



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Ysabella Orlando Abraham de Lima

**“WASTE TO ENERGY”: BENEFICAMENTO DO EFLUENTE  
INDUSTRIAL PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM UMA INDÚSTRIA  
DE BEBIDAS**

Rio de Janeiro

2024

Ysabella Orlando Abraham de Lima

**“WASTE TO ENERGY”: BENEFICAMENTO DO EFLUENTE INDUSTRIAL PARA  
A PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM UMA INDÚSTRIA DE BEBIDAS**



Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro como requisito para obtenção do título de mestre.

Orientadora: Dra. Lia Cardoso Rocha Saraiva Teixeira

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

L732 Lima, Ysabella Orlando Abraham de.  
"Waste to energy": beneficiamento do efluente industrial para a  
produção de biogás em uma indústria de bebidas / Ysabella Orlando  
Abraham de Lima. – 2024.  
108 f.

Orientadora: Lia Cardoso Rocha Saraiva Teixeira.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de  
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Resíduos industriais - Teses. 3.  
Biogás - Teses. 4. Recursos energéticos - Teses. 5. Desenvolvimento  
sustentável - Teses. I. Teixeira, Lia Cardoso Rocha Saraiva. II.  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.  
III. Título.

CDU 62-665.9:620.92

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial  
desta tese, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Ysabella Orlando Abraham de Lima

**“WASTE TO ENERGY”: BENEFICAMENTO DO EFLUENTE INDUSTRIAL PARA  
A PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM UMA INDÚSTRIA DE BEBIDAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro como requisito para obtenção do título de mestre.

Aprovado em 25 de março de 2024.

Banca examinadora:

---

Prof. Dra. Lia Cardoso Rocha Saraiva Teixeira (Orientadora)  
Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof. Gabriel de Pinna Mendez  
Instituto Federal Fluminense - IFFluminense

---

Prof. Simone Maria Ribas Vendramel  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro – IFRJ

Rio de Janeiro

2024

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai, Julio Cesar Abraham de Lima e minha avó, Ermelinda Lombardi Orlando, que mesmo ausentes em presença física, se fizeram presentes em graça e espírito. A eles que me concederam princípios valiosos na vida terrena de fé, honestidade, caráter e coragem, a minha gratidão eterna.

## AGRADECIMENTOS

Nas entrelinhas deste presente trabalho é possível expressar a gratidão pelos que estiveram ao meu lado e me incentivaram a concluir esta etapa com muito mais leveza e sabedoria. Através do amor verdadeiro expressado em forma de apoio e afeto pela minha família, amigos e professores me senti sempre pronta e confiante para cumprir este desafio.

Ao Deus todo poderoso, pai e rei do universo agradeço pela minha vida, e por ser presença viva ao longo desta, durante toda a minha caminhada. Certa de que esteve me fortalecendo nos dias difíceis e de tempestade, agradeço ao meu Deus, à São Miguel Arcanjo, príncipe da milícia celeste, à São Jorge e a todos os santos pela vitória e graça alcançada.

Ao meu pai, meu para sempre herói, agradeço por todo exemplo que foi em vida, sempre me orientando e vibrando pelos meus sucessos e vitórias. Espero que esteja orgulhoso de sua filha.

À minha vó, em memória, Ermelinda Lombardi, a matriarca da família, agradeço por todo amor e zelo pelo quais sempre dedicou em nossas vidas para que eu chegasse até aqui.

À minha mãe, Maria Laura Orlando, que foi sempre a minha sentinela, rocha firme e inabalável, agradeço por todo apoio emocional e financeiro, dedicado ao longo de toda a sua vida, para que eu alcançasse o meu sucesso. Sem ela, não seria possível chegar até o dia de hoje.

À minha irmã, Yasmin Abraham, minha fonte de orgulho e inspiração, agradeço pelas orientações e horas dedicadas a este trabalho. Sem ela, não seria possível chegar até o dia de hoje.

Ao meu parceiro de vida, Felipe Pacheco, sempre tão amoroso e gentil, agradeço por todo amor e dedicação ao longo desta caminhada.

Aos meus colegas de trabalho, que contribuíram direta e indiretamente para a conclusão deste projeto, seja pelo incentivo, instigação ao tema, e aos dados fornecidos, o meu muito obrigada. Em especial, aos meus mentores Tiago Azevedo e Tiago Ribeiro, pelas conversas e orientações no início desta caminhada, e que me guiaram a temática escolhida para discussão. Ao meu chefe, Marcos Cattaneo, pelo

apoio e compreensão ao longo de todo este tempo. Aos colegas Marcel, Beatriz e Drailton pelo suporte e dados técnicos fornecidos.

À minha professora orientadora Dr. Lia Teixeira, pela incrível condução e orientação deste presente trabalho.

Aos professores do Mestrado profissional em Engenharia Ambiental da UERJ e a esta renomada instituição que me acolheu.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para este trabalho, torcendo e vibrando pelo meu sucesso, longe ou perto, o meu muito obrigada.

Mas tu, quando orares, entra no teu aposento, e fechando a tua porta, ora a teu Pai que está em oculto; e teu Pai, que vê em oculto, te recompensará publicamente.

*(Mateus 6:6)*

## RESUMO

LIMA, Y.O.A. **“Waste to energy”**: beneficiamento de efluente industrial para a produção de biogás em uma indústria de bebidas. 2024. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

O tema “Environmental, Social and Corporate Governance” (ESG) passou a ocupar a agenda dos conselhos de administração e das diretorias das empresas como forma de integrar fatores ambientais, sociais e de governança no mercado de capitais. As agendas corporativas de descarbonização e preocupações climáticas orientam o setor industrial para um modelo de negócio sustentável e a busca por alternativas de aproveitamento energético é parte desta jornada. Sendo assim, o presente trabalho aborda as principais características operacionais da digestão anaeróbia, interferências de processos produtivos e oportunidades do tratamento de efluentes líquidos de uma indústria de bebidas localizada no Rio de Janeiro e seu modelo de negócio referência em sustentabilidade. Foram analisados dados técnicos fornecidos pela própria empresa no ano de 2022. A partir dos resultados obtidos observa-se a viabilidade de reaproveitamento energético através do biogás no setor industrial como um processo economicamente rentável e tecnicamente viável. Dessa maneira, a busca pela inovação no ambiente corporativo deve ultrapassar os limites da atividade fim e permear as áreas de sustentabilidade do negócio, objetivando o alcance dos objetivos do desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Indústria de bebidas; Biogás; Digestão anaeróbia.

## ABSTRACT

LIMA, Y.O.A. **“Waste to Energy”**: processing of industrial effluent for the production of biogas in a beverage industry. 2024. 108 p. Dissertation (Master's in Environmental Engineering) – Faculty of Engineering, State University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

The topic “Environmental, Social and Corporate Governance” (ESG) began to occupy the agenda of company boards and directors as a way of integrating environmental, social and governance factors in the capital market. Corporate decarbonization agendas and climate concerns guide the industrial sector towards a sustainable business model and the search for alternative energy use is part of this journey. Therefore, the present work addresses the main operational characteristics of anaerobic digestion, interferences in production processes and opportunities for treating liquid effluents from a beverage industry located in Rio de Janeiro and its business model, a reference in sustainability. Technical data provided by the company itself in 2022 was analyzed. From the results obtained, the feasibility of energy reuse through biogas in the industrial sector is observed as an economically profitable and technically viable process. In this way, the search for innovation in the corporate environment must go beyond the limits of the core activity and permeate the sustainability areas of the business, aiming to achieve the objectives of sustainable development.

Keywords: Beverage industry; Biogas; Anaerobic digestion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Os 17 Objetivos do desenvolvimento sustentável estabelecidos pela Organização das Nações Unidas como parte da Agenda 2030. ....	26
Figura 2 – Previsão das emissões anuais de CO <sub>2</sub> relacionadas a incorporação de fontes renováveis de energia para o período 2010-2050. ....	28
Figura 3 - Percentual de energias renováveis e não renováveis na matriz energética do Brasil, nos anos de 2019 e 2020, m comparação com o mundo e com os países membros da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) em 2018 .....	29
Figura 4 - Ilustração esquemática da repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) no Brasil no ano de 2020. ....	30
Figura 5 - Composição gráfica da matriz elétrica brasileira, em 2019 e 2020, em comparação com o mundo, em 2018, e com os países membros da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) em 2019. ....	31
Figura 6 - Potencial de produção de biogás no Brasil em diferentes nichos destacados pela ABiogás em 2021. ....	33
Figura 7 - Potencial de produção de biogás por substrato no setor de saneamento no Brasil .....	33
Figura 8 - Potencial máximo de biogás para o setor de esgoto sanitário no ano de 2019, em Nm <sup>3</sup> /ano. ....	34
Figura 9 - Distribuição geográfica das cervejarias no Brasil.....	36
Figura 10 - Distribuição por porte das cervejarias no Brasil .....	37
Figura 11 - Etapas de produção da cerveja e os respectivos resíduos gerados em cada etapa do processo. ....	38
Figura 12 - Esquema de geração de energia a partir de 1 tonelada de resíduo .....	41
Figura 13 - Aproveitamento do biogás em cervejarias .....	42
Figura 14 - Etapas da Digestão Anaeróbia. Processos de hidrólise, acidogênese, acetanogênese e metanogênese. ....	43
Figura 15 - Efeitos do pH na atividade relativa de produção de metano em diferentes espécies de arqueas metanogênicas .....	47
Figura 16 - Esquema de funcionamento de um biodigestor tipo UASB.....	51

Figura 17 - Planta de representação esquemática da indústria de bebidas.....	54
Figura 18 - Comitê das Bacias Hidrográficas dos rios Guandu, da Guarda e Guandu-Mirim .....	55
Figura 19 - Fluxo interno de descarte de efluentes para a estação de tratamento de efluentes industriais na indústria de produção de bebidas.....	56
Figura 20 - Análises laboratoriais internas de amostras dos diferentes tipos de efluentes gerados na indústria de bebidas para o controle da ETEI .....	58
Figura 21 - Vista superior da estação de tratamento de efluentes da indústria produtoras de bebidas sendo (1) Caixa de recebimento de efluente bruto e diluído; (2) gradeamento e caixas de areia; (3) peneiras estáticas; (4) tanque de equalização; (5) tanque de acidificação; (6) reatores anaeróbios; (7) flare atmosférico; (8) reatores aeróbios; (9) decantadores.....	59
Figura 22 - Tratamento preliminar com peneiras da ETEI da indústria produtora de bebidas.....	60
Figura 23 - Tratamento primário – tanque de equalização da ETEI da indústria produtora de bebidas. ....	60
Figura 24 - Tanque de tratamento secundário da ETEI da indústria produtora de bebidas.....	61
Figura 25 - Tanque de tratamento terciário da ETEI da indústria produtora de bebidas.....	61
Figura 26 - Esquema de controle automático da estação de tratamento de efluentes industrial da indústria produtora de bebidas. Em verde destaca-se as automatizações de processo na planta. ....	62
Figura 27 - Tela do supervisor com controles automáticos da ETEI da industria produtora de bebidas. ....	63
Figura 28 - Imagem gerada pelo software Grafana® para o acompanhamento online de parâmetros da ETEI da indústria produtora de bebidas .....	63
Figura 29 - Imagem da ETEI da indústria produtora de bebidas destacando o Gasômetro e o Flare. ....	65
Figura 30 - Imagem da ETEI da indústria produtora de bebidas destacando os compressores de biogás. ....	66
Figura 31 - Imagem das tubulações de distribuição do biogás da ETEI da indústria produtora de bebidas .....	67

Figura 32 - Fluxograma de produção de biogás na ETEI da indústria produtora de bebidas.....	67
Figura 33 - Imagem da tela do supervisor do Sistema de Dessulfurização do biogás da ETEI da indústria produtora de bebidas. ....	68
Figura 34 - Imagem da tela do supervisor do Sistema de Distribuição de Biogás e Gás Natural no forno da fábrica de vidros da indústria produtora de bebidas.....	69
Figura 35 - pH de saída nos reatores anaeróbios (R2 e R3) da ETEI numa indústria produtora de bebidas. Média de pH registrada ao longo do ano de 2022.....	71
Figura 36 - Temperatura nos reatores anaeróbios (R2 e R3) da ETEI numa indústria produtora de bebidas. Média de temperatura registrada ao longo do ano de 2022. .	72
Figura 37 - Alcalinidade total nos reatores anaeróbios (R2 e R3) da ETEI numa indústria produtora de bebidas. Média de alcalinidade total registrada ao longo do ano de 2022. ....	73
Figura 38 - Nutrientes (Nitrogênio e Fósforo) nos reatores anaeróbios (R2 e R3) da ETEI numa indústria produtora de bebidas. Média de nutrientes registrada ao longo do ano de 2022. ....	74
Figura 39 - DQO de alimentação nos reatores anaeróbios (R2 e R3) da ETEI numa indústria produtora de bebidas. DQO de alimentação registrada ao longo do ano de 2022. ....	76
Figura 40 - DQO de saída nos reatores anaeróbios (R2 e R3) da ETEI numa indústria produtora de bebidas. Média de DQO registrada ao longo do ano de 2022. ....	76
Figura 41- Eficiência de Remoção de DQO nos reatores anaeróbios (R2 e R3) da ETEI numa indústria produtora de bebidas. Média de remoção de DQO registrada ao longo do ano de 2022.....	77
Figura 42 - Atividade metanogênica nos reatores anaeróbios (R2 e R3) da ETEI numa indústria produtora de bebidas. Atividade metanogênica registrada ao longo do ano de 2022. ....	78
Figura 43 - Análise dos parâmetros da ETEI de uma indústria produtora de bebidas. Vazão de Biogás x Carga Orgânica no Reator 2.....	81
Figura 44 - Análise dos parâmetros da ETEI de uma indústria produtora de bebidas. Vazão de Biogás x Carga Orgânica – Reator 3.....	82

Figura 45 - Análise dos parâmetros da ETEI de uma indústria produtora de bebidas. DQO de Alimentação x Carga Orgânica – Reator 2.....	83
Figura 46 - Análise dos parâmetros da ETEI de uma indústria produtora de bebidas. DQO de Alimentação x Carga Orgânica – Reator 3.....	83
Figura 47 - Análise dos parâmetros da ETEI de uma indústria produtora de bebidas. Vazão de Biogás X DQO – Reator 2.....	84
Figura 48 - Análise dos parâmetros da ETEI de uma indústria produtora de bebidas. Vazão de Biogás X DQO – Reator 3.....	84
Figura 49 - Produção de Biogás na ETEI de uma indústria produtora de bebidas. Dados mensais referentes ao ano de 2022.....	85
Figura 50 - Análise dos parâmetros na ETEI de uma indústria produtora de bebidas. Volume de Produção de bebida (hl) x Produção de Biogás (MJ) no reator 2. Dados mensais referentes ao ano de 2022.....	86
Figura 51 - Análise dos parâmetros na ETEI de uma indústria produtora de bebidas. Volume de Produção (hl) x Produção de Biogás (MJ) no reator 3. Dados mensais referentes ao ano de 2022.....	87
Figura 52 - Análise dos parâmetros na ETEI de uma indústria produtora de bebidas. Perda de extrato (%) x Produção de Biogás (MJ). Dados mensais referentes ao ano de 2022. PE= Perda de extrato.....	88
Figura 53 - Perda de extrato (%) x Produção de Biogás (MJ) – 2022.....	89
Figura 54 - Representação do consumo de biogás na fábrica de vidros de uma indústria produtora de bebidas. Consumo mensal em MJ referentes ao ano de 2022.....	90
Figura 55 - Porcentagem de biogás em relação ao gás natural utilizado na fábrica de vidros uma indústria produtora de bebidas. Dados mensais referentes ao ano de 2022.....	91
Figura 56 - Porcentagem de biogás perdido pelo Flare na fábrica de vidros de uma indústria produtora de bebidas. Dados referentes aos anos de 2019 a 2022.....	92
Figura 57 - Área de descarte de resíduos de bagaço de malte oriundo da produção de cerveja na Industria produtora de bebidas.....	95
Figura 59 - Consumo de Soda na Industria produtora de bebidas. Dados mensais referente ao ano de 2022.....	98

Figura 60 - Consumo de ácidos na Indústria produtora de bebidas. Dados mensais referente ao ano de 2022. ....	99
Figura 61 - Consumo de NH <sub>3</sub> na Indústria produtora de bebidas. Dados mensais referentes ao ano de 2022. ....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características físico-químicas dos substratos usados para produção de biogás e seus potenciais de produção em base seca .....	40
Tabela 2 - Requisitos ambientais dos microrganismos anaeróbios durante o processo de digestão anaeróbia. ....	46
Tabela 3 - Autorização de área licenciada pelo INEA para as instalações da indústria de bebidas.....	54
Tabela 4 - Lista de equipamentos da planta de biogás da ETEI da Industria de bebidas.....	64
Tabela 5 - Correlação DQO:N:P nos reatores anaeróbios (R2 e R3) da ETEI numa indústria produtora de bebidas. Correlação DQO:N:P registrada ao longo do ano de 2022. ....	75
Tabela 6 - Biodegradabilidade nos reatores anaeróbios (R2 e R3) da ETEI numa indústria produtora de bebidas. Biodegradabilidade registrada ao longo do ano de 2022. ....	79
Tabela 7 - Tempo de detenção hidráulica nos reatores anaeróbios (R2 e R3) da ETEI numa indústria produtora de bebidas. ....	79
Tabela 8 - Custos operacionais totais ETEI da Industria produtora de bebidas no ano de 2022. Foram considerados custos com mão de obra (MO), produtos químicos, transporte e destinação de resíduos, gastos com manutenção e energia elétrica. ....	93
Tabela 9 - Lucro da geração de biogás da Industria produtora de bebidas no ano de 2022. ....	93
Tabela 10 - Ganhos financeiros a partir da venda de bagaço de malte oriundo da produção de cerveja na Industria produtora de bebidas. Dados mensais referente ao ano de 2022. ....	96
Tabela 11 - Ganhos financeiros a partir da venda de levedura oriunda da produção de cerveja na Industria produtora de bebidas. Dados mensais referente ao ano de 2022. ....	97

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIOGAS	Associação brasileira do biogás
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
CAF	Corporación Andina de Fomento
CETESB	Companhia estadual do estado de São Paulo
COP	Conference of the Parties
ENSO	El Niño–Southern Oscillation
ESA	European Space Agency
GISS	Goddard Institute for Space Studies
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás
IEA	International Energy Agency
INEA	Instituto estadual do ambiente
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRENA	International Renewable Energy Agency
MMA	Ministério de Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas Energia
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration.
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration.
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PROCON	Programa de auto controle de efluentes líquidos
RAE	Relatório de acompanhamento de efluentes líquidos
REMAP	Renewable Energy Roadmaps
SEBRAE	Serviço de apoio brasileiro a micro e pequenas empresas
SIN	Sistema Interligado Nacional
SLAM	Sistema de licenciamento ambiental

SNIS Sistema nacional de informações sanitárias  
UASB Upflow Anaerobic Sludge Blanket  
UNFCCC United Nations Framework Convention on Climate Change

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	20
<b>1. OBJETIVOS .....</b>	<b>22</b>
1.1. OBJETIVO GERAL .....	22
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	22
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>23</b>
2.1. ESG NAS GRANDES EMPRESAS: O ÚNICO CAMINHO POSSÍVEL .....	23
2.2. PANORAMA HISTÓRICO DOS FÓRUMS GLOBAIS SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS .....	24
2.3. DESCARBONIZAÇÃO .....	27
2.4. MATRIZ ENERGÉTICA E ELÉTRICA BRASILEIRA .....	28
2.5. BIOGÁS .....	31
2.6. SANEAMENTO .....	33
2.6.1 Esgoto Sanitário .....	34
2.6.1.1. Potencial de geração de biogás nas estações de tratamento de esgoto .....	34
2.7. SETOR CERVEJEIRO NO BRASIL .....	36
2.7.1 Processo de produção cervejeiro .....	37
2.7.2. Potencial de geração de biogás na indústria cervejeira .....	39
2.7.2.1. Geração de resíduos e conversão em biogás .....	40
2.8. O PROCESSO DE BIODIGESTÃO .....	42
2.8.1.1. Hidrólise .....	43
2.8.1.2 Acidogênese .....	44
2.8.1.3 Acetanogênese .....	44
2.8.1.4 Metanogênese .....	45
2.8.2. Parâmetros de processo .....	46
2.8.2.1. Temperatura .....	46
2.8.2.2 pH, Alcalinidade e Ácidos Voláteis .....	47
2.8.2.3. Nutrientes .....	48
2.8.2.3.1 Nitrogênio amoniacal e amônia livre .....	48
2.8.2.4. Alcalinidade .....	49
2.8.2.5 Tempo de retenção hidráulica .....	49

<b>2.9. TIPO DE BIODIGESTORES</b> .....	50
<b>2.9.1 REATOR UASB</b> .....	50
<b>3. ESTUDO DE CASO – METODOLOGIA</b> .....	52
<b>3.1. CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA DE BEBIDAS</b> .....	53
<b>3.2 O EFLUENTE INDUSTRIAL</b> .....	55
3.2.1. Gestão corporativa dos descartes industriais .....	55
3.2.2. Lançamento de efluentes .....	57
3.2.3.– Estação de tratamento de efluentes industriais (ETEI).....	58
3.2.4. Gestão a vista e automatização da ETEI .....	62
3.2.5 Usina de beneficiamento de biogás.....	64
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	70
<b>4.1 RESULTADOS DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS NO ANO DE 2022</b> .....	70
4.1.1 pH dos reatores anaeróbios .....	70
4.1.2. Temperatura .....	71
4.1.3. Alcalinidade .....	72
4.1.4. Nutrientes (N/P).....	73
4.1.5. Eficiência de remoção de DQO R2 e R3 .....	75
4.1.6. Atividade metanogênica .....	77
4.1.7. Biodegradabilidade.....	78
4.1.8. Tempo de detenção hidráulica (TDH) .....	79
<b>4.2 COEFICIENTE DE PEARSON NA CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS APRESENTADOS</b> .....	80
4.2.1 Carga Orgânica X Biogás .....	81
4.2.2 Carga Orgânica X DQO.....	82
4.2.3 Vazão de Biogás X DQO .....	84
<b>4.3 RESULTADOS DA CERVEJARIA COMPARATIVO COM A PRODUÇÃO DE BIOGÁS</b> .....	85
4.3.1 Volume de produção.....	86
4.3.2.Perda de extrato .....	87
4.3.3 Ganhos em energia calorífica.....	89
<b>4.4 RESULTADOS DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DA ESTAÇÃO DE BENEFICIAMENTO DE BIOGÁS E IMPACTO NA FÁBRICA VIDREIRA</b> .....	90

<b>4.5 CÁLCULO GANHOS FINANCEIROS .....</b>	<b>92</b>
<b>4.6 OPORTUNIDADES OPERACIONAIS DE INCREMENTO NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS .....</b>	<b>94</b>
4.6.1 Resíduos: bagaço de malte e fermento .....	94
4.6.2 Oportunidade: uso de químicos na cervejaria .....	97
4.6.3 Oportunidade – rota logística de despejo .....	100
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>102</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>104</b>

## INTRODUÇÃO

Como estratégia para conquistar diferentes mercados vários setores industriais estão direcionando investimentos para a adoção de práticas ambientais, sociais e de governança através de uma gestão sustentável de recursos. Em 2022, a empresa líder mundial na fabricação de bebidas na América Latina delineou, num relatório de sustentabilidade, suas metas e compromissos ambientais a serem alcançados até 2025. As áreas de foco incluem gestão hídrica, agricultura sustentável, ação climática, embalagens circulares e apoio ao ecossistema empreendedor. Entre as metas relacionadas ao clima, destaca-se o compromisso de, até 2025, obter 100% da eletricidade de fontes renováveis e reduzir em 25% a intensidade das emissões de carbono em toda a cadeia de valor.

Nesse sentido, a geração de energias a partir do combustível biometano, produzido no processo de biodigestão anaeróbia dos efluentes, tem recebido especial atenção no Brasil como uma promissora fonte alternativa e sustentável de energia (EMPRAPA, 2015).

Uma das principais vantagens da produção de energia em ETE (Estação de Tratamento de Efluentes) relaciona-se ao fato de que toda a eletricidade gerada pode ser consumida no próprio local, sem a necessidade de uma rede de distribuição (TSAGARAKIS, 2007). Adicionalmente, a digestão anaeróbia do lodo de esgoto pode, em muitos casos, produzir biogás suficiente para atender à demanda de energia necessária para a operação da planta (METCALF & EDDY, 2003). Para Salomon e Lora (2009), as principais vantagens da produção de energia elétrica pelo uso do biogás são a geração descentralizada de energia, próximo da fonte consumidora, a possibilidade de lucro adicional devido à produção e à comercialização de energia, de acordo com as regras do sistema regulador do mercado de energia elétrica, a redução no consumo de eletricidade suprida externamente, o potencial de uso em processos para a cogeração de eletricidade e calor e a redução das emissões de metano, que é um gás de efeito estufa.

O efluente das cervejarias é oriundo das diversas fases do processo de produção de bebidas, como a moagem, mosturação, fermentação, maturação, filtração e envase, sendo composto por resíduos dos insumos utilizados como levedura, malte e açúcares. Em termos de volume, são gerados de 3 a 6 L de efluente

líquido para cada 1 L de cerveja produzida (CETESB, 2005). Dessa forma, a necessidade de tratamento desse efluente para disposição final, aliada à sua composição e volume, torna a digestão anaeróbia uma alternativa de redução de carga orgânica e de geração de biogás. Nos reatores anaeróbios, cerca de 70 a 90% da matéria orgânica é convertida em biogás, uma pequena quantidade de lodo é produzida. Além disso, o tratamento de resíduos biológicos é atrativo na indústria cervejeira, pois pode combinar o tratamento de águas residuais com seu uso para gerar recursos como energia elétrica, que pode ser usado dentro da própria planta (ARANTES et al., 2017).

