação de microrganismos indesejáveis ao processo. Além disso, a levedura é reaproveitada reduzindo os custos e aumentando a eficiência do processo (CRUZ, 2019).

Ao final do processo de fermentação, é gerado um líquido chamado de vinho fermentado ou vinho alcoólico, com um teor de álcool entre 7% e 10%, este vinho é enviado para o processo de destilação, onde há a separação do etanol (CRUZ, 2019).

A destilação é o processo pelo qual o etanol é separados das outras substâncias no vinho fermentado. Este processo acontece nas colunas de destilação, o álcool é concentrado até atingir teor superior a 90%, esta etapa é baseada na diferença nos pontos de ebulição entre as substâncias presentes no vinho (CRUZ, 2019). É nesta etapa que é formada a vinhaça, classificada como resíduo industrial.

Os produtos finais são o etanol neutro, etanol hidratado (cerca de 96% de pureza), etanol anidro (cerca de 99% de pureza) e o “álcool” 70 (Etanol utilizado na assepsia higiénica) (CRUZ, 2019).

Na figura 10, é apresentado uma imagem geral de uma fábrica de álcool, para melhor contextualização dos processos apresentados, em destaque vemos as torres de destilação onde acontece o processo de produção do etanol.

Figura 10 - Destilaria de Etanol da cana-de-açúcar



Fonte: Próprio Autor (2025).

Abaixo será apresentado um balanço do processo de industrial de uma usina sucroalcooleiro da região nordeste, explicitando os principais parâmetros, gerenciáveis no processo, a fim de exemplificar e elucidar como funciona tais controles.

Os dados em questão foram retirados de um relatório gerencial diário, mostrando um dia de produção na safra 2024/2025.

- Quantidade de cana moída: 5.329,36 toneladas
- Moagem média horária: 282,275 toneladas/hora
- ART cana: 17,06%
- Percentagem de cana para açúcar: 90%
- Percentagem de cana para álcool: 10%

- Quantidade efetiva de cana para açúcar: 4.796,42 toneladas
- Quantidade efetiva de cana para álcool: 532,94 toneladas
- Quantidade de açúcar produzido: 261,55 toneladas
- Quantidade de álcool hidratado produzido: 45,374 m<sup>3</sup>
- Embebição % cana: 21,203%
- Embebição % fibra: 129,1514%
- Vapor Produzido: 4.532 toneladas/hora
- Kg de vapor por tonelada de cana: 850,39 kg
- Impurezas minerais na matéria-prima (cana-de-açúcar): 13,4 kg por tonelada de cana
- Sacarose na cana (polarização): 19,42%
- Fibra presente na cana: 17,06%
- Bagaço kg por tonelada de cana: 348,98 kg/tonelada
- Fibra do bagaço: 47,51%
- Umidade do bagaço: 49,68%
- Produção de torta de filtro por tonelada de cana: 31 kg/t
- Kg de açúcar por tonelada de cana: 110,27 kg/t
- Litros de álcool por tonelada de cana: 135,68 l/t
- Litros de vinhaça produzidos por litro de álcool: 11,98 L/L

### **3.2.6 RESÍDUOS DA INDÚSTRIA SUCRALCOOLEIRA**

A indústria sucralcooleira, gera uma serie de resíduos que podem ser reaproveitados, seu manejo inadequado gera uma serie de impactos socioambientais, seus principais usos são na própria cadeia produtiva da cana-de-açúcar, garantindo assim sua sustentabilidade e sua economia circular.

O bagaço da cana é os principais resíduos gerados do processo de transformação da indústria da cana-de-açúcar. Ele é utilizado como fonte de energia na cogeração de eletricidade nas usinas, aumentando a gama de produtos gerados. Além disso, pode ser

empregado na produção de papel, ração de animal e na obtenção do etanol de segunda geração (2G) (SIQUEIRA FILHO, 2019).

A Vinhaça ou Vinhoto, é um resíduo líquido gerado na destilação do etanol, possui uma alta quantidade de matéria orgânica, podendo ser utilizado como fertilizante na fertirrigação, fornecendo nutrientes essenciais às lavouras, quando aplicado dentro das normas ambientais (FIALHO, 2019).

A torta de filtro é um resíduo rico em matéria organiza e minerais. Utilizado como adubo nas lavouras de cana-de-açúcar, contribui para a melhoria na qualidade do solo (MORAIS; COSTA, 2012).

As cinzas geradas na queima do bagaço nas caldeiras, são utilizadas pela indústria cimenteiras, na fabricação de cimentos, alguns tipos de materiais de construção, ajudando na redução do descarte e criando a economia circular (MATOS, 2021).

### **3.3 VINHAÇA**

A vinhaça é um resíduo industrial de etanol, derivado da destilação do licor após a sua fermentação dos açúcares, também conhecida como restilo ou vinhoto. Apresenta uma alta quantidade de DQO (demanda química de oxigênio) e DBO (demanda biológica de oxigênio), além de um pH ácido, contribuindo assim para seu alto teor poluente. A vinhaça também é produzida da destilação do caldo da beterraba, sorgo, dentre outros (WIKIE et. al., 2000).

A vinhaça tem como características o poder poluente, cerca de 100 vezes maior que o esgoto doméstico, possui uma alta carga orgânica, corrosividade elevada, além de uma elevada temperatura na saída da destilaria, por isso, é considerada prejudicial a fauna e a flora, além dos lençóis freáticos. (Freire & Cortez, 2000).

Na Tabela 2, é apresentado a composição físico-química da vinhaça, com destaque para a alta carga de DQO e DBO, presentes independente da fonte de origem da matéria-prima, seja do caldo, do melaço (massa cozida que sobra do processo da fabricação do açúcar) ou da mistura dos dois.

Tabela 2 - Características físico-química da vinhaça proveniente de diferentes fontes do processo.

Parâmetro	Melaço	Caldo	Mistura
pH	4,2 - 5,0	3,7 - 4,6	4,4 - 4,6
Temperatura (°C)	80 - 100	80 - 100	80 - 100
DBO (mg/l O <sub>2</sub> )	25.000	6.000 - 16.500	19.800
DQO (mg/l O <sub>2</sub> )	65.000	15.000 - 33.000	45.000
Sólidos totais (mg/l)	81.500	23.700	52.700
Material volátil (mg/l)	60.000	20.000	40.000
Material Fixo (mg/l)	21.500	3.700	12.700
Nitrogênio (mg/ 1 N)	450 - 1.600	150 - 700	480 - 710
Fósforo (mg/l P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	100 - 290	10 - 210	9 - 200
Potássio (mg/ 1 K <sub>2</sub> O)	3.740 - 7.830	1.200 - 2.100	3.340 - 4.600
Cálcio (mg / L CaO)	450 - 5.180	130 - 1.540	1.330 - 4.570
Magnésio (mg/ 1 MgO)	420 - 1.520	200 - 490	580 - 700
Sulfato (mg / 1 SO <sub>4</sub> )	6.400	600 - 760	3.700 - 3.730
Carbono (mg/ 1 C)	11.200 - 22.900	5.700 - 13.400	8.700 - 12.100
Relação C/N	16 - 16,27	19,7 - 21,07	16,4 - 16,43
Material Orgânico (mg/l)	63.400	19.500	38.000
Outras Substâncias (mg/l)	9.500	7.900	8.300

Fonte: (FREIRE & CORTES 2000)

A composição da vinhaça a base da cana-de-açúcar depende da fonte do mosto, da fermentação e da destilação, assim como a variedade da cana-de-açúcar.

A matéria orgânica é a maior parte da composição da vinhaça, formada basicamente de ácidos orgânicos, e por cátions K, Ca e Mg, presentes em menor quantidade, provenientes do mosto do processo industrial. Quando sua origem parte do mosto do melaço (mel proveniente do processo de fabricação de açúcar, destinado para destilaria), apresenta maiores concentrações orgânicas, K, Ca e Mg, quando comparado ao mosto do caldo da cana-de-açúcar (caldo enviado direto para a fabricação de álcool).

De acordo com Souza (2018), a cada 1 litro de etanol produzido, são gerados de 10 a 14 litros de vinhaça como resíduos deste processo, mostrando um alto volume e acentuado a necessidade de um descarte correto. Dados da CONAB (2024), de novembro de 2024, trazem uma estimativa de produção de etanol para a safra 2024/2025 no brasil na casa de 28,856 bilhões de litros de etanol, isso representativa uma geração de resíduos entre 288,56 a 403,984 bilhões de litros de vinhaça.

Diante desse fator, faz-se necessário uma destinação adequada a este resíduo, uma

das maneiras é o tratamento biológico deste resíduo surge como uma alternativa ambiental e econômica uma vez que se pode gerar um biocombustível a partir deste tratamento. A vinhaça é gerada após a retificação e a destilação na produção de etanol.

A temperatura da vinhaça varia entre 65 °C a 107 °C, a depender do processo, com um pH entre 3 e 5, o que também depende das condições de cultivo e do manejo da cana-de-açúcar.

A vinhaça possui uma alta concentração de sólidos voláteis e um DQO significativo, este DQO é a quantidade necessária de oxigênio para decompor quimicamente uma matéria orgânica, (BUDIYONO *et al.*, 2014). Os sólidos totais na vinhaça variam entre 63.000 a 79.000 mg/L, já algumas literaturas trazem valores na casa de 100.000 mg/L (SYAICHURROZI, 2016). Devido a todos esses fatores a vinhaça não podem ser descartados no meio ambiente (rio, mananciais, mares, solo), pois seu elevador DQO reduz a concentração de oxigênio, causando um desequilíbrio ambiental ao ecossistema.

A CESTEB (2015), traz uma norma técnica de número P4.231, com destaque para as especificações para armazenamento, transporte e aplicação no solo, abaixo temos os principais itens:

- A vinhaça não pode ser aplicada nas Áreas de Preservação Permanente – APP; ;
- A área de aplicação da vinhaça deverá estar há no mínimo 6 metros de Áreas de Preservação Permanente – APP;
- A vinhaça não pode ser aplicada em áreas de proteção de poços regularmente definida ou a menos de 100 metros de distância dos poços de abastecimento;
- O local de aplicação da vinhaça não poderá estar na área de domínio de ferrovias e rodovias federais ou estaduais;
- A área de aplicação da vinhaça deverá estar há no mínimo 1 km de centros urbanos;
- A profundidade no nível d'água do aquífero livre, no momento da aplicação, dever ser no mínimo 1,50 m;
- Os tanques de armazenamento de vinhaça deverão ser impermeabilizados com geomembrana impermeabilizante ou outra técnica igual ou superior de efeito.

Uma das possíveis técnicas para o tratamento ecológico da vinhaça, consiste no seu aproveitamento para geração de biogás, através da digestão anaeróbica, a matéria orgânica presente na vinhaça é convertida em gás, com alto potencial energético e o líquido que sobra pode ser utilizado para a fertirrigação, pois seus níveis de potássio, cálcio e outras

substâncias inorgânicas são concentradas, tornando-a em biofertilizante.

### **3.4 BIOGÁS**

O biogás é um biocombustível renovável oriundo de misturas gasosas, obtido por meio da digestão anaeróbica da matéria orgânica, apresenta-se como uma ótima alternativa sustentável para a geração de energia e o tratamento de resíduos. Sua composição varia conforme a matéria-prima, sendo composto em sua grande maioria por metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (LIRA, 2021).

A utilização do biogás expandiu-se globalmente, pois é adequado para substituir os combustíveis fósseis e ajuda a reduzir as emissões de gases com efeito de estufa. Relacionado à adoção de tecnologias de produção e purificação, tem sido permitido seu uso em diversos setores como indústria, rural e transporte (POVEDA, 2014).

Com uma oferta gigantesca de resíduos orgânicos que podem ser aproveitados para sua obtenção, os principais resíduos hoje utilizados são, resíduos urbanos, resíduos agrícolas, resíduos industriais, tal como a vinhaça objeto de estudo desta pesquisa. O reaproveitamento destes são determinantes não apenas para a geração de energia, como também para reduzir a emissão dos gases de efeito estufa (NAKASHIMA, 2018).

Os resíduos agrícolas, em especial os dejetos da agropecuária são em sua grande maioria, os mais utilizados na produção de biogás, pois possuem uma alta carga de matéria orgânica, um grande exemplo é o esterco bovino, pois contem uma grande quantidade de material biodegradável, sendo o mais utilizado em propriedades rurais (POVEDA, 2014). Também ganha destaque os resíduos gerados pela agroindústria, como o setor sucroalcooleiro, através da vinhaça, bagaço e torta de filtro, devido ao elevado potencial bioenergético.

Na figura 11, é apresentado um biogestor tipo lagoa, amplamente utilizado nas propriedades rurais, para a produção de biogás de maneira familiar.

Figura 11 - Biodigestor em propriedade rural



Fonte: G1(2021) apud SALES (2025).

O resíduo Sólido Urbanos (RSU) tem uma importante parcela hoje na produção de biogás no país, principalmente em aterros sanitários. O biogás gerado nesses aterros, também chamado de biogás de aterro, pode ser aproveitado para geração de eletricidade e calor, com a implantação de tecnologias, tem se tornado um ponto estratégico em todo mundo para seu aproveitamento e mitigação de emissões de gases que causam o efeito estufa (NAKASHIMA, 2018).

Na Figura 12, é apresentado uma imagem da planta de biogás da usina cocal no Estado de São Paulo, onde o biodigestor utilizado é o do tipo lagoa.

Figura 12 - Vista de cima da Planta de Biogás Usina Cocal – SP



Fonte: VITAL (2024)

A produção de biogás ocorre por meio da biodigestão anaeróbica da matéria orgânica, acontece em 4 etapas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Através deste processo, resulta em um gás metano com concentração variando entre 50% a 75%, a depender da origem do substrato (POVEDA, 2014). Na tabela 3, é apresentado os percentuais de cada componente presente no biogás.

Tabela 3 - Composição do biogás

Gases	Percentagem (%)
Metano (CH <sub>4</sub> )	50 – 80
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	25 – 40
Nitrogênio (N)	0,5 – 2,5
Oxigênio (O)	0,1 – 1
Ácido sulfídrico (H <sub>2</sub> S)	1 – 2
Hidrogênio (H)	1 – 2

Fonte: COELHO et al., (2004) *apud* POVEDA (2014).

O biogás tem algumas aplicações importantes, como para geração de eletricidade, geração de calor e como biocombustível veicular, após passar por um processo de purificação para remoção das impurezas e concentração do gás metano (POVEDA, 2014). Além desta aplicação, o resíduo remanescente do processo, pode ser utilizado como biofertilizante, diminuindo os custos com insumos agrícolas.

Quando utilizados em sistemas de cogeração, o biogás pode ser utilizado como combustível em motores a combustão interna gerando eletricidade e calor, com isso melhorando a eficiência energética do sistema de cogeração utilizado amplamente em planta de tratamento de esgoto e resíduos indústrias.

O biogás apresenta-se como uma solução extremamente viável para a sustentabilidade dos sistemas de geração de energia, entretanto sua viabilidade econômica depende de incentivos econômicos de políticas públicas que promovam a sua instalação e isenção de impostos.

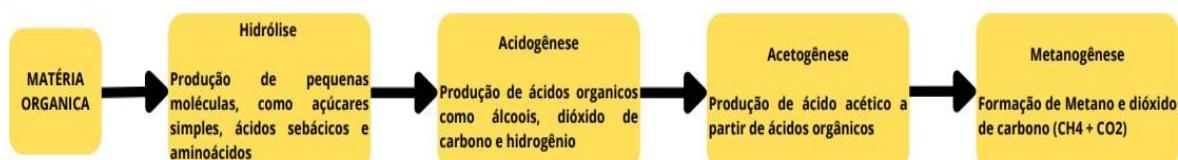
### 3.5 DIGESTÃO ANAERÓBICA

A digestão anaeróbica é um processo biológico no qual bactérias degradam matérias orgânicas na ausência de oxigênio, neste processo é produzido um gás, chamado de biogás, com seu componente principal sendo o metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), também produz um resíduo semiliquido chamado de digestato que pode ser utilizado como biofertilizante. Cada dia mais esta tecnologia tem se tornado realidade, devido a suas vantagens de econômicas e ambientais, contribuindo para diminuição dos gases do efeito estufa (CHERNICHARO, 2007).

