

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

HAMYNE JÚLIA CHAVES DE ARAGÃO LISBOA AMORIM

**Recuperação de energia a partir do tratamento de resíduos de  
uma indústria cervejeira artesanal**

Maceió  
2022

HAMYNE JÚLIA CHAVES DE ARAGÃO LISBOA AMORIM

**Recuperação de energia a partir do tratamento de resíduos de  
uma indústria cervejeira artesanal**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim

Maceió  
2022

**Catálogo na Fonte  
Universidade Federal de Alagoas  
Biblioteca Central  
Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

A524r Amorim, Hamyne Júlia Chaves de Aragão Lisboa.  
Recuperação de energia a partir do tratamento de resíduos de indústria cervejeira  
artesanal / Hamyne Júlia Chaves de Aragão Lisboa Amorim. – 2022.  
71 f. : il. color.

Orientador: Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de  
Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2022.

Bibliografia: f. 65-71.

1. Biogás. 2. Energia - Indústria. 3. Cervejarias. 4. Malte - Bagaço. 5. Leveduras. I.  
Título.

CDU: 662.767.2:663.439

**Hamyne Júlia Chaves de Aragão Lisboa Amorim**

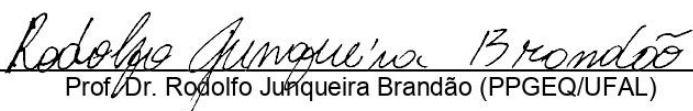
**Recuperação de energia a partir do tratamento de resíduos de  
uma indústria cervejeira artesanal**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Alagoas,  
como requisito para a obtenção do  
Título de Mestre em Engenharia  
Química.

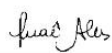
Aprovada em: Maceió, 28 de março de 2022.

**BANCA EXAMINADORA**

  
Prof. Dr. Eduardo Lucena Cavalcante De Amorim (Orientador – PPGEQ/UFAL)

  
Prof. Dr. Rodolfo Junqueira Brandão (PPGEQ/UFAL)

  
Prof.ª Dr.ª Fernanda Santana Peiter (Membro Externo)

  
Dr.ª Inaê Alves (Membro Externo)

## AGRADECIMENTOS

À minha família pelo apoio constante e incentivo, sobretudo à minha mãe, Mávia Lisbôa e meu irmão, Marney Amorim, por todas as contribuições.

Ao meu namorado, Rubens, pela paciência, motivação, e dedicação empenhada ao longo de todo o trabalho, incentivando-me incondicionalmente.

Aos novos amigos que fiz ao longo do mestrado, parceiros nos estudos e nos momentos de descontração, em especial, Mayara, Larissa, Felipe, Magda e Gabryel.

À Nadjane pelo companheirismo e conhecimentos passados. As companheiras de grupo do pesquisa, Isadora e Ana Lara, pela parceria na construção desse projeto.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Lucena, pela empatia, incentivo, orientação e ensinamentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPQ pelo apoio financeiro concedido.

A todos que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho.

"É isso. A liberdade intelectual depende de coisas materiais. A poesia depende da liberdade intelectual." (Virginia Woolf)

## RESUMO

A indústria cervejeira apresenta um papel importante no setor agroindustrial brasileiro com impacto positivo na economia do país. No contexto local, Alagoas tem apresentado um aumento no número de cervejarias artesanais e em decorrência dessa expansão, cresce a importância do estudo e da otimização da gestão dos resíduos gerados durante a produção de cerveja. Estes subprodutos, caracterizados em grande medida pelo alto teor de carga orgânica e sólidos, necessitam de tratamento adequado para minimizar o impacto negativo para o ecossistema em que forem inseridos. Visando oferecer uma alternativa para a contenção deste impacto, investigou-se o potencial energético do biometano gerado a partir de resíduos (levedura fermentada e bagaço de malte) de uma cervejaria artesanal local, analisando cinco diferentes cenários, caracterizados pelo uso de diferentes combinações desses resíduos: RF (levedura fermentada), RB (bagaço de malte), RFB (1:2), RFB (1:4,5) e RFB(1:9), com estes três últimos utilizando uma mistura de levedura fermentada e bagaço de malte em diferentes proporções. Os acionadores utilizados foram motores a gás, microturbinas a gás e turbinas a gás. Com base nos dados de produção metanogênica, estimou-se a capacidade de produção de biogás da unidade, resultando no valor de 125,57 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/mês, utilizando os dados do cenário RFB (1:4,5). Para o aproveitamento energético, calculou-se a potência elétrica gerada a partir do biogás, que apresentou o melhor desempenho no cenário RFB (1:4,5), com a utilização de motores a gás, gerando 372 kWh/mês, podendo fornecer até 4% da energia elétrica consumida pela cervejaria. Ademais, verificou-se que direcionar o uso do biogás produzido no cenário RFB (1:4,5) para gerar energia térmica nas caldeiras do local poderia suprir 18,7% do total mensal de gás natural requerido pela cervejaria. Assim, o estudo demonstra que os resíduos da cervejaria podem ser empregados para atender parcialmente a suas demandas de energia elétrica, bem como da energia térmica necessária para o funcionamento da caldeira.