Desta forma, a partir dos dados da Estação de Tratamento de Efluentes Industriais (ETEI) de uma Indústria produtora de bebidas no estado do Rio de Janeiro, avaliou as características do efluente industrial de origem cervejeira, identificar as correções necessárias para maximizar a produção de biogás e calcular os ganhos financeiros a partir da substituição do gás natural pelo biogás.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GERAL**

O presente estudo tem por objetivo geral avaliar as características físico-químicas do efluente industrial e analisar a correlação e interferência entre os processos produtivos e a geração de biogás na Estação de tratamento de efluentes de uma indústria produtora de bebidas no estado do Rio de Janeiro.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar os fatores oriundos do processo fabril que contribuem para as características do efluente;
- Caracterizar o Efluente quanto as suas características físico-químicas;
- Analisar a quantidade de biogás gerado a partir da quantidade de produção líquida que foi produzida na cervejaria;
- Correlacionar parâmetros físico químicos e parâmetros de processo, de forma a identificar a correlação dos mesmos com a geração de biogás;
- Mensurar financeiramente os ganhos relativos ao uso de biogás em substituição ao Gás Natural como fonte energética na indústria vidreira.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. ESG NAS GRANDES EMPRESAS: O ÚNICO CAMINHO POSSÍVEL

O tema *ESG* (“*Environmental, social, and corporate Governance*”) passou a ocupar a agenda dos conselhos de administração e das diretorias das empresas, bem como dos governantes, como forma de integrar fatores ambientais, sociais e de governança no mercado de capitais. O termo foi cunhado em 2004, em uma publicação do Pacto Global em parceria com o Banco Mundial, chamada “*Who cares wins*” (PACTO GLOBAL REDE BRASIL, 2020). Na oportunidade, o então secretário-geral da ONU, Kofi Annan, fez a provocação a presidentes de grandes instituições financeiras sobre como integrar fatores ambientais, sociais e de governança no mercado de capitais (BNDS, 2021).

A ONU lista alguns exemplos oriundos do mercado financeiro e de capitais que demonstram a relevância da agenda com relação aos princípios ESG (PACTO GLOBAL REDE BRASIL, 2020). O primeiro diz respeito à Bolsa de Valores do Brasil – a B3 –, que lançou em setembro de 2020, em parceria com a S&P Dow Jones, o índice S&P/B3 Brasil ESG, voltado especialmente à seleção de empresas comprometidas com as práticas ambientais, sociais e de governança (BNDS, 2021) estimulando ainda mais os investimentos nessas frentes de trabalho em empresas nacionais e multinacionais.

A pesquisa realizada por Peloza (2009) examinou 128 artigos científicos que investigaram esta relação e constatou que 59% reportaram uma correlação positiva entre as práticas sustentáveis e o desempenho financeiro das empresas, sendo o restante dividido entre relação neutra ou mista (27%) e negativa (14%). Existem algumas possíveis justificativas para estes resultados. Primeiramente, companhias que adotam estratégias socialmente responsáveis conseguem mitigar riscos operacionais, estratégicos, reputacionais, regulatórios e financeiros que, caso concretizados, poderiam afetar a performance futura e o valor da empresa (*Journal of Corporate Finance*, 2015). Além disso, a divulgação dos resultados não financeiros reflete uma maior transparência corporativa e uma forte governança que, por ventura, diminuem a assimetria de informação existente entre a empresa e as partes interessadas (CHENG; COLLINS; HUANG, 2006).

## 2.2. PANORAMA HISTÓRICO DOS FÓRUMS GLOBAIS SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As discussões acerca das mudanças climáticas, apesar de mais acentuadas no século XXI, tiveram o seu marco ainda no século XIX. Os fóruns e interesses globais relativos à temática do clima foram iniciados visto que as alterações relativas ao aumento da temperatura global são capazes de impactar toda a economia e ecossistema a nível mundial. Este pleno reconhecimento dos impactos das ações antrópicas nas alterações do clima fez com que a comunidade internacional através da Organização das Nações Unidas (ONU) se reunisse para a tomada de decisões acerca deste tema (MIRANDA, 2012).

As mudanças climáticas estão associadas às alterações na temperatura e na precipitação, ao aumento do nível do mar e à intensificação dos eventos extremos, como secas, ondas de calor e ciclones tropicais (IPCC, 2007). O rastreamento das tendências da temperatura global fornece um indicador crítico do impacto das atividades humanas – especificamente das emissões de gases de efeito estufa - em nosso planeta. O aumento das temperaturas está causando fenômenos como a perda de gelo marinho e massa da camada de gelo, aumento do nível do mar, ondas de calor mais longas e intensas e mudanças nos habitats de plantas e animais (NASA, 2021). Compreender essas tendências climáticas de longo prazo é essencial para a segurança e a qualidade da vida humana, permitindo que os cidadãos se adaptem às mudanças no ambiente, como plantar diferentes safras, gerenciar recursos hídricos e se preparar para eventos climáticos extremos.

De fato, as discussões sobre esse tema começaram, em um âmbito global, na década de 1970 e vêm se consolidando desde então. Em 1979, foi realizada a Primeira Conferência Mundial do Clima que apontou para a necessidade de uma cooperação entre as Nações para o desenvolvimento de uma estratégia global para o entendimento do funcionamento e uso racional do sistema climático (WMO, 1979). As discussões evoluíram e, em 1989, foi criado o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) com o objetivo de fornecer aos governos uma visão científica clara sobre o que está acontecendo com o clima mundial (IPCC, 2010).

Em 1992, foi criada a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas *United Nations Framework Convention on Climate Change*, (UNFCCC) que reuniu os países num esforço para estabilizar as concentrações de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera em um nível que não interfira de forma perigosa no sistema climático, freando o aquecimento global e seus possíveis impactos (UNITED NATIONS, 1992). E, como desfecho, tem-se a criação do Protocolo de Quioto no ano de 1997, que trouxe compromissos reais e estabeleceu que os países devem reduzir suas emissões de GEE em pelo menos 5% abaixo dos níveis de 1990 no período de 2008 a 2012 (UNITED NATIONS, 1998). Todos esses eventos sustentam a importância de estudos sistemáticos sobre as mudanças climáticas e da busca por ações que levem à redução das emissões de GEE (MIRANDA, 2021).

Desde a Conferência das Partes (COP-3) realizada em 1997, onde foi acordado o protocolo de Kyoto, houve diversos outros marcos históricos formados pela COP nos anos de 2007, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016.

Em 2015, na COP-21, em Paris, foi instituído o Acordo de Paris, um pacto global para nortear a estratégia mundial de luta contra as mudanças climáticas globais. Dentre os principais objetivos deste acordo, estão o de limitar o aumento da temperatura global abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais. Além disso, possui diretrizes em diversos aspectos que preconizam (WWF, 2020):

- Contribuições climáticas nacionais de atualização periódica a fim de acompanhar o atingimento das metas a longo prazo.
- Abertura de um intercâmbio de emissões de carbono.
- Fomento a contribuições financeiras de países desenvolvidos.
- Monitoramento e verificação das ações.
- Transferência de tecnologia para países em desenvolvimento.

Também em 2015, líderes mundiais e representantes da sociedade civil reuniram-se na sede da ONU, em Nova York, e formularam um plano de ação para erradicar a pobreza, proteger o planeta e garantir que as pessoas alcancem a paz e a prosperidade (UNODC,2024). Esse plano, conhecido como Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, resultou na criação de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Figura 1) são reflexos do atual estágio dos direitos humanos globalmente considerados, seja porque consistem numa reafirmação do rol de tais direitos, seja porque trazem metas concretas com a finalidade de alcançá-los e protegê-los (Silveira e Pereira, 2018).

Figura 1 - Os 17 Objetivos do desenvolvimento sustentável estabelecidos pela Organização das Nações Unidas como parte da Agenda 2030.



Fonte: UNODC, 2024

Ao longo das conferências do clima desde 2015 até 2022, as principais metas estabelecidas refletiram a crescente urgência em combater as mudanças climáticas e promover a sustentabilidade global. Metas adicionais foram estabelecidas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, aumentar o investimento em energias renováveis, proteger ecossistemas vulneráveis e fortalecer a resiliência das comunidades aos impactos das mudanças climáticas. A COP26, em 2021, representou um marco significativo, com nações se comprometendo a intensificar seus esforços para cumprir as metas do Acordo de Paris e avançar em direção a um futuro mais sustentável e resiliente para todos citação.

Estima-se que as ações antrópicas sejam responsáveis por cerca de 0,8 a 1,2°C de aquecimento global acima dos níveis pré-industriais. Seguindo esta tendência temporal, é esperado que este valor atinja 1,5°C entre 2030 e 2052 (IPCC, 2018). Limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais é fundamental para reduzir significativamente os riscos e impactos das mudanças climáticas a partir das emissões de GEE. Caso haja algum tipo de falha no cumprimento dessas metas, o planeta se encontrará no limiar de risco para que as mudanças climáticas sejam ainda mais catastróficas (IRENA, 2019).

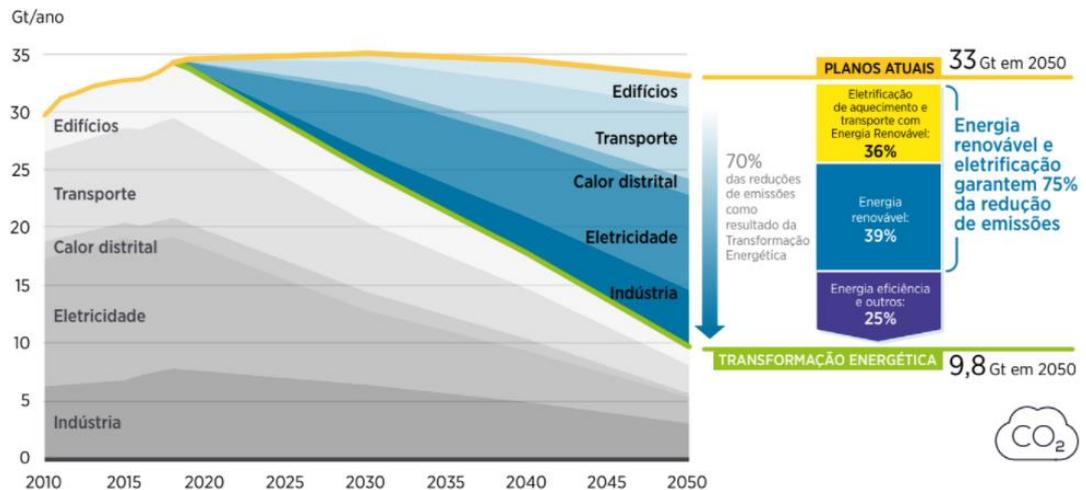
### 2.3. DESCARBONIZAÇÃO

Mundialmente, as preocupações climáticas reforçaram os caminhos para uma transição energética, sobretudo do ponto de vista da redução das emissões de combustíveis fósseis. A produção eficiente de energia reduzindo as emissões de gases de efeito estufa é conhecida como a descarbonização. Para que esta transição energética ocorra de maneira efetiva, os países precisarão diminuir a participação de fontes fósseis em suas matrizes, bem como a promoção de ações para aumentar a eficiência energética, o armazenamento de energia e o estímulo a fontes que possuem um potencial reduzido de emissões de GEE em suas operações (IRENA, 2019).

A transição para uma economia de baixo carbono já é uma realidade mesmo nas empresas mais tradicionais de combustíveis fósseis, que já estão investindo em energias renováveis. A retomada econômica do Brasil exigirá energia, uma vez que expansão do Produto Interno Bruto (PIB) e consumo energético estão correlacionados. A questão que fica em relação ao futuro é como consolidar investimentos em fontes energéticas limpas, reduzir a participação dos combustíveis fósseis, e ainda assim, atender à urgente demanda por crescimento energético (DELGADO, 2020).

Com a descarbonização energética espera-se, ainda, uma maior dinamização do setor devido à contínua incorporação de novas fontes de energia no mercado da eletricidade. Uma parte importante disso é a entrada da geração renovável variável, predominantemente solar, fotovoltaica, eólica terrestre e marítima, que começou a substituir as formas convencionais de geração energia. A figura 2 demonstra o cenário de participação das energias renováveis como peça fundamental para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> em até 75%, demonstrando, ainda mais, seu papel central na transformação energética (IRENA, 2019).

Figura 2 – Previsão das emissões anuais de CO<sub>2</sub> relacionadas a incorporação de fontes renováveis de energia para o período 2010-2050.



Legenda: Gt refere-se a gigatoneladas e RE energia renovável.

Fonte: IRENA, 2019.

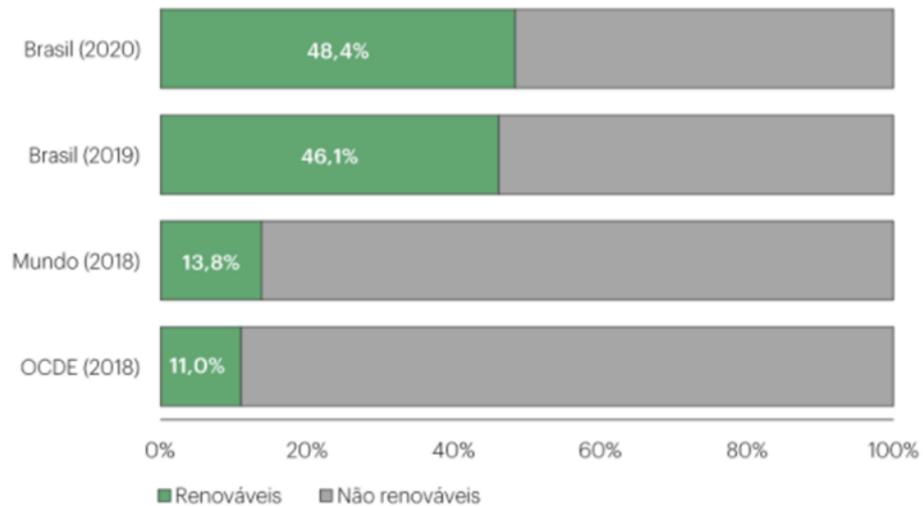
## 2.4. MATRIZ ENERGÉTICA E ELÉTRICA BRASILEIRA

Como forma de compreender, em sua totalidade, o cenário de transição energética brasileiro, é fundamental conhecer o retrato atual da matriz energética. Ele consiste no ponto de partida inicial para a construção da transição energética no horizonte futuro.

Segundo dados do Balaço Energético Nacional (BEM) publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) no ano de 2021, a matriz energética brasileira era constituída majoritariamente por fontes não renováveis, sendo representada por 51,6%, e a outra parcela, menor e renovável, representando 48,4% (EPE, 2021).

Ainda que não represente a principal parcela da distribuição na matriz brasileira, a participação renovável no Brasil, quando comparada a tendência mundial, é bastante representativa (Figura 3).

Figura 3 - Percentual de energias renováveis e não renováveis na matriz energética do Brasil, nos anos de 2019 e 2020, em comparação com o mundo e com os países membros da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) em 2018



Fonte: EPE, 2021

Esta vantagem frente ao cenário mundial se deve aos esforços brasileiros no que diz respeito ao incremento da geração hidráulica e eólica, o aumento da oferta da biomassa da cana e biodiesel e redução da oferta de carvão mineral (BEN, 2020).

Entre as fontes não renováveis, a composição energética é constituída de petróleo e derivados (33,1%), gás natural (11,8%), carvão mineral (4,9%), urânio (1,3%) e outras fontes não renováveis (0,6%). Por outro lado, entre as fontes renováveis, a composição se apresenta da seguinte maneira: biomassa da cana (19,1%), hidráulica (12,6%), lenha e carvão vegetal (8,8%) e outras renováveis (7,7%) conforme ilustra a Figura 4 (EPE, 2021).

Figura 4 - Ilustração esquemática da repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) no Brasil no ano de 2020.

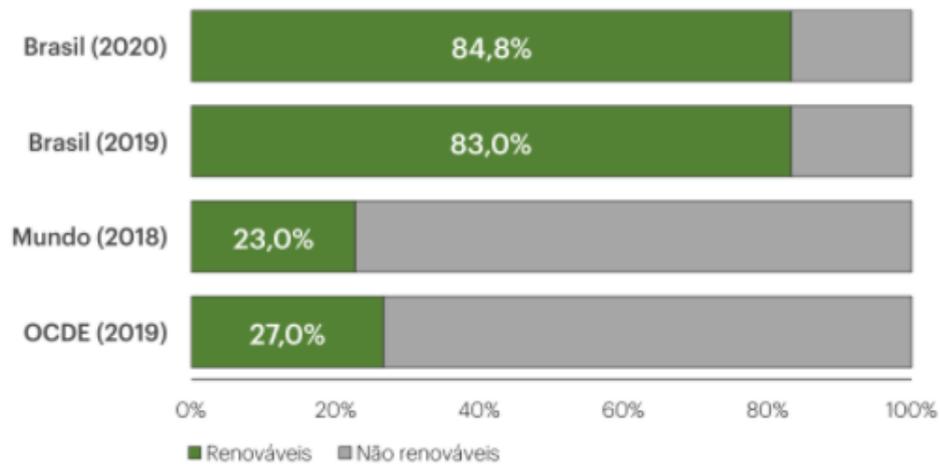


Fonte: EPE, 2021.

Por outro lado, a matriz elétrica trata-se de um conjunto mais restrito de fontes de energia, já que ela abrange apenas fontes de energia responsáveis pela geração de energia elétrica, a eletricidade (EPE, 2020).

A matriz elétrica brasileira, ao contrário da matriz energética, é constituída majoritariamente por energia renovável, representada por 84,8%, com predominância da geração hidráulica, correspondente a 63,8% (EPE, 2021). O Brasil é privilegiado em termos de território, ocupando as primeiras posições entre os países de maior extensão territorial, o que lhe permite ser potencialmente apropriado para prospecção de diferentes fontes de energia (OLIVEIRA, 2019). A tendência mundial é que com o crescimento de outros tipos de fontes renováveis, o protagonismo hidráulico diminua, já que é um método a fatores sazonais e climáticos, comprometendo a segurança energética. Os outros 15,2% da matriz elétrica são compostos por fontes de energias não renováveis (Figura 5).

Figura 5 - Composição gráfica da matriz elétrica brasileira, em 2019 e 2020, em comparação com o mundo, em 2018, e com os países membros da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) em 2019.



Fonte: EPE, 2020

Apesar da matriz elétrica nacional ser uma das mais limpas do mundo, devido a abundância de fontes renováveis de energia, Coyle e Simmons (2014) alertam que nas próximas décadas, o Brasil enfrentará novos desafios associados ao rápido crescimento da demanda de eletricidade e decisões delicadas sobre os benefícios e riscos associados ao desenvolvimento de hidrelétricas em larga escala.

Desta forma, verifica-se que a diversificação das fontes de energia é fundamental para garantir o fornecimento ininterrupto de eletricidade, pois quando se obtém o recurso de fontes distintas, em eventuais crises hídricas o setor não será prejudicado, garantindo o suprimento da demanda de energia (ROVARIS, 2020).

## **2.5.BIOGÁS**

O biogás gerado no processo da biodigestão anaeróbia é constituído basicamente de 60% de metano ( $\text{CH}_4$ ), 35% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e 5% de uma mistura de hidrogênio, nitrogênio, amônia, ácido sulfídrico, monóxido de carbono, aminas voláteis e oxigênio (TCHOBANOGLIOUS, THEISEIN e VIGIL, 1993). O gás metano, constituinte majoritário do biogás, é altamente energético e lhe atribui um poder calorífico na faixa de 5.000 a 7.000  $\text{kcal.m}^{-3}$ , conferindo-lhe características

semelhantes às do gás natural (GN) e pode ser usado como combustível, e conseqüentemente, para a conversão em energia térmica, mecânica ou elétrica (PECORA, 2006). Devido à versatilidade do biogás, é possível utilizá-lo em quaisquer atividades que necessitem de calor, como para o uso doméstico (cozinhar, aquecer e iluminar) e também para a geração de energia elétrica, através da sua combustão controlada em motores de conversão, como em turbinas a gás.

O incremento e incentivo às tecnologias renováveis vêm ampliando e se transformando na nova tendência energética futura. Em 2017, o Ministério das Cidades, em Brasília, publicou o documento denominado “PROBIOGÁS”, um projeto de fomento ao aproveitamento energético do biogás no Brasil através de uma cooperação Brasil-Alemanha, com o objetivo de contribuir para a ampliação do uso energético eficiente do biogás e, por conseguinte, para a redução de emissões de gases indutores do efeito estufa. (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2017)

As rotas tecnológicas para a produção de biogás no Brasil podem ser desmembradas em três principais nichos com diferentes potenciais de produção (Figura 6) (ABIOGÁS, 2021):

- Setor Sucreenergético
- Agronegócio
  - Abatedouros
  - Dejetos de animais
  - Laticínios
  - Mandioca
  - Milho
  - Soja
- Saneamento
  - Resíduos sólidos urbanos
  - Tratamento de efluentes líquidos

Figura 6 - Potencial de produção de biogás no Brasil em diferentes nichos destacados pela ABiogás em 2021.



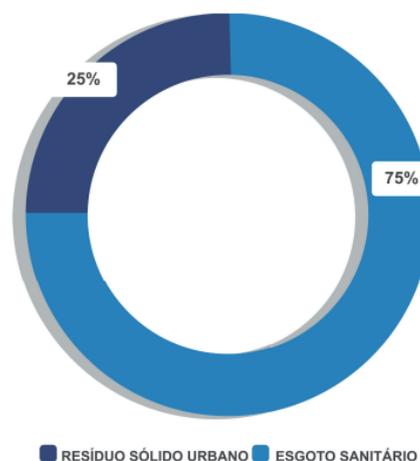
Fonte: ABIOGAS, 2021

## 2.6.SANEAMENTO

Na lei do saneamento em 2007, ele foi definido como o conjunto dos serviços, infraestrutura e instalações operacionais de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana, drenagem urbana, manejos de resíduos sólidos e de águas pluviais.

No caso dos substratos com potencial de produção de biogás (Figura 7), o setor de saneamento engloba a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos e o esgotamento sanitário, que serão detalhados a seguir.

Figura 7 - Potencial de produção de biogás por substrato no setor de saneamento no Brasil



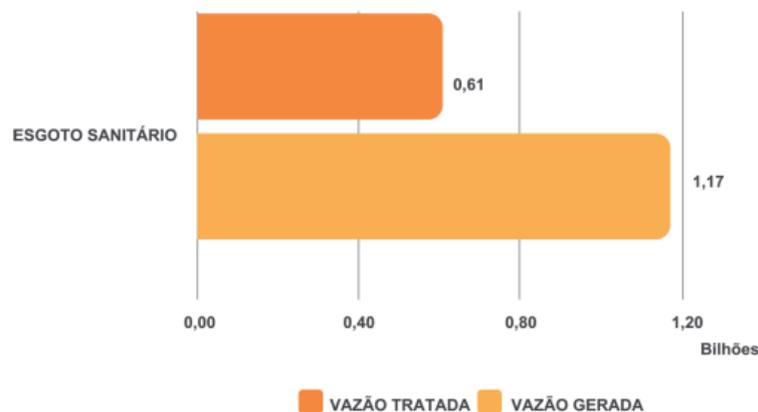
Fonte: ABIOGAS, 2021.

### 2.6.1 Esgoto Sanitário

O esgotamento sanitário no Brasil representa um grande desafio a ser vencido. Somente 55% da população possui acesso à coleta e tratamento adequado de esgotos, em um país no qual se gera 9,1 toneladas de esgoto por dia (ANA, 2020).

O biogás pode ser um grande aliado na universalização do esgotamento sanitário do país, pois além de reduzir a problemática de descarte do resíduo, pode reduzir os gastos energéticos do sistema, podendo trazer receita adicional para unidades de maior porte (ABILOGÁS, 2020). Diversas plantas no Brasil já utilizam uma rota anaeróbia de tratamento do esgoto recebido, no entanto, grande parte do biogás gerado hoje ainda é queimado (Figura 8).

Figura 8 - Potencial máximo de biogás para o setor de esgoto sanitário no ano de 2019, em Nm<sup>3</sup>/ano.



Fonte: ABILOGAS, 2021

#### 2.6.1.1. Potencial de geração de biogás nas estações de tratamento de esgoto

Considerando apenas a disponibilidade atual da rede de esgoto, o potencial de produção de biogás é de 493 milhões de Nm<sup>3</sup> por ano, sendo 70% localizado na região sudeste. Essa produção poderia gerar 375 milhões de Nm<sup>3</sup> de biometano/ano. (ABILOGÁS, 2022).

O novo marco do saneamento sinaliza para o setor de biogás uma grande oportunidade com a ampliação do serviço de coleta de esgoto, elevando o potencial de produção de biogás e biometano podendo chegar em 934 milhões de Nm<sup>3</sup> em 2033 (ABILOGÁS, 2022). A expansão do serviço de saneamento e o aproveitamos

energético do biogás nas ETEs tem também potencial para reduzir as emissões de GEE. Em 2033, seria possível evitar as emissões de 11,4 milhões de tCO<sub>2</sub>eq por ano. Sistemas eficientes de uso do biogás, especialmente quando associado à geração de energia, emitem até 95% menos de GEEs (ABIOGÁS, 2022). A redução de emissões de GEEs na ETEs, no entanto, depende de algumas medidas que reduzem a perda do biogás dos reatores, como: uso de queimadores eficientes, cobertura dos tanques e manutenção adequada do sistema.

A Nota técnica nº da ABiogás, publicada em 2021 em parceria com diversos entes privados e liderada pelo MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação) (ABIOGAS, 2021) e implementada pela ONU para o desenvolvimento industrial, apresenta uma estimativa do potencial de produção biogás a partir de tratamento de esgotos, considerando o inventário de dados disponíveis no Sistema Nacional de Informações de Saneamento (SNIS), referente ao ano de 2019 (SNIS, ano) e os cenários de universalização dos serviços de esgotamento sanitário previstos pelo Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab), Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007 (BRASIL, 2007) .

A nota técnica nº reafirma a importância do incremento na produção de biogás para o sistema público de saneamento por ser considerado uma ferramenta de universalização do acesso à coleta e ao tratamento de esgoto sanitário.