A digestão anaeróbica acontece em 4 etapas, **hidrólise**, onde as moléculas maiores de carboidratos, lípideos e proteínas são quebradas em moléculas menores, **acidogênese**, conversão dos compostos menores da etapa da hidrólise em ácidos orgânicos dióxido de carbono, hidrogênio e alcoóis, **acetogênese** transforma os produtos intermediários em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono, e por fim, **metanogênese** que converte o acetato e hidrogênio em metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (LIRA, 2021).

No estudo de LIRA (2021), o autor traz uma representação esquemática das etapas da digestão anaeróbica, apresentado na figura 13.

Figura 13 - Etapas de produção do biogás na digestão anaeróbica



Fonte: Adaptado de LIRA (2021) apud SALES (2025)

### 3.6 FATORES QUE INFLUENCIAM A PRODUÇÃO DE BIOGÁS

A eficiência na produção do biogás sobre influencia de alguma condições determinantes para que as bactérias responsáveis pelo processo de digestão anaeróbica,

atuem de maneira a converter a maior de matéria orgânica em biogás.

O primeiro fator é a temperatura, Lira (2021) traz em seu estudo que a temperatura tem uma influência direta na digestão anaeróbica, uma vez que, os micro-organismos responsáveis pela digestão, podem aguentar apenas pequenas variações de temperaturas. A digestão pode ocorrer em três faixas, a psicrófila ( $<20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), mesófila ( $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e termófila ( $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

O segundo fator, exposto por LIRA (2021), é o tempo de retenção hidráulica, NAKASHIMA (2018), fez varias simulações para o TRH, comprovante que este fator influênciam no crescimento dos micro-organismos responsáveis pela digestão da matéria orgânica.

O terceiro fator, é o pH, NAKASHIMA (2018), mostra que o substrator para sua maior eficiência de produção, precisa esta numa faixa de trabalho entre 6,5 e 7,5 na escala de pH. Outro fator de importante influência é a carga orgânica volumétrica, uma alta COV, pode levar à acidificação do meio inibindo a etapa da metanogênese.

### **3.7 TIPOS DE BIOGESTORES**

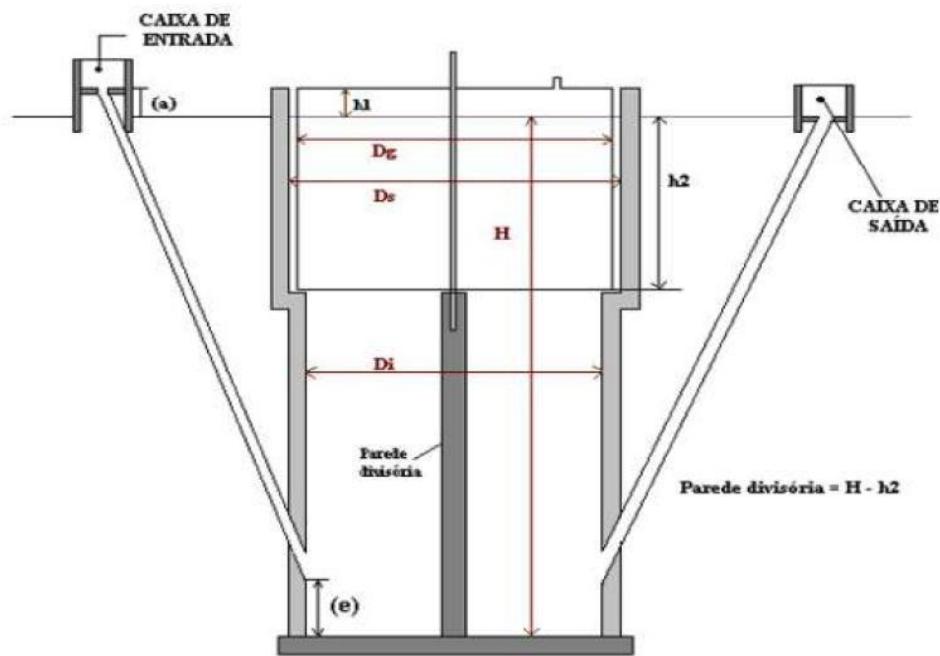
Os biodigestores são dispositivos projetados para que as decomposições dos resíduos orgânicos ocorram em condições ideais, este processo ocorre na ausência total de oxigênio, em um sistema isolado do ar atmosférico. Nestas condições, existe a proliferação dos micro-organismos específicos, acelerando a decomposição da matéria orgânica. Tais dispositivos podem operar com alimentação continua ou por bateladas, dependendo do tipo de substrato, da localização (LIRA, 2021).

#### **3.7.1 BIODIGESTOR INDIANO**

O biodigestor de modelo indiano permite a fermentação de maneira mais rápida, pois dificulta a variação de temperatura quando comparado com outros modelos de biodigestores. É composto por uma campânula móvel, que pode ser fabricada de fibra ou ferro, deslocando-

se verticalmente proporcional a quantidade e o consumo do biogás. Este modelo, se destaca pelo baixo custo e por sua construção simplista (LIRA, 2021). A Figura 14, é apresentado a estrutura do biodigestor indiano.

Figura 14 - Biodigestor indiano



Fonte: LIRA (2021).

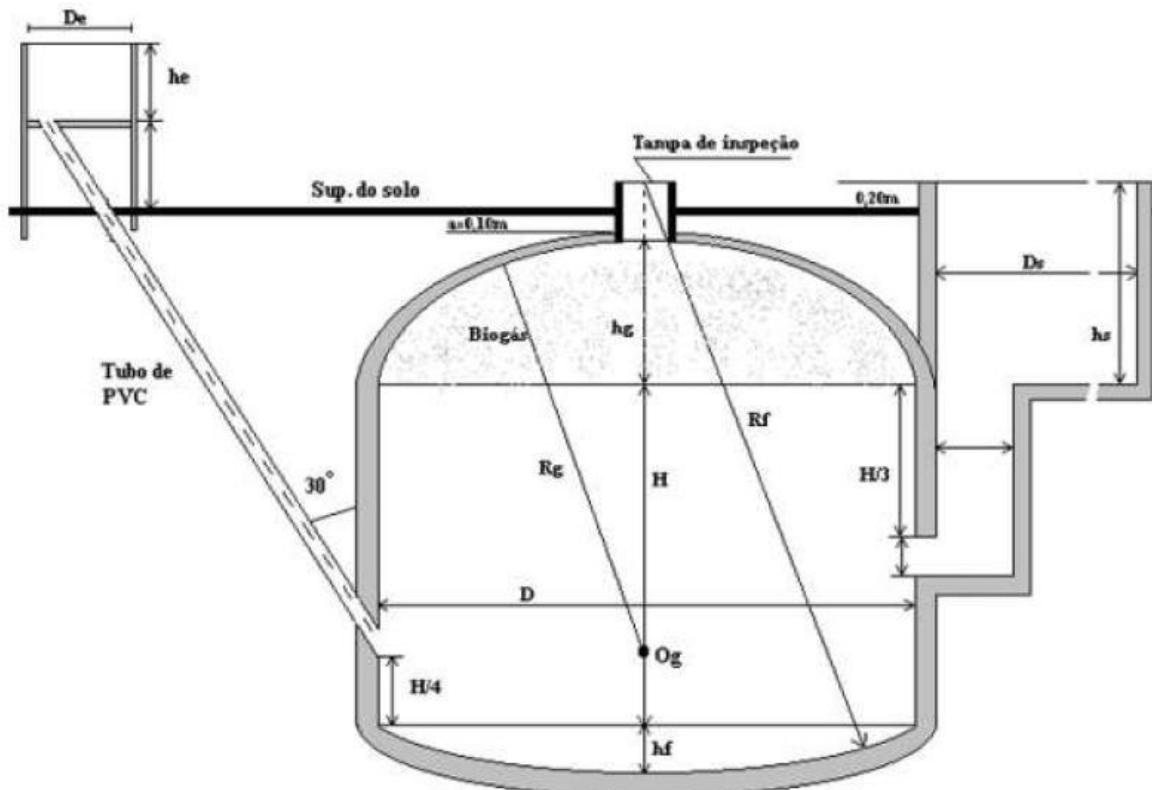
### 3.7.2 BIODIGESTOR CHINÊS

O biodigestor chinês tem um funcionamento parecido com uma prensa hidráulica, onde o aumento da pressão interna é devido ao acúmulo de biogás no seu interior, o que resulta em uma movimentação no efluente em direção a caixa de saída, proporcionando um alívio na pressão interna (LIRA, 2021).

Esse modelo é composto por uma câmara cilíndrica feita de alvenaria, com o teto em um formato de domo, sendo impermeável para que não haja contaminação externa, região está dedicada ao acúmulo de biogás (SALES, 2025).

A figura 15, é apresentado a estrutura do biogás chines.

Figura 15 - Biodigestor Chinês



Fonte: LIRA (2021).

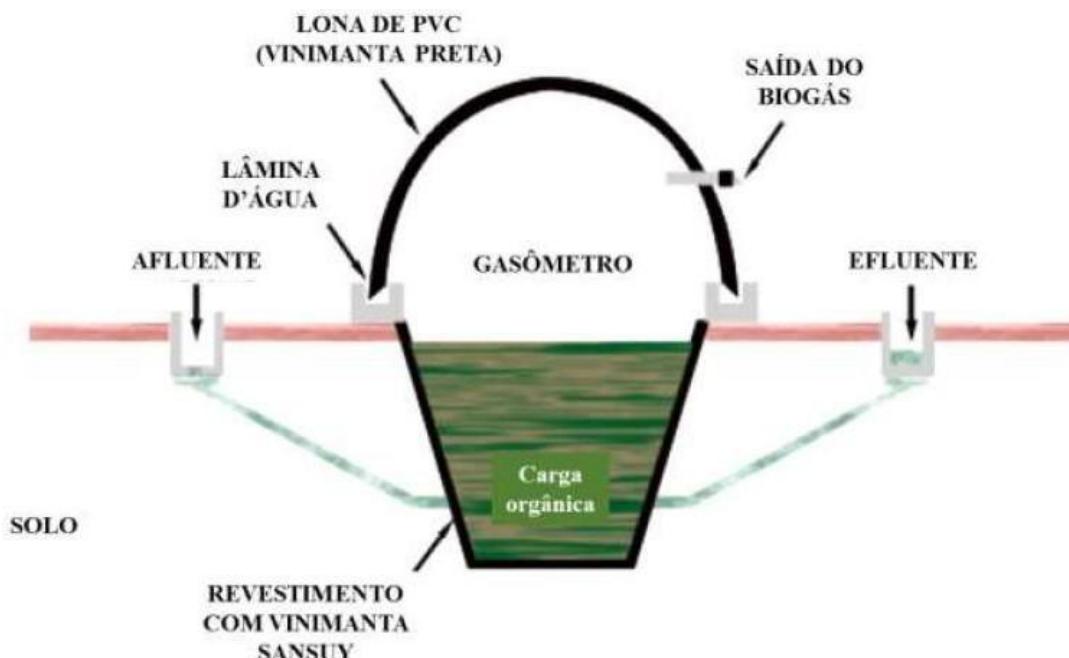
### 3.7.3 BIODIGESTOR CANADENSE

O biodigestor canadense, também conhecido como biodigestor de lagoa, ocupa um espaço físico maior que os demais, por ter uma largura maior que sua profundidade, sua principal vantagem é o maior controle da temperatura interna, devido a sua exposição ao sol, faltando o equilíbrio térmico com o meio, e aumentando a produção de biogás (SALES, 2025).

Esse aparelho é composto de um espaço destinado ao gás, através de uma manta flexível que infla, conforme o gás é produzido, para que não haja vazamentos comprometendo a eficiência da geração, instala-se uma vedação do tipo lâmina d'água onde

a ponta da manta fica imersa (SALES, 2025). Na figura 16, temos uma representação do biodigestor canadense e todos os seus componentes.

Figura 16 - Biodigestor Canadense



Fonte: LIRA (2021).

### 3.7.4 BIODIGESTOR UASB

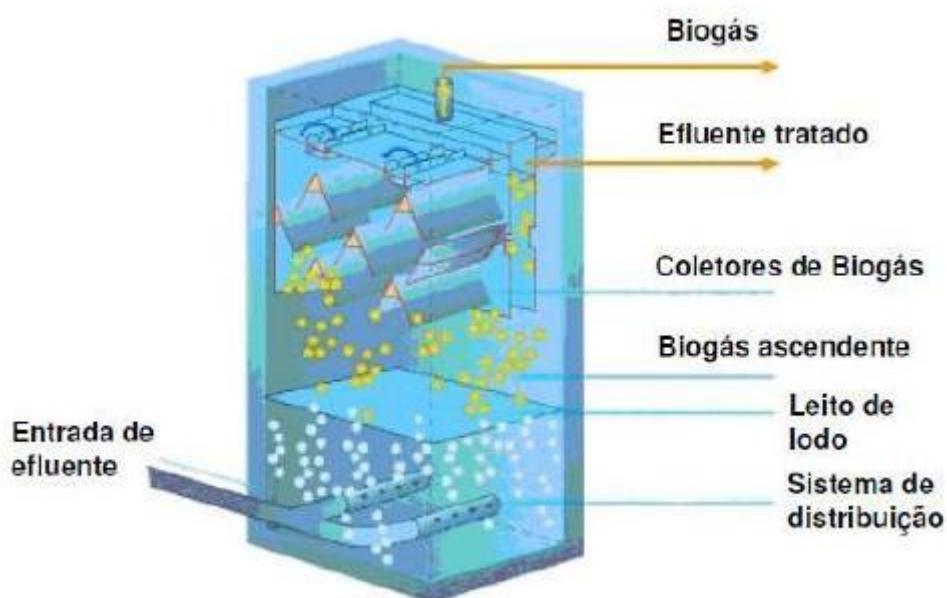
O reator UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), também chamado de reator anaeróbico de fluxo ascendente com manta de lodo. Ele opera sobre condições anaeróbica, destacando-se pela alta eficiência na remoção da carga orgânica, gerando biogás como subproduto. Esta tecnologia é altamente empregada, principalmente para o tratamento da vinhaça, resíduo gerado na indústria sucroalcooleira (POVEDA, 2014).

O funcionamento do biodigestor UASB, ocorre através da entrada do efluente pelo fundo do reator em um fluxo ascendente por meio da manta de lodo, região onde ocorre a digestão anaeróbica. As bactérias presentes no lodo, degradam as matérias orgânicas,

presente no efluente, produzindo metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (POVEDA, 2014).

Sua principal vantagem está na alta taxa de remoção de DQO, uma baixa produção de lodo excedente e fácil captação do biogás gerado. Além disso, apresenta um TRH relativamente baixo, tornando uma excelente alternativa para o tratamento de efluentes urbanos e industriais (POVEDA, 2014).

Figura 17 - Biodigestor UASB



Fonte: POVEDA (2014).

### 3.8 EXERGIA

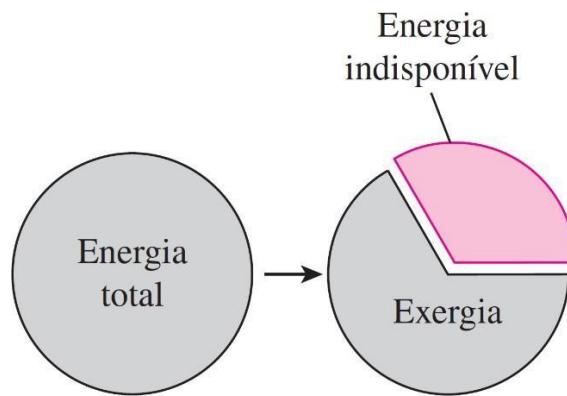
A exergia é um conceito fundamental para a termodinâmica aplicada, sendo como a máxima quantidade de trabalho que pode ser obtida quando uma massa é trazida para o estado de equilíbrio termodinâmico dos componentes do meio ambiente. Ou seja, de maneira leiga, é a capacidade de produzir um efeito útil. Diferentemente da energia, a exergia pode ser destruída devido às irreversibilidades dos processos reais (KOTAS, 2013).