**Palavras-chave:** biogás, energia, cervejaria, bagaço de malte, levedura fermentada

## ABSTRACT

The brewery industry has an important role in the Brazilian agroindustrial sector with a positive impact in the country's economy. In the local context, Alagoas has shown a growth in the number of craft breweries and, as a consequence of this expansion, the importance of the study and optimization of beer production waste management grows. These subproducts, characterized by the high content of negative organic load and solids, need appropriate treatment to minimize the negative impact to the ecosystem in which they are inserted. Aiming to offer an alternative to the containment of this impact, was investigated the biomethane energetic potential generated from the waste (fermented yeast, malt bagasse) of a local craft brewery, analyzing different scenarios characterized by the use of different combinations of these different waste: RF (fermented yeast), RB (malt bagasse), RFB (1:2), RFB (1:4,5) e RFB(1:9), with the last three using a mixture of fermented yeast and malt bagasse in different proportions. Based on methanogenic production data, it was estimated the biogas production capacity of the unit, resulting in 9,49 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>.day<sup>-1</sup>, using the RFB (1:4,5) scenario data. To the energetic use, the electric power generated by the biogas was calculated and showed the best performance in the RFB (1:4,5) scenario with the use of gas engines, generating 844,33 kWh/month, being able to supply until 4% of the electric energy consumption required by the brewery. In addition, it was verified that directing the biogas produced in the RFB(1:4,5) scenario to generate thermal energy in the industry boiler could supply 18,7% of the monthly total natural gas required by the brewery. Thus, the study demonstrates that the brewery waste can be used to partially meet its electric energy demand as well as the thermic energy needed for the boiler operation.

**Keywords:** biogas, energy, brewery, malt bagasse, fermented yeast



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1 - Fluxograma com opções para conversão de biogás em energia.....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 2 - Fluxograma do processo geral de produção de cerveja e alguns resíduos gerados.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 3 - Reatores usados na digestão anaeróbia.....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 4 - Bagaço de malte residual (a) e levedura fermentada (b).....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 5 - Coleta do biogás no headspace (a) e injeção manual no cromatógrafo (b).....</b>	<b>40</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 - Comparativo entre as tecnologias disponíveis para conversão em energia elétrica .....</b>	<b>24</b>
<b>Tabela 2 - Comportamento da produção de metano em cada cenário.....</b>	<b>35</b>
<b>Tabela 3 - Análises físico-químicas .....</b>	<b>39</b>
<b>Tabela 4 - Cervejas e resíduos produzidos em 2020.....</b>	<b>43</b>
<b>Tabela 5 - Caracterização dos substratos.....</b>	<b>44</b>
<b>Tabela 6 - Concentrações iniciais e finais de carboidratos de cada cenário.....</b>	<b>44</b>
<b>Tabela 7 - Concentrações iniciais e finais de DQO de cada cenário .....</b>	<b>45</b>
<b>Tabela 8 - Concentrações iniciais e finais de sólidos voláteis de cada cenário.....</b>	<b>45</b>
<b>Tabela 9 - pH finais em cada cenário.....</b>	<b>46</b>
<b>Tabela 10 - Comportamento da produção de metano em cada cenário.....</b>	<b>47</b>
<b>Tabela 11 - Resultados experimentais obtidos ao final dos ensaios de biodegradabilidade.....</b>	<b>48</b>
<b>Tabela 12 - Quantificação dos resíduos e possíveis taxas de produção de metano gerado... ..</b>	<b>50</b>
<b>Tabela 13 - Estimativa da energia elétrica produzida.....</b>	<b>51</b>
<b>Tabela 14 - Aproveitamento energético possível do metano .....</b>	<b>52</b>
<b>Tabela 15 - Consumo de energia térmica suprida com o uso do biogás.....</b>	<b>53</b>

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1 - Aumento da quantidade de dióxido de carbono na atmosfera.....</b>	<b>14</b>
<b>Gráfico 2 - Distribuição das emissões de gases de efeito estufa por setores econômicos..</b>	<b>14</b>
<b>Gráfico 3 - Mudança da temperatura global entre 1850 a 2016.....</b>	<b>15</b>
<b>Gráfico 4 - Número de cervejarias registradas entre os anos de 2000 e 2020.....</b>	<b>29</b>
<b>Gráfico 5 - Consumo de energia elétrica na cervejaria no ano de 2020.....</b>	<b>38</b>
<b>Gráfico 6 - Todos os cenários de produção acumulada de metano.....</b>	<b>48</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
bcm	Bilhão de metros cúbicos
CH <sub>4</sub>	Metano
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
DA	Digestão anaeróbia
GEE	Gases de Efeito Estufa.
Gl	Gigalitro
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GN	Gás Natural
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt hora
hl	Hectolitro
IPA	India Pale Ale
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MCG	Microturbinas a gás
MG	Motores a gás
Mm <sup>3</sup> /ano	Milhão de metro cúbico por ano
MW	Megawatt
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
NaHCO <sub>3</sub>	Bicarbonato de sódio
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PCI	Poder Calorífico Inferior
ppm	Partes por milhão
RB	Reator com bagaço de malte
RF	Reator com levedura fermentada
RFB	Reator com a mistura de levedura fermentada e bagaço de malte