De acordo com a nota técnica nº, as seguintes características fazem com que o biogás, como política pública, seja uma boa forma de investimento social (ABiogás, 2021):

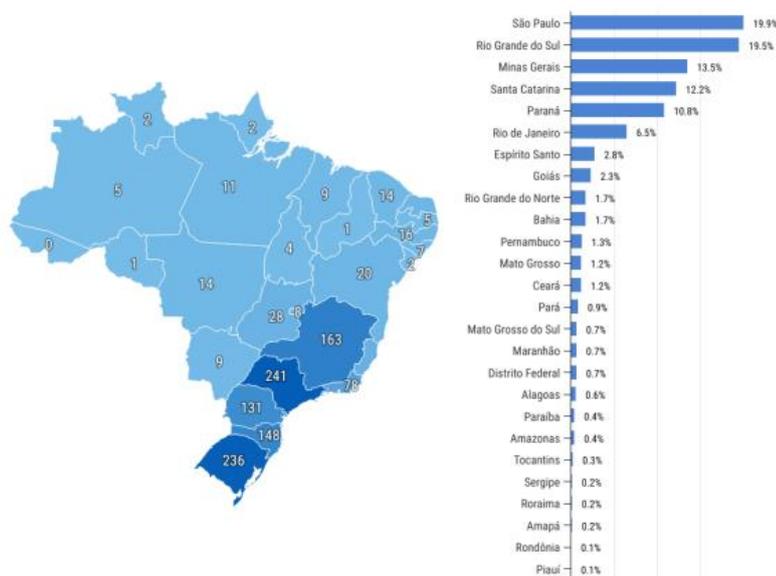
- Redução da emissão de GEEs e de particulados, sendo, portanto, um aliado no combate às mudanças climáticas;
- Melhoria na sustentabilidade ambiental, social e financeira das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE);
- Mitigação da emissão de maus odores;
- Transformação de um passivo ambiental em um ativo energético, que pode ser utilizado na produção descentralizada de energia elétrica, energia mecânica, energia térmica e/ou biocombustível;
- Melhoria na qualidade dos serviços prestados no setor de saneamento;
- Fácil escalabilidade, permitindo a produção descentralizada em diversas escalas;

- Promoção de uma economia circular no setor, com impactos positivos na saúde da população em geral;
- Incentivo ao desenvolvimento regional e de uma cadeia de suprimentos dedicada;
- Acesso a linhas de créditos específicas para financiamento.

## 2.7 SETOR CERVEJEIRO NO BRASIL

O número de cervejarias vem crescendo exponencialmente a cada ano. O setor representa 1,6% do PIB brasileiro e 14% da indústria de transformação nacional. Sua arrecadação atinge cerca de R\$ 21 bilhões por ano em impostos, sendo que a cada R\$1,00 investido no setor são gerados R\$ 2,50 na economia (CERVBRASIL, 2020). Em 2019 foram registradas 320 novas unidades produtoras no país, totalizando 1.209 cervejarias (MAPA, 2020). Os estados de São Paulo e Rio Grande do Sul detêm 39,4% do total de cervejarias do país. As regiões Sul e Sudeste lideram o ranking de unidades instaladas, nos estados da Região Sul, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, operam 43% das cervejarias, o que evidencia a alta representatividade da região para o setor (Figura 9).

Figura 9 - Distribuição geográfica das cervejarias no Brasil



Fonte: Adaptado de MAPA, 2020

Em relação ao porte das unidades cervejeiras, apenas 2% produzem acima de 100.000 litros de cerveja por mês e aproximadamente 41% das unidades se concentram na escala de produção mensal entre 1.000 e 4.999 litros de cerveja, ou seja, 69% das unidades cervejeiras do Brasil são de micro ou pequeno porte, com produção de até 9.999 litros por mês. (SEBRAE, 2019). O percentual de distribuição é mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Distribuição por porte das cervejarias no Brasil



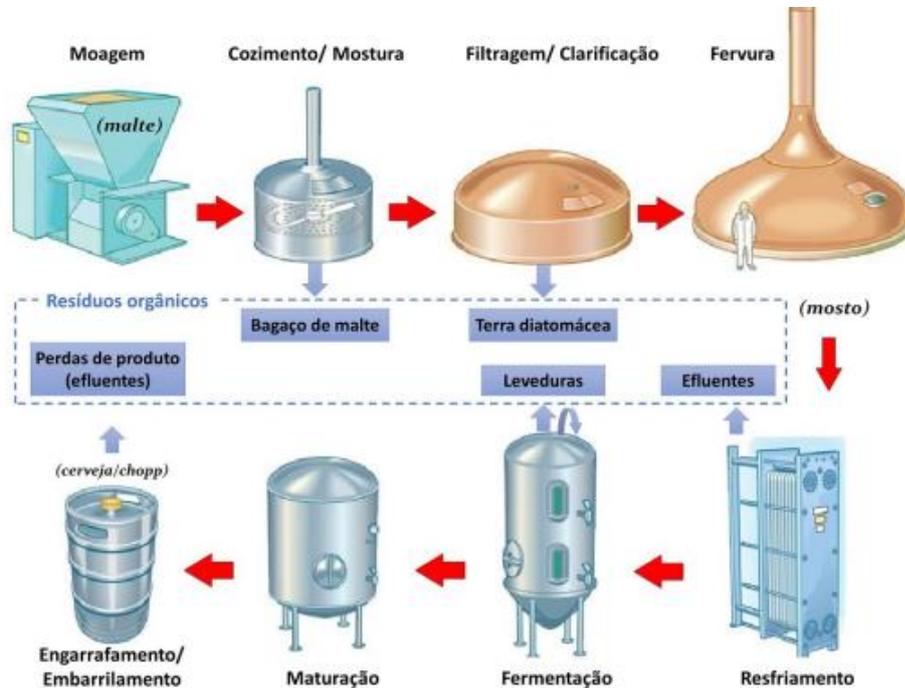
Fonte: Adaptado de Sebrae, 2019

O cenário crescente do setor, aliado ao volume expressivo de efluentes gerados, evidenciam a grande oportunidade de aproveitamento energético dos resíduos. A presença de inúmeras cervejarias já instaladas por todo o território nacional, justifica a elaboração de modelos de negócios que atendam a todos os portes industriais, gerando valor para toda a cadeia produtiva cervejeira citação.

### 2.7.1 Processo de produção cervejeiro

No processo industrial de produção da cerveja são gerados resíduos com alta biodegradabilidade e grande potencial de produção de biogás. Além do bagaço de malte, resultante da etapa inicial de preparo do mosto cervejeiro, outros resíduos também podem ser utilizados para produção de biogás, como a terra diatomácea, a levedura e os efluentes industriais. A Figura 11, detalha as etapas de produção de cerveja e aponta os resíduos gerados ao longo do processo.

Figura 11 - Etapas de produção da cerveja e os respectivos resíduos gerados em cada etapa do processo.



Fonte: Adaptado de Veroneze, 2019

Para a remoção de impurezas que ainda não decantaram e para a clarificação da cerveja, há uma etapa denominada de filtração da cerveja. Nessa etapa, além do uso de outros meios filtrantes, é utilizado um produto denominado terra diatomácea, composta por esqueletos fossilizados de diatomáceas, que são microalgas marinhas e é uma substância porosa, extremamente absorvente Citação. A terra diatomácea apresenta vida útil muito curta em razão da sua saturação com material orgânico (SANTOS, 2005; GOULART, et al., 2011, OLAJIRE, 2020).

As leveduras, outro resíduo gerado no processo de fabricação da cerveja, são microrganismos responsáveis pela fermentação do malte, onde há a conversão do mosto em álcool e dióxido de carbono (SANTOS, 2005). Ao final da primeira fermentação, toda levedura é retirada por meio de peneira oscilante, sucção, coletor cônico, decantação ou centrifugação. Parte dessa levedura é recuperada para uma nova fermentação e a outra parte pode ser comercializada para indústria da ração animal ou utilizada para produção de biogás (FILLAUDEAU, BLANPAIN-AVET e DAUFIN, 2006; OLAJIRE, 2020).

Os efluentes líquidos na indústria cervejeira são gerados principalmente por conta da necessidade de limpeza em equipamentos, pisos ou garrafas. Suas características estão relacionadas com o tipo de cerveja fabricada, tipo de levedura, qualidade dos processos de filtração e eficiência dos processos de limpeza de equipamentos (SANTOS, 2005).

A produção de cerveja requer grandes volumes de água e demanda alto consumo de energia elétrica, térmica e combustíveis fósseis. Neste sentido, o biogás surge como uma fonte atrativa na geração de ativos, possibilitando a redução de custos operacionais vinculados ao suprimento da demanda energética nas unidades de produção citação.

### 2.7.2. Potencial de geração de biogás na indústria cervejeira

O desenvolvimento industrial brasileiro vem sofrendo uma série de desafios econômicos nos últimos anos. Contudo, o ramo cervejeiro apresenta grande avanço econômico no cenário nacional em todos os portes industriais, e encerrou o ano de 2019 com um crescimento de 36% em novas unidades registradas (em comparação ao ano de 2018), com um faturamento de R\$ 107 bilhões (MAPA, 2020).

A geração de resíduos cresce ao mesmo passo do desenvolvimento do setor cervejeiro à medida que são necessários de 4,5 a 10 litros de água para cada litro de cerveja produzida (CERVBRASIL, 2020). Para cada litro de cerveja produzido são gerados de 2 a 6 litros de efluentes, além de outros resíduos como bagaço de malte e leveduras, evidenciando assim a importância em adotar um tratamento adequado para tais resíduos (BIOTHANE, 2020).

Uma das possíveis técnicas para o tratamento desses resíduos orgânicos é a Digestão Anaeróbia (DA), que além de minimizar a carga poluidora de rejeitos, viabiliza a produção de biogás.

### 2.7.2.1. Geração de resíduos e conversão em biogás

Resíduos e efluentes gerados a partir do processo produtivo da cerveja podem ser aproveitados como substrato visando a obtenção de biogás. Cada um desses adjuntos possui uma produção teórica de biogás publicada pelo MCTI NA nota técnica nº “Biogás no setor cervejeiro” conforme ilustra a tabela 1.

Tabela 1 - Características físico-químicas dos substratos usados para produção de biogás e seus potenciais de produção em base seca

Substrato	ST (g.kg <sup>-1</sup> )	SV (g.kgST <sup>-1</sup> )	Produção de biogás		Produção de biogás (Nm <sup>3</sup> .ton.substrato <sup>-1</sup> )	Produção de metano (Nm <sup>3</sup> .ton.substrato <sup>-1</sup> )
			(Ln.kgSV <sup>-1</sup> )	(%)		
Levedura	271,2	972,9	563	64	148,5	94,7
Bagaço de malte	219,2	964,8	614	57	129,8	73,9
Terra diatomácea	409,6	131,1	873	63	46,9	29,6

Fonte: MCTI, 2022

A terra diatomácea produziu cerca de 30% do volume gerado pela levedura, tanto para biogás quanto para metano. Esta diferença evidencia a maior biodegradabilidade da levedura, fator este que contribui na conversão da matéria orgânica em biogás citação.

O bagaço de malte, obtido no início da fabricação, é um dos principais subprodutos das cervejarias. Estima-se que cada hectolitro (100 litros) de cerveja produzida gere entre 14 e 20 kg de bagaço (CORDEIRO, EL-AOUAR, GUSMÃO, 2012). Este é constituído principalmente por cascas de cevada maltada, o bagaço de malte e apresenta elevados teores de fibras, sendo considerado um material lignocelulósico. Tal característica lhe confere maior resistência quanto ao seu aproveitamento na produção de biogás, sendo necessária a adoção de pré-tratamentos para elevar o rendimento de conversão.

Em decorrência dessa diversidade de substratos, adotar sistemas de co-digestão nas cervejarias torna-se uma alternativa atrativa e tecnicamente viável citação.

A mistura dos substratos deve respeitar as condições operacionais dos biodigestores selecionados e o volume de material disponível. Adotar sistemas de co-

digestão permite que as taxas de sólidos totais sejam reduzidas (este fator está vinculado à tecnologia de biodigestão adotada), assim como contribui para um aproveitamento otimizado dos substratos e um índice maior de conversão em biogás citação.

A Figura 12 apresenta a geração de energia elétrica, térmica e de biometano a partir de uma tonelada de bagaço de malte, levedura e terra diatomácea, exemplificando, assim, a conversão do substrato em energia.

Figura 12 - Esquema de geração de energia a partir de 1 tonelada de resíduo



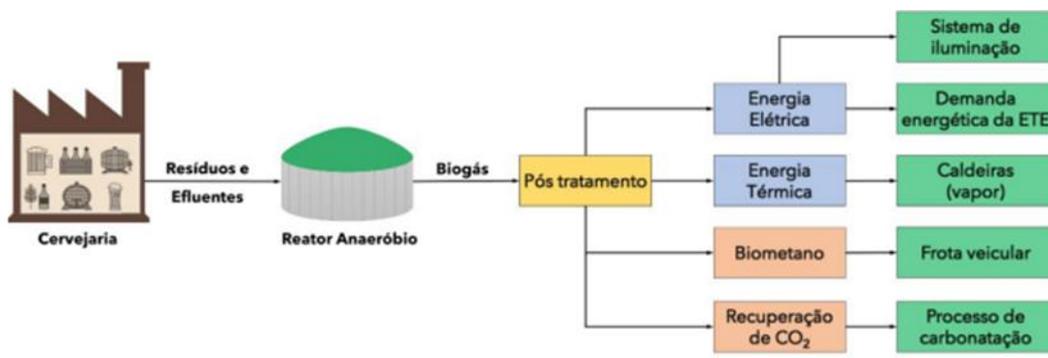
\*Energia térmica = queima direta

Fonte: MCTI, 2022

O biogás possui atributos que o diferenciam de outras fontes de energia, dentre eles destacam-se ser armazenável, despachável e não-intermitente, o que oportuniza sua aplicação no momento e formato de interesse do produtor. Tais características permitem que unidades cervejeiras façam uso do biogás para geração de energia elétrica e energia térmica citação.

Além de energia, o biogás pode ser utilizado na forma de biometano, sendo possível explorar ainda o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para os processos industriais de carbonatação como mostra a Figura 13.

Figura 13 - Aproveitamento do biogás em cervejarias



Fonte: MCTI, 2022

Considerando a utilização do bagaço de malte e efluente na produção de biogás, é possível gerar cerca de 5,78 kWh de energia elétrica por hectolitro (100 litros) de cerveja produzida, podendo suprir de 48% a 72% da energia elétrica utilizada no processo produtivo de uma cervejaria.

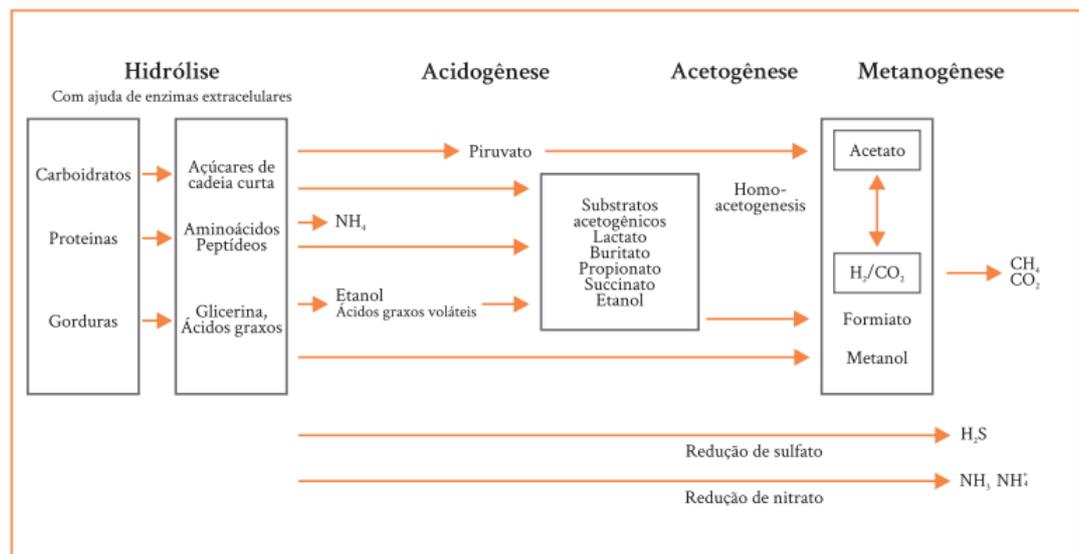
No que tange ao consumo de energia térmica, as cervejarias utilizam de 118 a 200 MJ/hL de cerveja produzida (SANTOS, 2005). Portanto, o uso do biogás é capaz de atender de 27 a 45% da demanda térmica do processo produtivo.

## 2.8. O PROCESSO DE BIODIGESTÃO

A digestão anaeróbia é um processo metabólico e depende da atividade conjunta de uma associação de microrganismos para transformar material orgânico

em dióxido de carbono e metano citação. O processo pode ser dividido em quatro fases, sendo: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Etapas da Digestão Anaeróbia. Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.



Fonte: EMBRAPA, 2019

## 2.8.1. Etapas do processo de biodigestão:

### 2.8.1.1. Hidrólise

A etapa da hidrólise degrada compostos de alta massa molecular como os lipídios, polissacarídeos e proteínas em substâncias orgânicas mais simples (monômeros) e solúveis. Esse processo ocorre pela ação de enzimas extracelulares excretadas pelas bactérias hidrolíticas. A importância da etapa de hidrólise na velocidade de degradação é dependente da característica do substrato envolvido. (EMBRAPA, 2019).

Quando a matéria orgânica presente é complexa e de difícil degradação, a hidrólise tem grande importância na velocidade global de degradação, podendo ser considerada como etapa limitante da velocidade da digestão anaeróbia. Existem diversos fatores que podem afetar o grau e a taxa em que o substrato é hidrolisado (CHERNICHARO, 2008):

- Temperatura operacional do reator;
- Tempo de residência do substrato no reator;
- Composição do substrato (ex.: teores de lignina, carboidrato, proteína e gorduras);
- Tamanho das partículas;
- pH do meio;
- Concentração de  $\text{NH}_4^+$ ;
- Concentração de produtos de hidrólise (ex.: ácidos graxos voláteis).

#### 2.8.1.2 Acidogênese

Os monômeros formados na fase hidrolítica são utilizados como substratos por diferentes bactérias anaeróbias e facultativas, sendo degradados na fase acidogênica a ácidos orgânicos de cadeia curta, moléculas com 1 a 5 carbonos (ex. ácidos butírico, propiônico e acético), álcoois, óxidos de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, hidrogênio e dióxido de carbono (EMBRAPA, 2019).

#### 2.8.1.3 Acetanogênese

A terceira etapa da digestão anaeróbia é considerada crítica ao processo, sendo conduzida por um grupo de bactérias denominadas acetogênicas.

As bactérias acetogênicas estabelecem relação de simbiose com as arqueas metanogênicas e as bactérias homoacetogênicas. Nessa etapa os ácidos de cadeia longa são transformados em ácidos com apenas um ou dois átomos de carbono (fórmico e acético), com a concomitante produção de hidrogênio e dióxido de carbono.

Durante a formação dos ácidos acético e propiônico, uma grande quantidade de hidrogênio é formada, fazendo com que o valor do pH no meio aquoso decresça.

Há, porém duas maneiras pelas quais o hidrogênio é consumido no meio (CHERNICHARO, 2008):

- Através das arqueas metanogênicas, que utilizam hidrogênio e dióxido de carbono para produzir metano;
- Por meio da formação de ácidos orgânicos, tais como propiônico e butírico, ácidos estes formados pela reação do hidrogênio com dióxido de carbono, com formação do ácido acético

#### 2.8.1.4 Metanogênese

A etapa final do processo de digestão anaeróbia, metanogênese, ocorre em condições estritamente anaeróbias. Deste modo, o carbono contido na biomassa é convertido a dióxido de carbono e metano através da ação das arqueas metanogênicas por meio de duas vias metabólicas principais: hidrogenotróficas e acetoclástica (VON SPERLING, 1996).

A primeira via consiste na produção de metano (CH<sub>4</sub>) a partir de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e hidrogênio (H<sub>2</sub>); esta primeira via é conhecida como metanogênese hidrogenotrófica e responde por 30% da produção de metano em reatores anaeróbios. Nela predominam os gêneros *Methanobacterium*, *Methanospirillum* e *Methanobrevibacter*. A metanogênese hidrogenotrófica (redução de CO<sub>2</sub>) pode ser representada pela reação:



A segunda via, acetoclástica, responsável por 60 a 70% da produção de CH<sub>4</sub>, utiliza o ácido acético. Os gêneros predominantes são: *Methanosarcina* e *Methanosaeta*. Esta via é representada pela equação:



Abreu, Silva e Chernicharo (2007) encontraram arqueas acetoclásticas compreendendo 63 a 82% da comunidade metanogênica em um reator UASB; o segundo grupo mais detectado foi o de arqueas hidrogenotróficas.

### 2.8.2. Parâmetros de processo

O metabolismo dos microrganismos anaeróbios é dependente de diversos fatores (Tabela 2), com isso, para um ótimo processo de fermentação, múltiplos parâmetros devem ser considerados e controlados.

Tabela 2 - Requisitos ambientais dos microrganismos anaeróbios durante o processo de digestão anaeróbia.

Parâmetros	Hidrólise/Acidoeénes	Metanoeeénes
Temperatura	25 - 35	32 -42
pH	5,2 - 6,3	6,7 - 7,5
Relação CIN	10-45	20-30
Concentração de matéria	«40	«30
Potencial Redox (mV)	400 até -300	«-200
Relação de C:N:P:S necessária	500: 15 : 5 : 3	600: 15 : 5: 3
Elementos traços	-	Essencial: Ni, Co, MO, Se

Fonte: EMBRAPA, 2019

#### 2.8.2.1. Temperatura

A temperatura tem efeitos importantes nas propriedades físico-químicas de componentes encontrados nos substratos anaeróbios. Também influencia a velocidade de crescimento e metabolismo dos microrganismos, e com isso, a dinâmica populacional em um biodigestor citação. Os microrganismos podem ser classificados de acordo com a temperatura, em três grandes grupos:

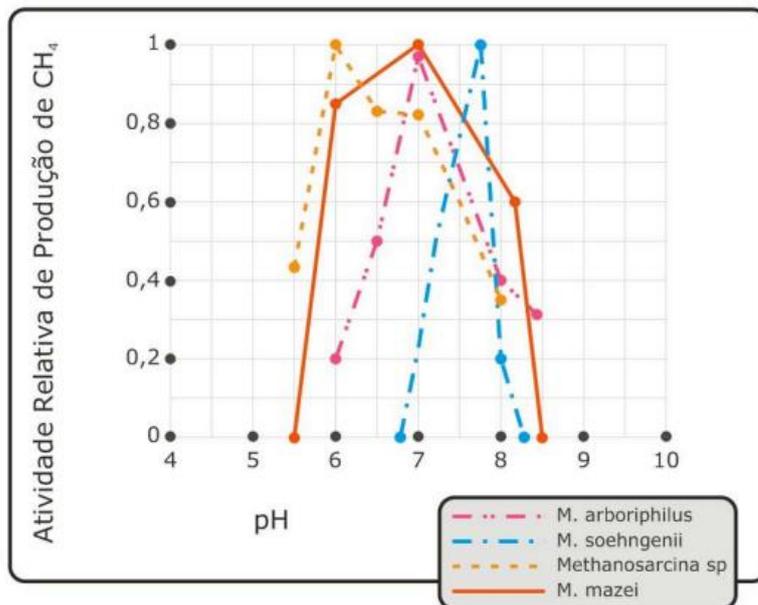
- Psicrófilos – temperatura ótima de crescimento de 10 a 15 °C;
- Mesófilos – temperatura ótima de crescimento de 30 a 35 °C;
- Termófilos – temperatura ótima de crescimento de 55 a 60 °C.

Grandes variações da temperatura podem ocasionar um desequilíbrio entre as bactérias acidogênicas e as arqueas metanogênicas, afetando consequentemente todo o processo de desenvolvimento anaeróbio (CHERNICHARO, 2008).

### 2.8.2.2 pH, Alcalinidade e Ácidos Voláteis

Cada grupo de microrganismo tem um valor diferente de pH ótimo. As arqueas metanogênicas são extremamente sensíveis ao pH, com um valor ótimo entre 6,7 e 7,5 (Figura 15). Os microrganismos fermentativos são menos sensíveis e podem se adaptar a maiores variações de pH entre 4,0 e 8,5.

Figura 15 - Efeitos do pH na atividade relativa de produção de metano em diferentes espécies de arqueas metanogênicas



Fonte: COSTA et al, 2014

O valor do pH no processo influencia sob duas formas principais (CHERNICHARO, 2008):

- Diretamente: Mudanças no pH ocasionam situações imediatas, através da atividade enzimática alterada em suas estruturas proteicas;
- Indiretamente: A alteração de valores do pH pode ocasionar o surgimento de toxidade no meio biótico inibindo o processo anaeróbio. Compostos em equilíbrio tendem a variar suas concentrações relativas em função da variação do pH.

A alcalinidade pode ser entendida como uma medida da capacidade de tamponamento de um sistema, ou seja, a capacidade de evitar alterações bruscas de pH. Em meios anaeróbios, muitas vezes é atribuída ao equilíbrio entre a dissolução do CO<sub>2</sub> e a formação de ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>).

A alcalinidade total é dada pela soma da concentração de íons hidroxila (OH), carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) e bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) e é expressa na forma de concentração de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

### 2.8.2.3. Nutrientes

As células dos microrganismos anaeróbios contêm nitrogênio, fósforo e enxofre nas proporções aproximadas de 12, 2 e 1%, respectivamente, de matéria seca. Para o processo anaeróbio são necessárias relações de 700:5:1 de demanda biológica de oxigênio, Nitrogênio (N) e fósforo (P). Os íons de enxofre, potássio, cálcio, magnésio, cloro e sulfato são necessários para o bom funcionamento da digestão anaeróbia. Elementos traços como ferro, cobre, zinco, magnésio, molibdênio e vanádio são importantes para o crescimento celular. Os compostos de enxofre podem causar problemas para o processo anaeróbio, pois causam a precipitação de nutrientes essenciais em níveis traços como ferro, níquel, cobre e molibdênio, que são insolúveis em baixos potenciais redox (precipitação como sulfeto). Íons de metais pesados como  $\text{Cu}^{++}$  e  $\text{Zn}^{++}$ , íons metais alcalinos e alcalinos terrosos e  $\text{NH}_4^+$  também podem causar efeitos inibitórios. A toxicidade é reversível em muitos casos e observa-se um elevado potencial de aclimação quando é dado tempo suficiente aos microrganismos anaeróbios.

#### 2.8.2.3.1 Nitrogênio amoniacal e amônia livre

O nitrogênio é um nutriente essencial para o crescimento dos microrganismos anaeróbios, mas também pode ser tóxica em concentrações elevadas. A fermentação de materiais ricos em ureia e proteínas libera amônia. Em função do pH e temperatura do meio reacional, pode-se ter uma geração elevada de amônia livre (DE PRÁ et al. 2013). A amônia livre é tóxica às arqueas metanogênicas, pois facilmente se difunde através da membrana celular dos microrganismos.