Segundo Shapiro (2013), definiu a exergia como sendo o máximo trabalho teórico possível a ser atingido por um sistema térmico em referência a um estado de equilíbrio ou estado morto.

O estado morto, ou também conhecido por estado de equilíbrio, acontece quando o sistema atinge o equilíbrio completo com sua vizinhança. Isto significa, que temperatura, pressão, velocidade, altura e composição química se igualam às condições do ambiente em que o sistema está inserido. Nesse estado, não há troca de energia ou matéria entre o sistema e a vizinhança, tornando impossível qualquer possibilidade de geração de trabalho útil (MEDEIROS NETO, 2018).

Na figura 18, é apresentado uma exemplificação da definição de exergia para melhor compreensão da teoria.

Figura 18 - Exemplificação da definição de exergia



Fonte: ÇENGEL e BOLES (2013) *apud SOUZA (2019)*.

Como a exergia é obtida a partir da segunda lei da termodinâmica, na equação 3.1, estará explicitada abaixo:

$$\frac{dS_{v.c.}}{dt} = \sum m_e s_e - \sum m_s s_s + S_{ger} + \sum \frac{Q_{v.c.}}{T} \quad (3.1)$$

Apresenta a definição da segunda lei, podemos então definir a taxa dos fluxos de exergia do volume de controle, utilizando a equação da taxa de irreversibilidades em função da disponibilidade térmica do sistema, dada pela equação 3.2, temos:

$$I = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot Q - W_{v.c.} + \sum (m_e e_e) - \sum (m_s e_s) \quad (3.2)$$

Aplicando o teorema de Guy-Stodola na equação 3.2, podemos reescreva-la de acordo com a equação 3.3, com isso temos:

$$I = T_0 \cdot [\sum_{ss} (m_s s_s) - \sum_{ee} (m_e s_e) - \frac{Q_{vL}}{T}] \quad (3.3)$$

A exergia pode ser dividida em parcelas, das quais iremos abordar a física, a química, a potencial e a gravitacional. A exergia física de uma substância é o trabalho reversível combinado a mudança de estado inicial com o equilíbrio físico do ambiente, envolvendo interações térmicas e mecânicas (KOTAS, 2013).

A equação 3.4, apresenta a parcela da exergia física, de um sistema térmico:

$$e_x = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (3.4)$$

Onde  $h_0$  e  $s_0$  é a entalpia e a entropia do estado morto ou do estado de equilíbrio do sistema térmico.

A exergia química pode ser entendida como o máximo trabalho teórico gerado pela interação de uma substância com o estado de referência, quando existe uma reação com o ambiente produzindo novos componentes (KOTAS, 2013).

A exergia química para uma mistura pode ser calculada pela equação 3.5, representada abaixo:

$$Ex_{ch} = \dot{n} (\sum_i y_i * \bar{e}_i^{ch,0} + R * T_0 * \sum_i y_i * \ln y_i) \quad (3.5)$$

Onde:

- $\bar{e}_i^{ch,0}$  – Exergia padrão da substância;
- $\dot{n}$  – Quantidade de mols por segundo;
- $y_i$  – Fração Molar da substância;
- $R$  – Constante universal dos gases;
- $T_0$  – Temperatura padrão do estado de referência em Kelvin;

Quando a substância se trata de um combustível, podemos calcular, de acordo com a equação 3.6, representada abaixo:

$$Ex_{ch} = \beta \cdot PCI \quad (3.6)$$

Onde:

$$\beta = 1,401 + 0,1728 * \frac{y_h}{y_c}$$

A exergia cinética é explicitada pela energia cinética adotando a velocidade relativa da superfície da terra como padrão, sendo representada pela equação 3.7.

$$E_{cinética} = \frac{mv_0}{2} \quad (3.7)$$

A exergia potencial, é definida pela energia potencial, quando se tem a superfície da terra como referência, a equação 3.8, define a exergia potencial.

$$E_{potencial} = m \cdot g_0 \cdot Z_0 \quad (3.8)$$

Na maioria dos sistemas, quando analisado, a exergia cinética e potencial são desconsideradas, pois possuem valores irrelevantes em relação aos outros fluxos de exergia do componente.

### 3.9 CUSTO EXERGÉTICO

Com a definição de exergia podemos analisar o custo exergético, é obtido associando um valor monetário à exergia dos fluxos de entrada e saída de um determinado volume de controle. Desta forma, é possível determinar a parcela do custo total associado a cada fluxo exergético do sistema estudado, considerando os insumos e produtos energéticos (BEJAN *et. al.*, 1996).

Para cada fluxo de massa e calor, atribuído a suas taxas de transferências de exergia e fluxos de trabalho, podemos escrever conforme as equações 3.9 a 3.12.

$$C_e = c_e E_e = c_e (\dot{m}_e e_e) \quad (3.9)$$

$$C_s = c_s E_s = c_s (\dot{m}_s e_s) \quad (3.10)$$

$$C_w = c_w W \quad (3.11)$$

$$C_q = c_q E_q \quad (3.12)$$

Onde:

- $C_e, C_s, C_w$  e  $C_q$  – Taxa de custos associados a entrada, saída, trabalho e Calor, respectivamente;
- $E_e, E_s, W$  e  $E_q$  – Fluxos exergéticos associados a entrada, saída, Trabalho e calor, respectivamente;
- $c_e, c_s, c_w$  e  $c_q$  – Custos médios por unidade de exergia, associados a entrada, saída, trabalho e calor, respectivamente;
- $\dot{m}_e, \dot{m}_s$  – Fluxo mássico de entrada e saída do volume de controle.

Representado estas equações, podemos definir o balanço dos custos, no qual representa a soma de todas as taxas de custos associados á todos os fluxos de entrada e saída do volume de controle estudado, com os custos de aquisição, operação e manutenção dos equipamentos analisados. Considerando estes aspectos podemos escrever este balanço de acordo com a equação 3.13.

$$\sum C_{s,n} + C_{w,n} = C_{q,n} + \sum C_{e,n} + Z_n^{CI} + Z_n^{OM} \quad (3.13)$$

Onde:

- $Z_n^{CI} + Z_n^{OM}$  – Representa o custo monetário de aquisição somado ao custo de manutenção e operação, respectivamente;

Na equação 3.5, podemos fazer deduções específicas quando analisamos os componentes do sistema, quando a análise for sobre uma bomba o termo  $C_{w,n}$ , passa por outro lado da igualdade, pois é um equipamento recebendo potência, o  $C_{q,n}$ , passaria para o lado esquerdo da equação quando o componente estiver transferindo calor além das fronteiras do volume de controle (SOUZA, 2019).

Segundo CAVALCANTI (2016), podemos reescrever a equação 3.5, em termos dos custos unitários dos produtos e dos combustíveis, otimizando o custo do equipamento, com isso escrevemos o balanço do custo conforme a equação 3.14.

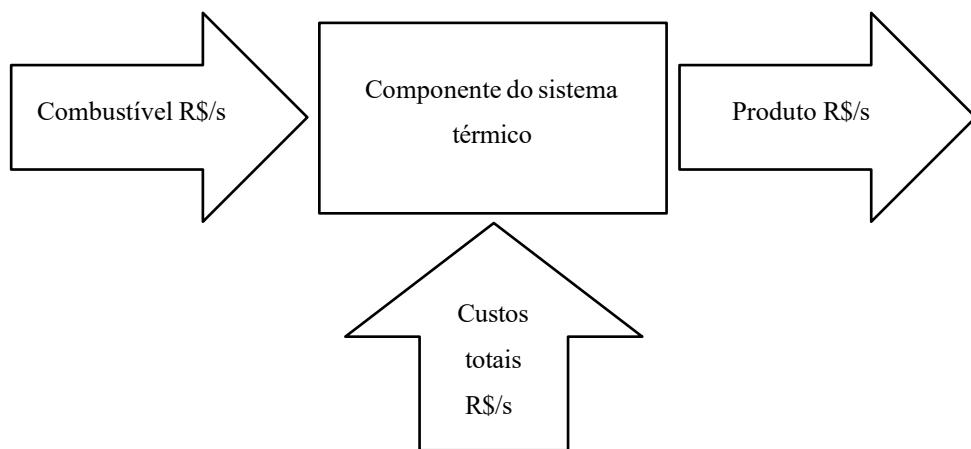
$$C_p = C_F + Z \quad (3.14)$$

Podemos então substituir os termos pelos custos médios por unidade de exergia (R\$/kJ), com isso temos a equação 3.15.

$$c_p E_p = c_F E_F + Z \quad (3.15)$$

Com a determinação desses custos podemos indicar quais pontos do sistema possuem deficiência. A figura 19, exemplifica os custos envolvidos na análise exergoeconômica.

Figura 19 - Custos dos componentes do sistema térmico



Fonte: Adaptado de CAVALCANTI (2016).

Segundo SOUZA (2019), um outro conceito importante para análise dos custos exergético, é a taxa do custo nivelado, que determina uma série de conversão de variáveis

em uma constante financeira, durante um certo intervalo de tempo, portanto, a taxa de custo nivelado é a transformação dos valores variáveis em um valor constante no período de um ano, com isso a taxa de custo nivelado é descrita na equação 3.16.

$$Z_n = Z_n \cdot CRF \cdot \varphi \quad (3.16)$$

Com  $Z_n$ , sendo o custo de aquisição do equipamento (R\$),  $\varphi$  sendo o fator de manutenção e CRF sendo o fator de recuperação de capital, calculado pela equação 3.17.

$$CRF = i \cdot \left( \frac{(1+i)^{n_{anos}}}{(1+i)^{n_{anos}} - 1} \right) \cdot \frac{1}{n_{anos} \cdot n_h \cdot 3600} \quad (3.17)$$

Onde:

- $i$  – Taxa de juros anual;
- $n_{anos}$  – Vida útil dos equipamentos em anos;
- $n_h$  - Número de horas de operação do equipamento por ano;

Outra análise feita para os custos exergético é através da exergia destruída do combustível e produto. Sabendo que, a exergia do produto é igual a soma das exergias do combustível e das perdas, portanto a equação da destruição de exergia pode ser descrita pela equação 3.18.

$$E_D = E_F - E_P \quad (3.18)$$

Podemos reescrever a equação 3.10, em função dos custos associados à destruição de exergia, na equação 3.19.

$$C_D = c_F \cdot E_D \quad (3.19)$$

Segundo BEJAN *et. al.*, (1996), traz outro parâmetro para se analisar, que é a diferença relativa de custos, este parâmetro busca analisar o aumento relativo do custo por unidade de exergia, relacionando o combustível com o produto, servindo também como uma

excelente ferramenta de análise de otimização dos componentes. Em outras palavras o autor quis dizer, que é necessário comparar o valor do custo relativo entre os componentes, aquele que apresentar maior valor, terá uma necessidade de otimização. Com isso a diferença relativa entre os componentes deve ser minimizada, tem-se a equação da diferença dos custos relativos na equação 3.20.

$$r_n = \frac{C_p - C_E}{C_F} \quad (3.20)$$

Os custos podem ser resumidos em dois grupos, o primeiro seria os custos não relacionados à exergia (Operação e manutenção dos componentes) e o segundo seria relacionado com a destruição da exergia (BEJAN *et al.*, 1996). Para esta relação usa-se o fator exergoeconômico buscando conhecer o quanto significativo é cada grupo em comparação ao outro. Este fator é representado por CAVALCANTI (2016), como sendo uma ferramenta útil para analisar qual componente do sistema é economicamente mais viável para investir sua eficiência, com isso temos a equação 3.21.

$$f_n = \frac{Z}{c_{FED} + Z} \quad (3.21)$$

Ao se calcular o fator exergoeconômico de determinado componente e ele apresentar um valor baixo, indica ser necessário uma melhoria na eficiência do equipamento para se ter uma economia nos custos, ou seja, diminuindo a destruição de exergia. Já quando o fator exergoeconômico apresenta um valor alto, indica que é necessário a diminuição nos custos de investimento do componente, quando se analisa a sua eficiência (SOUZA, 2016).

### 3.10 – ANÁLISE EXERGOECONÔMICA

A análise exergoeconômica é a combinação da análise exergética com a avaliação econômica para os sistemas térmicos. Podendo ser utilizada na análise dos custos de diferentes produtos obtidos através de um mesmo sistema (como a geração de biogás da vinhaça, por exemplo), além disso, pode ser utilizado na otimização dos resultados dos KPI's

de cada equipamento do volume de controle estudado (BEJAN *et. al.*, 1996).

Existem dois métodos principais de análise exergoeconômica para avaliação de sistemas térmicos, são TCE – Teoria do Custo Exergético (*Exergetic Cost Theory*) e o método SPECO – Custo Exergético Específico (*Specific Exergy Costing*) (SOUZA, 2016).

### 3.10.1 – TCE – TEORIA DO CUSTO EXERGÉTICO

Os primeiros a utilizarem este método foram LOZANO & VALERO (1993), pensando em formular soluções para o problema de alocação de custos em sistemas térmicos, mas além disso, o método é utilizado para otimização e diagnósticos dos componentes desse sistema.

Esta teoria afirma ter uma contabilidade termoeconômica que liga a termodinâmica, por meio da segunda lei da termodinâmica, com foco principal em quantificar os custos reais dos recursos utilizados em sistema térmico, levando em conta a exergia, que representa a parte útil da energia disponível para a realização e trabalho (LOZANO E VALERO, 1993).

Segundo LOURENÇO (2016), a análise exergoeconômica através do método TCE, tem como base os conceitos de produto, insumo, eficiência e custo exergético unitário. LOZANO (1989), afirma que para determinação dos custos exergético unitário é necessário seguir cinco afirmações, explicitadas a seguir:

1. O custo exergético é uma grandeza que se conserva, o que significa, que significa que para cada componente do sistema térmico, a soma dos custos exergéticos dos fluxos de entrada deve equivaler à soma dos custos exergéticos dos fluxos de saída.

$$\sum_{\text{Entrada}} \text{Custos Exergéticos} = \sum_{\text{Saída}} \text{Custos Exergéticos}$$

2. Para um volume de controle que possui múltiplas entradas e saídas de insumos energético, os custos exergéticos unitários dos fluxos de exergia do combustível

que entram no volume de controle devem ser equivalentes aos custos exergéticos unitários dos fluxos de exergia que saem, conforme a regra dos insumos.

3. O produto de um sistema formado por vários fluxos, o custo exergético será o mesmo para cada um deles, de acordo com a regra do produto.
4. Para os fluxos de exergia associados a perdas externas, devemos associar um custo exergético nulo, pois não haverá utilização posterior.
5. Na ausência de valor externo, o custo exergético dos fluxos que entram no volume de controle é igual a sua exergia.

### **3.10.2 – MÉTODO SPECO**

O método SPECO, consiste numa série de procedimentos para a definição do combustível, produto e equações do custo de um sistema térmico estudado. Estas equações gerais de custos, foi definida por LOZANO E VARELO (1993), são aplicadas ao método SPECO, mas com uma particularidade sobre a exergia analisada separadamente nas suas formas térmicas, mecânica e química.

Segundo Lazzaretto e Tsatsaronis (2006), devolveram um procedimento para a análise dos combustíveis e produtos de componentes dos sistemas térmicos, associando os custos monetários a todos os fluxos de exergia de um determinado sistema de conversão de energia. Os autores, desenvolveram 3 passos, para este procedimento.