SV	Sólidos Voláteis
TBG	Turbinas a gás
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>2 OBJETIVOS</b>	<b>19</b>
2.1 Geral	19
2.2 Específicos	19
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>20</b>
3.1 Mudanças climáticas e acordos internacionais	20
3.2 Obtenção de biogás por diferentes substratos	24
3.3 Aproveitamento energético do biogás	28
3.3.1 Microturbinas a gás	30
3.3.2 Turbinas a gás	30
3.3.3 Motores a gás	31
3.3.4 Comparativo entre as tecnologias	31
3.4 Potencial Bioquímico de Metano	32
3.5 Equação de Gompertz modificada	33
3.6 Indústria da cerveja	35
3.6.1 Processo de produção	36
3.6.2 Principais resíduos gerados no processo.	38
3.6.2.1 Bagaço de malte	39
3.6.2.2 Levedura excedente	39
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>41</b>
4.1 Procedimento experimental	41
4.2 Substratos.	43
4.3 Inóculo	44
4.4 Obtenção dos dados e informações	44
4.4.1 Consumo energético da cervejaria	45
4.4.2 Análises físico-químicas	46
4.4.3 Cromatografia gasosa	46
4.5 Determinação da produção acumulada de metano	47
4.6 Estimativa da conversão energética do biogás	48
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>50</b>
5.1 Quantificação e caracterização dos substratos	50
5.1.1 Quantificação do bagaço de malte e levedura excedente	50
5.1.2 Caracterização dos substratos	51
5.2 Monitoramento dos reatores	51
5.3 Produção de metano nos reatores	53
5.4 Geração de energia elétrica a partir do biogás	56
5.4.1 Estimativa da produção de metano	56

5.4.2 Energia elétrica	57
5.4.3 Aproveitamento energético	58
<b>6 CONCLUSÕES</b>	<b>62</b>
<b>7 PERSPECTIVAS FUTURAS</b>	<b>64</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com a invenção da máquina a vapor no final do século XVII, iniciou-se o processo que culminou décadas depois na revolução industrial. Nesse contexto foram desenvolvidos e aperfeiçoados conceitos como energia e calor e a própria ciência termodinâmica. Desde então, o uso de motores para a realização de trabalho tem sido intensificado e diversificado, especialmente motores movidos a combustão, demandando um consumo crescente de combustíveis de tipos variados (OTLES e SAKALLI, 2019; FURFARI, 2007). Em decorrência deste processo e com a predominância do uso de combustíveis fósseis, tem se observado um aumento preocupante da emissão de poluentes na atmosfera, contribuindo para o aquecimento global.

A geração de energia mediante a utilização de combustíveis fósseis é responsável por gerar grandes quantidades de poluentes, dentre eles gases de efeito estufa (GEE), que contribuem para alterações climáticas e podem desencadear mudanças danosas ao meio ambiente. Em face desse problema, muitas soluções têm sido elaboradas, entre elas a utilização de uma nova matriz energética mais limpa e sustentável. Entre as iniciativas desse tipo, tem-se o desenvolvimento de pesquisas que combinam a produção de bioenergia com o gerenciamento sustentável de resíduos (MARAFON, et al., 2019; OLIVEIRA, et al., 2017) utilizando o biogás, formado principalmente por metano, para a produção de energia a partir de sua queima, com o propósito de realizar um uso mais racional de recursos naturais e contribuir para a otimização do gerenciamento de emissões gasosas de poluentes por meio do aproveitamento energético de um gás gerado a partir de resíduos das mais diversas origens.

Essa iniciativa tem motivado um aumento significativo do interesse da indústria e dos Estados, preocupados com a descarbonização dos seus setores produtivos, incentivando o desenvolvimento de tecnologias capazes de gerar energia de forma menos prejudicial ao planeta. Nas últimas décadas, vários acordos internacionais têm sido firmados com o objetivo de limitar as emissões de gases poluentes para a atmosfera. Como exemplos, pode-se citar a criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), em 1992, na Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento e Meio Ambiente e o protocolo de Kyoto, em 1997, que passou a vigorar em 2005, estabelecendo prazos e metas para redução de GEE. Outro documento que sela negociações nesse sentido é o Acordo de Paris, criado na 21ª Conferência das Partes (COP-21) da UNFCCC, ocorrida em Paris no ano de 2015.