A literatura apresenta inibição da digestão anaeróbia em diferentes concentrações de amônia livre. Garcia e Angenent (2009) estudaram a digestão de dejetos suínos e reportaram inibição na produção de metano em concentrações a partir de  $200 \text{ mgL}^{-1}$  a  $35^\circ\text{C}$  com pH 7,6. Já Rodríguez et al. (2011) relataram que níveis de até  $375 \text{ mgL}^{-1}$  de amônia livre não afetaram a eficiência do processo de digestão. A

aclimação dos microrganismos na presença da amônia livre é um fator chave para eficiência do processo. Isto pode ocorrer devido à adaptação das espécies de arqueas metanogênicas presentes no reator ou através da seleção da população, sobressaindo-se espécies mais adaptadas às condições do reator (SILVA et al., 2014).

#### 2.8.2.4. Alcalinidade

Pode ser entendida como uma medida da capacidade de tamponamento de um sistema, ou seja, a capacidade de evitar alterações bruscas de pH. Em meios anaeróbios, muitas vezes é atribuída ao equilíbrio entre a dissolução do CO<sub>2</sub> e a formação de ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>).

A alcalinidade total é dada pela soma da concentração de íons hidroxila (OH), carbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) e bicarbonato HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e é expressa na forma de concentração de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>). Pode ser determinada através da titulação da amostra com solução de ácido sulfúrico (ex.: 0,1 mol.L<sup>-1</sup>), até pH 4,5 e aplicação da equação (EMPRAPA, 2019):

$$\text{Alc} = M \times E \times 100.000/D$$

Onde,

Alc = Alcalinidade (mg CaCO<sub>3</sub>.L<sup>-1</sup>)

M = Concentração de solução de ácido sulfúrico (mol.L)

D= Volume da amostra (mL)

100.000 = Coeficiente de ajuste da unidade de medida

#### 2.8.2.5 Tempo de retenção hidráulica

O tempo de retenção hidráulica (TRH) é o tempo médio em que o substrato permanece no interior do biodigestor, ou seja, é a razão entre o volume do biodigestor e a vazão de alimentação, podendo ser determinado por meio da Equação (EMBRAPA, 2019):

$$TRH = V/Q$$

Onde,

TRH = Tempo de retenção hidráulica (d)

V= Volume do biodigestor (m<sup>3</sup>)

Q= Vazão de alimentação (m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>)

## **2.9. TIPO DE BIODIGESTORES**

Os biodigestores são caracterizados pelo regime de alimentação (batelada ou contínuo), forma de alimentação (ascendente ou laminar) e pela concentração de sólidos no reator, sendo divididos nos seguintes tipos (EMBRAPA, 2019):

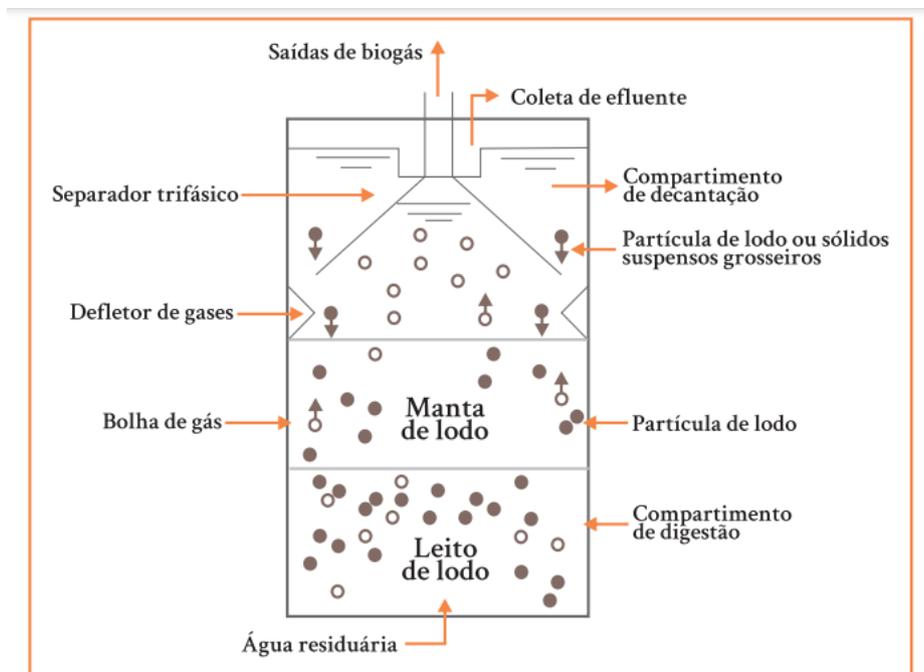
- Biodigestor de lagoa coberta (BLC)
- Biodigestor CSTR
- Biodigestor em fase sólida
- Biodigestor tipo UASB

Neste presente trabalho, iremos nos aprofundar no biodigestor tipo UASB e suas características.

### **2.9.1 REATOR UASB**

A sigla UASB vem do inglês Upflow Anaerobic Sludge Blanket. O biodigestor UASB tem como característica o fluxo ascendente do afluente por uma manta de lodo até o topo do reator, onde há um separador trifásico (Figura 16).

Figura 16 - Esquema de funcionamento de um biodigestor tipo UASB



Fonte: EMBRAPA, 2019

Estes reatores têm como característica a alta capacidade de retenção de biomassa, o que permite trabalhar com baixo tempo de retenção hidráulica (4 a 72 horas). Além disso, os reatores UASB apresentam estabilidade em situações de variações das características do afluente e o suporte à alta carga orgânica volumétrica, especialmente em condições em que a matéria orgânica está solubilizada (EMPRAPA, 2019).

### 3. ESTUDO DE CASO – METODOLOGIA

A metodologia empregada no trabalho em questão consiste em um estudo de caso realizado em uma indústria de bebidas de grande porte localizada no rio de janeiro. Todos os dados que serão apresentados neste estudo, foram fornecidos pela empresa, para fins acadêmicos, preservando a sua identidade, com a devida autorização jurídica. Os levantamentos são referentes ao ano base de 2022.

Para avaliar todo o contexto do processo industrial em questão, o estudo de caso teve início com a caracterização da indústria de bebidas, do seu efluente industrial, dos processos produtivos relacionados com a geração de resíduos e a estação de tratamento de efluentes.

Ao todo, foram fornecidos para este presente trabalho, dados de análise de 58 itens de processo desta indústria, totalizando 21.111 dados. Destes itens disponíveis, foram selecionados, de acordo com a literatura apresentada no estudo, os dados de maior relevância para caracterização anaeróbia do efluente e interferência na geração de biogás. Sendo assim, foram selecionados 8 parâmetros de processo, dos quais foram analisados 5.491 dados no total, para os reatores anaeróbios denominados 2 e 3, sendo: pH (2001 dados analisados), temperatura (2093 dados), alcalinidade (669 dados), nutrientes (12 dados), eficiência de remoção de DQO (670 dados), atividade metanogênica (22 dados), biodegradabilidade (12 dados) e tempo de detenção hidráulica (12 dados).

Os dados foram tratados no Microsoft Excel, e representados através de diagramas de caixa, ferramenta gráfica para representar a variação de dados observados de uma variável numérica por meio de quartis. Através destes gráficos, é possível analisar o limite inferior, o primeiro quartil, a mediana, o terceiro quartil, o limite superior e os valores discrepantes da amostra. Os valores encontrados foram correlacionados para fins de comparação com a literatura vigente.

Foram analisados os dados comparativos entre duas lineares através da utilização do método de Pearson a fim de avaliar a correlação linear entre duas variáveis, são elas: Carga orgânica X Biogás; Carga orgânica X DQO; Vazão de biogás X DQO. Através desta análise estatística é possível estabelecer o grau de correlação desprezível ( $r = 0$  à  $0.3$ ) à muito forte ( $r = 0.9$ ) entre os dados.

Além disso, foi possível analisar os dados da indústria de bebidas, referente aos meses do ano de 2022, e correlacionar os resultados de processo, com os

resultados da geração de biogás. Para isso, foram analisados 12 dados de produção líquida mensal, perda de extrato e energia calorífica.

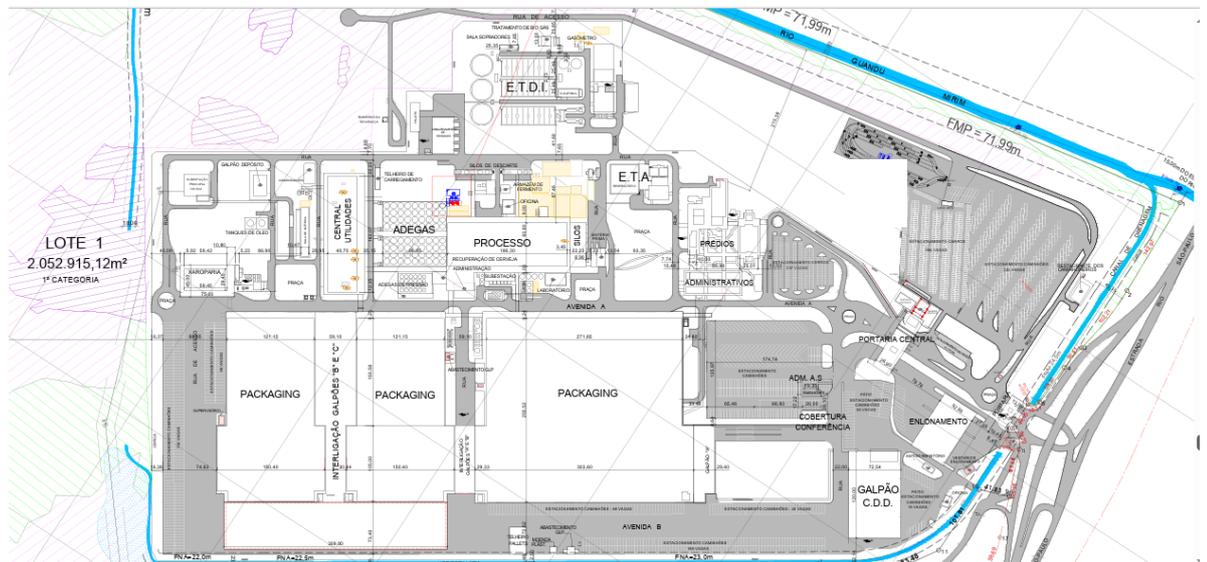
A partir dessas análises, foram estratificados os ganhos financeiros da geração de biogás referentes ao ano de 2022 a partir dos dados fornecidos de apuração orçamentária. Analisando o contexto produtivo, também foram propostas oportunidades processuais de incremento na geração de biogás, a partir do processamento de resíduos (bagaço de malte e fermento), uso de químicos no ambiente industrial e rota logística de despejo.

### **3.1. CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA DE BEBIDAS**

A referida indústria de bebidas é considerada a maior da América Latina, tanto pelo seu tamanho e complexidade, mas também pela sua capacidade produtiva. Com a produção de diversos tipos de cervejas e refrigerantes, ela emprega sete linhas de produção de cervejas retornáveis, quatro linhas de produção de cerveja do tipo One Way, três linhas de produção de refrigerantes e uma linha decoradora de garrafas - totalizando 14 linhas produtivas.

Em termos de processo produtivo, o processo cerveja é composto pelas áreas de brasagem, adegas e filtração, e o processo refrigerante, pela área da xaroparia. As áreas externas são compostas pela estação de tratamento de efluente, estação de tratamento de água, área de utilidades, e logística, que suportam o bom funcionamento industrial representadas na figura 17. A complexidade industrial se dá pelo número de processos e área construída conforme ilustrados na Tabela 3.

Figura 17 - Planta de representação esquemática da indústria de bebidas



Fonte: A autora, 2024.

Tabela 3 - Autorização de área licenciada pelo INEA para as instalações da indústria de bebidas.

Item	Área atual (m <sup>2</sup> )	Área Licenciada (m <sup>2</sup> )	Área a licenciar (m <sup>2</sup> )	Área futura (m <sup>2</sup> )
Área do terreno	2.052.915,12	-	-	2.052.915,12
Área construída	280.238,40	4.410,00	114	284.762,40
Área impermeável	542.375,48	6.303,00	436	594.114,48
Área Permeável	1.504.729,91	-	-	1.504.729,91

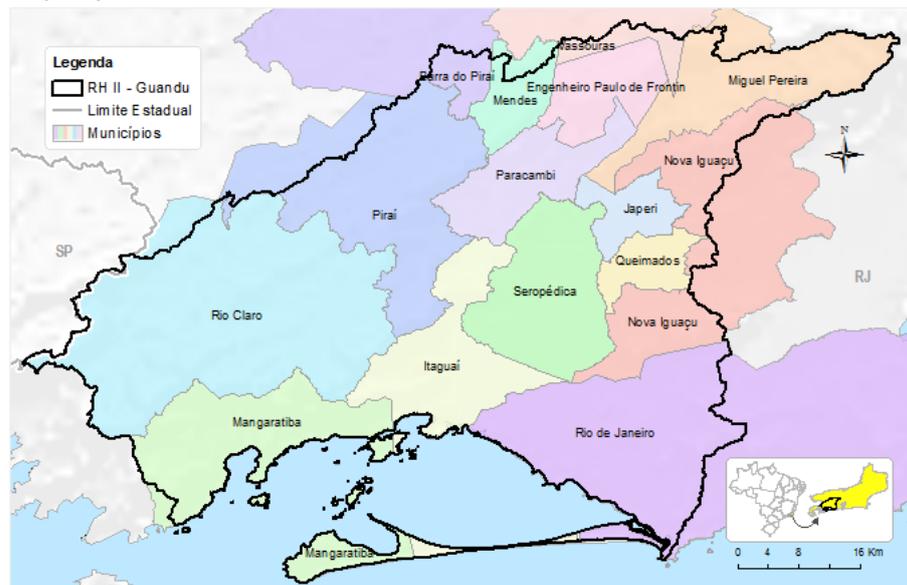
Fonte: A autora, 2024.

### 3.2 O EFLUENTE INDUSTRIAL

O efluente industrial é tratado e lançado em corpo receptor próximo a localidade, na bacia hidrográfica do Rio Guandu, Rio de Janeiro, conforme representado na figura 18. A outorga de direito de uso de recurso hídrico requer uma eficiência de remoção de DBO de 96% em uma vazão média de 350 m<sup>3</sup>/h para o despejo.

Figura 18 - Comitê das Bacias Hidrográficas dos rios Guandu, da Guarda e Guandu-Mirim

Fonte: SigaGuandu, 2023.



Fonte: SigaGuandu, 2023.

Devido à complexidade dos processos produtivos existentes na cervejaria, para a efetiva gestão de efluentes, e a caracterização dele, é necessário o entendimento da complexidade de cada um dos processos bem como a sua contribuição para os resíduos no efluente final e esses serão apresentados na sequência

#### 3.2.1. Gestão corporativa dos descartes industriais

Visando assegurar os parâmetros legais de lançamento de efluentes e a garantia da saudabilidade dos processos biológicos da estação de tratamento de efluente, foi implementado uma política interna sobre descarte nas áreas produtivas.

Portanto, todo o despejo deve ser comunicado através da política regulamentada, seguindo o fluxo apresentado na Figura 19.

Os descartes podem ser programados ou não programados. Nos programados a área produtiva faz a comunicação do lançamento, e o operador da estação de tratamento de efluentes (ETEI) realiza a tomada de decisão de autorizar ou não o descarte naquele momento, levando em consideração as características do efluente a ser descartado e as condições da estação de tratamento no momento. Para os casos dos despejos não programados, ou acidentais, o operador da estação de tratamento de efluentes precisa se atentar em garantir as manobras a fim de minimizar os impactos nos processos biológicos, utilizando, quando necessários os tanques de emergência.

Figura 19 - Fluxo interno de descarte de efluentes para a estação de tratamento de efluentes industriais na indústria de produção de bebidas.



Fonte: Política Interna da indústria produtora de bebidas, 2023.

Este fluxo, além de garantir o lançamento de efluentes dentro dos parâmetros legais e proporcionar uma maior previsibilidade operacional na ETEI, também proporciona uma melhor modulação dos reatores para o processo de geração de biogás e lodo aeróbio.

A fim de contabilizar e prever todos os possíveis descartes e riscos para a ETEI, é previamente estabelecido pela política de descarte de resíduos os respectivos descartes que podem ser feitos pelas áreas, bem como seus volumes, e concentração, para que não afete a capacidade de tratamento da ETEI. Em caso de

descumprimento destes padrões operacionais, podem ser aplicadas punições cabíveis as áreas e respectivos funcionários, em caso de descarte indevido.

### 3.2.2. Lançamento de efluentes

Em atendimento ao Programa de Autocontrole de Efluentes Líquidos - PROCON ÁGUA e parte integrante do Sistema de Licenciamento Ambiental – SLAM a indústria de bebidas em questão deve informar mensalmente ao INEA as características qualitativas e quantitativas de seus efluentes líquidos, por meio do Relatório de Acompanhamento de Efluentes Líquidos – RAE. Ficam sujeitas ao Programa, empresas licenciadas ou em processo de licenciamento no Estado do Rio de Janeiro pelas esferas: federal, estadual e municipal.

No âmbito Nacional, a Resolução Conama nº 430/2011 é responsável por complementar e alterar a Resolução Conama nº 357/2005, definindo as condições e padrões necessários para que efluentes possam ser lançados diretamente nos corpos receptores (BRASIL, 2005; BRASIL, 2011), sendo necessário que passem por tratamento adequado e atendam às exigências da resolução e de outras normas aplicáveis.

No Estado do Rio de Janeiro, dentre as normas aplicáveis para lançamento em corpos hídricos ou em redes públicas, estão:

- Norma Técnica NT-202.R10: que estabelece os critérios e padrões físico-químicos, inorgânicos e orgânicos (RIO DE JANEIRO, 1986)
- Norma Operacional Padrão NOP-INEA-008: que determina novos critérios e padrões de ecotoxicidade, utilizando testes de toxicidade aguda com organismos aquáticos vivos. (RIO DE JANEIRO, 2018)

E, destacam-se ainda especificamente para o controle de lançamento de carga orgânica em efluentes líquidos, normas específicas que tratam separadamente os efluentes de origem sanitária, NOP-INEA-45 (RIO DE JANEIRO, 2021), e de origem industrial, DZ-205.R6 (RIO DE JANEIRO, 2007).

Para a garantia do lançamento de efluentes conforme outorga de funcionamento da indústria de bebidas, são realizadas diariamente em laboratório *in situ* as análises laboratoriais e reportadas mensalmente aos órgãos ambientais.

Figura 20 - Análises laboratoriais internas de amostras dos diferentes tipos de efluentes gerados na indústria de bebidas para o controle da ETEI

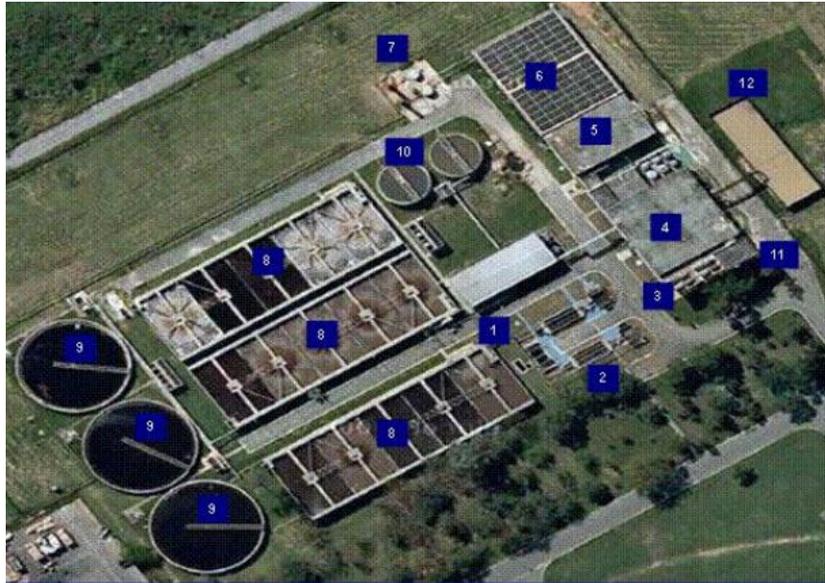


Fonte: A autora, 2024.

### 3.2.3.– Estação de tratamento de efluentes industriais (ETEI)

A estação de tratamento de efluentes possui capacidade de tratar até 570 m<sup>3</sup>/h, o equivalente a uma rede populacional de 450.000 pessoas/dia. O tratamento biológico anaeróbio possui uma capacidade de 64.800 kg.DQO dia<sup>-1</sup> enquanto o aeróbio 13.500 kg.DQOdia<sup>-1</sup>. O reaproveitamento energético proveniente do biogás possui capacidade de 900 m<sup>3</sup>/h<sup>-1</sup>, equivalente a 3.600 residências/mês. O tamanho e complexidade da ETEI pode ser entendido por meio da Figura 21.

Figura 21 - Vista superior da estação de tratamento de efluentes da indústria produtoras de bebidas sendo (1) Caixa de recebimento de efluente bruto e diluído; (2) gradeamento e caixas de areia; (3) peneiras estáticas; (4) tanque de equalização; (5) tanque de acidificação; (6) reatores anaeróbios; (7) flare atmosférico; (8) reatores aeróbios; (9) decantadores.



Fonte: Sena, 2012

As etapas do tratamento de efluentes são constituídas por:

- Tratamento preliminar (mecânico/físico): Responsável por eliminar sólidos maiores nesta primeira etapa do processo através das peneiras.

Figura 22 - Tratamento preliminar com peneiras da ETEI da indústria produtora de bebidas.



Fonte: A autora, 2024

- Tratamento primário (físico/químico): Responsável por preparar o efluente para a próxima etapa através do tanque de equalização. O coagulante empregado neste processo é o cloreto férrico.

Figura 23 - Tratamento primário – tanque de equalização da ETEI da indústria produtora de bebidas.



Fonte: A autora , 2024

- Tratamento secundário (biológico): É responsável por reduzir a matéria orgânica do efluente através dos reatores anaeróbios do tipo UASB pela

atividade de microrganismos anaeróbicos tendo com um dos subprodutos produto a geração de biogás.

Figura 24 - Tanque de tratamento secundário da ETEI da indústria produtora de bebidas.



Fonte: A autora, 2024

- Tratamento terciário (biológico/físico-químico): É responsável pela precipitação química, adsorção e troca iônica, tem como principal produto os lodos aeróbios.

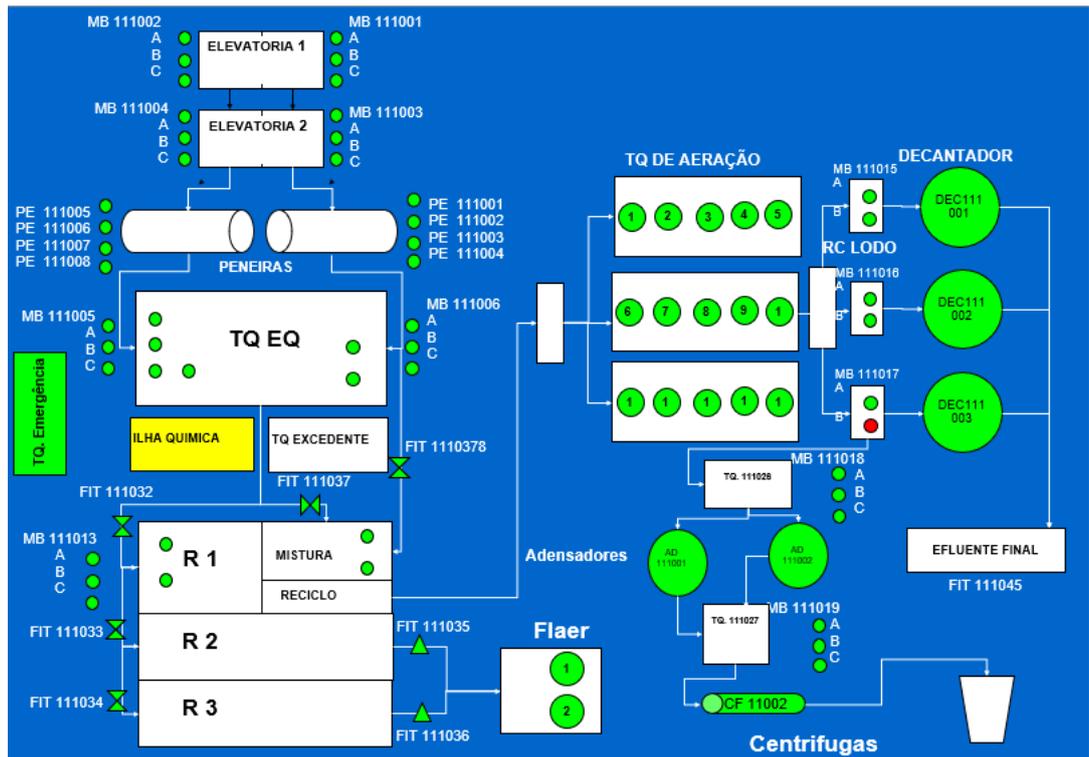
Figura 25 - Tanque de tratamento terciário da ETEI da indústria produtora de bebidas.



Fonte: A autora , 2024

De maneira geral, todos os compartimentos que englobam a estação de tratamento de efluente em questão podem ser demonstrados através deste fluxograma simplificado esquematizado na figura 26.

Figura 26 - Esquema de controle automático da estação de tratamento de efluentes industrial da indústria produtora de bebidas. Em verde destaca-se as automatizações de processo na planta.

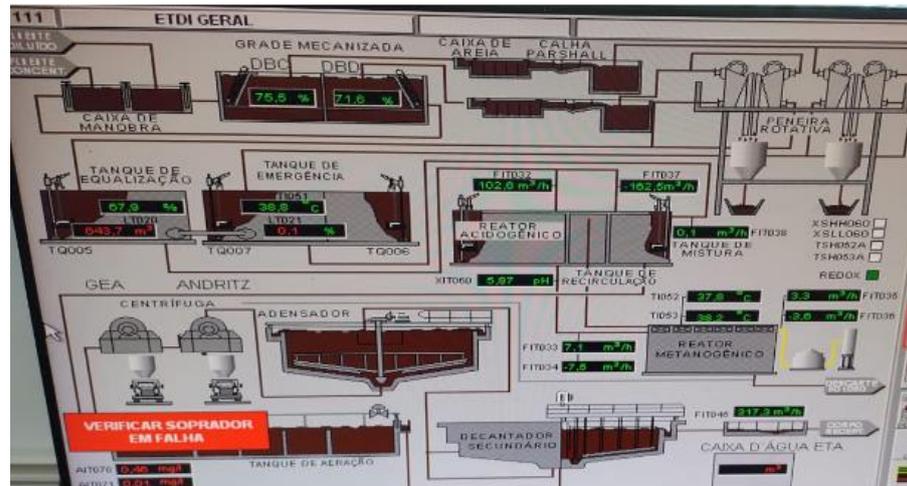


Fonte: Material interno, 2023.