1. O primeiro passo consiste na escolha inicial sobre a avaliação dos componentes, podendo considerar a exergia total ou suas subdivisões em exergia térmica, química e mecânica. A separação das formas de exergia aumenta a precisão dos cálculos, porém sua aplicação é recomendada apenas em situações específicas, pois na grande maioria dos casos, não há alteração significativamente dos resultados e exige um maior processamento computacional. Logo após esta

decisão, aplica-se a primeira e a segunda lei da termodinâmica, encontrando os valores de energia e exergia.

2. O segundo passo, é a definição dos combustíveis e produtos. Esses elementos são produzidos com base no objetivo do componente e da fonte de energia necessária para o seu funcionamento. Esta definição deve ser feita considerando o objetivo do componente em análise. Segundo LAZZARETTO e TSATSARONIS (2006), o *produto* é definido como todos os valores de exergia na saída, mais todo aumento de exergia entre a entrada e a saída que concorde com o propósito do componente e o *combustível* é definido como todos os valores de exergia na entrada, mais toda redução de exergia entre a entrada e a saída, menos todo aumento de exergia que não esteja de acordo com o propósito do componente.
3. O último passo, consiste na definição das equações dos custos. Neste trabalho os custos foram abordados na seção 3.8, nas equações 3.9 a 3.12, estabelecendo uma relação entre os fluxos exergéticos e os custos monetários, enquanto a equação (3.13) realiza o balanço de custos para determinado componente. Segundo Lazzaretto e Tsatsaronis (2006), geralmente há  $N_s$  fluxos de exergia saindo de um componente específico, o que resulta em  $N$  variáveis desconhecidas e apenas uma equação referente ao balanço de custos. Dessa forma, torna-se necessário desenvolver  $N_s$  equações auxiliares, formuladas a partir dos princípios P e F.

### 3.10.2.1 - PRINCÍPIO F

Segundo Lazzaretto e Tsatsaronis (2016), Este princípio está relacionado à retirada de exergia de um fluxo dentro do componente analisado, desde que a diferença entre a entrada e a saída desse fluxo seja considerada na definição de combustível. O princípio F estabelece que o custo específico associado à remoção dessa exergia deve corresponder ao

custo específico médio pelo qual a exergia removida foi originalmente fornecida pelo componente anterior ao sistema em análise. Dessa forma, para cada remoção de exergia, obtém-se uma equação auxiliar. Sendo assim, o total de equações auxiliares geradas por esse princípio equivale à quantidade de fluxos de exergia que saem do componente  $N_s$  e que fazem parte da definição de combustível desse sistema.

### **3.10.2.2 – PRINCÍPIO P**

Segundo Medeiros Neto (2018), esse princípio está relacionado ao fornecimento de exergia a um fluxo dentro do componente em estudo. Ele estabelece que cada unidade de exergia fornecida a um fluxo classificado como produto deve ter um custo médio uniforme. Como cada fluxo que recebe exergia corresponde a um fluxo de saída, a quantidade de equações auxiliares resultantes desse princípio será sempre equivalente ao número total de fluxos de exergia que saem do componente, subtraindo-se um, desde que esses fluxos tenham sido definidos como produtos.

## **CAPÍTULO IV**

### **METODOLOGIA**

Esta pesquisa adotou uma abordagem qualitativa, baseada na análise sistemática dos dados sobre análise exergética do biogás da vinhaça e avaliação econômica do biogás da vinhaça. O objetivo principal foi integrar estes dados efetuando uma análise da literatura, extraíndo os dados de dissertações, teses, artigos científicos e publicações, para uma construção coesa, construindo um panorama abrangente e aprofundado sobre a exergoeconomia, contribuindo para o avanço dos estudos nesta área.

A análise de dados da literatura foi conduzida por meio de uma síntese dos principais pontos para o desenvolvimento desta pesquisa, possibilitando é não apenas uma compreensão, mas oferecendo suporte técnico e teórico para as discussões nesta pesquisa.

#### **4.1 – ANÁLISE EXERGETICA**

Os dados da análise exergetica foram extraídos do estudo de NAKASHIMA (2018), todos os dados foram analisados e revisados, alguns pontos com divergência foram corrigidos para que nesta pesquisa os resultados sejam o mais aproximado possível da realidade.

Neste tópico serão explicitados todos os dados que foram extraídos do estudo de referência, bem como suas análises baseadas no que o autor apresentou, a fim de ajudar o leitor na compreensão dos resultados apresentados no próximo capítulo.

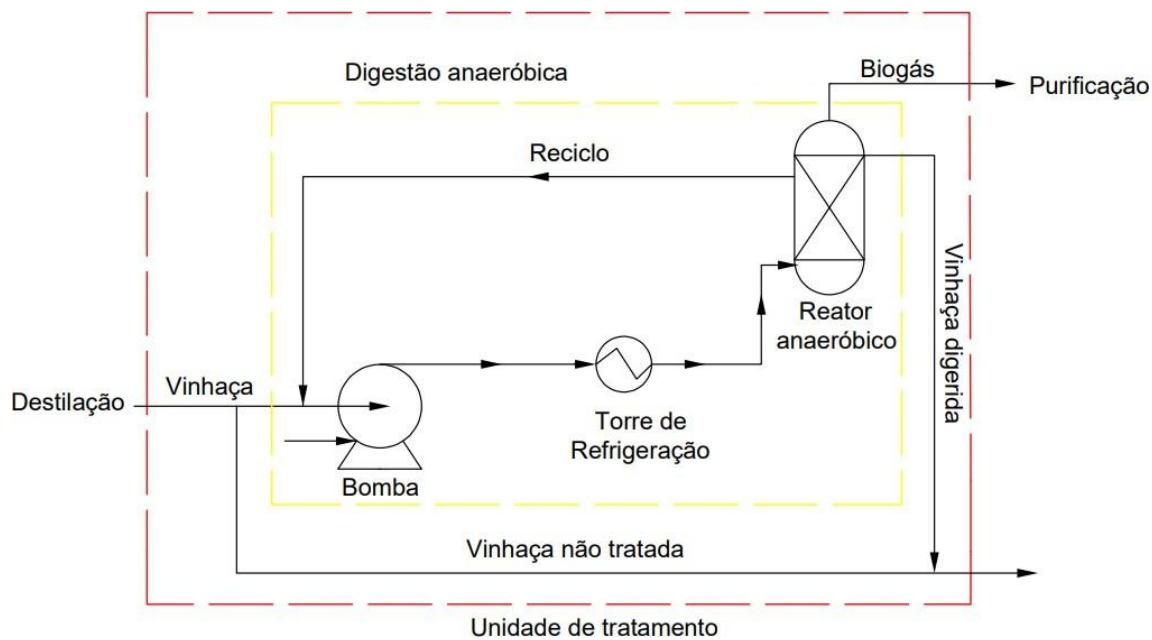
Nakashima (2018), traz em seu estudo, uma simulação feita no aspen plus, no Microsoft Excel e no Matlab, a produção de biogás tendo como matéria-prima a vinhaça,

foram feitas algumas simulações, para uma faixa de COV, para três quantidade de DQO, o estudo em questão ainda analisou exergeticamente 5 configurações para o uso da vinhaça, abaixo será mostrado todas e qual será o nosso foco:

- (1) Fertirrigação
- (2) Concentração parcial e fertirrigação
- (3) Planta de biogás e fertirrigação**
- (4) Concentração parcial e planta de biogás em paralelo
- (5) Concentração parcial e planta de biogás em série

Nesta pesquisa, pegaremos os dados da configuração 3, pois é o princípio do nosso estudo, abaixo na figura 20 mostraremos qual a planta foi analisada.

Figura 20 - Esquema do modelo da unidade de tratamento



Fonte: Adaptado de Nakashima (2018).

Nakashima (2018), definiu dois volumes de controle uma “unidade de tratamento” e o outro como “digestão anaeróbica”, quando toda vinhaça passa por tratamento os volumes de controles são idênticos, nesta pesquisa apenas parte da vinhaça é tratada, são geradas 474 m<sup>3</sup>/h na destilaria, porém, apenas 54,8 m<sup>3</sup>/h são tratadas na digestão anaeróbica.

A configuração da unidade de tratamento consiste em uma bomba, uma torre de

resfriamento, um reator UASB de 5.000 m<sup>3</sup> de volume, a tabela 4 é apresentado os parâmetros iniciais utilizado na simulação para a produção do biogás.

Tabela 4 - Parâmetros iniciais da vinhaça

PARÂMETRO	VALOR
TEMPERATURA INICIAL DA VINHAÇA	90 °C
PRESSÃO	1 atm.
VAZÃO VINHAÇA	474 m <sup>3</sup> /h
VAZÃO VINHAÇA PARA TRATAMENTO	54,8 m <sup>3</sup> /h
DQO	31,5 gO <sub>2</sub> /L

Fonte: Adaptado de Nakashima (2018).

A temperatura de saída da vinhaça na destilaria é 90 °C, com um DQO em 31,5 gO<sub>2</sub>/L, a escolha do DQO pelo autor, se deu com média encontrada na literatura, o valor máximo de 97,40 gO<sub>2</sub>/L e mínimo de 9,20 gO<sub>2</sub>/L.

Apenas parte do volume gerado pela destilaria foi destinado para geração do biogás, o restante foi destinado para a fertirrigação, junto com a vinhaça biodigerida, os parâmetros principais adotados na simulação do ADM1, teve um resultado convertido em um período longo ( $t = 200$  dias), pois buscou simular uma configuração em regime permanente.

A tabela 5, apresenta os parâmetros da vinhaça e dos componentes da digestão anaeróbica.

Tabela 5 - Dados da digestão anaeróbica

PARÂMETRO	VALOR
VOLUME	5000 m <sup>3</sup>
TEMPERATURA DE OPERAÇÃO	35 °C
pH	7,5
TAXA DE RECICLO	15:01
COV	7,7 KgO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> . d

Fonte: Adaptado de Nakashima (2018).

Apresentado os parâmetros inicial, que são importantes para o entendimento de como o NAKASHIMA (2018), chegou nos resultados da exergia, dados estes, que são o ponto de partida para nossa análise exergoeconômica.

A densidade da vinhaça foi fornecida pela Usina Otávio Lages, localizada na cidade de Goianésia, no estado do Goiás, em parceria com a Albioma, operam uma planta de biogás na unidade, inaugurada em outubro de 2023, na tabela 6, são apresentados os dados da densidade. A densidade do biogás foi adotada através do estudo de ZANK *et. al.*, 2020, no para uma composição de 60% de metano.

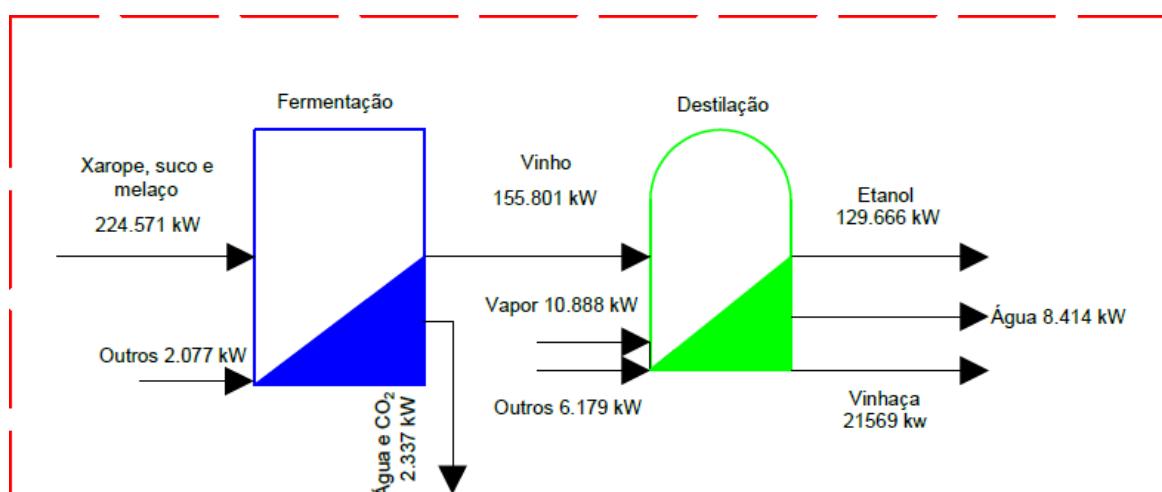
Tabela 6 - Densidades

<b>Componente</b>	<b>Densidade (<math>\rho</math>)</b>	<b>Unidade</b>
Vinhaça Bruta	1,0115	kg/L
Vinhaça Biodigerida	1,0041	kg/L
Biogás	1,2143	kg/Nm <sup>3</sup>

Fonte: Próprio Autor (2025).

A vinhaça possui um grande potencial exergético, em sua maior parcela exergia química advinda de suas substâncias orgânicas e íons, na figura 21, é apresentado o fluxo exergético da fermentação e da destilaria, onde surgem a vinhaça.

Figura 21 - Fluxo de exergia do processo de fabricação do etanol



Fonte: adaptado de Flórez-Orrego *et. al.* Apud Nakashima (2018).

O fluxo de exergia de possui duas entradas, um presente no xarope/suco/melaço, vindo dos tanques de mosto para a fermentação, e um outro fluxo, que se dá através do trabalho da bomba e dos motores elétricos usados no bombeamento para esta etapa do processo. Na saída deste processo, temos dois fluxos exergéticos um presente no vinho que será usado na destilação para obtenção do etanol, e outro em forma de água e CO<sub>2</sub> vindo para o processo de fermentação. Ainda existe um fluxo de exergia destruído na irreversibilidade presente na fermentação.

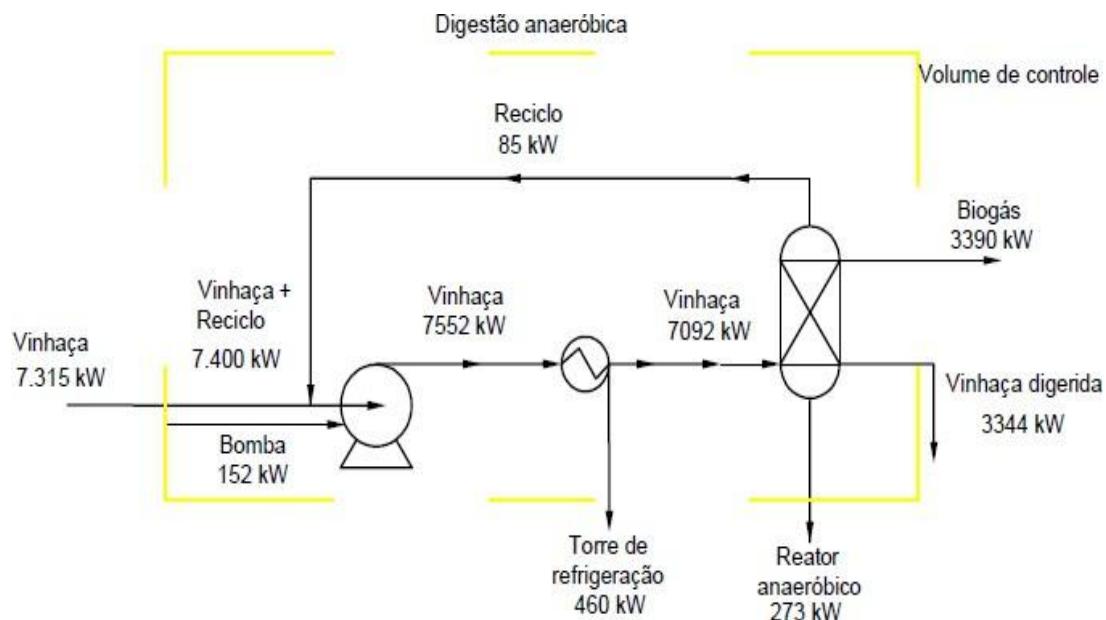
No processo de destilação além do fluxo exergético presente no vinho, temos o fluxo vindo do vapor, dos motores elétricos e bombas usadas na transferência do fluido entre as etapas. Na saída da destilação temos o fluxo exergético presente no etanol, o fluxo presente na água e o fluxo presente na vinhaça. Além disso o processo de destilação destrói uma parte do fluxo de exergia de entrada através das irreversibilidades presente no processo.