Este cenário tem fomentado um crescimento notável dos investimentos em pesquisa para a elaboração de novos métodos para a geração e um melhor aproveitamento do biogás visando a produção de energia, bem como para o aperfeiçoamento dos métodos já conhecidos. Na União Europeia, líder dos mercados de biogás e biometano (CUCCHIELLA; D'ADAMO; GASTALDI, 2019), segundo a Associação Europeia de Biogás (2019), no ano de 2018 obteve-se um total de 18.202 instalações de biogás, uma capacidade elétrica instalada em toda a Europa de 11.082 MW e 63.511 GWh de biogás produzidos. Fábricas de biometano também apresentaram crescimento na Europa, chegando a um total de 660 plantas produzindo 2,28 bcm<sup>3</sup> de biometano. Segundo Santos et al. (2018), o potencial de geração de biogás no Brasil é alto, devido à elevada produção de resíduos orgânicos, consequência de sua forte atividade agrícola e grande população. O potencial brasileiro de produção de biogás varia de 200.000 a 312.000 Mm<sup>3</sup>/ano, o que corresponde a uma faixa de potência instalada de 4,5 a 6,9 GW, cerca de 4,9% de toda a capacidade instalada no país.

O biogás é derivado da degradação anaeróbia da matéria orgânica, que pode se apresentar na forma de diversos substratos. Esta degradação é realizada a partir da ação de distintos grupos de microrganismos atuando em diferentes fases do processo, dentre as quais pode-se destacar, hidrólise, acidogênese, acetanogênese e metanogênese. Durante essas fases, orgânicos complexos são quebrados em orgânicos simples e ácidos orgânicos e como produto final alguns gases são gerados, a exemplo do metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (CHERNICCHARO, 2016). Este processo pode ser usado visando ganhos ambientais, com o manejo e tratamento adequados de resíduos industriais e decorrentes de outras atividades produtivas.

Segundo Milanez et al. (2018), os resíduos agroindustriais são responsáveis por três quartos do potencial de matérias-primas a serem exploradas para a produção de biogás. Como mostram vários estudos, diferentes substratos agrícolas podem dar origem a este composto. Por exemplo, segundo Parsaee, Kiani e Karimi (2019), a vinhaça é um recurso com alto potencial para a geração deste tipo de gás. Atualmente, são produzidos 22,4 Gl de vinhaça em todo o mundo, o que permitiria produzir 407,68 Gl de biogás. Em um estudo realizado com efluentes vindos do processo de parboilização do arroz, Nadaleti (2019) verificou neste material um potencial de produção de energia térmica e elétrica elevado, capaz de promover a autossuficiência energética desse setor da agroindústria. Um ano antes, Guerini Filho et al. (2018) analisaram o potencial de geração de biogás e CH<sub>4</sub> de resíduos orgânicos do processo de vinificação e demonstraram a viabilidade da recuperação energética desses subprodutos.

Uma importante indústria do setor agroindustrial brasileiro, com impacto relevante no Produto Interno Bruto (PIB) do país, com crescimento proporcional de produção superior a este indicador entre os anos de 2003 e 2016 (CERVIERI JÚNIOR, 2017), é a indústria de bebidas, com destaque para a indústria cervejeira, que hoje encontra-se em um notável processo de desenvolvimento, com um crescimento de mais de 100% no número de indústrias registradas no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) entre os anos de 2017 e 2020. No contexto local, com o aumento do número de cervejarias artesanais em Alagoas, no ano de 2020 o estado figurou entre os dez estados com mais unidades por Km<sup>2</sup> (MAPA, 2021). Somente em uma dessas indústrias, com a produção de diferentes tipos de cerveja, no ano de 2020 foram produzidos mais de 90.000 litros da bebida, dentre os quais, o maior percentual foi composto por cervejas dos tipos Pilsen e IPA.

Em decorrência da expansão deste ramo da indústria, cresce a importância do estudo e da otimização da gestão dos resíduos gerados pela sua produção. Tal produção é composta por diversas etapas, que levam à fermentação de açúcares contidos no malte e conversão deste produto em álcool e dióxido de carbono por leveduras (BRASIL et al., 2021). Deste processo resulta uma grande quantidade de subprodutos, com elevada geração de efluentes, caracterizados em grande medida pelo alto teor de carga orgânica e sólidos (ROVEROTO et al., 2021), capazes de impactar negativamente o ecossistema em que for inserido.

No presente trabalho, foi investigado o potencial energético do biogás resultante do processo de digestão anaeróbia (DA) do bagaço de malte e levedura fermentada, provenientes de resíduos de uma cervejaria local, utilizando diferentes acionadores primários. Com isto, visou-se adicionar valor aos subprodutos da indústria, colaborar para criar uma oportunidade sustentável de geração de fontes energéticas renováveis e alternativas para o aproveitamento dos resíduos da produção da indústria cervejeira do estado.

No segundo capítulo da dissertação, foi apresentada uma breve descrição dos seus objetivos gerais. O terceiro capítulo foi composto pela revisão bibliográfica, onde foram apresentadas questões relacionadas ao processo de industrialização com lançamento de gases de efeito estufa para a atmosfera e a relação desses lançamentos com mudanças climáticas. Nele foi também discutido o crescimento da indústria de cerveja nos últimos anos e como os resíduos decorrentes do seu processo de fabricação podem ser utilizados como substratos para a obtenção de biogás para a produção de energia.

No quarto capítulo foram listados os materiais e métodos empregados nas análises que compõem a parte principal do estudo, descrevendo os cálculos utilizados para a obtenção de quantidades como o potencial elétrico do biogás e a potência elétrica gerada a partir dele.