### 3.2.4. Gestão a vista e automatização da ETEI

A estação de tratamento de efluentes industriais conta com um quadro de funcionários próprios no corpo operacional e técnico, que opera nos três turnos produtivos. Os processos são automatizados permitindo o controle operacional por supervisor, com acionamento automático de válvulas, intertravamentos por níveis e alarmes no supervisor conforme ilustrado na figura 27.

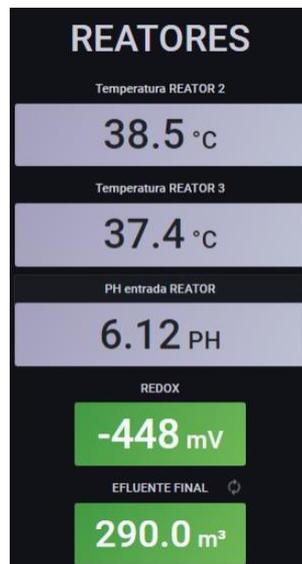
Figura 27 - Tela do supervisório com controles automáticos da ETEI da indústria produtora de bebidas.



Fonte: Material interno, 2023.

Os dados também podem ser acompanhados de forma instantânea através dos gráficos gerados no software denominado Grafana®, com acompanhamento online dos parâmetros.

Figura 28 - Imagem gerada pelo software Grafana® para o acompanhamento online de parâmetros da ETEI da indústria produtora de bebidas



Fonte: Material interno, 2023.

Todo este processo de automatização, permite um acompanhamento operacional e gerencial dos dados instantâneos, trazendo agilidade ao processo de gestão de anomalias e desvios.

### 3.2.5 Usina de beneficiamento de biogás

Nesta indústria, a cada 1kg de DQO removida, é gerado o equivalente a 0,38 m<sup>3</sup> de metano, processo que ocorre na planta de beneficiamento de biogás.

Todo o biogás gerado pelo processo é enviado para abastecimento dos fornos da fábrica de vidros pertencente a indústria de bebidas, em substituição ao gás natural, e percorre cerca de 2 km de distância nas tubulações de distribuição.

O processo de beneficiamento do biogás ocorre a partir dos equipamentos listados na tabela 4 e suas seis principais etapas são descritas a seguir:

Tabela 4 - Lista de equipamentos da planta de biogás da ETEI da Industria de bebidas

Lista de equipamentos		
Nome	Quantidade	Capacidade
Gasômetro	2	500m <sup>3</sup> /h
Flare	2	500m <sup>3</sup> /h
Lavador de gás	1	1000m <sup>3</sup> /h
Filtro	2	750m <sup>3</sup> /h
Compressor	5	250m <sup>3</sup> /h
Trocador de calor	2	1000m <sup>3</sup> /h
Chiller	1	80m <sup>3</sup> /h ~ 10°C

Fonte: A autora, 2024

- Sistema de geração: Através do processo de tratamento de efluentes da cervejaria é gerado o biogás, que vem acompanhado de gases nocivos ao meio ambiente, esses gases devem ser queimados ou tratados para consumo em caldeiras ou fornos industriais. São dois gasômetros para geração e dois queimadores.

Figura 29 - Imagem da ETEI da indústria produtora de bebidas destacando o Gasômetro e o Flare.



Fonte: A autora, 2024

- Sistema de filtração: Depois de desviado dos queimadores, todo biogás é transportado através de tubulações de aço inox e conduzido para o Sistema de Filtragem, onde o biogás é filtrado através do Sulfatreat, nesse processo se retém: sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ), vapor de água ( $H_2O$ ) e hidrogênio ( $H_2$ ). Essa filtração ocorre por pressão atmosférica, onde o biogás é forçado, através de tubulações, a passar pelo contêiner onde se encontra o elemento filtrante. Todo condensado removido neste processo segue novamente para rede sanitária. São dois elementos filtrantes, (contêineres), com capacidade de  $750m^3/h$  cada.
- Sistema de compressão: Após a filtração, o mesmo é encaminhado ao Sistema de Compressão, onde atinge sua pressão de envio (4,5 bar). Todo sistema de compressão é controlado e monitorado através de um sistema supervisório instalado na planta. São 5 compressores com capacidade de  $250m^3/h$  cada.

Figura 30 - Imagem da ETEI da indústria produtora de bebidas destacando os compressores de biogás.



Fonte: A autora, 2024

- Sistema de absorção de umidade: Logo após o biogás ser comprimido, ele adentra o Sistema de Absorção de Umidade, que é responsável por diminuir o seu volume e reter todo o condensado ( $H_2O$ ).
- Sistema de drenagem: A drenagem é feita através do Sistema de Colmeias, em velocidade de compressão, onde o vapor é chocado contra as colmeias deixando em ponto de orvalho e direcionando para a drenagem que é feita através de um sistema automático e temporizado (Demister). Esse condensado é enviado para o Sistema de Separação de Água e Óleo (SAO).
- SAO: Equipamento único responsável por separar água e óleo, proveniente da purga do Demister, ação feita logo após a drenagem. Todo condensado removido neste processo segue novamente para rede de esgoto. Todo óleo removido neste processo segue para os coletores.
- Sistema de tubulação: Esse sistema é responsável por conduzir o biogás filtrado e resfriado até o ponto de queima (Forno da fábrica de Vidros).

Figura 31 - Imagem das tubulações de distribuição do biogás da ETEI da indústria produtora de bebidas



Fonte: A autora, 2024.

De forma simplificada, o tratamento de biogás pode ser resumido através do fluxo a seguir na Figura 32:

Figura 32 - Fluxograma de produção de biogás na ETEI da indústria produtora de bebidas.



Fonte: A autora, 2024.

Atualmente o biogás é utilizado para combustão, se tornando uma das principais fontes energéticas durante a queima na fábrica de vidros. Para que os parâmetros e controles do biogás enviado possuam confiabilidade, são controlados através do supervisor, conforme ilustrado na Figura 33, com acionamentos automatizados. A confiabilidade neste processo garante que não haja interrupções no fornecimento do gás, capazes de ocasionar a produção de garrafas de vidros defeituosas, causando perdas na produção.

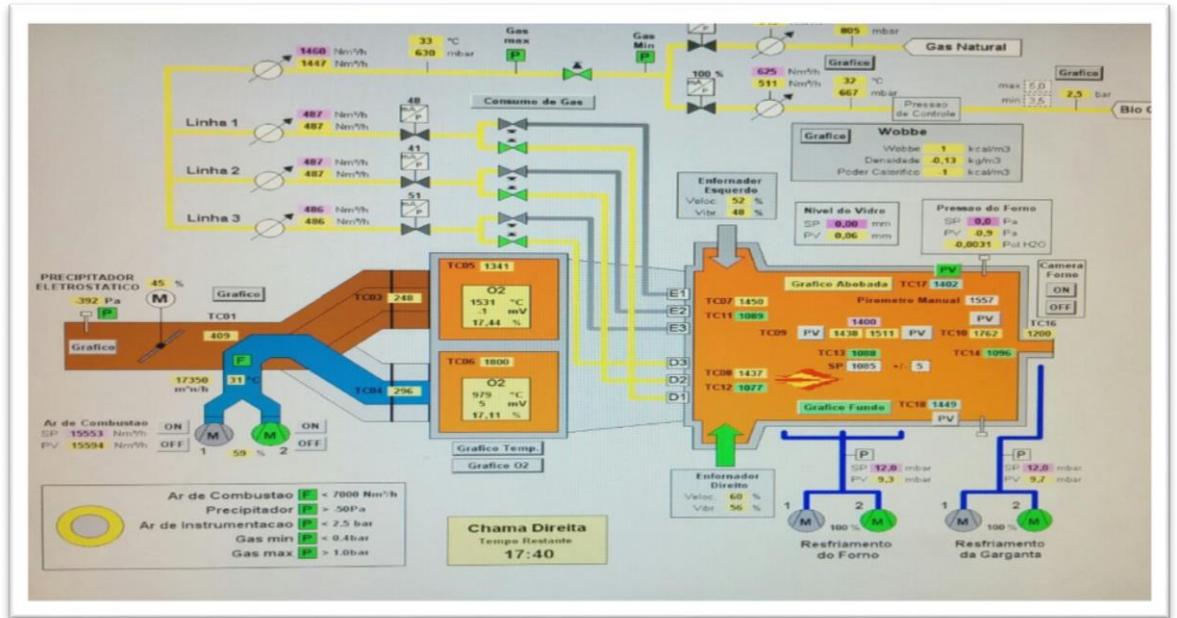
Figura 33 - Imagem da tela do supervisor do Sistema de Dessulfurização do biogás da ETEI da indústria produtora de bebidas.



Fonte: A autora, 2024

A combinação do biogás e do gás natural, a outra fonte energética, e com o ar de combustão, forma a chama que mantém a temperatura do forno em cerca de 1560°C na fábrica de vidros. A mistura de matérias-primas sólidas (caco, areia, barrilha, calcário) é mantida aquecida por cerca de 24 horas para que o vidro fundido fique perfeitamente homogêneo e possa fluir através dos canais de distribuição para as máquinas de formação onde os moldes de vidro estão localizados.

Figura 34 - Imagem da tela do supervisor do Sistema de Distribuição de Biogás e Gás Natural no forno da fábrica de vidros da indústria produtora de bebidas.



Fonte: A autora, 2024

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

A partir do embasamento teórico apresentado anteriormente, as especificidades, e o processo de tratamento de resíduos líquidos da indústria de bebidas em questão serão apresentados nesse capítulo os resultados e discussões.

Os dados foram fornecidos com a devida autorização jurídica pela indústria de bebidas para fins estritamente acadêmicos, com a condicionante de não ter sua identificação revelada.

As análises foram divididas em tópicos: resultados operacionais da estação de tratamento, resultados da indústria de bebidas e sua interface com a produção de biogás, e os resultados da indústria vidreira relacionados com a geração de biogás.

### **4.1 RESULTADOS DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS NO ANO DE 2022**

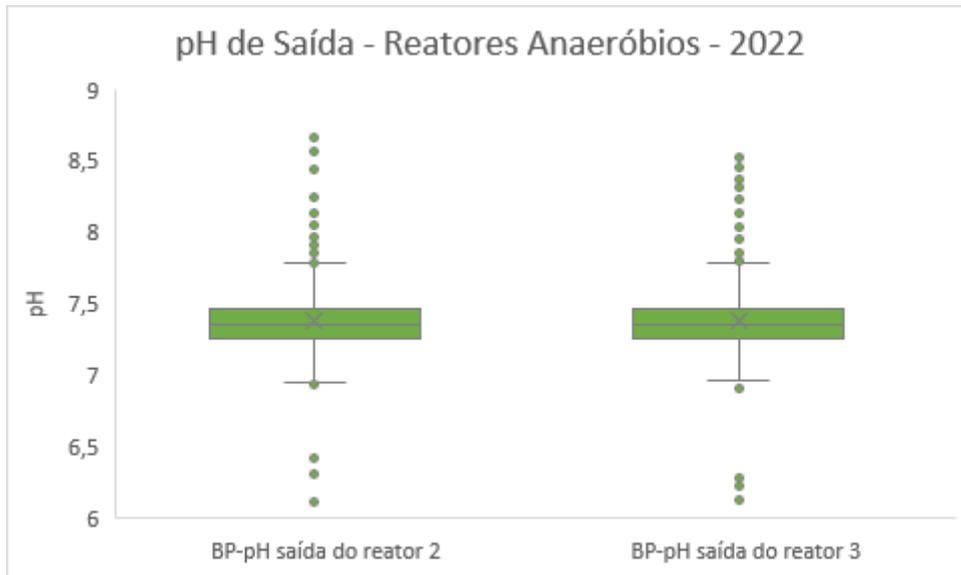
Todos os dados utilizados possuem diversas frequências de análise, que podem ser diárias, por turno, semanais, quinzenais ou mensais, ocasionando um maior ou menor número de coletas amostrais.

Dentre os parâmetros do processo anaeróbio disponibilizados para análise, foram criteriosamente selecionados os dados que, segundo a literatura vigente, podem acarretar interferência na geração de biogás através de reações biológicas de inibição, interferência na atividade metanogênica, toxicidade, choques de carga orgânica, e demais desequilíbrios capazes de comprometer a geração de biogás.

#### **4.1.1 pH dos reatores anaeróbios**

Foram analisadas 2001 amostras coletadas dos reatores anaeróbios 2 e 3, os dados estão apresentados na Figura 35. Ao analisar os dados, pode-se compreender que os valores máximos de pH obtidos respectivamente para os reatores 2 e 3 foram de 8,67 e 8,53, enquanto os valores mínimos são de 6,11 e 6,12. Os valores médios obtidos são na faixa de 7,37 para ambos os reatores.

Figura 35 - pH de saída nos reatores anaeróbios (R2 e R3) da ETEI numa indústria produtora de bebidas. Média de pH registrada ao longo do ano de 2022.



Fonte: A autora, 2024.

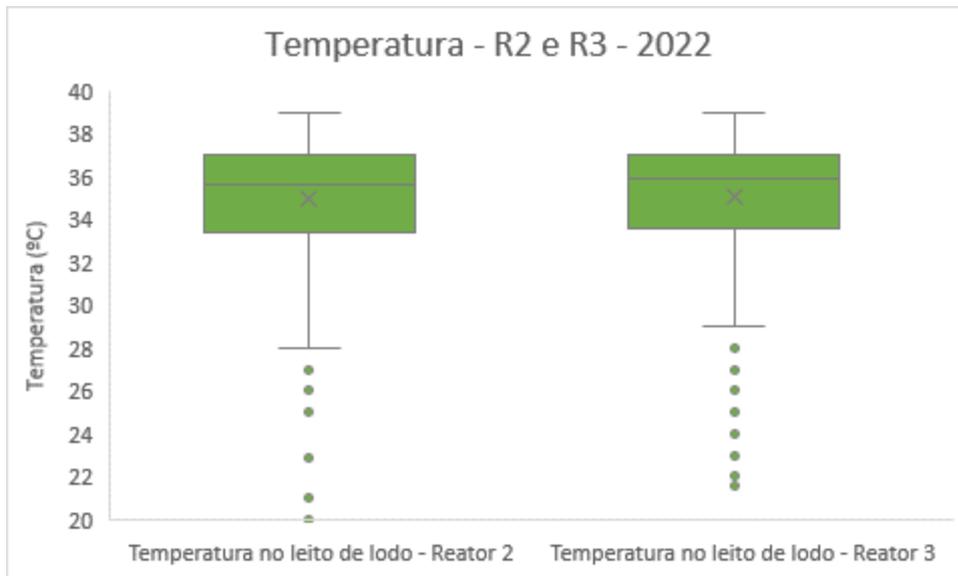
A taxa de metanogênese ótima ocorre quando o pH se encontra no entorno do valor neutro. Van Haandel e Lettinga (1994) indicam que valores superiores a 7,8 e inferiores a 6,3 do pH reduzem a taxa metanogênica, podendo até ocorrer a instabilidade do reator caso os ácidos produzidos na fase acidogênica não sejam processados nas etapas subsequentes.

Em ZHOU et al. (2016), os resultados mostraram que o desempenho da digestão anaeróbica foi fortemente dependente do valor do pH. A produção de biogás e o teor de metano em pH neutro foram significativamente maiores (16.607 mL, 51,81%) do que aqueles em pH 6,0 (6.916 mL, 30 42,9%) e 8,0 (9.739 mL, 35,6%).

#### 4.1.2. Temperatura

Foram realizadas 2093 análises de temperatura, contemplando os três turnos de produção, no ano de 2022. A partir da análise gráfica (Figura 40) pode-se constatar que a temperatura mínima nos reatores 2 e 3, respectivamente, foram de 20°C e 21,6°C, as médias ficaram entre 34,96 °C e 35,10 °C, e as temperaturas máximas em 39 °C.

Figura 36 - Temperatura nos reatores anaeróbios (R2 e R3) da ETEI numa indústria produtora de bebidas. Média de temperatura registrada ao longo do ano de 2022.



Fonte: A autora, 2024.

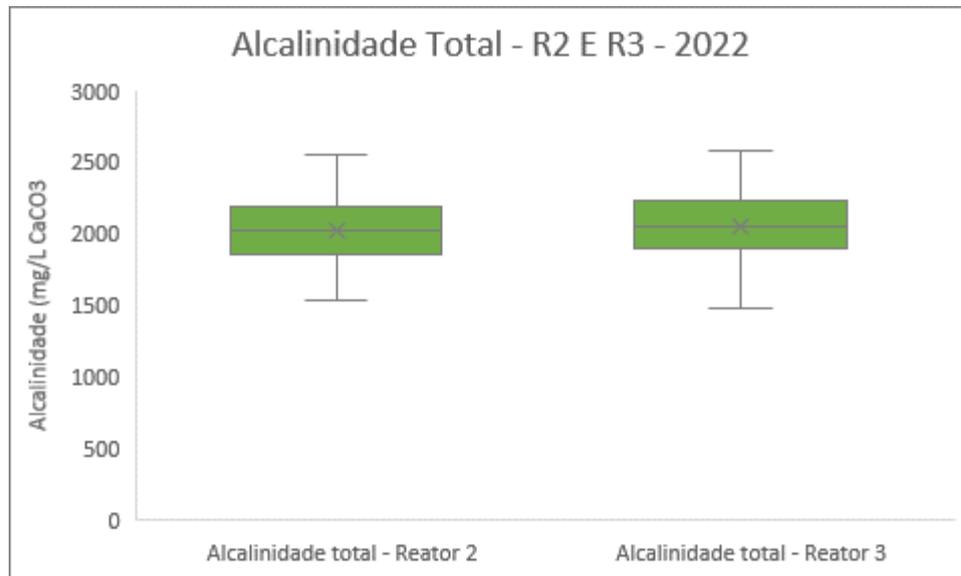
A temperatura ideal de operação de reatores anaeróbios encontra-se na faixa de 30 a 35°C, na qual o crescimento dos microrganismos anaeróbios é considerado ótimo (CHERNICHARO, 2008). Wang et al. (2019) observou que o teor de metano da produção de biogás poderia ser mantido acima de 50% em temperaturas acima de 25°C. O desempenho da fase acidogênica e da fase metanogênica pode ser significativamente diminuída a uma temperatura mais baixa de 20 °C, com inibição da atividade microbiana.

Nesse estudo de caso verificou-se que a produção de biogás aumentou gradativamente com temperatura na faixa de 30–35 °C, e manteve-se em níveis relativamente altos.

#### 4.1.3. Alcalinidade

Foram realizadas 669 análises de alcalinidade ao longo do ano de 2022. Pela análise do Gráfico 41 pode-se observar que os valores mínimos de alcalinidade foram de 1582 mg/L CaCO<sub>3</sub> e 1481 mg/L CaCO<sub>3</sub>, valores máximos de 2253 mg/L CaCO<sub>3</sub> e 2583 mg/L CaCO<sub>3</sub> e valores médios de 2019 mg/L CaCO<sub>3</sub> e 2056 mg/L CaCO<sub>3</sub>, respectivamente para R2 e R3.

Figura 37 - Alcalinidade total nos reatores anaeróbios (R2 e R3) da ETEI numa indústria produtora de bebidas. Média de alcalinidade total registrada ao longo do ano de 2022.



Fonte: A autora, 2024.

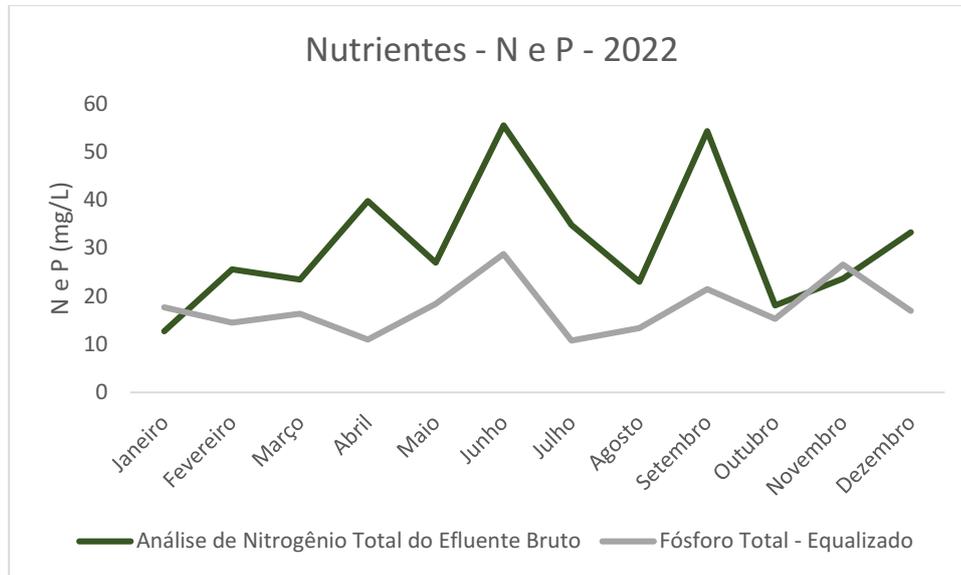
De acordo com Metcalf & Eddy (1991), para o processo de digestão anaeróbia ocorrer de forma satisfatória, a alcalinidade deve ter valores entre 1000 e 5000 mg/L  $\text{CaCO}_3$ . Em Pereira-Ramirez et al. (2004) foi testada a recirculação do efluente para aumentar a alcalinidade num reator UASB para o tratamento de resíduo de suinocultura.

Nesse estudo a maior alcalinidade residual (mg/L  $\text{CaCO}_3$ ) encontrada foi quando aplicada taxa de recirculação de 3:1 e 5:1 com efluente com alcalinidade inicial de 2500 mg/L  $\text{CaCO}_3$ . A recirculação de efluente aumentou a alcalinidade no reator favorecendo a remoção orgânica.

#### 4.1.4. Nutrientes (N/P)

As coletas de nutrientes, nitrogênio e fósforo, foram mensais, e estão representadas na Figura 38.

Figura 38 - Nutrientes (Nitrogênio e Fósforo) nos reatores anaeróbios (R2 e R3) da ETEI numa indústria produtora de bebidas. Média de nutrientes registrada ao longo do ano de 2022.



Fonte: A autora, 2024.

Lettinga et al. (1994) citado por Chernicharo (2008) indicam que para esgotos domésticos, assumindo-se que os nutrientes estejam numa forma disponível para as bactérias, as seguintes relações:

(a) DQO:N:P de 1000:5:1 e C:N:P de 330:5:1, são indicadas para biomassa com baixo coeficiente de produção celular ( $Y \sim 0,05$  gSSV/gDQO), como por exemplo, a degradação de ácidos graxos voláteis.

(b) DQO:N:P de 350:5:1 e C:N:P de 130:5:1, no caso de biomassa com alta produção celular ( $Y \sim 0,15$  gSSV/gDQO), como por exemplo a degradação de carboidratos.

A correlação entre DQO:N:P obtida para os meses de 2022 pode ser demonstrada na Tabela 5.

Tabela 5 - Correlação DQO:N:P nos reatores anaeróbios (R2 e R3) da ETEI numa indústria produtora de bebidas. Correlação DQO:N:P registrada ao longo do ano de 2022.

Mês	DQO	N	P
Janeiro	259	3	1
Fevereiro	94	2	1
Março	138	3	1
Abril	74	4	1
Mai	94	2	1
Junho	83	5	1
Julho	108	3	1
Agosto	161	3	1
Setembro	137	5	1
Outubro	221	2	1
Novembro	179	2	1
Dezembro	172	4	1

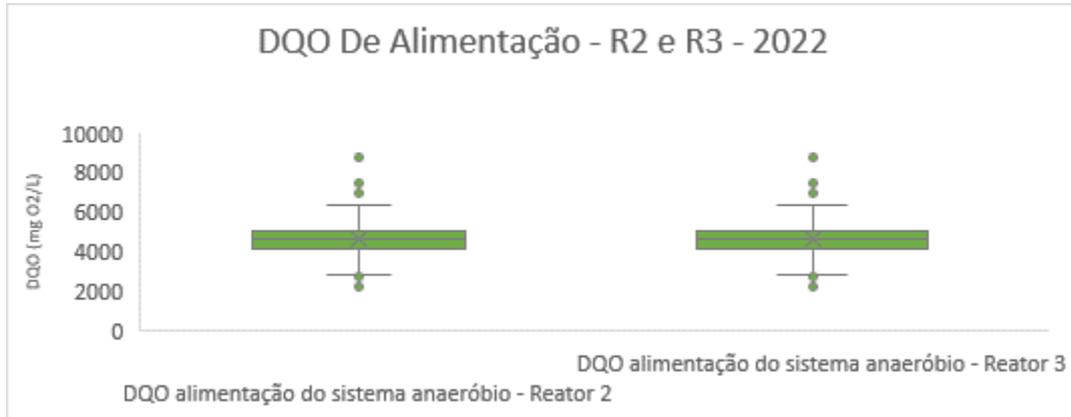
Fonte: A autora, 2024.

Speece (1996) considerou uma relação de 500:5:1 para DQO:N:P como suficiente para atender às necessidades por macronutrientes pelos microrganismos anaeróbios. Luiz (2007), obteve como resultados para reatores anaeróbios 264:4:1, 750:9:1 e 589:9:1 concluindo que os reatores operavam com folga em relação ao suprimento de nitrogênio, sendo as duas últimas fases analisadas, com um déficit de fósforo.

#### 4.1.5. Eficiência de remoção de DQO R2 e R3

Foram realizadas 670 coletas no ano de 2022 para avaliação da DQO, com valores mínimos de alimentação 2209 mg O<sub>2</sub>/L e valores máximos de 8783 mg O<sub>2</sub>/L, com uma média de 4646 mg O<sub>2</sub>/L (Figura 39).