Neste cenário, o fluxo de exergia presente na vinhaça é considerado uma destruição se analisado apenas o processo de produção do etanol, visto que a vinhaça é resíduo industrial, que quando não aproveitado para gerar biogás, é utilizado para fertirrigação e este fluxo é “jogado” fora, não aproveitando seu potencial.

Após esta etapa, apresentaremos na imagem x o fluxo exergético para a vinhaça que será utilizada no processo de conversão em biogás, a vazão de vinhaça que entra para o processo de digestão anaeróbica é 54,8 m<sup>3</sup>/h, com um DQO de 31,5 gO<sub>2</sub>/L e um COV de 7,7 KgO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.d.

Na figura 22, é apresentado os fluxos de exergia, para cada componente da planta de biogás, mostrando as entradas e saídas dos fluxos.

Figura 22 - Diagrama de fluxo exergético para a produção de biogás



Fonte: Adaptado Nakashima (2018)

A vinhaça vem com um fluxo de exergia de 7315 kW, ao ser adicionado a vinhaça do reciclo, para o controle de pH, a passa a ter 7400 kW de fluxo de exergia, o reciclo possui um fluxo de exergia de 85kW, ao ser bombeada para a torre de refrigeração é acrescentado os fluxos exergéticos da bomba em 152 kW, ao passar pelo processo de bombeamento o fluxo de exergia passa a ser 7552 kW.

Ao passar pelo processo de resfriamento, na torre de refrigeração, a vinhaça saí com um fluxo de 7092 kW, para o processo de digestão anaeróbica no biodigestor. Após a conversão no biodigestor, o biogás apresenta um fluxo de exergia de 3390 kW e a vinhaça digerida 3344 kW.

Na tabela 7, apresentamos a vazão e o fluxo mássico, de cada ponto apresentado na figura 4.3, estes dados são necessários para a conversão dos fluxos de exergia em exergia específica.

Tabela 7 - Dados de Vazão e Fluxo Mássico

<b>Componente</b>	<b>Vazão</b>	<b>Unidade</b>	$\dot{m}$	<b>Unidade</b>
<i>Vinhaça Bruta + Reciclo</i>	15,22	l/s	16,42	kg/s
<i>Bomba</i>	16,24	l/s	16,42	kg/s
<i>Vinhaça na entrada do resfriamento</i>	16,24	l/s	16,42	kg/s
<i>Vinhaça na Saída do Resfriamento</i>	16,24	l/s	16,42	kg/s
<i>Torre de resfriamento</i>	16,24	l/s	16,42	kg/s
<i>Vinhaça na Entrada do Reator</i>	16,24	l/s	16,42	kg/s
<i>Vinhaça Biodigerida</i>	14,21	l/s	14,27	kg/s
<i>Biogás</i>	178,61	l/s	0,22	kg/s
<i>Reator</i>			0,91	kg/s
<i>Reciclo</i>	1,01	l/s	1,02	kg/s

Fonte: Próprio Autor (2025).

As vazões foram convertidas em Litros/segundo, para facilitar no cálculo do fluxo mássico, a única unidade divergente foi a vazão do biogás, uma que vez que, foram usados como referência 11 Nm<sup>3</sup> de biogás produzido a cada 1 m<sup>3</sup> de vinhaça alimentado no reator, conforme indicado por FERNANDES (2017).

Na tabela 8, são apresentadas as exergia específicas, foram calculadas a partir dos dados coletados no estudo de NAKASHIMA (2018), estes dados serão utilizados nos cálculos dos custos exergéticos e na análise exergoeconômica.

Tabela 8 - Dados da exergia específica

<b>Componente</b>	<b>Exergia específica</b>	<b>Unidade</b>
<i>Vinhaça Bruta + Reciclo</i>	450,77	kJ/kg
<i>Bomba</i>	9,26	kJ/kg
<i>Vinhaça na entrada do resfriamento</i>	460,03	kJ/kg
<i>Vinhaça na Saída do Resfriamento</i>	432,01	kJ/kg
<i>Torre de resfriamento</i>	28,02	kJ/kg
<i>Vinhaça na Entrada do Reator</i>	432,01	kJ/kg
<i>Vinhaça Biodigerida</i>	234,41	kJ/kg
<i>Biogás</i>	15.630,55	kJ/kg
<i>Reator</i>	298,45	kJ/kg
<i>Reciclo</i>	83,42	kJ/kg

Fonte: Próprio Autor (2025).

A destruição da exergia fica caracterizada após cada etapa do processo, na torre de refrigeração representa 545 kW, devido a troca de calor, a vinhaça entre com uma temperatura de 90 °C e sai com uma temperatura 50 °C, o reator tem uma temperatura de operação em 35 °C, com isso a vinhaça sai com uma temperatura superior para que seja usada para manter a temperatura de operação.

Já no reator anaeróbico, a destruição de exergia representa um fluxo de 273 kW, dado pelo lodo e as irreversibilidades, como a vinhaça não é um produto para esta análise e sim um resíduo, é o seu fluxo exergético é considerado uma destruição de exergia, representando um fluxo de 3344 kW, como uma parte dessa vinhaça é usada no reciclo para o controle de pH, a uma taxa de 15:1, a destruição do fluxo exergético é de 85 kW.

Na tabela 9 é apresentado um resumo das destruições do fluxo de exergia para cada componente do sistema e quanto isso representa em percentual na destruição total.

Tabela 9 - Destruição de exergia

<b>COMPONENTE</b>	<b>DESTRUÇÃO DO FLUXO EXERGETICO</b>	<b>% DESTRUÇÃO DO FLUXO EXERGETICO</b>
TORRE DE REFRIGERAÇÃO	545 kW	9%
REATOR ANAERÓBICO	273 kW	9%
RECICLO	85 kW	2%
VINHAÇA DIGERIDA	3344 kW	80%

Fonte: Adaptado Nakashima (2018).

Os cálculos para a destruição de exergia foram feitos e chegando a valores divergentes do autor, pois foram considerados com os valores acima como referência para os cálculos. A vinhaça digerida é quem apresenta o maior fluxo de destruição de exergia, visto que para as condições estudadas, a conversão da matéria orgânica teve uma eficiência baixa.

Na Tabela 10, é apresentado a eficiência global da planta de biogás e a eficiência de conversão da vinhaça em biogás, calculada pelo autor.

Tabela 10 - Eficiência exergética

COMPONENTE	$\eta$
GLOBAL	44,49%
CONVERSÃO	47,80%

Fonte: Adaptado Nakashima (2018)

A eficiência global está representada pelo fluxo de entrada no início do volume de controle (bomba) e a saída do produto final (biogás). A eficiência de conversão é a entrada do fluxo de exergia no reator com a saída do produto (biogás).

## 4.2 - AVALIAÇÃO ECONÔMICA

A avaliação econômica inicia-se com o levantamento dos custos da vinhaça, apesar de ser considerada um resíduo industrial, existe um valor agregado para a sua “produção”, na indústria sucroalcooleiro, costumeiramente, o setor industrial considera os custos de produção apenas associado ao produto final, neste caso o etanol.

Os parâmetros usados neste estudo, é adotado pela Consecana-SP (Conselho dos Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Etanol do Estado de São Paulo), para determinação do custo da vinhaça, os dados fornecidos foram de uma empresa que será chamada de Usina A, devido a confidencialidade das informações.

A usina A, produziu na Safra 2024, um total de 68.000 m<sup>3</sup> de etanol, com uma moagem de 872.000 toneladas de cana, conseguindo uma recuperação de ATR em 119,6 kg, a partir dessas informações, conseguimos calcular quanto de ATR é necessário para se produzir 1 litro de etanol.

Na tabela 11, é apresentado os parâmetros utilizados para o cálculo de formação do custo do litro de etanol, usando o conceito da CONSECANA.

Tabela 11 - Dados de produção do etanol

Parâmetro	Valor	Unidade
Moagem	872.000	t
Etanol produzido	68.000	m <sup>3</sup>
ART por tonelada	119,60	Kg
ATR Safra	104.291.200,00	Kg
ATR por Litro Etanol	1,5337	Kg

Fonte: Próprio Autor (2025).

Com a quantidade de ATR por litro de etanol, conseguimos determinar o custo de produção de 1 litro de etanol através da média nacional adotado pela CONSECANA (2025), que é R\$ 1,1886 por quilograma de ATR, logo a tabela 12, traz o valor do custo do litro de etanol:

Tabela 12 - Composição do custo do Etanol

Parâmetro	Valor	Unidade
ATR por Litro Etanol	1,5337	Kg
Custo do kg do ATR	1,1886	R\$
Custo do Etanol	1,82	R\$

Fonte: Próprio Autor (2025).

Com o custo do Etanol em R\$ 1,82, já determinado, podemos enfim determinar o custo de 1 litro de vinhaça, nesta pesquisa, adotamos que para cada 1 litro de etanol produzido, são gerados 12 litros de vinhaça como resíduo, portanto basta dividir o custo do litro de etanol por 12, para obtermos o valor do custo da vinhaça, com isso temos R\$ 0,15 por litro de vinhaça.

A vazão de vinhaça utilizada na análise energética, foi de 54,8 m<sup>3</sup>/h, então para esta vazão o custo do combustível ficou em R\$ 99.736,00 por hora. Determinado o valor do combustível, podemos começar a determinar os valores dos componentes presente no regime de controle adotado no estudo.

Os valores de investimento inicial da bomba, se deu através de uma pesquisa de bomba centrífugas na mesma para a vazão requerida, o reator foi através do estudo de POVEDA (2014), e a torre de refrigeração, foi informação passada por uma usina do

triângulo mineiro que implementou uma para o seu processo de resfriamento de vinhaça, nas mesmas condições aplicada no estudo.

Na tabela 13, é apresentado os investimentos para aquisição (CAPEX) e os custos de operação e manutenção (OPEX), para cada componente da planta de biogás.

Tabela 13 - Custo de Investimento, manutenção e operação.

<b>Componente</b>	<b>Modelo</b>	<b>CAPEX</b>		<b>OPEX</b>	
Bomba Centrifuga	KSB Megabloc 065-040-125 5CV Rotor 120mm trifásica 220/380V	R\$	4.878,04	R\$	2.823,00
Torre de Refrigeração	INS RD 1300 VA E PR617 0056	R\$	78.000,00	R\$	6.240,00
Produção de Biogás	Reator UASB	R\$	12.760.000,00	R\$	501.120,00
<b>Total</b>		R\$	12.842.878,04	R\$	510.183,00

Fonte: Próprio Autor (2025).

Os valores de OPEX, foram definidos pelo custo de manutenção e operação de cada equipamento, o motor foi levado em conta o custo com eletricidade, a torre de refrigeração possui um custo de 8% do valor do CAPEX e o reator UASB, também foi retirado do estudo realizado por POVEDA (2014).

O tempo de vida útil foi balizado em 20 anos para todos os componentes com base na premissa da vida útil do reator UASB em configurações similares adotadas na literatura, com isso fizemos a divisão dos custos, por ano, por mês, por dia e por hora, como soma dos valores de CAPEX e OPEX.

Na tabela 14, é apresentado o ciclo de vida dos equipamentos e o seu custo total, para que possa ser definido o custo anual de cada componente.

Tabela 14 - Custo Anual dos equipamentos

<b>Componente</b>	<b>Custo Total</b>	<b>Ciclo de Vida</b>	<b>Custo Anual</b>
Bomba Centrifuga	R\$ 7.701,04	20 anos	R\$ 3.066,90
Torre de Refrigeração	R\$ 84.240,00	20 anos	R\$ 10.140,00
Produção de Biogás	R\$ 13.261.120,00	20 anos	R\$ 663.056,00

Fonte: Próprio Autor (2025).

Como o fluxo exergético foi definido pela vazão, com o tempo em hora, precisamos transformar os custos anuais em custo por hora, para isso, convertemos os valores em mês, dia e hora.

Na tabela 15, é apresentado os custos mensais, diário e horário, facilitando o cálculo do custo exergoeconômico.

Tabela 15 - Custo mensal, diário e por hora

<b>Componente</b>	<b>Custo Mensal</b>		<b>Custo dia</b>		<b>Custo Hora</b>	
Bomba Centrifuga	R\$	255,58	R\$	8,52	R\$	0,35
Torre de Refrigeração	R\$	845,00	R\$	28,17	R\$	1,17
Produção de Biogás	R\$	55.254,67	R\$	1.841,82	R\$	76,74

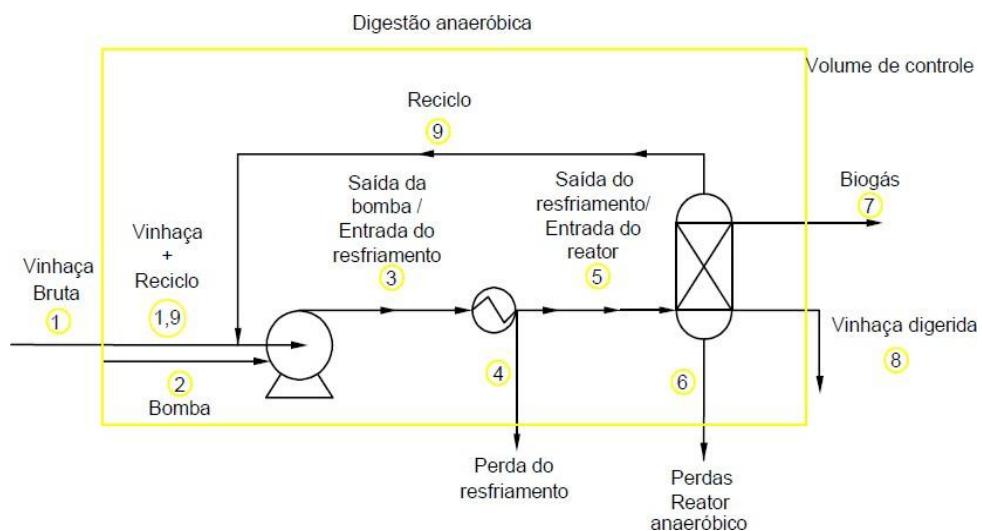
Fonte: Próprio Autor (2025).

Diante deste cenário o custo da bomba, da torre de refrigeração e da produção de biogás, em R\$/h, respectivamente são, R\$ 0,35, R\$ 1,17 e R\$ 76,74, com isso temos todos os dados necessários para o início da análise exergoeconômica.

#### **4.3 – AVALIAÇÃO EXERGOECONÔMICA**

Na avaliação exergoeconômica, enumeramos as entradas e saídas de cada componente do volume de controle definido na avaliação exergética na figura 23.

Figura 23 - Diagrama dos fluxos de exergia no volume de controle

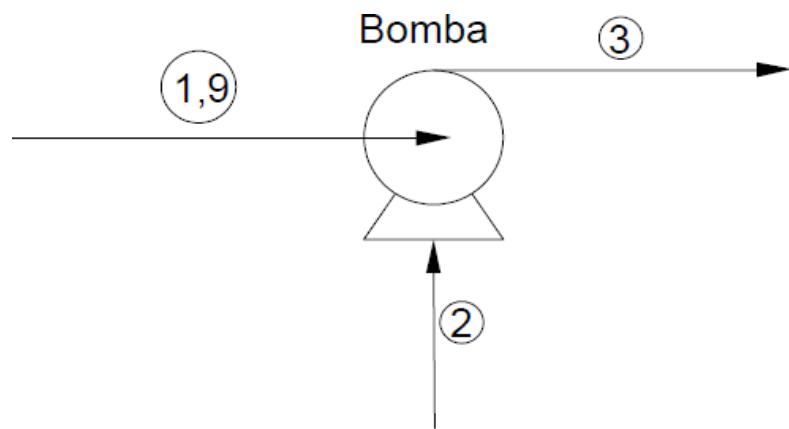


Fonte: Próprio Autor (2025).