No quinto capítulo, foram apresentados e analisados os resultados obtidos ao longo do trabalho, além de comparações com outras análises semelhantes de pesquisas que estudaram a produção de energia através do uso do biogás gerado a partir de resíduos de diferentes tipos de indústrias.

No sexto capítulo foram destacadas as conclusões do estudo, derivadas dos resultados apresentados no capítulo anterior. No sétimo e último capítulo foram apresentadas as perspectivas futuras traçadas para a pesquisa.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a produção de metano a partir da biodigestão do bagaço de malte e levedura fermentada, resíduos provenientes do processo de produção de cerveja, tendo em vista o aproveitamento energético do gás produzido para geração energia por meio de três acionadores primários diferentes: motores a gás, microturbinas a gás e turbinas a gás.

### **2.2 Específicos**

- Estimar a produção de biogás por meio da degradação anaeróbia dos substratos estudados.
- Calcular a conversão energética do biogás produzido e analisar seu aproveitamento energético por meio de motores a gás, turbinas a gás e microturbinas a gás.
- Realizar o ensaio do potencial bioquímico de metano para determinação do grau de biodegradabilidade dos substratos.
- Verificar o ajuste ao modelo de Gompertz modificado.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

Esta seção foi dedicada a discutir brevemente os pontos principais da estrutura geral deste trabalho. Nela, foi tratado o problema do crescimento do lançamento de gases do efeito estufa e sua relação com as mudanças climáticas no planeta, sendo apresentados diferentes substratos para a geração de biogás, bem como alguns tipos de acionadores primários utilizados neste estudo. Por fim, foram explicados a vantagem da realização do teste do potencial bioquímico de metano e o processo de produção de cerveja.

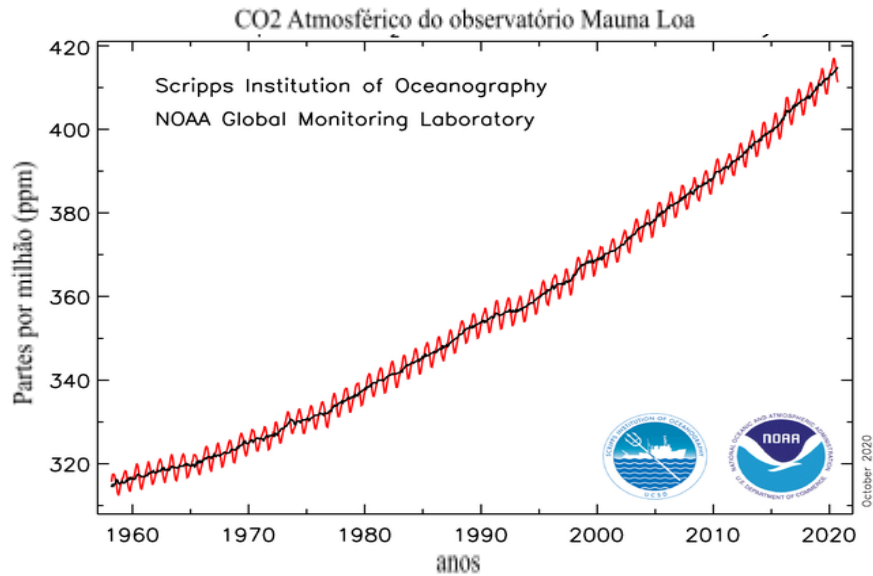
#### 3.1 Mudanças climáticas e acordos internacionais

Ciclos naturais de aquecimento e resfriamento da Terra sempre existiram e, entre estes fenômenos, períodos de intensa atividade geológica lançaram na sua superfície grandes quantidades de gases, que terminaram por formar uma cobertura gasosa sobre o planeta, que criou um efeito estufa natural. Os principais causadores deste efeito são o vapor d'água, o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o gás metano ( $\text{CH}_4$ ) e o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) (TILIO NETO, 2010). Estes gases absorvem parte da energia do Sol, refletida pela superfície do planeta, e a redistribuem em forma de calor por meio das circulações atmosféricas e oceânicas. Qualquer fator que afete esse processo afeta o clima global (CAVALCANTI, et al., 2009). Entre os possíveis fatores muitos podem ser de origem antrópica.

Com a Segunda Revolução Industrial, intensificou-se o processo de utilização de motores de combustão. Atrelado a esse processo, tem-se a liberação de GEEs (Gases de Efeito Estufa), que com o passar do tempo, se acumularam em grandes quantidades na atmosfera (NOAA, 2020). Contudo, desde o início da Primeira Revolução Industrial, em 1760, com o desenvolvimento de máquinas a vapor, até 1960, logo após o final da Segunda Revolução, a concentração atmosférica de gás carbônico aumentou de aproximadamente 277 partes por milhão (ppm) para 317 ppm, um aumento de cerca de 14,4%. Nas décadas seguintes, de 1960 até 2001, as concentrações de  $\text{CO}_2$  aumentaram de 317 ppm para 371 ppm, um acréscimo aproximado de 17%. (CAVALCANTI, et al., 2009). O nível de dióxido de carbono na atmosfera aumentou em 40% durante os séculos XX e XXI e agora supera os 400 ppm. Este nível de  $\text{CO}_2$  é mais alto que em qualquer outro momento dos últimos 800.000 anos (NOAA, 2020). Na Gráfico 1, é possível verificar o aumento da quantidade de dióxido de carbono na