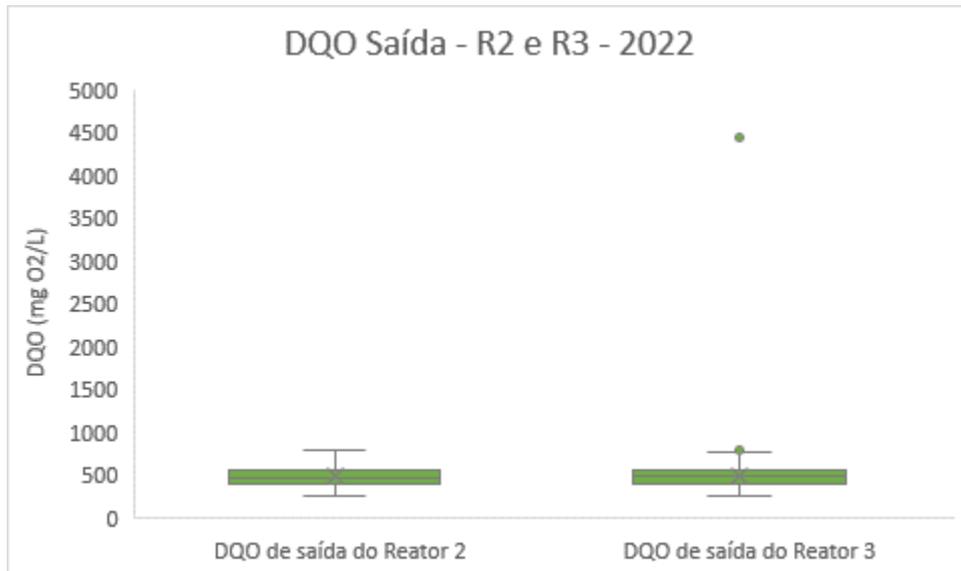
Figura 39 - DQO de alimentação nos reatores anaeróbios (R2 e R3) da ETEI numa indústria produtora de bebidas. DQO de alimentação registrada ao longo do ano de 2022.



Fonte: A autora, 2024.

Em se tratando da DQO de saída, entre as 669 coletas, os valores médios são de 485 mg O<sub>2</sub>/L e 494 mg O<sub>2</sub>/L respectivamente conforme representado na Figura 40.

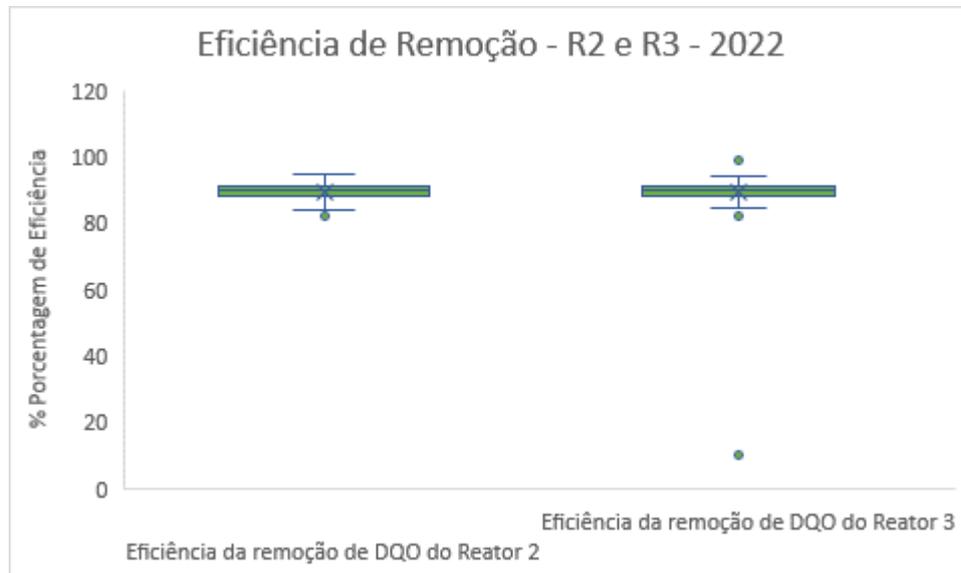
Figura 40 - DQO de saída nos reatores anaeróbios (R2 e R3) da ETEI numa indústria produtora de bebidas. Média de DQO registrada ao longo do ano de 2022.



Fonte: A autora, 2024.

A eficiência média de remoção é de 89% em ambos os reatores como mostra a figura 41.

Figura 41- Eficiência de Remoção de DQO nos reatores anaeróbios (R2 e R3) da ETEI numa indústria produtora de bebidas. Média de remoção de DQO registrada ao longo do ano de 2022.



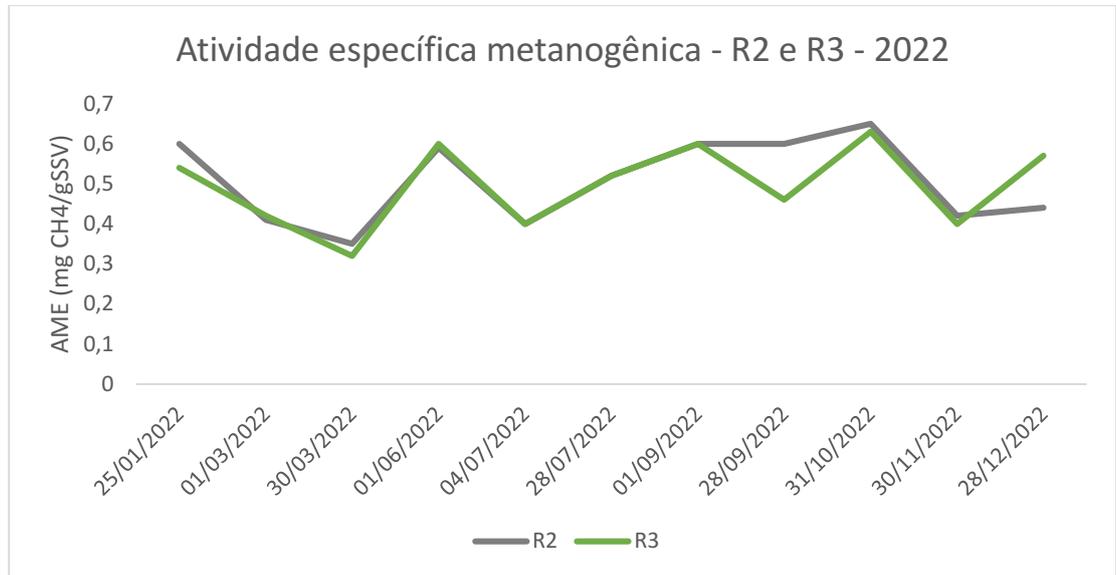
Fonte: A autora, 2024.

De acordo com Von Sperling (2002) sistemas de lodos ativados que tratam esgoto doméstico, em geral, atingem eficiências para a remoção da DQO entre 85 e 95%. Junior et al., (2003) avaliou o efluente característico de uma indústria de bebidas e encontrou uma mediana de 81,7% de remoção de DQO, e após intervenção de projeto, com a inclusão de pós-tratamento, foi possível elevar esses valores para medianas de 90,3% de remoção de DQO.

#### 4.1.6. Atividade metanogênica

Nas 12 coletas anuais para avaliação do parâmetro de Atividade Metanogênica Específica (AME) dos reatores anaeróbios 2 e 3, os valores médios encontrados foram na faixa de 0,5 mLCH<sub>4</sub>/g SSV como mostra a figura 42.

Figura 42 - Atividade metanogênica nos reatores anaeróbios (R2 e R3) da ETEI numa indústria produtora de bebidas. Atividade metanogênica registrada ao longo do ano de 2022.



Fonte: A autora, 2024.

Em Rocha (2003), a máxima AME foi obtida com lodo granular de uma cervejaria na concentração de 1,74 à 0,11 mLCH<sub>4</sub>/gSSV a depender da concentração do lodo utilizado na amostragem.

Longaretti et al. (2019), apresentou ensaios com o objetivo de avaliar o parâmetro de AME em lodos de diferentes indústrias. O valor da AME foi superior para a indústria cervejeira, seguida das de grão e curture e, por fim, das de laticínios — 0,35, 0,27 e 0,10 mLCH<sub>4</sub>/gSSV, respectivamente.

#### 4.1.7. Biodegradabilidade

Nas 12 amostras analisadas referentes aos meses do ano de 2022, a biodegradabilidade média obtida foi de 78,17%, levando em consideração os respectivos valores mensais de DQO Total, carga orgânica por quilo de DQO e a produção teórica de metano (Tabela 6).

Em Rocha (2003) a biodegradabilidade do efluente da indústria de bebidas variou de 76% a 50% de acordo com o tratamento de lodo aplicado. Em Pontes et al. (2016), para o efluente gerado na indústria farmacêutica encontrou-se o teor de biodegradabilidade com variação entre 76% e 87%.

Tabela 6 - Biodegradabilidade nos reatores anaeróbios (R2 e R3) da ETEI numa indústria produtora de bebidas. Biodegradabilidade registrada ao longo do ano de 2022.

Mês de referência	jan/22	fev/22	mar/22	abr/22	mai/22	jun/22	jul/22	ago/22	set/22	out/22	nov/22	dez/22
DQO Total (mg/L)	3600	2005	6910	2027	2800	5794	5015	2248	2920	2986,5	2390	3870
Carga orgânica (kg DQO)	0,008	0,0036	0,0028	0,0036	0,005	0,0106	0,009	0,004	0,005	0,0054	0,0043	0,007
Produção teórica de metano (base: DQO Total - mL)	2352	1245,3	782	1313	1657,1	3194,4	2760	1364,6	1653	1778,8	1441,8	2173,1
Produção de metano no teste (mL)	2100	870	679	960	1200	2930	2218	970	1210	1290	1060	1830
Biodegradabilidade (%)	89,29	69,864	86,829	73,115	72,416	91,722	80,37	71,085	73,2	72,522	73,518	84,212

Fonte: A autora, 2024.

#### 4.1.8. Tempo de detenção hidráulica (TDH)

As dimensões dos reatores anaeróbios são 16,74 m X 26,55 m X 5,75 m, com uma capacidade total de 2555 m<sup>3</sup> e capacidade útil de 2444 m<sup>3</sup>. Considerando uma vazão média de 3804,59 m<sup>3</sup>/h para o reator 2, o tempo de detenção hidráulica é de 15,39 h enquanto para o reator 3, considerando uma vazão média de 3690,30 m<sup>3</sup>/h é de 15,86h conforme registrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Tempo de detenção hidráulica nos reatores anaeróbios (R2 e R3) da ETEI numa indústria produtora de bebidas.

Reator	R2	R3
Volume útil (m3)	2440	2440
Vazão média diária (m3/d)	3804,59	3690,3
TDH (dias)	0,641331	0,661193
TDH (horas)	15,39193	15,86863

Fonte: A autora, 2024.

O tempo de detenção hidráulica (TDH) é relevante por ter relação direta com a velocidade do processo de digestão anaeróbia, que está conexo com o tamanho da unidade de tratamento.

Relacionado a uma temperatura média de 20 °C, este parâmetro pode variar de 6 a 16 horas. Já valores superiores de carga hidráulica ou inferiores em tempo de detenção hidráulica, podem acarretar os seguintes inconvenientes (CHERNICHARO, 2008):

- Perda excessiva de biomassa do sistema;
- Redução do tempo de residência celular (idade do lodo) e consequente diminuição do grau de estabilização dos sólidos, e
- Possibilidade de falha do sistema, uma vez que o tempo de permanência da biomassa no sistema pode ser inferior ao seu tempo de crescimento.

#### **4.2 COEFICIENTE DE PEARSON NA CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS APRESENTADOS**

Nesse tópico estão apresentadas algumas correlações relevantes em relação aos parâmetros analisados na estação de tratamento de efluentes e que caracterizam o tratamento anaeróbio.

Para expressar estes dados, foi selecionado o método estatístico coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) por se tratar de uma medida de associação linear entre variáveis. Através dele, é possível correlacionar variáveis e estimar o grau de relevância entre elas. A correlação mensura a direção e o grau da relação linear entre duas variáveis quantitativas (MOORE, 2007).

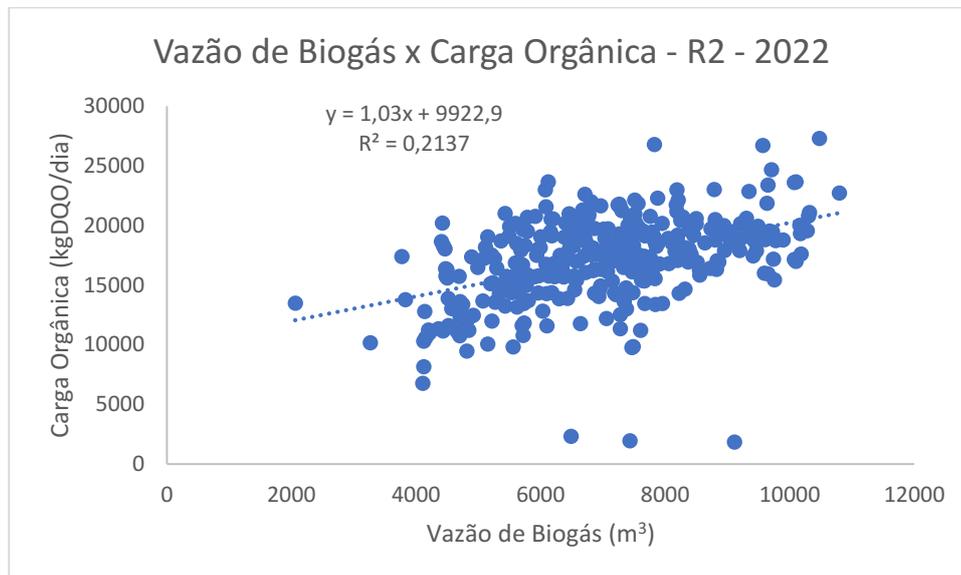
A interação entre as duas variáveis analisadas pode ser interpretada quanto ao seu grau de força e fraqueza (MUKAKA, 2016).

- 0.9 para mais ou para menos indica uma correlação muito forte.
- 0.7 a 0.9 positivo ou negativo indica uma correlação forte.
- 0.5 a 0.7 positivo ou negativo indica uma correlação moderada.
- 0.3 a 0.5 positivo ou negativo indica uma correlação fraca.
- 0 a 0.3 positivo ou negativo indica uma correlação desprezível.

#### 4.2.1 Carga Orgânica X Biogás

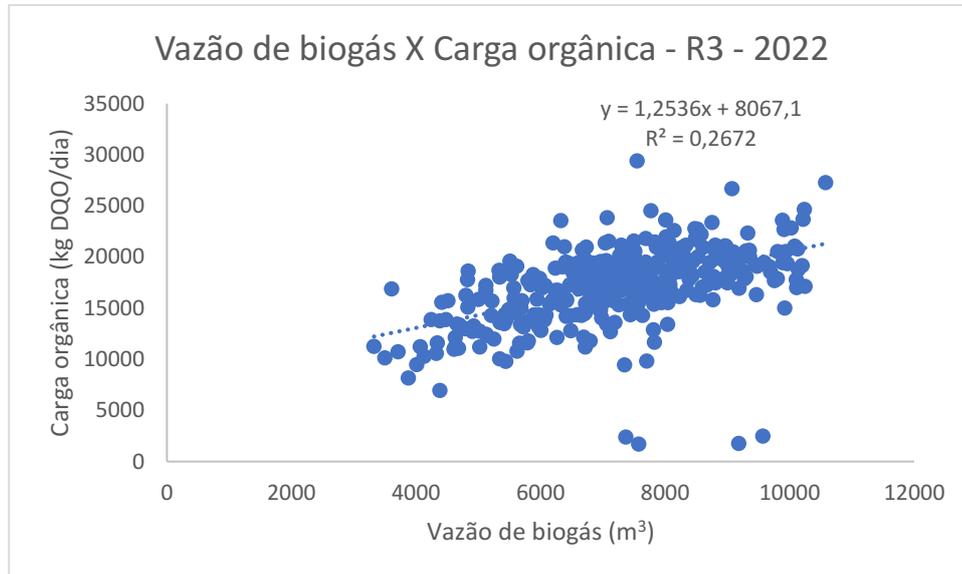
Foram analisadas 668 amostras de carga orgânica e produção de biogás. Para o reator anaeróbio 2, o coeficiente encontrado foi de  $r = 0,462$  (Figura 43) e para o reator 3 a correlação foi de  $r = 0,516$  (Figura 44). Estes valores permitem caracterizar com fator de interferência moderada a correlação entre os parâmetros de carga orgânica e vazão de biogás gerada no processo.

Figura 43 - Análise dos parâmetros da ETEI de uma indústria produtora de bebidas. Vazão de Biogás x Carga Orgânica no Reator 2.



Fonte: A autora, 2024.

Figura 44 - Análise dos parâmetros da ETEI de uma indústria produtora de bebidas. Vazão de Biogás x Carga Orgânica – Reator 3



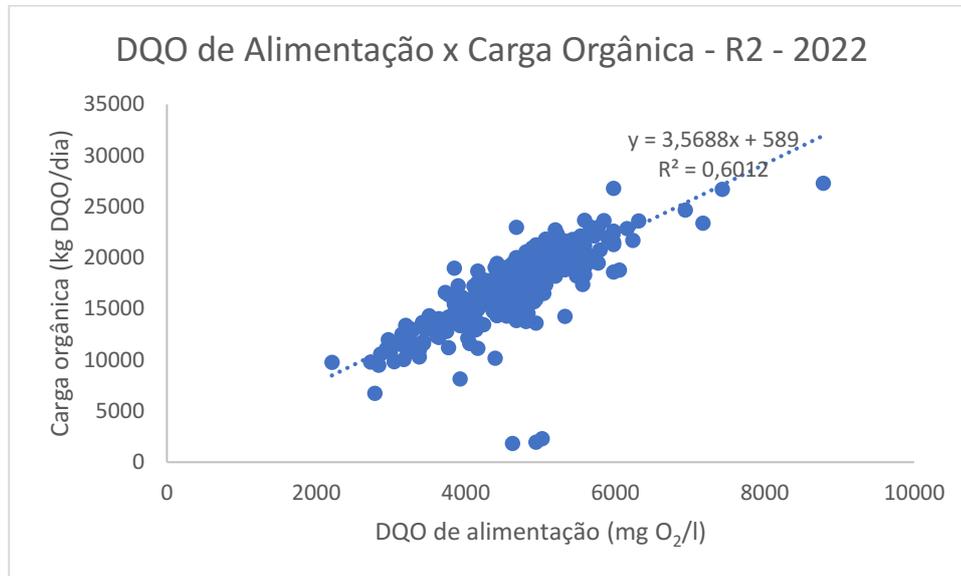
Fonte: A autora, 2024.

Enitan et al. (2015) durante o tratamento de águas residuárias em uma cervejaria também usou a correlação de Person entre o coeficiente de produção de metano e a carga orgânica, em detrimento do tempo de detenção hidráulica, e encontrou uma correlação significativa desta variável com  $r=0,84$ .

#### 4.2.2 Carga Orgânica X DQO

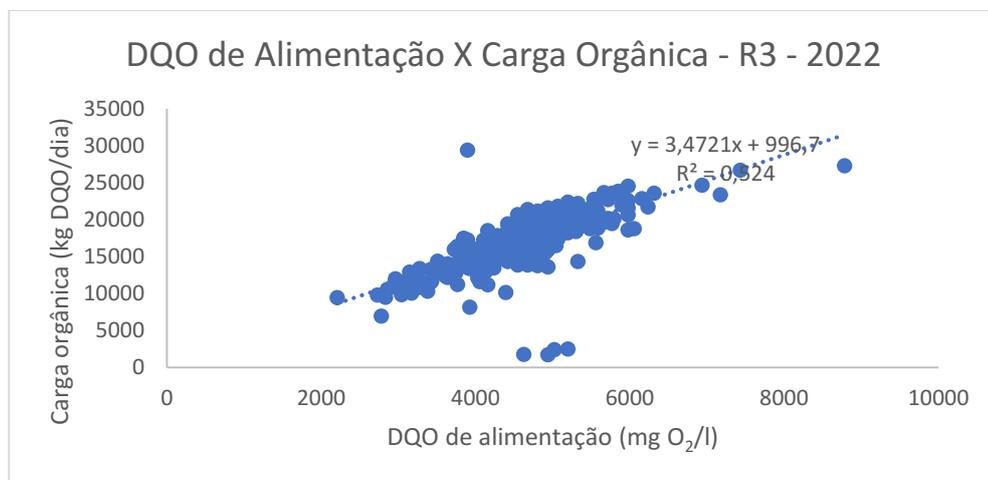
A correlação entre carga orgânica e DQO de alimentação mostrou-se forte, com valores de  $r=0,77$  e  $r=0,72$  respectivamente para os reatores 2 e 3, considerando um espaço amostral de 668 análises, conforme descrito nas Figuras 45 e 46.

Figura 45 - Análise dos parâmetros da ETEI de uma indústria produtora de bebidas. DQO de Alimentação x Carga Orgânica – Reator 2



Fonte: A autora, 2024.

Figura 46 - Análise dos parâmetros da ETEI de uma indústria produtora de bebidas. DQO de Alimentação x Carga Orgânica – Reator 3



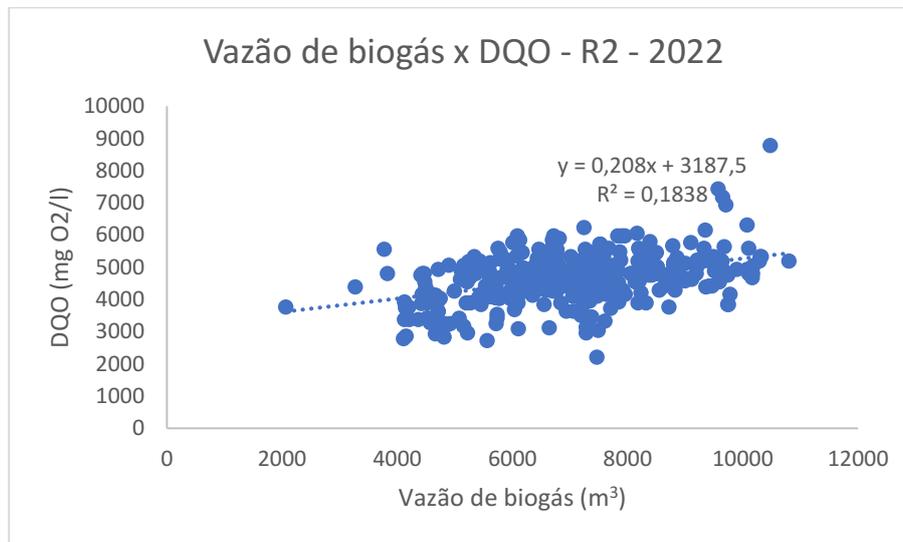
Fonte: A autora, 2024.

Reis (2007) também avaliou a eficiência do processo anaeróbico em termos de remoção de DQO, considerando-a como ótima, em função das altas cargas orgânicas aplicadas, apresentando uma eficiência média de 83% a 91% para cinco modelos de reatores testados. A capacidade de manter boas eficiências de remoção de DQO para ampla faixa de cargas orgânicas também foi observada por ØDEGAARD (2006).

#### 4.2.3 Vazão de Biogás X DQO

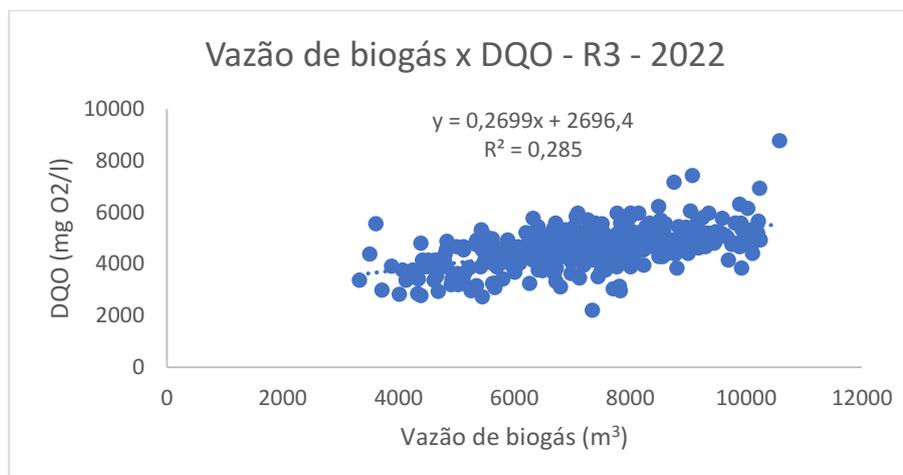
A partir da análise de 668 amostras de produção de biogás e DQO, para os reatores 2 e 3, constatou-se, respectivamente, uma taxa de correlação entre essas duas variáveis de  $r = 0,428$  e  $r = 0,533$ . Dessa forma, configura-se um coeficiente de Pearson de fraco à moderado para a correlação entre as variáveis conforme evidenciado nas figuras 47 e 48.

Figura 47 - Análise dos parâmetros da ETEI de uma indústria produtora de bebidas. Vazão de Biogás X DQO – Reator 2



Fonte: A autora, 2024.

Figura 48 - Análise dos parâmetros da ETEI de uma indústria produtora de bebidas. Vazão de Biogás X DQO – Reator 3



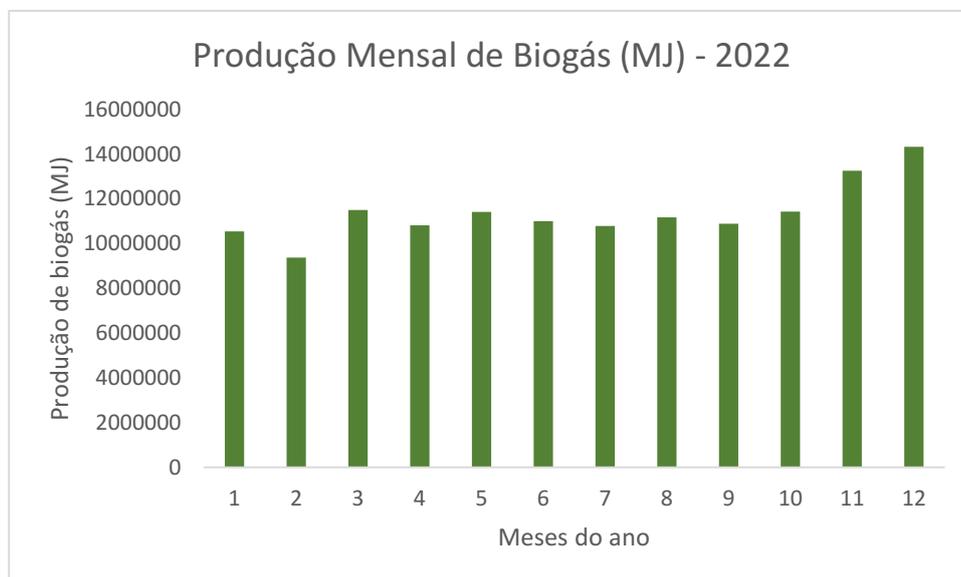
Fonte: A autora, 2024.