Foram definidas as entradas 1,2 e 9, na bomba, e uma única saída 3, para a torre de resfriamento foi definido 3 como entrada, a saída como 4 e 5, para o reator, temos a entrada 5 e saída, 6, 7, 8 e 9.

As equações exergoeconômica, foram desenvolvidas usando o método SPECO e os princípios F e P, conforme descrito no capítulo 3, seção 3.9.2, e com as equações auxiliares e todas as considerações definidas por Bejan *et. al.*, (1996). Na entrada do volume de controle temos a bomba e seus respectivos fluxos, conforme a figura 24.

Figura 24 - Análise dos fluxos na bomba



Fonte: Próprio Autor (2025).

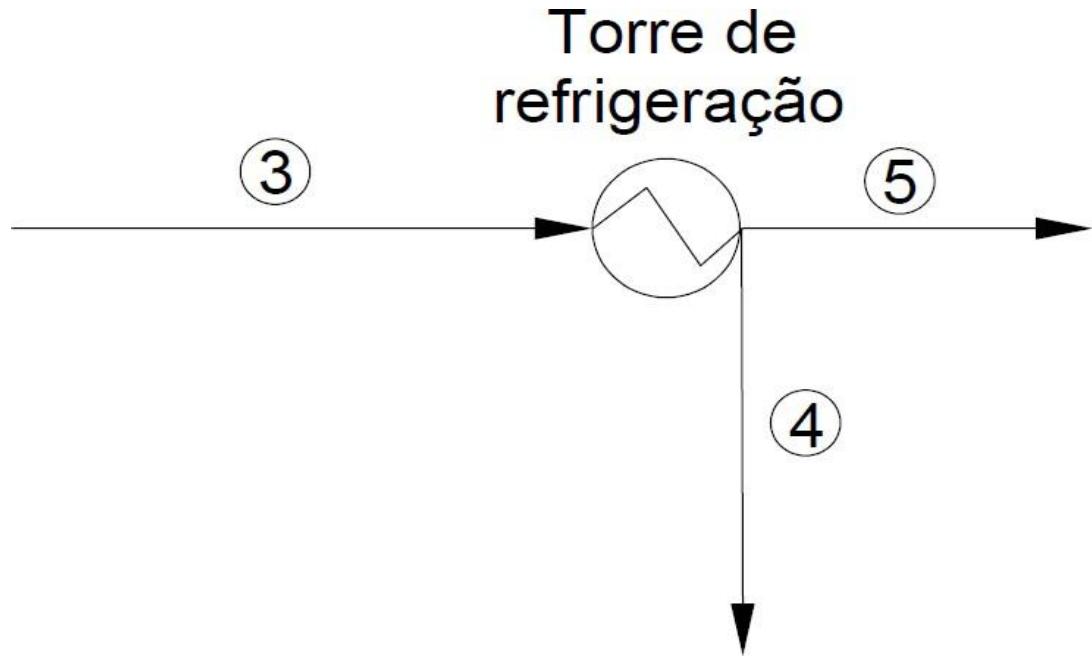
A equação 4.1, traz o balanço exergoeconômico na bomba.

$$C_3 = C_{19} + C_2 + Z_B \quad (4.1)$$

Não há equações auxiliares

Na figura 25, analisamos o volume de controle para a torre de resfriamento, através de sua entrada e suas saídas, nas equações 4.3 e 4.4, apresentamos o balanço exergoeconômico.

Figura 25 - Análise dos fluxos na torre de refrigeração



Fonte: Próprio Autor (2025).

$$C_5 = C_3 + C_4 + Z_{TR} \quad (4.2)$$

Equações auxiliares – Princípio F

$$c_4 = c_3 \quad (4.3)$$

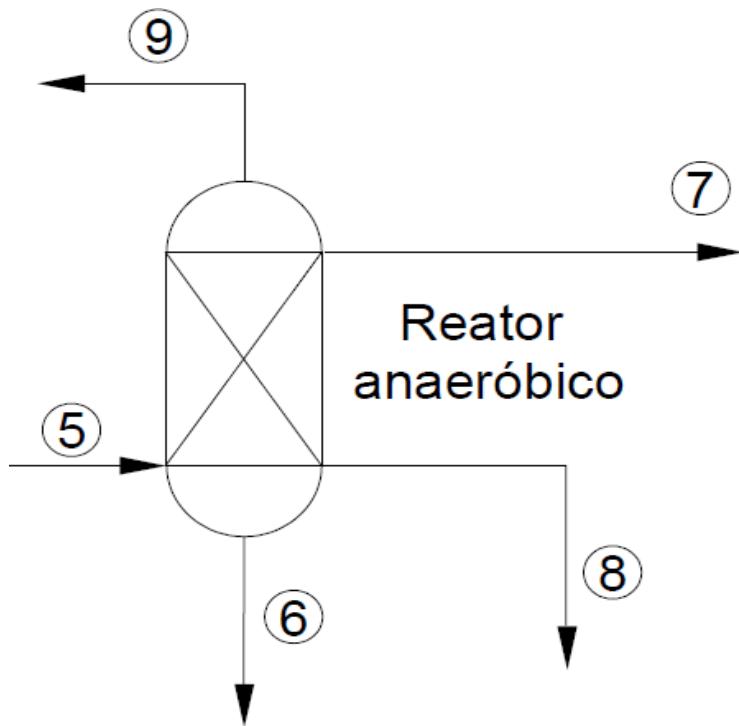
Nesta análise foi associado o fluxo exergético perdido no processo de resfriamento, ao fluxo exergético destruído no processo.

Logo, podemos apresentar a equação 4.4.

$$E_D = E_4 \quad (4.4)$$

Na figura 26, foi definido os fluxos de entrada e saídas para o volume de controle do reator UASB, gerando as equações 4.5, 4.6 e 4.7.

Figura 26 - Análise dos fluxos no reator UASB



Fonte: Próprio Autor (2025).

O balanço exergoeconômico para a taxa de custo de entradas, e suas saídas pode ser escrita como a equação 4.5.

$$C_6 + C_7 + C_8 + C_9 = C_5 + Z_{Reator} \quad (4.5)$$

Equações auxiliares – Princípio F

Pelo princípio F, do método SPECO, foi adotado o mesmo custo médio unitário da exergia da entrada  $c_5$ , para a exergia perdida no reator UASB  $c_6$ .

$$c_6 = c_5 \quad (4.6)$$

Pelo princípio P, do método SPECO, foi adotado o mesmo custo médio unitário da exergia de saída da vinhaça, então temos as equações 4.8 e 4.9.

$$c_7 = c_8 \quad (4.7)$$

$$c_9 = c_8 \quad (4.8)$$

Pelo mesmo princípio F, do método SPECO, foi adotado o mesmo custo médio unitário da exergia da entrada  $c_5$ , para saída da vinhaça da digerida  $c_9$ .

Após a apresentação da metodologia, apresentaremos no capítulo 5, os resultados obtidos através dos cálculos (apresentados no apêndice A), pelas equações aqui desenvolvidas.

## CAPÍTULO V

### APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

#### INTRODUÇÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos pela metodologia e o desenvolvimento dos cálculos descritos na seção anterior.

#### ANÁLISE EXERGOECONÔMICA NA BOMBA

Após a definição do volume de controle para a bomba, e as definições das entradas e saídas, na tabela 16, são apresentados os resultados da análise dos custos exergéticos para a bomba.

Tabela 16 - Apresentação dos resultados na bomba

Ponto	$\dot{m}$ (kJ/s)	$e_{x,n}$ (kJ/kg)	$E_{x,n}$ (kW)	$C$ (R\$/s)	$c$ (R\$/MJ)
1,9	16,42	450,77	7400	2,60	0,3511
2	16,42	9,26	152	0,04	0,2360
3	16,42	460,03	7552	2,63	0,3488

Fonte: Próprio Autor (2025).

O custo da exergia na saída é composto principalmente pelo custo da exergia da

vinhaça na entrada e pelo custo da energia elétrica fornecida pela bomba. A parcela referente ao custo de aquisição, operação e manutenção da bomba é mínima neste caso. Isto pode ser comprovado através do fator exergoeconômico que ficou 0,0037 %.

Este fator muito baixo, comprova que os custos operacionais (em especial a eletricidade) dominam o custo total da bomba, e esforços para reduzir esses custos seriam mais impactantes do que reduzir os custos de aquisição, operação e manutenção nesta composição.

O custo médio da exergia diminui ligeiramente da entrada 0,3511 R\$/MJ para a saída 0,3488 R\$/MJ, indicando um valor relativamente alto da energia de entrada em comparação ao valor inicial da exergia da vinhaça. A bomba adiciona uma quantidade muito significativa de exergia a um custo unitário menor do que exergia inicial da vinhaça.

Embora o custo total aumente devido à entrada de energia, a quantidade de exergia também aumenta significativamente. A razão deste aumento de custo para o aumento de exergia resulta em um custo unitário médio menor na saída para a composição estudada na bomba.

## ANÁLISE EXERGOECONÔMICA NA TORRE DE REFRIGERAÇÃO

Na torre de refrigeração foi adotado uma configuração similar a de um condensador uma que o fluído refrigerante é o próprio ar, pois a torre tem um princípio de funcionamento similar da de uma torre alpina.

Na tabela 17, são apresentados os resultados dos custos médios unitários de exergia e a taxa de custo para cada ponto adotado no volume de controle da torre de refrigeração.

Tabela 16 - Apresentação dos resultados na torre de refrigeração

Ponto	$\dot{m}$ (kJ/s)	$e_{x,n}$ (kJ/kg)	$E_{x,n}$ (kW)	$C$ (R\$/s)	$c$ (R\$/MJ)
3	16,42	460,03	7552	2,6344	0,3488
4	16,42	28,02	460	0,1604	0,3488
5	16,42	432,01	7092	2,7954	0,3942

Fonte: Próprio Autor (2025).

As taxas de exergia fornecidas na entrada  $E_{x,3} = 7552 \text{ kW}$  e na saída  $E_{x,5} = 7092 \text{ kW}$  da vinhaça fornecem informações sobre a variação do potencial de trabalho útil do fluido durante o processo de resfriamento. Uma diferença significativa entre  $E_{x,3} = 7552 \text{ kW}$  e  $E_{x,5} = 7092 \text{ kW}$  indica a ocorrência de destruição de exergia  $E_D = E_{x,4} = 460 \text{ kW}$ , evidenciando as ineficiências termodinâmicas inerentes ao processo de transferência de calor dentro da torre de resfriamento.

Economicamente, essa destruição de exergia corresponde a um custo de  $C_4 = 0,1604 \text{ R\$/s}$ . A comparação entre o custo exergetico unitário da vinhaça na entrada  $c_3 = 0,0003488 \text{ R\$/kJ}$  e na saída  $c_5 = 0,0003941 \text{ R\$/kJ}$ , demonstra um aumento no custo por unidade de exergia, refletindo o custo adicional incorrido pelo processo de resfriamento, incluindo os custos operacionais e as perdas devido à ineficiência termodinâmica. Embora o custo de operação e manutenção  $Z_{TR} = 0,000325 \text{ R\$/s}$  seja relativamente baixo em comparação com o custo associado à destruição de exergia, ele ainda contribui para o custo total do processo.

## ANÁLISE EXERGOECONÔMICA NO REATOR UASB.

No reator UASB, a vinhaça resfriada, é o combustível e o produto o biogás, neste caso as outras saídas foram consideradas destruição de exergia, pois o que se pretendia era obter o biogás. Na tabela 18, são apresentados os custos exergéticos do combustível, produto e das destruições de exergia.

Tabela 178 - Apresentação dos resultados no reator UASB

Ponto	$\dot{m}$ (kJ/s)	$e_{x,n}$ (kJ/kg)	$E_{x,n}$ (kW)	$C$ (R\\$/s)	$c$ (R\\$/MJ)
5	16,42	432,01	7092	2,7954	0,3942
6	0,91	298,45	273	0,1076	0,3942
7	0,22	234,41	3390	1,4540	0,4289
8	14,27	15.630,55	3344	1,4342	0,4289
9	1,02	83,42	85	0,03646	0,4289

Fonte: Próprio Autor (2025).

O custo associado à exergia perdida no reator é de  $C_6 = 0,107 \text{ R\$/s}$ , o que representa uma parcela significativa do custo total de entrada. O custo de aquisição, operação e manutenção do reator  $Z_{Reactor} = 0,0213167 \text{ R\$/s}$  é relativamente baixo em comparação com o custo do combustível e a perda de exergia.

A distribuição dos custos entre os produtos revela que o biogás, com uma taxa de custo de  $C_7 = 1,4540 \text{ R\$/s}$ , e a vinhaça na saída, com uma taxa de custo de  $C_8 = 1,4342 \text{ R\$/s}$ , absorvem a maior parte dos custos incorridos no processo.

Quando avaliado o custo unitário do produto em relação ao combustível, nota-se um aumento de 8,80%, este aumento reflete o impacto dos custos operacionais e das perdas de exergia dentro do reator.

As principais fontes de custo dentro do reator são, em ordem de magnitude: o custo da exergia da vinhaça na entrada  $C_5 = 2,7954 \text{ R\$/s}$  e o custo da exergia perdida  $C_6 = 0,107 \text{ R\$/s}$ . O custo operacional do reator tem uma contribuição muito menor na escala de tempo analisada.

A magnitude do custo associado à exergia perdida sugere que esforços para reduzir as irreversibilidades termodinâmicas dentro do reator poderiam levar a melhorias significativas no desempenho exergoeconômico do processo. Estratégias como a otimização das condições de operação ou modificações no projeto do reator poderiam ser investigadas para minimizar essas perdas.

## ANÁLISE EXERGOECONÔMICA

Na tabela 19, são apresentados os resultados dos custos envolvendo os combustíveis, produtos, OM (aquisição, operação e manutenção) e da destruição de exergia, além do custo relativo e do fator exergoeconômico, por componente da planta.

Tabela 189 - Resumo dos resultados por componente da planta

Componente	$E_D$ (kW)	$c_f$ (R\$/MJ)	$c_p$ (R\$/MJ)	$c_D$ (R\$/MJ)	$Z_T$ (R\$/s)	$r_k$ (%)	$f$ (%)
Bomba	0,00	0,3511	0,3488	0,0000	0,000972	0,00	100,00
Torre de Resfrigeração	460	0,3488	0,3942	0,3488	0,000325	13,02	0,20
Reator UASB	3702	0,3942	0,4289	1,2520	0,021317	8,80	1,33

Fonte: Próprio Autor (2025)

O maior custo médio unitário de destruição de exergia, ficou no reator, uma que as fontes de destruição, são a vinhaça digerida, a vinhaça do reciclo e as perdas no reator devido as irreversibilidades do processo. O fato exergoeconômico  $f$ , mostra que o maior custo de aquisição de reator.

A análise exergoeconômica do reator anaeróbico utilizando o método SPECO revelou os custos unitários de exergia do produto biogás, como sendoc<sub>p</sub> = 0,0004223 R\$/kJ. A principal contribuição para o custo total do processo é o custo da exergia da vinhaça na entrada, seguido pelo custo associado à exergia perdida no reator. O custo operacional do reator, na escala de tempo analisada, apresenta uma contribuição insignificante.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSÃO

Após a metodologia aplicada e da apresentação dos resultados desenvolvidos nesta pesquisa, foram realizados uma análise exergoeconômica da geração de biogás a partir da vinhaça, buscando evidenciar os equipamentos da planta de biogás, (bomba, torre de refrigeração e reator UASB). Os resultados que os custos variam de maneira significativa entre cada equipamento, oferecendo insights valiosos para a otimização técnica e econômica.

A bomba, apesar do baixo custo de aquisição, mostrou que seus custos operacionais associados ao consumo de energia elétrica são dominantes. Isso evidencia uma importante estratégia para a redução do consumo energético, mesmo que na análise a bomba tenha sido adotada como isentrópica, ou seja, com uma eficiência em 100% (ideal), não traduzindo a realidade, tornando assim ainda mais importante o controle do consumo energético deste componente.