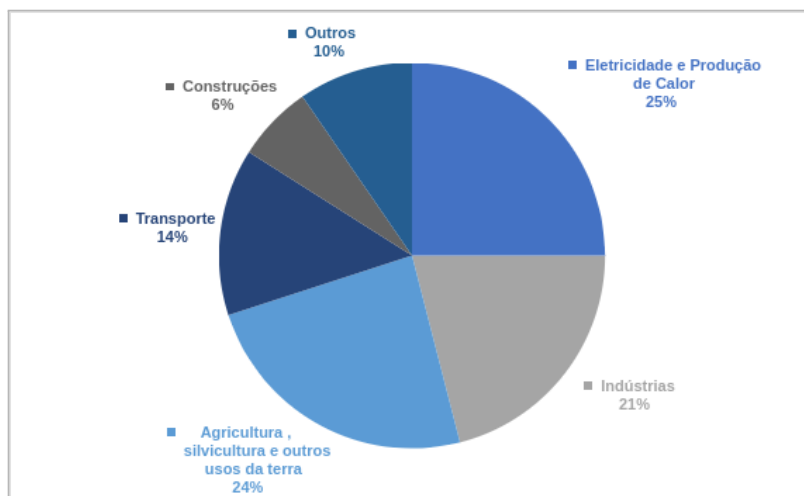
atmosfera desde 1960, de acordo com dados NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

**Gráfico 1 - Aumento da quantidade de dióxido de carbono na atmosfera.**



Um quarto das emissões de gases de efeito estufa causadas pelo homem vem da queima de combustíveis fósseis para a produção de eletricidade e calor. Outro quarto das emissões é proveniente da agricultura, silvicultura e outros usos da terra (MET OFFICE, 2020). No Gráfico 2 é possível visualizar a distribuição da emissão desses gases em diferentes setores da economia.

**Gráfico 2 - Distribuição das emissões de gases de efeito estufa por setores econômicos.**

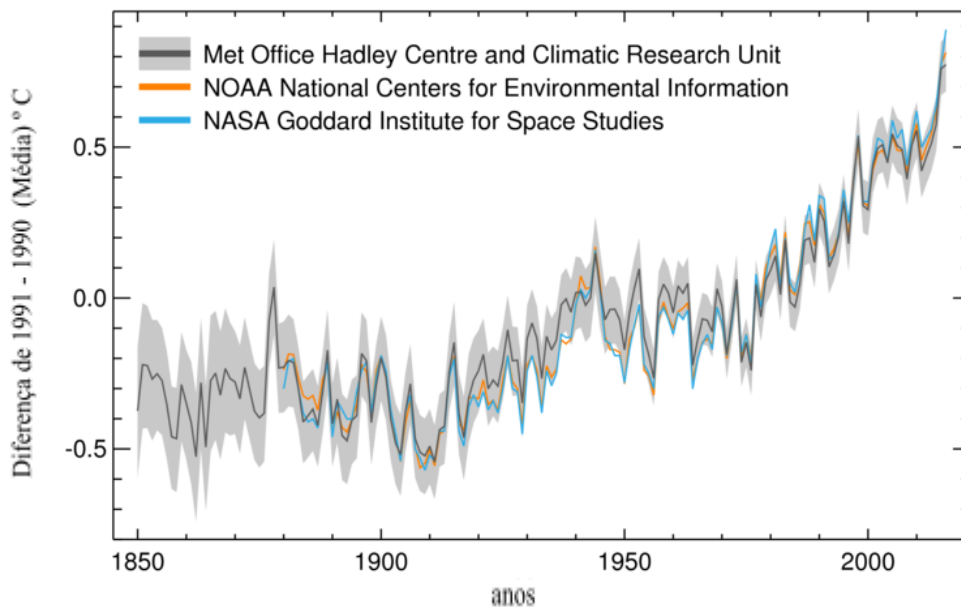


Fonte: Adaptado do IPCC (2014).

Segundo dados de 2010 (49 Gt de CO<sub>2</sub> eq), de acordo com o Quinto Relatório Científico do IPCC – AR5, a emissão direta de GEE (em termos percentuais do total de emissões antrópicas) é, conforme mostrado no gráfico, fracionada entre cinco setores econômicos (construção civil: 10%, transporte: 14%, ASOUT (agricultura, silvicultura e outros usos da terra): 24%, outros setores: 10%). As emissões indiretas são concentradas no setor correspondente à produção de eletricidade e calor (25%), que se divide entre diversas atividades, a saber: construção civil, indústrias, ASOUT, transporte e energia.