Em Hasan et al. (2018) foi realizada uma avaliação paralela das produções de biogás e metano obtidas com as quantidades de matéria orgânica removida (DQO), evidenciando a correlação entre estas duas informações, confirmada pelo coeficiente de Pearson (0,97), no efluente de uma indústria alimentícia por meio do tratamento anaeróbio.

### 4.3 RESULTADOS DA CERVEJARIA COMPARATIVO COM A PRODUÇÃO DE BIOGÁS

No ano de 2022, a produção de biogás na indústria de bebidas avaliada, se configurou como recorde histórico, com uma média de 366.898 MJ/dia atingindo a marca de 135.685.249,95 MJ ao final do ano de 2022 e o recorde mensal equivalente a 510.567 Nm<sup>3</sup> de biogás no mês de dezembro de 2022.

Figura 49 - Produção de Biogás na ETEI de uma indústria produtora de bebidas. Dados mensais referentes ao ano de 2022



Fonte: A autora, 2024.

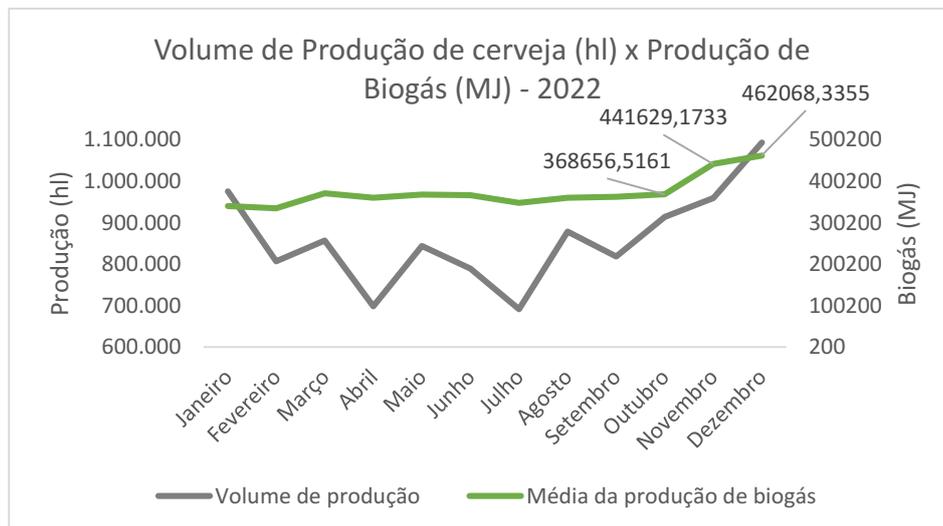
A produção de biogás na indústria cervejeira apresenta um cenário promissor. Em nota técnica publicada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), a projeção estimada de incremento de produção neste setor é de 731 milhões de Nm<sup>3</sup>

de biogás em 2030, acompanhando, desta maneira, a tendência de expansão do mercado cervejeiro. Considera-se que cerca de 50% do potencial atual das cervejarias possa ser explorado até 2030 (72 milhões Nm<sup>3</sup>/ano), e ocorra uma adesão de 60% das empresas atuais na produção de biogás por meio de maiores incentivos e oportunidades para o setor (GEF Biogás Brasil, 2022).

#### 4.3.1 Volume de produção

A indústria de bebidas estudada tem por característica histórica a influência da sazonalidade nas vendas associada aos períodos de calor no Rio de Janeiro e comemorações de final de ano. A Figura 50 reflete este cenário em que os maiores valores de produção de biogás acompanham a sazonalidade da produção de bebidas na indústria cervejeira e tem seus maiores picos de produção nos últimos 3 meses do ano (outubro, novembro e dezembro) atingindo uma média de 424.118 MJ/mês.

Figura 50 - Análise dos parâmetros na ETEI de uma indústria produtora de bebidas. Volume de Produção de bebida (hl) x Produção de Biogás (MJ) no reator 2. Dados mensais referentes ao ano de 2022.

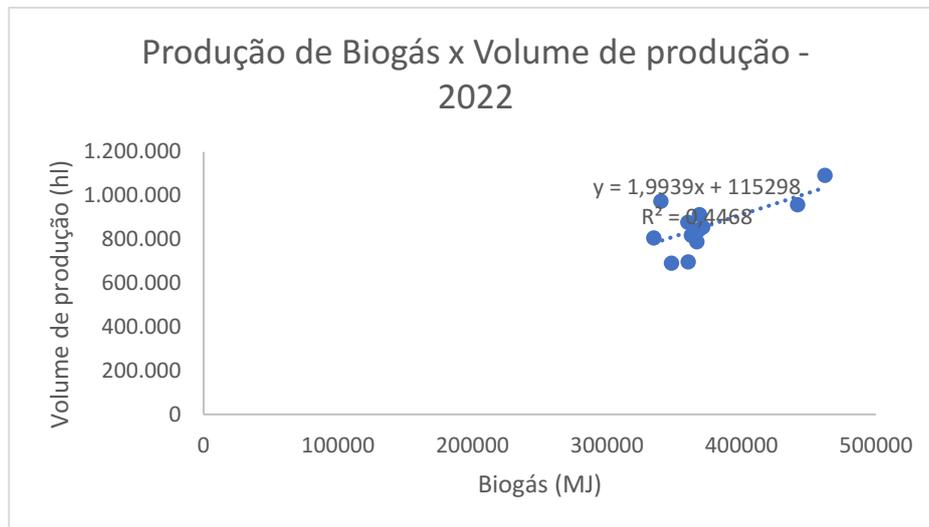


Fonte: A autora, 2024.

Foram analisadas as médias anuais de produção de biogás e do volume produzido de bebida, a fim de se verificar uma correlação entre os dados, utilizando o

coeficiente de Pearson (Figura 51). A correlação entre os dados apresentou um  $r=0,668$  caracterizando-se com uma correlação moderada à forte.

Figura 51 - Análise dos parâmetros na ETEI de uma indústria produtora de bebidas. Volume de Produção (hl) x Produção de Biogás (MJ) no reator 3. Dados mensais referentes ao ano de 2022.



Fonte: A autora, 2024.

O Brasil assume a posição de terceiro maior produtor de cerveja do mundo, atrás da China e dos Estados Unidos e deve alcançar, em 2023, o volume de vendas de 16,1 bilhões de litros, um crescimento de 4,5% em relação a 2022, de acordo com dados da empresa de mercado *Euromonitor International*, para o Sindicato Nacional da Indústria da Cerveja - Sindicerv.

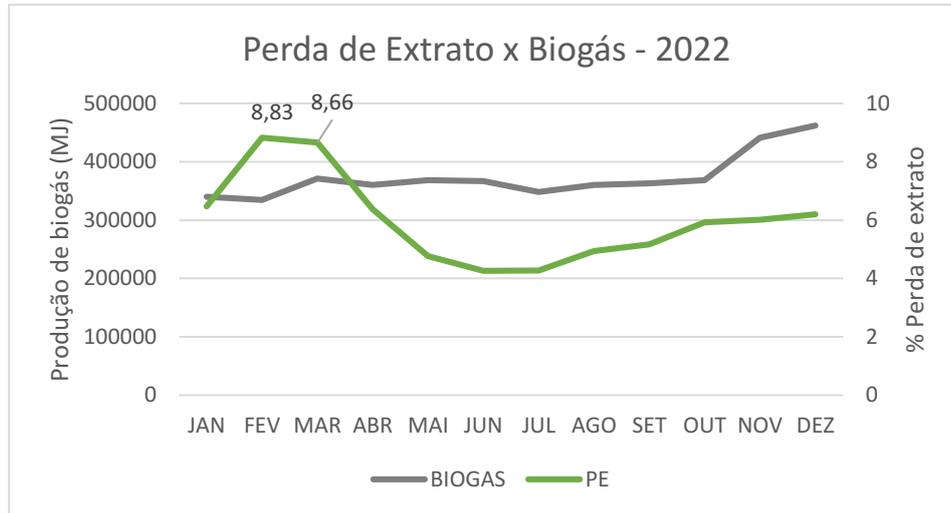
#### 4.3.2. Perda de extrato

Perda de extrato é o conceito introduzido na indústria para tratar das perdas de processo que impactam diretamente no volume final envazado. No ano de 2022 a cervejaria fechou o ano com o indicador de perda de extrato em 5,98%. Ou seja, aproximadamente 6% de todo o volume produzido no ano foram perdas de processo, descartadas através da rede industrial de esgotamento, e tratado na estação de tratamento de efluentes para posterior lançamento ao corpo receptor.

Apesar de não ser interessante para o negócio, a perda de extrato, inerente ao processo, contribui para o envio de matéria orgânica na estação de tratamento de efluentes, e conseqüentemente, na geração de biogás. Os dados referentes à perda

de extrato relacionado à produção de biogás na indústria de bebidas analisada durante o ano de 2022 está representado na Figura 59.

Figura 52 - Análise dos parâmetros na ETEI de uma indústria produtora de bebidas. Perda de extrato (%) x Produção de Biogás (MJ). Dados mensais referentes ao ano de 2022. PE= Perda de extrato

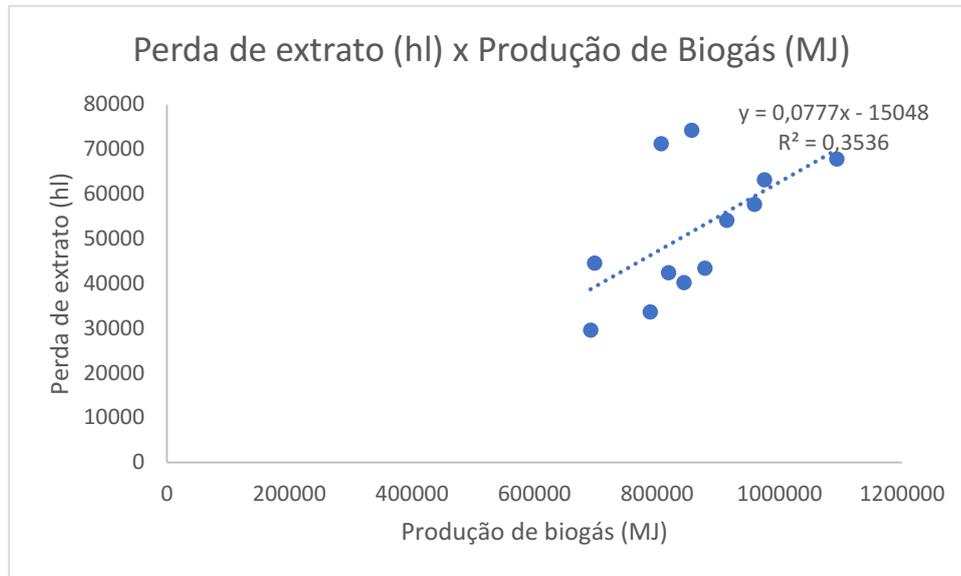


Fonte: A autora, 2024.

Os meses de fevereiro e março se configuram como meses de maior índice de perda de extrato, com uma média de 8,74%, demonstrando um descontrole de processo operacional nestes meses. A média de produção neste período atingiu a marca de 352.917,97 MJ/mês.

Aplicando o coeficiente de Pearson para entender a correlação existente entre o volume de perda de extrato na cervejaria e o impacto na geração de biogás, obteve-se o coeficiente de  $r = 0,59$ , indicando uma correlação moderada entre as variáveis.

Figura 53 - Perda de extrato (%) x Produção de Biogás (MJ) – 2022



Fonte: A autora, 2024.

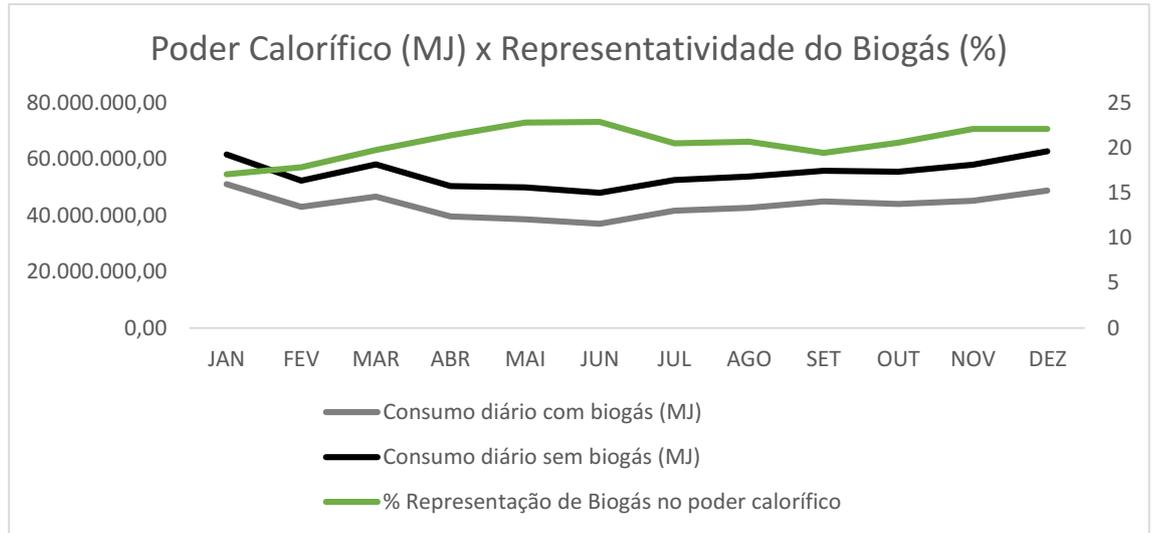
Conforme ilustrado na figura 60, a indústria possui um rigoroso controle de suas perdas processuais, apesar dos *outliers*. As organizações na incessante busca por melhores posições em um mercado globalizado e competitivo procuram produzir mais com menor custo, e também, centralizar esforços na redução das perdas em seus processos (MOURA e ESTEVES, 2010).

#### 4.3.3 Ganhos em energia calorífica

Todo o biogás produzido na cervejaria avaliada neste estudo, apesar de ser consumido na fábrica de vidros, é descontado do índice de *Heat*. Este índice contempla a correlação entre energia calorífica (em MJ) por hectolitro (hl) de bebida produzida citação. Desta forma, a maior produção de biogás, reduz o índice de MJ/hl da cervejaria, contribuindo para suas metas de sustentabilidade.

Nos meses de abril, maio e junho, conforme ilustra a Figura 54, o biogás gerado representou 22,38% de todo o consumo em MJ de energia da cervejaria, sendo abatido de seu indicador principal.

Figura 54 - Representação do consumo de biogás na fábrica de vidros de uma indústria produtora de bebidas. Consumo mensal em MJ referentes ao ano de 2022.



Fonte: A autora, 2024.

O aproveitamento energético de biogás é um processo de recuperação de energia, e, portanto, uma iniciativa da companhia para aproveitamento energético e redução de custos, associada às metas de sustentabilidade globais assumidas publicamente até o ano de 2025:

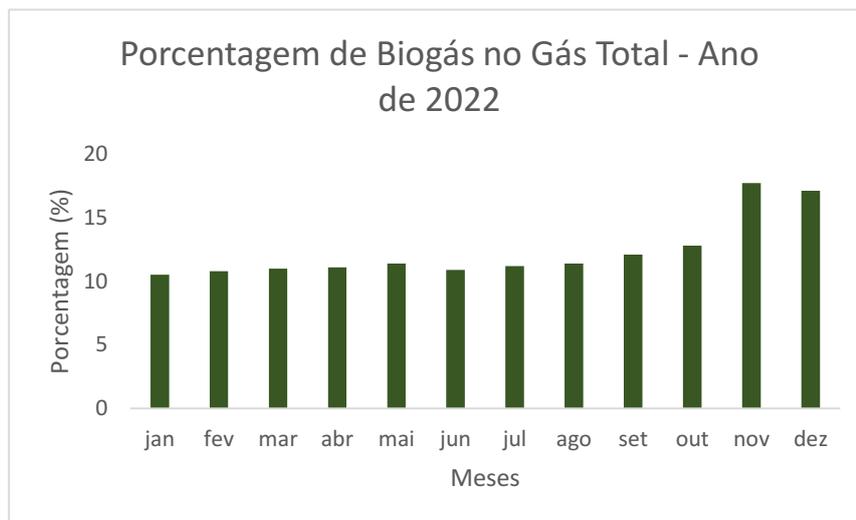
- Eletricidade 100% renovável;
- 100% das embalagens retornáveis ou feitas majoritariamente de material reciclado;
- 25% de redução de emissões por hectolitro na cadeia;
- 35% de redução de emissões absolutas;

#### 4.4 RESULTADOS DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DA ESTAÇÃO DE BENEFICIAMENTO DE BIOGÁS E IMPACTO NA FÁBRICA VIDREIRA

Como resultado do acompanhamento e melhorias no processo, mês a mês, a porcentagem de biogás utilizado na indústria na composição do gás total vem crescendo, gerando uma economia financeira, em substituição ao gás natural, e um modelo mais sustentável para o negócio.

A porcentagem de biogás no gás natural total direcionado para utilização na fábrica de vidros, em média no ano de 2022, foi de 12,33% (Figura 55). Sendo assim, há uma margem considerável de oportunidade no incremento da produção de biogás, que veremos a seguir, já que a vidreira possui capacidade de receber até 100% de biogás em sua composição calorífica.

Figura 55 - Porcentagem de biogás em relação ao gás natural utilizado na fábrica de vidros uma indústria produtora de bebidas. Dados mensais referentes ao ano de 2022.

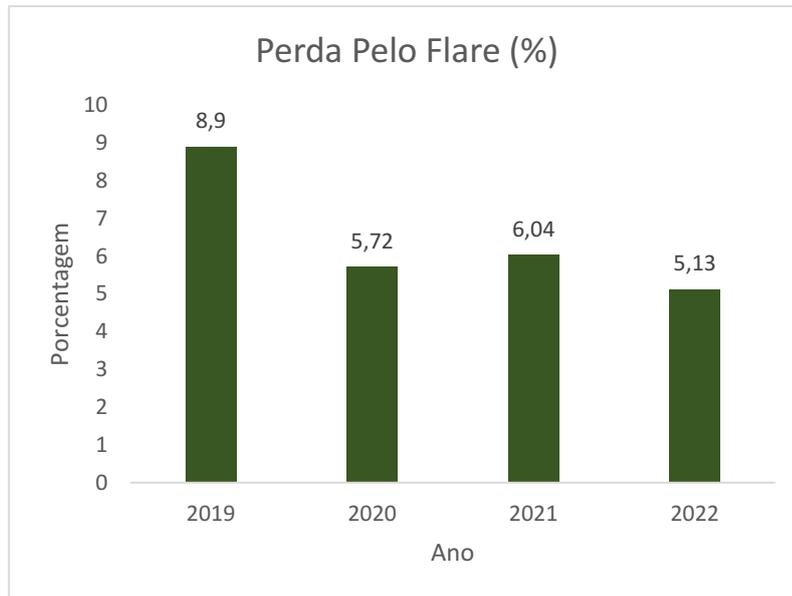


Fonte: A autora, 2024.

Esta alternativa para substituir o gás natural pelo biogás se deve ao fato de ambos terem o mesmo processo de formação, por meio da decomposição anaeróbia da matéria orgânica. A diferença entre eles é que o gás natural não é formado pela circulação do material orgânico presente na superfície terrestre. Com a queima do gás natural, o carbono retorna para seu ciclo na atmosfera e, quando o material orgânico é convertido em biogás, não há liberação adicional de dióxido de carbono, e sim, o aproveitamento do potencial de energia que está armazenado na matéria orgânica (KARLSSON et At., 2014).

As perdas pelo *flare* na fábrica de vidros tem sido cada vez menores, mostrando os bons resultados alcançados no beneficiamento ao longo dos últimos anos (Figura 56). Ano após ano, os resultados, com o aprimoramento do controle de processos e dados, vêm alcançando êxito na indústria de bebidas em questão.

Figura 56 - Percentagem de biogás perdido pelo Flare na fábrica de vidros de uma indústria produtora de bebidas. Dados referentes aos anos de 2019 a 2022.



Fonte: A autora, 2024.

Para Figueirado (2011) os gases residuais do processo de beneficiamento do biogás são queimados no *flare*, reduzindo, desta forma, a emissão de compostos mais poluentes, como o metano, que segundo a EPA (2009) tem o potencial de aquecimento global cerca de 20 vezes superior ao CO<sub>2</sub>.

#### 4.5 CÁLCULO GANHOS FINANCEIROS

Em se tratando dos impactos financeiros, é preciso considerar todos os custos anuais para a manutenção da estação de tratamento de efluentes, como mão de obra (MO), custos de produtos químicos, transporte e destinação de resíduos, gastos com manutenção e energia elétrica que garantem a operacionalidade do sistema. Considerando os cálculos obtidos o custo anual da ETEI no ano de 2022 foi de R\$5.504.554,08 (Tabela 8).

Tabela 8 - Custos operacionais totais ETEI da Industria produtora de bebidas no ano de 2022. Foram considerados custos com mão de obra (MO), produtos químicos, transporte e destinação de resíduos, gastos com manutenção e energia elétrica.

<b>Custo Operacional ETEI</b>	
<b>Operações ETEI</b>	<b>Valor anual 2022</b>
MO ETA/ETEI	R\$ 1.754.865
Produtos Químicos	R\$ 1.015.200,00
Transporte de Lodo	R\$ 689.000
Destinação de lodo	R\$ 590.000
Custo de Manutenção	R\$ 550.000
Energia Elétrica	R\$ 905.489
<b>TOTAL ANUAL</b>	<b>R\$ 5.504.554,08</b>

Fonte: A autora, 2024.

Considerando as tarifas de base orçamentária de R\$0,089/MJ para a tarifa de Heat, e R\$0,20/MJ para a Tarifa de Energia Elétrica, e a bases reais de R\$0,077/MJ e R\$0,24/MJ respectivamente podemos calcular o lucro do sistema de geração de biogás (Tabela 9). O cálculo é feito multiplicando o valor de geração anual 3.728.256,58 m<sup>3</sup> por 27,21 (conversão para MJ) e por R\$ 0,08/MJ (base orçamentária), e subtraindo o total anual de 5.504.554,08, obteve-se um impacto base de R\$ 2.611.114,84.

Considerando R\$3,77 o custo do gás natural, subtraindo-o de R\$0,24 MJ/hl, e multiplicando pela geração anual, obtém-se o valor de R\$ 13.123.463,16. Subtraindo-o do valor total anual, encontra-se o resultado de R\$7.618.909,08.

Tabela 9 - Lucro da geração de biogás da Industria produtora de bebidas no ano de 2022.

<b>Receita gerada pela Geração de BIOGAS</b>	
Geração anual 2022	3728256,58
IMPACTO BASE	R\$ 2.611.114,84
IMPACTO REDUÇÃO CUSTO FÁBRICA DE VIDROS	R\$ 7.618.909,08
<b>SOMA IMPACTO (VIDROS + INDÚSTRIA)</b>	<b>R\$ 10.230.023,92</b>

Fonte: A autora, 2024.

Nesse sentido, estima-se que o lucro para a companhia no ano de 2022 com a geração de biogás e substituição do gás natural na fábrica de vidros seja de R\$

4.725.469,83 equivalente ao balanço financeiro dos ganhos positivos e negativos neste processo.

As oportunidades do setor cervejeiro são ainda mais promissoras. De acordo com a projeção, se toda a estimativa de geração de biogás fosse convertida em biometano e utilizada nas próprias unidades geradoras, seria possível obter uma redução de custo de até R\$22,9 milhões em 2022, com crescimento médio de 34% ao ano, alcançando valores de R\$194,2 milhões em 2030. (GEF Biogás Brasil, 2022).

## **4.6 OPORTUNIDADES OPERACIONAIS DE INCREMENTO NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Além de analisar as características físico-químicas do efluente a partir dos parâmetros operacionais de processo e as interfaces de processo industrial, é fundamental considerar, para o longo prazo, melhorias de processo. Essas oportunidades estão concentradas nas áreas de resíduos, utilização de químicos e logística de despejo, e que juntas, podem garantir o incremento futuro da geração de biogás na indústria em questão.

### 4.6.1 Resíduos: bagaço de malte e fermento

O bagaço de malte na cervejaria tem sua destinação como resíduos, e no ano de 2022 representou 115 toneladas (Figura 66). Apesar da dificuldade de tratamento na ETEI em função do aporte de sólidos inertes, formação de lodo pesado, DQO de difícil degradação e cisalhamento do lodo anaeróbico, este bagaço, com o tratamento adequado, poderia também ser despejado na ETEI, e convertido a biogás. Estima-se que cada hectolitro (100 litros) de cerveja produzida gere entre 14 e 20 kg de bagaço (CORDEIRO, EL-AOUAR, GUSMÃO, 2012). Este é constituído principalmente por cascas de cevada maltada, o bagaço de malte, e apresenta elevados teores de fibras, sendo considerado um material lignocelulósico. Tal característica lhe confere maior resistência quanto ao seu aproveitamento na produção de biogás, sendo necessária a adoção de pré-tratamentos para elevar o rendimento de conversão.

Figura 57 - Área de descarte de resíduos de bagaço de malte oriundo da produção de cerveja na Indústria produtora de bebidas.



Fonte: A autora, 2024.

Uma forma de incrementar a geração de biogás na indústria de bebidas seria o descarte e tratamento na estação de efluentes do bagaço de malte gerado durante o processo produtivo.

No ano de 2022, a partir dos dados coletados, foram destinadas 115.704.290,30 toneladas deste ativo, o que seria equivalente a R\$ 11.304.309.171,20 m<sup>3</sup> de biometano, considerando a conversão de 76,2 m<sup>3</sup> metano por tonelada de resíduo. Segundo a EPE (Empresa de Pesquisa Energética) (ano) a faixa de valores do biometano pode variar entre R\$ 1,04/m<sup>3</sup> e R\$ 1,85/m<sup>3</sup> no mercado. Sendo assim, o potencial rentável da geração de biogás através do bagaço, poderia variar de R\$ 11.756.481.538,05 à R\$ 20.912.971.966,72 se aproximando do ganho financeiro atual a partir da venda externa a depender da variação de preços e flutuações de mercado enquanto a venda enquanto resíduo gera hoje uma receita de 23 milhões (Tabela 10).