A torre de refrigeração evidenciou perdas de exergia bastante acentuada em 460 kW, elevando o custo unitário da exergia de saída, reforçando a necessidade de melhorias no projeto térmico ou no reaproveitamento do calor residual para minimizar os desperdícios.

O reator UASB, foi o componente da planta que demandou o maior investimento, teve sua sua eficiência comprometida pela destruição de exergia na ordem de 3702 kW, o principal contribuinte para esta destruição foi a vinhaça biodigerida, uma que a mesma ainda apresentou um alto valor no fluxo de exergia 3390 kW e às irreversibilidades presente no reator. Apesar disso o custo unitário do biogás apresentou um bom resultado na casa dos 0,4289 R\$/MJ, validando seu potencial como alternativa energética sustentável. O fator exergoeconômico comprovou que a maior parte dos custos está vinculada à exergia perdida, evidenciando a necessidade de otimização operacionais, como ajustes no tempo de retenção

hidráulica, com um reator de maior volume.

A análise também destacou a importância da exergia destruída como um fator determinante nos custos exergéticos. A redução das perdas exergéticas, por meio da implementação de novas tecnologias ou da adição de outras matérias orgânicas, mostrou-se crucial para a viabilidade econômica do sistema.

Assim é possível concluir através desta pesquisa, que analisar os resultados termodinâmicos da geração do biogás da vinhaça, com seus aspectos econômicos mostrou-se eficaz na identificação de gargalos e na priorização de investimentos, somando-se as demandas sustentáveis e de maior eficiência.

Em termos de implicações práticas, a pesquisa sugere que investimentos em tecnologias mais eficientes para o reator UASB e a busca por estratégias para reduzir as perdas de exergia podem melhorar significativamente a viabilidade econômica da produção de biogás a partir da vinhaça. Além disso, a análise exergoeconômica fornece informações valiosas para a tomada de decisões, permitindo a identificação de áreas prioritárias para a otimização do sistema.

De modo geral, a geração do biogás da vinhaça configura-se como uma solução extremamente viável no reaproveitamento dos resíduos, desde que seja alinhado com as melhorias técnicas e a gestão estratégicas de custos, consolidando-se como um pilar para a busca da transição energética e da economia circular no setor sucroenergético.

- **Sugestões para trabalhos futuros**

- Realizar uma análise exergetica da geração de biogás, adicionando a vinhaça outras matérias orgânicas como, bagaço, filtro de torta.
- Realizar uma comparação dos custos e tempo de retorno da implantação de uma planta de biogás com diferentes fontes de substrato (Vinhaça, Resíduos Sólidos Urbanos, Esterco Bovino, dentre outros).
- Realizar uma análise exergoeconômica da planta como um todo, analisando desde a entrada da cana-de-açúcar, até a saída dos produtos finais, como açúcar, álcool e biogás.
- Realizar uma análise exergoambiental da planta como um todo, analisando desde a entrada da cana-de-açúcar, até a saída dos produtos finais, como açúcar, álcool e biogás.

- Realizar uma simulação da produção de biogás da vinhaça, para os diferentes tipos de biodigestores, variando a carga orgânica e o TRH conforme especificado para cada biodigestor.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS**

ALEIXO, Eduardo Henrique. **A nova geração de evaporadores e o uso dos condensadores evaporativos como alternativa para redução do consumo de água no processo de evaporação.** 2012. Trabalho de conclusão de curso (Pós-Graduação em Gestão Industrial Sucroenergetica) - Universidade Federal de São Carlos, [S. l.], 2012.

ALMAÇA, Reinaldo Alves. **Avaliação do uso da vinhaça da cana-de-açúcar na geração de energia elétrica (Estudo de caso).** 1994. 144 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

ALMEIDA, J.; BARROS, L. **Eficiência energética na indústria sucroalcooleira.** São Paulo: Editora Sustentável, 2019. COSTA, R. et al. Processos industriais na produção de açúcar. Recife: Tecnologias Renováveis, 2020.

ALMEIDA, J.; SANTOS, F. **Produção e aproveitamento do biogás no Brasil.** São Paulo: Editora Sustentável, 2021. COSTA, P.; SILVA, R. Bioenergia e digestão anaeróbia: fundamentos e aplicações. Rio de Janeiro: Energia Verde, 2019.

ALVES, ANDRÉ FILIPE MENDES. **Análise Exergoeconômica e Exergoambiental de um Sistema de Trigeração Usando Gás Natural e Extensão Para o Uso do Biogás de Aterro Sanitário /** Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, 2020. 161 f.

BARRERA, E. L.; ROSA, E.; SPANJERS, H.; ROMERO, O.; MEESTER, S. De.; DEWULF, J. **A comparative assessment of anaerobic digestion power plants as alternative to lagoons for vinasse treatment: life cycle assessment and exergy analysis.** Journal of Cleaner Production, v. 113, p. 459-471, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615018260>>. Acesso em: 22 de maio de 2022.

BEJAN, A., TSATSARONIS, G., MORAN, M. 1996. **Thermal Design and Optimization**. John Wiley & Sons, Inc. New York. 542 pp.

BISPO, Djayr Alves.Jr. **ANÁLISE TERMODINÂMICA E AMBIENTAL DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS DO ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO DE JOÃO PESSOA**. 2022. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraíba, [S. l.], 2022.

BRITO, Fernanda Luísa Sampaio de. **Biodigestão anaeróbica em duplo estágio do bagaço de cana-de-açúcar para obtenção de biogás**. 2011. 184 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

BUDIYONO; SYAICHURROZI, I.; SUMARDIONO, S. Effect of total solid content to biogas production rate from vinasse. **International Journal of Engineering, Transactions B: Applications**, [s. l.], v. 27, n. 2, 2014.

CABELLO, Paulo Eduardo; SCOGNAMIGLIO, Felipe Petrassi; TERÁN, Francisco J. C. **Tratamento de vinhaça em reator anaeróbico de leito fluidizado**. Unipinhal, Espírito Santo do Pinhal, ano 2009, v. 6, ed. 1, p. 321-338, 19 mar. 2009.

CALEGARI, Rubens Perez. **Análise Econômica e Ambiental do Processamento da Vinhaça com Aproveitamento Energético**. 2014. Dissertação de Mestrado (Mestre em Ciências) - Universidade de São Paulo, [S. l.], 2014.

CALEGARI, Rubens Perez. **Produção de Biogás a partir da Vinhaça Concentrada**. 2017. Dissertação de Mestrado (Mestre em Ciências) - Universidade de São Paulo, [S. l.], 2017.

CARVALHO, Ruy de Quadros *et al.* **OPORTUNIDADES ENTERRADAS: GERAÇÃO ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**. 1. ed. Espírito Santo: EDUFES, 2019. 302 p.

CASAGRANDE, A. A; VASCONCELOS, A.C. **Fisiologia da parte aérea**. In: DINARDO-

MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. Cana de açúcar. Campinas: Instituto Agronômico, 2008, 882p.

CASTRO, Sebastião Beltrão de; ANDRADE, Samara Alvachian C. **Engenharia e tecnologia açucareira. 2006. 51 f.** Departamento de Engenharia Química. Centro de Tecnologia e Geociências - Escola de Engenharia de Pernambuco, Recife.

CAVALCANTI, E. J. C. **Análise exergoeconômica e exergoambiental** – São Paulo: Blucher, 2016.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. Sétima ed. [s.l.] Mc Graw Hill, 2013.

CESTEB, **Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**, fevereiro/2015, homologada pela Decisão de Diretoria – D.D. nº. 045/2015/C, de 12/02/2015. Publicada no Diário Oficial do Estado de São Paulo – Caderno Executivo I, v. 125, nº. 30, de 13/02/15, Poder Executivo, Seção I, p. 51 a 53.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Reatores anaeróbios.** 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

COELHO, S.T., VELAZQUEZ, S.M. S.G, SILVA, O.C. et al., Programa de uso racional de energia e fontes alternativas: PUREFA. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, **Anais.** 5., Campinas, 2004. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022004000200039&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000200039&lng=en&nrm=abn)>.

**Conab - Produção de cana-de-açúcar na safra 2023/24 chega a 713,2 milhões de toneladas, a maior da série histórica.** Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5489-producao-de-cana-de-acucar-na-safra-2023-24-chega-a-713-2-milhoes-de-toneladas-a-maior-da-serie-historica>>. Acesso em: 12 jul. 2024.

CONAB -COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Boletim de cana-de-açúcar abril 2022. Brasília, 2022. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info>>

agro/safras/cana >. Acesso em: 12 de julho de 2024.

CONSECANA, <https://www.consecana.com.br/>: Consecana, 2025. Disponível em: <https://www.consecana.com.br/>. Acesso em: 11 fev. 2025.

CRUZ, Mariana Lopes. **Avaliação de condições operacionais na fermentação alcoólica VHG empregando diferentes cepas de *Saccharomyces cerevisiae*.** 2019. 119 p. Tese (Doutor em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2019.

DINCER, I.; ROSEN, M.A. **Exergy: Energy, environment and sustainable development.** 2007.

FERNANDES, Gisele Pulz. **Potencial Energético da Vinhaça para Geração de Biogás - Estudo de Caso em Usina sucroenergética no estado de Goiás.** 2017. Trabalho de conclusão de curso (Especialização em Energias Renovaveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [S. l.], 2017.

FERREIRA, L. et al. **Desafios e perspectivas para a implementação de sistemas de biogás.** Curitiba: Editora Ambiental, 2021. MENDES, A. et al. Gestão de resíduos e biogás: uma abordagem sustentável. Porto Alegre: Editora Ecológica, 2022.

FIALHO, Marcelito Lopes *et al.* O impacto da vinhaça produzida pela cana-de-açúcar na produção de etanol – poluição ambiental. **Intraciência**, Recife - PE, ed. 17, p. 1-14, 2019.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar.** Guaíba: Agropecuária, 2000.

G1, GLOBO. **Produtores investem em biodigestor para reduzir conta de energia.** G1, [S.l.], p. 1-1, 3 out. 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sorocaba-jundiai/nossocampo/noticia/2021/10/03/produtores-investem-em-biodigestor-para-reduzir-conta-deenergia.ghtml>. Acesso em: 7 fev. 2025.

HAMERSKI, Fabiane; AQUINO, Arislete Dantas de; NDIAYE, Papa Matar. Clarificação do caldo de cana-de-açúcar por carbonatação - ensaios preliminares. **Acta Scientiarum Technologu**, [s. l.], v. 33, n. 3, p. 337-341, 2011.

HUGOT, Emile. **Manual da Engenharia Açucareira**. [S. l.]: Mestre Jou, 1969. v. 2.

ILVA, C.; CARVALHO, P. **O uso do digestato como biofertilizante**. Recife: Agroenergia, 2023.

KOTAS, T. J. 2013. **The Exergy Method of Thermal Plant Analysis**. Exergon Publishing Company UK LTD. London. 352 p.

KOTAS, T. J.. **Thermoeconomic applications of exergy. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis**. Departamento de Engenharia Mecânica, Queen Mary College, Universidade de Londres, 1985.

LAZZARETTO, A., TSATSARONIS, G. 2006. SPECO: **A systematic and general methodology for calculating efficiencies and cost in thermal systems**. Energy 31: 1257-1289.

LEITE, ANA LÍVIA FORMIGA. **Análise Exergoeconômica de um Sistema de Trigeração no Setor Terciário: um estudo de caso em um resort**. - Dissertação (mestrado) Universidade Federal da Paraíba, 2019. 143 f.

LINS, L. P.; MITO, J. Y. L.; FERNANDES, D. M. Composição média do biogás de diferentes tipos de biomassa. **IV Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais**, Rio de Janeiro, ano 2015, ed. 4, 5 de maio de 2015.

LIRA, E. **Biodigestor anaeróbico na agricultura familiar: produção de biogás e biofertilizante a partir de resíduos pecuários e implantação de cultivo de microalgas**. UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA, 2021.

LOURENÇO, A.B., 2016. **Uma Abordagem Termoeconômica Sistemática Para**

**Modelagem De Ciclos Termodinâmicos.** Tese de D.Sc., UFABC, Santo André, SP, Brasil.

LOZANO, M. A.; VALERO, A. **Teoria del coste exergético, II.** Aplicacion a pruebas de rendimento. Zaragoza, Espanha: Publicação interna da Universidad de Zaragoza, 1989.

LOZANO, M. A.; VALERO, A.; GUALLAR, J. Teoria del coste exergético, I. Conceptos básicos. Zaragoza, Espanha. Publicação interna da Universidad de Zaragoza, 1989.

LOZANO, M. A.; VALERO, A.; SERRA, L. Theory of exergetic cost and thermoeconomic optimization. Zaragoza, Espanha: Publicação interna da Universidad de Zaragoza 1993

M. L. F. **Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas.** BNDES Setorial.  
MACHADO, Simone Silva. **Tecnologia da Fabricação do Açúcar.** Etec: [s. n.], 2012. 56 p.

MATOS, Wdyelle Elcine de Carvalho *et al.* Utilização de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como material de preenchimento estrutural ou pozolânico para a produção de argamassas cimentícias: uma revisão. **Revista Matéria**, Teresina - PI, v. 26, n. 04, p. 1-20, 23 jul. 2021.

MEDEIROS NETO, João Luiz de. **ANÁLISE COMPARATIVA DAS METODOLOGIAS DE ESTUDO EXERGOECONÔMICO PARA UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO DE VAPOR DE DUPLO EFEITO.** 2018. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, [S. l.], 2018.

MILANEZ, A. Y.; GUIMARÃES, D. D.; MAIA, G. B. dá S.; DE SOUZA, J. A. P.; LEMOS, MORAIS, Yasmin Alves Morais; COSTA, Patrícia. Uso do filtro de torta na cultura da cana-de-açúcar. **VI Jornada Acadêmica**, Santa Helena de Goiás, 2012.

NAKASHIMA, Rafael Nogueira. **AVALIAÇÃO EXERGÉTICA DA GERAÇÃO E USO DE BIOGÁS NO SETOR SUCROENERGÉTICO.** 2018. Dissertação de Mestrado (Mestre em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [S. l.], 2018.

OLIVEIRA, Davi Brito Nunes. **Estudo da produção do biogás e a aplicação de uma análise exergoeconômica para um sistema de cogeração usando biometano.** 2023. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraíba, [S. l.], 2023.

PACHECO, Thályta Fraga. **Fermentação alcoólica com levedura de características floculantes em reator do tipo torre com escoamento ascendente.** 2010. 107 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2020.

PELLEGRINI, Luiz Felipe. **Análise e otimização termo-econômica-ambiental aplicada à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade.** 2009. 349f. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

PEREIRA, Matheus Fontanelle. Avaliação Exergoambiental. In: PEREIRA, Matheus Fontanelle. **Análise exergoambiental da cadeia produtiva da biomassa florestal para fins energéticos.** 2018. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, [S. l.], 2018.

PEREIRA, T.; OLIVEIRA, D. **Purificação e uso do biogás como biocombustível.** Belo Horizonte: Tecnologias Renováveis, 2020.

POVEDA, Manuel. **Análise econômica e ambiental do processamento da vinhaça com aproveitamento energético** Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Energia - Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, 2014.

REHAGRO, **Conhecimento sobre agronegócio,** 2018. Disponível em:  
<https://rehagro.com.br/blog/plantio-da-cana-de-acucar/>. Acesso em: 01 fevereiro de 2025.

REIN, P. **Cane Sugar Engineering.** Berlin: Bartens, 2007. 768P.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C.; IDE, B.Y. **Plantio de cana-de-açúcar: Estado da arte**, Piracicaba, T.C.C. Ripoli, 2006, 216p.

RODRIGUES, M.; ALVES, G. **Políticas públicas e incentivos para a energia renovável no Brasil**. Brasília: Instituto de Energia, 2022.