Em 1976, Schneider e Mesirov previram, pela primeira vez, a existência de um fenômeno de aquecimento do planeta, derivado do efeito estufa, chamado de aquecimento global (SCHNEIDER; MESIROW, 1977), fundamentando a correlação observada entre o aumento da temperatura em décadas recentes e o aumento do uso de combustíveis fósseis durante esse período. É destacável o fato de que os três anos mais quentes da história das observações meteorológicas, iniciadas em 1861, estão entre 1998 e 2005 (CAVALCANTI, et al., 2009). É possível ainda observar a mudança da temperatura global de 1850 a 2016, em comparação com a temperatura média de 1961-1990 ao analisar o Gráfico 3, a seguir, com dados do Met Office, NOAA e NASA.

**Gráfico 3 - Mudança da temperatura global entre 1850 a 2016.**



Fonte: Met Office, 2020.

Este gráfico, portanto, reforça a hipótese da existência do fenômeno de aquecimento do globo terrestre no período analisado.

Algumas consequências notáveis deste aquecimento global já foram observadas, como o derretimento de geleiras e pólos e o aumento de 10 cm no nível do mar em um século. Ademais, o Quarto Relatório Científico do IPCC – AR4 apresenta outras evidências de mudanças de clima, em especial nos extremos climáticos, que podem afetar significativamente o planeta, particularmente os países menos desenvolvidos da região tropical (IPCC, 2007).

Estas múltiplas comprovações científicas da ocorrência e da intensificação dessas questões criaram uma forte pressão sobre os governos dos países industrializados, o que levou à criação de encontros internacionais com o propósito de desenhar políticas globais voltadas para a redução e reversão de alguns dos principais problemas ligados ao aquecimento global.

Em 1972, foi realizado o primeiro destes encontros, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, em Estocolmo (Suécia). Esta iniciativa acarretou na realização de diversas outras reuniões deste tipo, entre as quais podemos destacar a Segunda Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento e Meio Ambiente, em 1992 no Rio de Janeiro (Brasil), a terceira Conferência das Partes – COP3, em Quioto (Japão), em 1997, e a vigésima primeira Conferência das Partes – COP21, em Paris (França), em 2015.

Como resultado dessas reuniões, várias medidas e compromissos foram firmados visando a minoração desses problemas, resultantes, em grande medida, da liberação de gases derivados da queima de combustíveis fósseis. Entre estas medidas, uma das mais destacadas é a modificação da matriz energética explorada atualmente em grande parte do planeta, baseada principalmente no uso de petróleo, gás natural e carvão (VURAL, 2020). Segundo Gielen et al. (2019), fontes de energia renovável podem fornecer dois terços da demanda energética global total e contribuir para a maior parte da redução das emissões de gases de efeito estufa, com soluções de baixo carbono, que possibilitam a limitação do aumento da temperatura média da superfície global.

Este cenário de busca por novas matrizes energéticas incentivou o desenvolvimento de pesquisas voltadas para a criação de outras formas de elaboração de energia, envolvendo fontes renováveis e menos nocivas para a natureza. Isso tem gerado um aumento de investimentos públicos e privados neste tipo de estudo e criado toda uma nova indústria, voltada para a pesquisa e a exploração de novos processos de produção energética.

Neste contexto, o biogás surgiu como uma importante opção, com a vantagem de poder envolver o reaproveitamento de resíduos orgânicos, urbanos e agroindustriais, como uma fonte alternativa e renovável de bioenergia (DALPAZ et al., 2020). O uso dessa fonte reciclada de energia, ao invés de matéria-prima virgem, é atraente porque reduz a extração de



recursos naturais, agrega valor aos resíduos produzidos nas indústrias, diminui a geração de GEE e proporciona diferentes vantagens econômicas (VILVERT et al., 2019). Isto configura uma importante iniciativa para a redução da poluição ambiental causada por indústrias como a alimentícia, caracterizada pelo descarte de subprodutos, como efluentes de elevada carga orgânica e de difícil degradabilidade (NADALETI, 2019).

### **3.2 Obtenção de biogás por diferentes substratos**

O biogás é uma fonte de energia renovável produzida a partir da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos. Nesse processo, a estabilização da matéria orgânica é realizada por uma série de reações em diferentes etapas, onde microrganismos, na ausência de oxigênio, degradam a matéria biodegradável e produzem o biogás e o digestato.

A digestão anaeróbia envolve processos metabólicos complexos com diferentes grupos fisiológicos de microrganismos realizando atividades sequenciais. Um número mínimo de microrganismos é necessário para que ocorram as etapas do processo. Bactérias fermentativas acidogênicas convertem compostos orgânicos complexos, como carboidratos, proteínas e lipídios, em compostos mais simples (principalmente ácidos orgânicos, hidrogênio e dióxido de carbono), por hidrólise e fermentação. A conversão de compostos orgânicos intermediários, como propionato e butirato, em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono, é realizada por microrganismos sintróficos acetogênicos. Por último, um grupo de microrganismos procariotas estritamente anaeróbios, denominados arqueas metanogênicas, transformam o acetato e o hidrogênio, decorrentes das etapas anteriores, em metano e dióxido de carbono (CHERNICHARO, 2016).