*Tabela 10 - Ganhos financeiros a partir da venda de bagaço de malte oriundo da produção de cerveja na Indústria produtora de bebidas. Dados mensais referente ao ano de 2022.*

MESES	BAGAÇO DE MALTE	
	QUANTIDADE	GANHO FINANCEIRO
JAN	10.203.490,92	R\$ 1.524.161,50
FEV	11.352.357,86	R\$ 1.800.795,61
MAR	9.296.616,50	R\$ 1.749.745,11
ABR	10.052.782,18	R\$ 2.062.722,15
MAI	8.526.810,26	R\$ 1.634.280,92
JUN	9.179.775,20	R\$ 1.606.025,91
JUL	7.533.020,40	R\$ 1.601.822,05
AGO	9.790.528,56	R\$ 2.063.591,04
SET	9.455.663,85	R\$ 1.893.670,73
OUT	9.678.020,88	R\$ 2.155.257,89
NOV	10.690.737,72	R\$ 2.644.229,17
DEZ	9.944.486,06	R\$ 2.244.207,52
<b>TOTAL</b>	<b>115.704.290,39</b>	<b>R\$ 22.980.509,60</b>

Fonte: A autora, 2024.

Em nota técnica publicada pelo MCTI, denominada Biogás no setor cervejeiro, entre as amostras analisadas, a levedura apresenta maior produção de biogás seguida pelo bagaço de malte, com uma diferença entre elas de aproximadamente 12% no volume de biogás e 21% no teor de metano. No ano de 2022, foram descartadas cerca de 16 toneladas de levedura na indústria estudada. Considerando a conversão de 97,7 m<sup>3</sup> de biometano a cada tonelada de levedura, poderiam ser produzidos 4.887.302.266,52 m<sup>3</sup> de biometano com a levedura, com ganho financeiro estimado em 5.082.794.357,18 a 9.041.509.193,05, ultrapassando os ganhos atuais de receita na venda de levedura, conforme tabela x. Apesar dos desafios para a estação de tratamento de efluentes pelas características da levedura como aumento do nitrogênio, risco de acidificação dos reatores e digestão prolongada em função da quebra das cadeias carbônicas, pode ser estudado um modelo de pré-tratamento no futuro, em função da possível rentabilidade deste processo.

Tabela 11 - Ganhos financeiros a partir da venda de levedura oriunda da produção de cerveja na Indústria produtora de bebidas. Dados mensais referente ao ano de 2022.

MESES	LEVEDURA UMIDA	
	QUANTIDADE	GANHO FINANCEIRO
JAN	2.062.964,00	R\$ 202.607,72
FEV	1.794.420,00	R\$ 157.047,69
MAR	1.876.300,00	R\$ 142.331,47
ABR	838.420,00	R\$ 71.902,50
MAI	1.003.098,38	R\$ 91.339,74
JUN	1.365.980,00	R\$ 114.591,69
JUL	731.320,00	R\$ 58.669,89
AGO	1.089.480,00	R\$ 92.429,33
SET	1.011.660,00	R\$ 75.533,26
OUT	971.870,00	R\$ 91.197,10
NOV	1.514.085,00	R\$ 172.029,84
DEZ	1.597.970,00	R\$ 177.489,73
<b>TOTAL</b>	<b>15.857.567,38</b>	<b>R\$ 1.447.169,96</b>

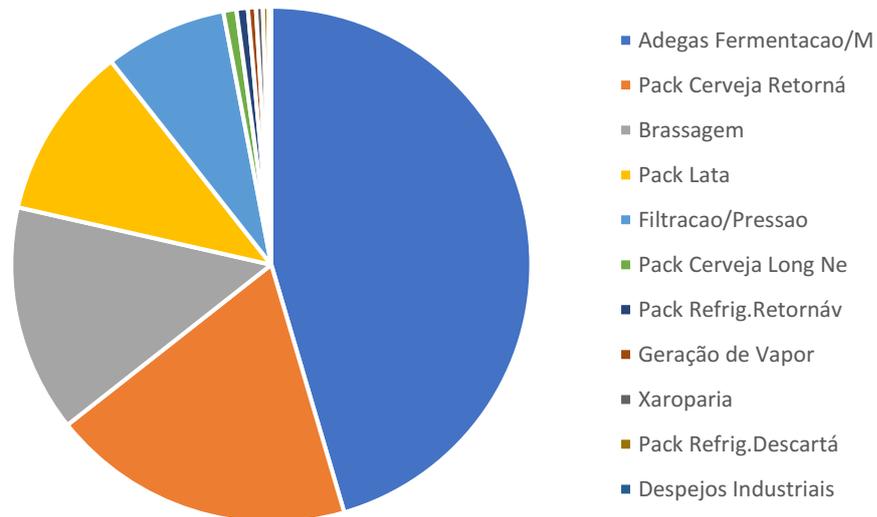
Fonte: A autora, 2024.

#### 4.6.2 Oportunidade: uso de químicos na cervejaria

A utilização de químicos na cervejaria está presente em todas as áreas e processos produtivos. Pontes et al. (2016) cita os consumos da Brassagem, que tem como característica o descarte de produtos alcalinos como soda cáustica; as Adegas que em seu processo irá gerar um descarte mais ácido com produtos químicos como ácidos nítrico e fosfórico e divosan forte; a Filtração que descarta produtos também ácidos e resíduos de cervejas (alta carga orgânica); e o Packaging gerando descarte de rejeitos ou produtos com má formação. Além disso, todas as áreas passam pelo processo de CIP (*Clean In Place*) com utilização de soda cáustica, além de todo o processo de resfriamento da cerveja realizado pela utilização de amônia.

O consumo total de soda cáustica na cervejaria, no ano de 2022, foi o equivalente a 8.487.440,984 kgs, sendo as principais áreas ofensoras as Adegas (45%) e em seguida do packaging de cerveja retornável (19%) (Figura 59).

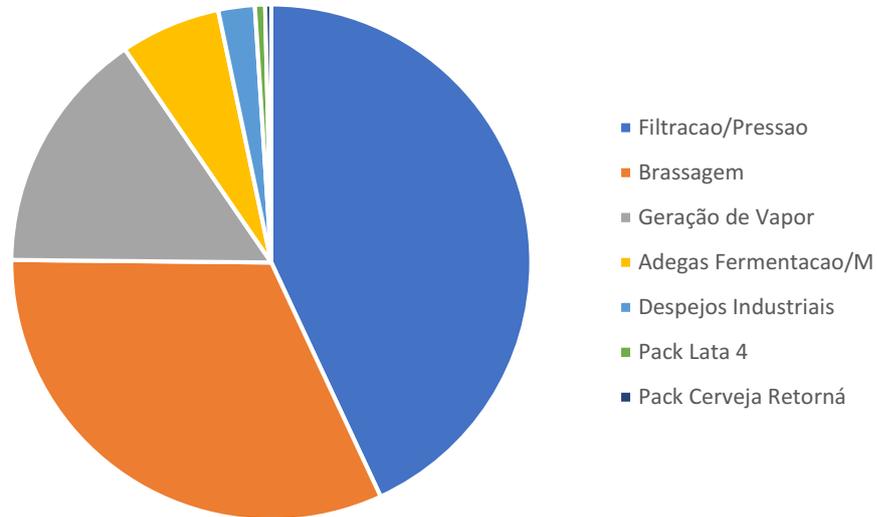
Figura 58 - Consumo de Soda na Indústria produtora de bebidas. Dados mensais referente ao ano de 2022.



Fonte: A autora, 2024.

Em se tratando do consumo de ácido, os principais consumidos são o ácido nítrico, fosfórico e clorídrico, somando 211.493,36 kgs no ano de 2022, sendo as principais áreas ofensoras, a filtração (43%) e brassagem (32%) (Figura 60).

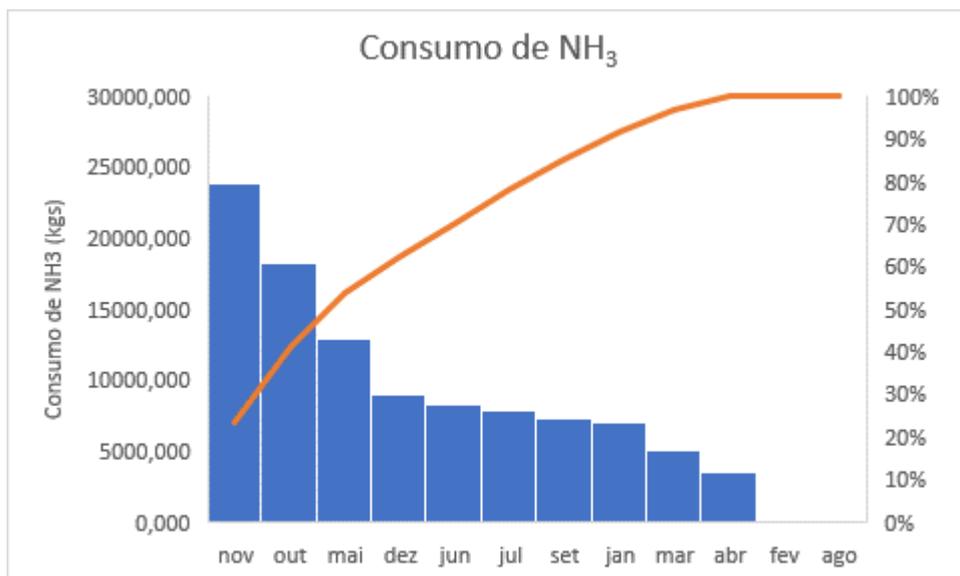
Figura 59 - Consumo de ácidos na Industria produtora de bebidas. Dados mensais referente ao ano de 2022.



Fonte: A autora, 2024.

O consumo de amônia total concentra-se na área de utilidades, na casa de máquinas, onde é utilizada para o resfriamento dos tanques de cerveja, totalizando um consumo de 102 toneladas no ano de 2022 (Figura 61).

Figura 60 - Consumo de NH<sub>3</sub> na Industria produtora de bebidas. Dados mensais referentes ao ano de 2022.



Fonte: A autora, 2024.

Para que os produtos químicos não afetem a saudabilidade da ETEI, é necessário o acompanhamento online dos parâmetros operacionais, e para isso, a garantia da manutenção preventiva nestes equipamentos de medição, para a detecção de possíveis eventos de descartes inesperados.

Também é altamente recomendável a utilização de metas por área no que tange o consumo de químicos, para limitar os excessos de consumos e consequente impacto na ETEI, bem como o gasto excessivo de dinheiro.

Além disso, a comunicação de descartes por área e avaliação operacional da ETEI no momento do descarte, para prévia autorização, como rotina operacional deve ser obedecida, e passível de punição em caso de descumprimento da área.

#### 4.6.3 Oportunidade – rota logística de despejo

Hoje, existe na cervejaria uma estrutura de compactação e descartes de resíduos terceirizada, que consiste na compactação de produtos não conformes da cervejaria e centros de distribuição próximos, e consequente despejo na estação de tratamento de efluentes. Esta frequência de rotina no despejo e vazão ainda não possuem um fluxo de processos definidos, e possuem diversas oportunidades para incremento da carga orgânica na estação de tratamentos de efluentes.

O principal objetivo de fixar este fluxo de trabalho é atribuir responsáveis aos processos e direcionar maiores oportunidades de despejo para a cervejaria. Os despejos podem vir de diversas fontes, por finalidades diferentes, e devem ser comunicados pelos responsáveis pelos processos:

- Despejos dos centros de distribuição: Produtos acabados com prazo de vencimento expirado. O supervisor de armazém deve comunicar ao supervisor da cervejaria, que em contato com a equipe de meio ambiente, receberá o material para coleta. Em função dos custos logísticos, deve-se priorizar as unidades na região sudeste.
- Despejo de produto acabado por avaria de produção: O packaging interno deve comunicar a área de meio ambiente e direcionar o material para despejo.
- Despejos de líquidos (cervejas ou refrigerantes) não conformes: A área de processo responsável das respectivas unidades deve entrar em

contato com a equipe de meio ambiente e solicitar o despejo. Antes de ser despejado, deve ser analisado uma amostra do efluente e avaliado a capacidade de recebimento deste volume.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho se propôs a analisar a estratégia de ESG na maior indústria de bebidas da América Latina a partir do beneficiamento do efluente industrial para a produção de biogás. Para estruturar esta análise, foram utilizados os dados fornecidos pela empresa, e o aprofundamento em análises bibliográficas sobre reatores anaeróbios e produção de biogás no setor cervejeiro.

Através dos objetivos específicos do trabalho buscou-se estabelecer algumas premissas básicas para garantia do bom funcionamento do projeto e replicabilidade do mesmo, tais como: a caracterização do efluente, a correlação entre eles, os fatores de processo que influenciam na geração de biogás, os ganhos financeiros e as propostas de melhorias.

Em relação aos parâmetros físico-químicos da estação de tratamento analisados foi constatado que os parâmetros, em sua maioria, atendiam ao recomendado na literatura para a garantia de um bom funcionamento do sistema anaeróbio. Os valores médios encontrados de pH foram de 7,37, Temperatura em 35°C e Alcalinidade em 2.000 mg/L CaCO<sub>3</sub>, parâmetros conforme o descrito na literatura. Em se tratando dos nutrientes, a relação DQO:N:P apresentou pequena deficiência de nitrogênio, frente a correlação esperada, que é de 350:5:1. Em relação aos parâmetros obtidos médios obtidos de eficiência de remoção de DQO (89%), atividade metanogênica (0,5 ml CH<sub>4</sub>/g SSV), biodegradabilidade (>78%) e TDH (<16h) cumprem todas as expectativas esperadas para o processo anaeróbio, favorecendo a produção de biogás, conforme a literatura analisada.

No que se refere a interação entre os parâmetros, foram reveladas interações fortes à fracas entre as variáveis. Os parâmetros de carga orgânica e DQO mostraram-se com uma forte relação entre eles, apresentando o coeficiente de 0,77. Por outro lado, a interface entre Carga orgânica x Vazão de biogás e DQO x Vazão de biogás se apresentaram com interação de fraca à moderada, variando de 0,42 à 0,53.

Em se tratando das interfaces do processo industrial com a geração de biogás no ano de 2022, foi possível comprovar regularidade técnica e operacional da planta, a partir do recorde histórico na produção de biogás anual, atingindo uma média mensal de 366.898 MJ/dia, o que expressa o ganho de 22% no índice mensal da planta de gasto de energia calorífica, reduzindo seu indicador de MJ/hl produzido. Em relação

as correlações do processo produtivo com a geração de biogás, pode-se destacar coeficiente de 0,668 entre as variáveis de volume de produção total (hl) pela geração de biogás, como uma interação forte. Já a interação entre perda de extrato e volume de biogás produzido, pode ser considerada moderada.

Em relação aos ganhos financeiros de projeto, estima-se um lucro anual na casa de 5 milhões de reais e com projeção de expansão de ganhos através da expansão deste modelo de negócio para outras unidades fabris semelhantes. Além disso, foram constatadas oportunidades de incremento na produção de biogás através da metabolização de resíduos hoje descartados, como bagaço de malte e levedura, que permitem considerar uma geração ainda mais promissora nesta operação. Também foram encontradas oportunidades no que diz respeito a gestão de químicos e rotas logísticas de despejo, que podem, a curto prazo, incrementar ainda mais o negócio.

Sendo assim, o modelo de aproveitamento energético apresentado coloca a indústria de bebidas em questão em uma posição de destaque do ponto de vista estratégico em ESG. Essa visibilidade frente ao setor se dá pelo fato do modelo de negócio além de ser rentável e alinhado com as metas de sustentabilidade a longo prazo da companhia, contribuírem para os objetivos do desenvolvimento sustentável da ONU como um exemplo a ser seguido para a agenda de descarbonização e mudanças climáticas.

## REFERÊNCIAS

- ABBIOGÁS. **Biogás no Brasil – conhecendo o mercado no país**. São Paulo. 2021.
- Ambev. **Net zero executive summary**. Brasil. 2023.
- Ambev. **Relato Anual e ESG 2022**. São Paulo, 2023.
- Anthony C. **Ng and Zabihollah Rezaee. Business sustainability performance and cost of equity capital**. Journal of Corporate Finance, 2015, vol. 34, issue C, 128-149.
- Arantes, M. K., Alves, H. J., Sequinel, R., & da Silva, E. A. **Treatment of brewery wastewater and its use for biological production of methane and hydrogen**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 42, n. 42, p. 26243-26256, 2017.
- BRASIL. Lei Nº 3239, de 02 de Agosto de 1999. **Dispõe da política estadual de recursos hídricos**. Brasília, DF. Diário oficial da união, 1999.
- BRASIL. Resolução CONAMA n. 357, de 17 de março de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. Diário Oficial da União, Brasília, 18 mar. 2005.
- CAF. **Os 3 D's de Energia, Descarbonização e Descentralização**. Disponível em: . <https://www.caf.com/pt/conhecimento/visoes/2019/11/os-3-d-deenergia-descarbonizacao-digitalizacao-e-descentralizacao/>. Acesso em: 4.mai.2021
- CETESB. **Cervejas e refrigerantes – Série P+L**. São Paulo. 2005.
- CHAMBRIARD, M. **Transição energética, efeito do covid-19, aceleração do crescimento: no Brasil, tudo acaba em logística! Brasil**. 2020.
- CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: reatores anaeróbios**. Vol. 5. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2008.
- CORDEIRO, L. G., EL-AOUAR, A. A., GUSMÃO, R. P. **Caracterização do bagaço de malte oriundo de cervejarias**. Revista de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v. 7, n. 3, p. 20–22, 2012.
- COSTA, Ernani S.; BARBOSA FILHO, Olavo; GIORDANO, Gandhi. **Reatores anaeróbios de manta de lodo(UASB): uma abordagem concisa**. Rio de Janeiro: COAMB / FEN / UERJ / 2014. (Série Temática: Tecnologias Ambientais - Volume 5) 121 p.
- Coutinho, L.M. **O Pacto global da ONU e o desenvolvimento sustentável**. R. BNDS, Rio de Janeiro, v. 28, n. 56, p. 501-518, dez. 2021.

DELGADO, F. HORTA, L.A. **O desafio da transição energética na indústria do petróleo.** Conjuntura econômica. Brasil. 2021.

Embrapa. Revista de Política agrícola. **Tratamento de efluentes de usinas de biogás.** Rio Grande do Sul. 2015.

Embrapa. **Fundamentos da Digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.** Concórdia, SC. 2019

Enitan, A.M. Adeyemo, J. Swalaha, F.M. Bux, F. **Anaerobic Digestion Model to Enhance Treatment of Brewery Wastewater for Biogas Production Using UASB Reactor.** Environ Model Assess (2015) 20:673–685 DOI 10.1007/s10666-015-9457-3

Figueiredo, N.J.V. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica – estudo de caso.** USP. Dissertação de Mestrado. São Paulo. 2011.

Gelma, G.R. **Influência da carga orgânica no desempenho de reatores de leito móvel com biofilme (MBBR).** Dissertação de mestrado. UFRJ. Rio de Janeiro – RJ. Brasil. 2007.

GLOBAL CLIMATE CHANGE. **A Degree of Concern: Why Global Temperatures Matter.** Disponível em: <https://climate.nasa.gov/news/2878/a-degree-of-concern-why-global-temperatures-matter/>. Acesso em 5 abr.2021.

GOV.BR. **Setor cervejeiro segue crescendo a cada ano.** Disponível em: < <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/setor-cervejeiro-segue-crescendo-a-cada-ano-aponta-anuario#:~:text=O%20Brasil%20%C3%A9%20o%20terceiro,Sindicato%20Nacional%20da%20Ind%C3%BAstria%20da> >. Acesso em: 05/01/2024.

GUERRI, M.V.D. SCHIRMER, W.N. BURATTO, W.G. RIBEIRO, C.B. **Sustentabilidade Rural: o uso do biogás como alternativa energética para os produtos do leite.** R. gest. sust. ambient., Florianópolis, n. esp, p.288-301, dez. 2015.

Hasan, C. Leite, L.C.S. Pallaoro, R.B. Mallmann, F. Viciniescki, R.P, Hoehne, L. Konrad, O. **Redução das cargas orgânicas de biomassas residuais de uma indústria alimentícia por meio de tratamento anaeróbio.** R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 7, n. 2, p.465-483, abr./jun. 2018

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). **IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change.** 2007. Disponível em: [https://archive.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/faq-1-3.html](https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/faq-1-3.html). Acesso em: 5 abr. 2021.

IRENA - International Renewable Energy Agency. **Global energy transformation: A roadmap to 2050.** Abu Dhabi. 201

Karlsson, Tommy. **Manual básico de biogás.** Lajeado. Ed. da Univates, 2014.

Longaretti, G. Meira, J.A. Sganderia, I.B. Magro, J.D. Fiori, M.A. Mello, J.M.M. **Estudo da atividade metanogênica específica de diferentes lodos anaeróbios**. Eng Sanit Ambient.v.24 n.6 DOI: 10.1590/S1413-41522019140730. 2019.

Luiz, F.A.R. **Desempenho de reatores anaeróbios de leito fixo no tratamento de águas residuárias da lavagem e descarcamento dos frutos do cafeeiro**. Dissertação de mestrado UFV. Brasil – MG. 2007.

MCTI. **ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL et. al. Biogás no setor cervejeiro: nota técnica**. E-book. (Projeto Aplicações do Biogás na Agroindústria Brasileira: GEF Biogás Brasil). Brasília – DF. 2022.

Metcalf & Eddy. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse**. Fouth Ed. McGraw-Hill, NY, USA.2003.

Ministério das cidades. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**. Brasília. 2017.

MIRANDA, M. M. **Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental e Área de Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2012.

MOORE, David S. **The Basic Practice of Statistics**. New York, Freeman. 2007.

Moura, L. S. Esteves, E.F. **Avaliação de Desperdícios e Perdas de Matéria-Prima no Processo Produtivo de uma Fábrica de Bebidas**. Tese de Doutorado em Administração FGV EBAPE. Rio de Janeiro – RJ. Brasil. 2010.

Mukaka, M.M. **Statistics Corner: A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research**. *Malawai Medical Journal*. PMC 3576830. 2012.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel>. Acesso em 7 de Janeiro de 2024.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **2020 Tied for Warmest Year on Record, NASA Analysis Shows**. Disponível em: <https://www.giss.nasa.gov/research/news/20210114/>. Acesso em 5 abr.2021.

ØDEGAARD, H. **Innovations in wastewater treatment: the moving bed biofilm process**. *Water Science and Technology*, v. 53, n. 9, p. 17-33, 2006.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E CULTURA (UNESCO). **Mudanças Climáticas e Mudanças Socioambientais Globais: reflexões sobre alternativas de future**. Brasil. 2008.

**PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). Aquecimento Global de 1,5 ° C.** Brasil. Julho, 2019.

**PECORA, V. Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de Caso.** 2006. 152 f. Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

**PELOZA, J. The challenge of measuring financial impacts from investments in corporate social performance.** Journal of Management, [s. l.], v. 35, n. 6, p. 1518–36 1541, 2009.

**Pereira-Ramirez, O. Quadro, M. Antus, R. Koetz, P. Influência da recirculação e da alcalinidade no desempenho de um reator UASB no tratamento de efluente de suinocultura.** R. bras. Agrociência, v. 10, n. 1, p. 103-110. 2004.

**Pontes, M.L.F.C. Santos, K. D. Sousa, T. R. S. Análise quantitativa da biodegradabilidade de resíduos orgânicos descartados no processo de produção de cerveja para produção de biogás.** Campina Grande – PB, Brasil. 2016.

**Resolução CONAMA n. 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n. 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.** Diário Oficial da União, Brasília, 16 mai. 2011.

**Rocha, M.A.G. Estudos das atividades metanogênicas de lodo e da biodegradabilidade anaeróbia de uma indústria de bebidas.** Dissertação de mestrado UFPE. Brasil – PE. 2003.

**SALOMON, K.R.; LORA, E.E.S. Estimate of the electric energy generating potencial for diferente sources of biogás in Brazil.** Biomass and Bioenergy. 2009.  
**Sêna, J.R.D. Tratamento de efluente em indústria de bebidas.** Rio de Janeiro, RJ. 2012.

**Siga Guandu. Sistema de Informações Geográficas e Geoambientais das Bacias Hidrográficas dos Rios Guandu.** Disponível em: < <http://sigaguandu.org.br/siga-guandu/saibaMais>>. Acesso em 03.jan.2024

**SOUZA, G.V.C. Impactos financeiros da estratégia de ESG nas corporações: evidência dos mercados emergentes.** Limeira. 2020.

**Speece, R.E. Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewater Treatments.** Archae Press, Nashville. 1996.

**TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues.** New York: McGraw- Hill, 1993. 978p.

TSAGARAKIS, K.P. **Optimal number of energy generators for biogas utilization in wastewater treatment facility.** Energy Conversion and Management, v. 38, p. 2694-2698. 2007.

UNITED NATIONS. **Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.** 1998. Disponível em: . Acesso em: 06 jun. 2010.

UNODC. **A agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável.** Disponível em: <https://www.unodc.org/lpo-brazil/pt/crime/embaixadores-da-juventude/conheca-mais/a-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentvel.html>. Acesso em 15 de Janeiro de 2024.

VAN HAANDEL, A.C.; LETTINGA, G. **Tratamento Anaeróbio de Esgoto: um manual para regiões de clima quente.** Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 1994.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos: Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias.** Vol. 1. 2.ed., Belo Horizonte: UFMG, 1996.

VON SPERLING, M. **Princípios do Tratamento de Esgotos: Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias.** Vol. 2. Belo Horizonte: UFMG, 1998.

Wang, S. Ma, F. Ma, W. Wang, P. Zhao, G. Lu, X. **Influence of Temperature on Biogas Production Efficiency and Microbial Community in a Two-Phase Anaerobic Digestion System.** Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China. 2018.

WWF. **Conheça mais sobre a história das mudanças climáticas.** Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?44502>. Acesso em: 5 abr. 2021.

Zhou, J., Zhang, R., Liu, F., Yong, X., Wu, X., Zheng, T., Jiang, M., Jia, H., **Biogas production and microbial community shift through neutral pH control during the anaerobic digestion of pig manure,** Bioresource Technology (2016), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.077>