ROSSETTO, A. J. Utilização Agronômica Dos Subprodutos E Resíduos Da Indústria Açucareira E Alcooleira. **Paranhos, S.B. (ed.). Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**, Campinas: Fundação Cargill, 1987. 435-504.

ROSSETTO, R; SANTIAGO, A. D. Agência Embrapa de Informações Tecnológicas – AGEITEC. **Arvore do conhecimento cana-de-açúcar**. Brasília, 2019. Disponível em:

SALES, Matheus Dos Santos. **DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS PARA UMA UNIDADE RURAL PRODUTORA DE LEITE BOVINO UTILIZANDO ESTERCO BOVINO COMO SUBSTRATO**. 2025. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, [S. l.], 2025.

SHAPIRO, Howard N; MORAN, Michael J.; BOETTNER, Daisie D.; BAILEY, Margaret B. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC, 2013. 814 p.

SILVA, A; GOMES, W.; ALSINA, O. **Utilização do bagaço de cana-de-açúcar como biomassa adsorvente na adsorção de poluentes orgânicos**. Departamento de Química / Universidade Federal da Paraíba e Unidade Acadêmica de Engenharia Química / Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, Brasil, 2007.

SIQUEIRA FILHO, Elias Amâncio de. **Análise térmica do uso do bagaço da cana-de-açúcar: sistema de cogeração e produção da segunda geração de etanol**. 2019. 85 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE, 2019.

SOUZA, H. et al. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos: uma abordagem**

**tecnológica.** Florianópolis: Editora Sustentável, 2020.

SOUZA, Rita de Cassia Pereira de. **Análise exergética da vinhaça para produção de biogás.** 2018. 75 f. Trabalho de conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2018.

SOUZA, Rita de Cássia Pereira de. **ANÁLISE EXERGÉTICA DA VINHAÇA PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS.** 2018. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [S. l.], 2018.

SOUZA, Ronelly José de. **Análise Exergoeconômica de um Sistema CCP Composto por um Ciclo de Rankine Orgânico e um Sistema de Refrigeração por Absorção.** 2019. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, [S. l.], 2019.

SYAICHURROZI, I. Review – Biogas Technology to Treat Bioethanol Vinassee. **Waste Technology**, [s. l.], v. 4, n. 1, 2016.

SZARGUT, J.; MORRIS, D. R.; STEWARD, F. R. **Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes.** New York: Hemisphere, 1988. 332 p.

TAVARES, Kauê. **Avaliação do potencial da aplicação de poliacrilamida catiônica e aniônica no processo de clarificação do caldo de cana-de-açúcar, na produção de açúcar vhp.** 2023. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel Química Industrial) - Instituto Municipal de Ensino Superior de Assis, [S. l.], 2023.

**TRATAMENTO de vinhaça em reator anaeróbico de leito fluidizado.** 2009. Artigo Científico (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista, [S. l.], 2009.

TSATSARONIS, G. **Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics.** Technische Universität Berlin, Institute for Energy Engineering, Berlim 2006.

TSATSARONIS, G., WINHOLD, M. “**Exergoeconomic Analysis and Evaluation of Energy Conversion Plants - I. A New General Methodology**”, Energy, v. 10, pp. 69–80, 1984.

TSATSARONIS, G.; LIN, L.; PISA, J. **Exergy costing in Exergoeconomics**. Journal of Energy Resources Technology, v. 115, n. 1, p. 9 – 16, 1993.

VAZ, Victor; Souza, Samuel Nelson Melegari de. **Análise Termoeconômica de uma planta rural de biogás integrada a um sistema de fertirrigação**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro de 2022.

VITAL, ANDREIA. **Planta da Cocal em Narandiba - SP é a vencedora no Fórum Mundial do Biogás**. Jornal da Cana, [S. l.], p. 1-1, 16 jul. 2024. Disponível em: <https://jornalcana.com.br/usinas-notas/planta-da-cocal-em-narandiba-sp-e-a-vencedora-no-forum-mundial-do-biogas/>. Acesso em: 09 mar. 2025.

ZANETTE, A. L.; **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil**. Dissertação (mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009

ZANK, J. C. C., BRANDT, L. S., BEZERRA, R. C., & PEREIRA, E. N. (2020). **As características do biogás e avaliação de substituição de combustíveis**. *Exacta*, 18(3), 502–516. <https://doi.org/10.5585/exactaep.v18n3.10802>

## APÊNDICE A

### CÁLCULO EXERGOECONÔMICO

#### 1. BOMBA

Dados do problema:

- Vazão mássica da vinhaça na entrada:  $m_i = 16,42 \text{ kg/s}$
  - Exergia específica da vinhaça na entrada:  $e_{x,1} = 450,77 \text{ kJ/kg}$
  - Custo do litro de vinhaça na entrada: R\$ 0,16
  - Vazão da vinhaça na entrada: 16,24 l/s
  - Densidade da vinhaça: 1,0115 kg/l
  - Potência fornecida na bomba:  $W = 152 \text{ kW}$
  - Considerando a bomba isentrópica
  - Custo do kW.h = R\$ 0,85
  - Exergia específica na saída da bomba:  $e_{x,2} = 460,03 \text{ kJ/kg}$
  - Custo de aquisição, operação e manutenção da bomba: R\$/h = 0,35
- Balanço exergoeconômico

$$C_3 = C_{19} + C_2 + Z_B$$

- Custo da exergia da vinhaça na entrada

$$c_{V,19} = 0,16 \text{ R\$/l}$$

$$M_{19} = 16,42 \text{ kg/s}$$

$$e_{x,19} = 450 \text{ kJ/Kg}$$

$$E_{x,19} = 7400 \text{ kW} \rightarrow 7400 \text{ kJ/s}$$

$$V_{1,9} = 16,24 \text{ l/s}$$

$$\rho = 1,0115 \text{ kg/l}$$

- Custo da taxa de custo da vinhaça na entrada

$$C_{V,19} = c_{V,19} \times V_{1,9} = 0,16 \times 16,24 = 2,5984 \text{ R\$/s}$$

- Custo médio unitário da exergia da vinhaça na entrada;

$$c_{19} = \frac{C_{V,19}}{E_{x,19}} = \frac{2,5984 \text{ R\$/s}}{7400 \text{ kJ/s}} = 0,00035106 \text{ R\$/kJ} \rightarrow 0,35106 \text{ R\$/MJ}$$

Custo da potência fornecida a bomba

$$W_2 = 152 \text{ kW} \rightarrow 152 \text{ kJ/s}$$

$$\text{Custo do kW} \times h = 0,85 \text{ R\$/h} \rightarrow 0,000236 \text{ R\$/s}$$

- Cálculo da taxa de custo da potência elétrica;

$$C_2 = W_2 \times c_2 = 152 \text{ kJ/s} \times 0,000236 \text{ R\$/s} = 0,035872 \text{ R\$/s}$$

- Custo médio unitário da exergia da potência elétrica;

$$c_2 = \frac{C_2}{e_{x,2}} = \frac{0,035872 \text{ R\$/s}}{152 \text{ kJ/s}} = 0,000236 \text{ R\$/kJ} \rightarrow 0,236 \text{ R\$/MJ}$$

- Taxa de custo associada à bomba (aquisição, operação e manutenção);

$$Z_B = 0,35 \text{ R\$/h} \rightarrow 0,00009722 \text{ R\$/s}$$

Assim, temos:

$$C_3 = C_{19} + C_2 + Z_B$$

$$C_3 = 2,5984 \text{ R\$/s} + 0,035872 \text{ R\$/s} + 0,00009722 \text{ R\$/s} = 2,63438612 \text{ R\$/s}$$

$$c_3 = \frac{C_3}{E_{x,3}} = \frac{2,63438612 \text{ R\$/s}}{7552 \text{ R\$/MJ}} = 0,0003488 \text{ R\$/kJ} \rightarrow 0,3488 \text{ R\$/MJ}$$

## 2. TORRE DE RESFRIAMENTO

Dados do problema

- Vazão mássica da vinhaça na entrada da torre de resfriamento:  $m_i = 16,42 \text{ kg/s}$
  - Exergia específica da vinhaça na entrada:  $e_{x,1} = 460,03 \text{ kJ/kg}$
  - Custo exergético unitário da vinhaça:  $c_1 = 0,0003488 \text{ R\$/kJ}$
  - Vazão mássica da vinhaça na saída da torre de resfriamento:  $m_f = 16,42 \text{ kg/s}$
  - Exergia específica da vinhaça na saída da torre:  $e_{x,2} = 432,01 \text{ kJ/kg}$
  - Exergia específica perdida na torre de resfriamento:  $e_{x,3} = 28,02 \text{ kJ/kg}$
  - Custo de aquisição, operação e manutenção da torre de resfriamento:  $0,000325 \text{ R\$/s}$
- Balanço exergoeconômico na torre de refrigeração

$$C_5 = C_3 + C_4 + Z_{TR}$$

Onde:

$$C_4 = C_{ED} \text{ e } E_4 = E_D$$

Dados:

$$c_3 = 0,0003488 \text{ R\$/Kj}$$

$$C_3 = 2,6343 \text{ R\$/s}$$

$$E_{X,3} = 0,7552 \text{ kJ/s}$$

Pelo princípio “P”, temos a equação  $c_4 = c_3$ , logo:

- A taxa de custo associada a destruição

$$C_4 = E_D \times c_4 \rightarrow C_4 = E_D \times c_3 = 460 \text{ kJ/s} \times 0,0003488 \text{ R\$/s} = 0,160448 \text{ R\$/s}$$

- A taxa de custo da aquisição, operação e manutenção

$$Z_{TR} = 0,000325 \text{ R\$/s}$$

- Taxa de custo associada ao fluxo de saída pelo balanço

$$C_5 = C_3 + C_4 + Z_{TR} \rightarrow 2,6343 \text{ R\$/s} + 0,160448 \text{ R\$/s} + 0,000325 \text{ R\$/s} = 2,7954 \text{ R\$/s}$$

- Custo médio unitário da exergia de saída

$$C_5 = c_5 \times E_{X,5} \rightarrow c_5 = \frac{C_5}{E_{X,5}} = \frac{2,7954 \text{ R\$/s}}{7092 \text{ kJ/s}} = 0,0003942 \text{ R\$/kJ} \rightarrow 0,3942 \text{ R\$/MJ}$$

- Custo relativo

$$r_5 = \frac{c_5 - c_3}{c_3} = \frac{0,3942 \text{ R\$/MJ} - 0,3488 \text{ R\$/MJ}}{0,3488 \text{ R\$/MJ}} = 13,02\%$$

- Fator exergoeconómico

$$f = \frac{Z}{C_4 + Z} = \frac{0,000325 \text{ R\$/s}}{0,160448 \text{ R\$/s} + 0,000325 \text{ R\$/s}} \cong 0,2021\%$$

### 3. REATOR UASB

Dados do problema

- Vazão mássica da vinhaça na entrada do reator:  $\dot{m} = 16,42 \text{ kg/s}$
- Exergia específica da vinhaça na entrada:  $e_{x,1} = 432,01 \text{ kJ/kg}$
- Custo exergetico unitário da vinhaça:  $c_1 = 0,0003942 \text{ R\$/kJ}$
- Densidade da vinhaça na entrada no reator:  $1,0115 \text{ kg/l}$
- Vazão mássica da vinhaça na saída do reator:  $\dot{m} = 14,27 \text{ kg/s}$
- Exergia específica da vinhaça na saída do reator:  $e_{x,2} = 234,41 \text{ kJ/kg}$
- Exergia específica do biogás na saída do reator:  $e_{x,3} = 15.630,55 \text{ kJ/kg}$
- Vazão mássica do biogás na saída do reator:  $\dot{m} = 0,22 \text{ kg/s}$
- Densidade do biogás:  $1,2143 \text{ kg/l}$
- Vazão do mássica do reciclo de vinhaça na saída do reator:  $\dot{m} = 1,02 \text{ kg/s}$
- Densidade da vinhaça na saída do reator:  $1,0041 \text{ kg/l}$
- Exergia específica do reciclo na saída do reator:  $e_{x,4} = 83,42 \text{ kJ/kg}$
- Custo de aquisição, operação e manutenção do reator:  $0,0213167 \text{ R\$/s}$
- Exergia específica perdida no reator:  $e_{x,5} = 298,45 \text{ kJ/kg}$
- Vazão mássica perdida no reator:  $\dot{m} = 0,91 \text{ kg/s}$

Dado:

$$C_5 = 2,7954 \text{ R\$/s}$$

$$c_5 = 0,0003942 \text{ R\$/Kj}$$

- Taxa de custo da exergia perdida

Sabendo que  $c_6 = c_5$  e  $E_6 = 273 \text{ kJ/s}$ , então:

$$C_6 = c_6 \times E_6 = c_5 \times E_6 \rightarrow 0,0003942 \text{ R\$/Kj} \times 273 \text{ kJ/s} = 0,1076166 \text{ R\$/s}$$

- Equação de balanço de custos

$$C_8 + C_7 + C_9 = C_5 + C_6 + Z_{REATOR}$$

Pelas equações temos:

1.  $c_7 = c_8$
2.  $c_9 = c_8$
3.  $C_8 = E_8 \times c_8$
4.  $C_7 = E_7 \times c_7$
5.  $C_9 = E_9 \times c_9$

Relacionando as equações 1 e 4, e 2 e 5, temos:

$$C_7 = E_7 \times c_8$$

$$C_9 = E_9 \times c_8$$

Substituindo na equação de balanço de custos:

$$E_8 \times c_8 + E_7 \times c_8 + E_9 \times c_8 = C_5 + C_6 + Z_{REATOR}$$

$$c_8 \times (E_8 + E_7 + E_9) = C_5 + C_6 + Z_{REATOR}$$

$$c_8 = \frac{C_5 + C_6 + Z_{REATOR}}{E_8 + E_7 + E_9}$$

$$c_8 = \frac{2,7954 \text{ R\$/s} + 0,1076166 \text{ R\$/s} + 0,0213167 \text{ R\$}}{3344 \text{ kJ/s} + 3390 \text{ kJ/s} + 85 \text{ kJ/s}} = \frac{2,9243 \text{ R\$/s}}{6819 \text{ kJ/s}}$$

$$= 0,0004289 \text{ R\$/kJ}$$

$$c_8 = 0,0004289 \text{ R\$/kJ} \rightarrow 0,4289 \text{ R\$/MJ}$$

Com isso:

$$c_7 = 0,0004289 \text{ R\$/kJ} \rightarrow 0,4289 \text{ R\$/MJ}$$

$$c_9 = 0,0004289 \text{ R\$/kJ} \rightarrow 0,4289 \text{ R\$/MJ}$$

Agora podemos calcular as taxas de custos dos fluxos de energia na saída, logo:

$$C_8 = E_8 \times c_8 \rightarrow 3344 \text{ kJ/s} \times 0,4289 \text{ R\$/MJ} = 1,4342 \text{ R\$/s}$$

$$C_7 = 3390 \text{ kJ/s} \times 0,4289 \text{ R\$/MJ} = 1,453971 \text{ R\$/s}$$

$$C_9 = 85 \text{ kJ/s} \times 0,4289 \text{ R\$/MJ} = 0,03646 \text{ R\$/s}$$

- Diferença relativa de custo para a vinhaça na saída

$$r_8 = \frac{c_8 - c_5}{c_5} = \frac{0,0004289 \text{ R\$/kJ} - 0,0003942 \text{ R\$/kJ}}{0,0003942 \text{ R\$/k}} = 0,088 = 8,80\%$$

- Diferença relativa de custos para o biogás

$$r_7 = \frac{c_7 - c_5}{c_5} = \frac{0,0004289 \text{ R\$/kJ} - 0,0003942 \text{ R\$/kJ}}{0,0003942 \text{ R\$/k}} = 0,088 = 8,80\%$$

- Fator exergoeconômico

$$f = \frac{Z_{REATOR}}{C_8 + C_9 + C_6 + Z_{REATOR}} = 0,0133 = 1,33\%$$