O biogás pode ser derivado de diferentes materiais orgânicos, assim, sua composição irá variar de acordo com o tipo de substrato utilizado e as condições operacionais do processo. No entanto, uma característica geral deste tipo de gás é que o metano ( $\text{CH}_4$ ) é sempre seu principal componente, com o teor oscilando entre 50% e 75%, seguido do  $\text{CO}_2$ , com uma participação entre 25% e 50%. Outros componentes também podem estar presentes, como a água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), oxigênio ( $\text{O}_2$ ), traços de enxofre (S) e sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (GOMEZ, 2013).

Os substratos empregados na obtenção do biogás podem ser agrupados em três grandes categorias, de acordo com sua origem, a saber, substratos agrícolas, urbanos e industriais. Isso mostra a possibilidade de reaproveitamento de resíduos, que antes seriam descartados, gerados tanto no campo quanto na cidade, criando a oportunidade de substituir os

custos envolvidos no descarte por um produto de alto valor agregado, com potencial para melhoria da economia na região. Como exemplos de uso de biomassa de material industrial, temos trabalhos como o de Suhartini et al. (2020), que analisou o potencial de produção de biometano de resíduos agroindustriais, como restos de jaca e outras frutas, além de resíduos de lavouras, como palha de arroz e milho, na condição de substratos para o processo de digestão anaeróbia. Segundo estimativas teóricas, baseadas em simulações matemáticas, todos os substratos testados apresentaram balanço energético positivo e bom potencial de valorização, mostrando-se úteis para o gerenciamento de resíduos e a produção de energia limpa na Indonésia.

Oliveira, Alves e Costa (2018), realizaram um estudo com os alguns subprodutos da produção de cerveja para investigar o potencial bioquímico de metano (BMP). Ensaio de biodegradabilidade anaeróbia, em escala laboratorial, foram realizados com leveduras fermentadas e grãos gastos de cevada. Os substratos foram avaliados separadamente e também uma mistura de leveduras fermentadas com grãos gastos (1:9, peso), pretendendo simular a proporção gerada na cervejaria. A levedura fermentada obteve o maior BMP, com aproximadamente 515 l de  $\text{CH}_4/\text{kg}$  SV do substrato, e a mistura de levedura com grãos se mostrou mais compensadora em termos de volume de metano produzido. Também foi realizada a codigestão da mistura da levedura e grãos gastos com o glicerol como cosubstrato. O ensaio que utilizou 10% de glicerol alcançou a maior produção de metano, com cerca de 573 l de  $\text{CH}_4/\text{kg}$  SV do substrato e biodegradabilidade de 94%, o que evidenciou sua capacidade para geração de energia, uma vez que a codigestão desses subprodutos apresentou um potencial de produção de eletricidade de 206 kWh por metro cúbico de cerveja produzida, podendo atender 80% das necessidades energéticas da cervejaria para aquecimento.

Um outro trabalho desse tipo foi realizado por Fu et al. (2017), que investigou a produção de hidrogênio e metano, em condições mesofílicas, a partir da vinhaça, por meio do processo de digestão anaeróbia. Os estudos foram feitos comparando os resultados realizados usando dois estágios, onde o processo de acidogênese e metanogênese operam separadamente, e com apenas um estágio. Durante a digestão anaeróbia de dois estágios, os rendimentos de hidrogênio e metano foram de 14,8 e 274 ml/g SV de substrato, respectivamente. O rendimento de metano foi 10,8% maior para o processo com dois estágios, quando comparado ao de estágio único. Além disso, a digestão anaeróbia de dois estágios obteve um percentual de 10,4% e 12,9% de eficiência de remoção de sólidos voláteis (SV) e recuperação de energia, superiores ao processo de um estágio. Com isso, os autores constataram que a digestão anaeróbia de dois estágios, para produção de hidrogênio e metano, pode contribuir

para um melhor aproveitamento desse substrato, trazendo benefícios como a recuperação da vinhaça para uso energético.

Na década de 90, na Tanzânia, o biogás já era considerado uma possível solução para o problema da escassez de energia elétrica no país, apontado como alternativa limpa e sustentável no estudo de Kivaisi e Rubindamayugi (1996). No trabalho foram analisados resíduos de café, sisal, açúcar e cereais, que geraram um total de 468.100 toneladas de matéria orgânica anualmente. Determinações em escala de laboratório revelaram uma produção de metano, a partir dos resíduos, que deram 400 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/ton SV da polpa de sisal, 650 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/ton SV de resíduos sólidos de café Robusta, 730 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/ton SV de resíduo sólido do café Arábica, 230 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/ton SV de esteira de filtro de açúcar e 450 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/ton SV de farelo de milho. Com base nesses resultados, o potencial de produção de eletricidade anual total estimado a partir desses resíduos foi de 1.135 milhões de kWh. Além disso, foi calculado que estes materiais poderiam substituir, anualmente, uma quantidade de 0,32 milhões de toneladas de óleo diesel, responsáveis por cerca de 2% da energia consumida no país. Desta forma, o estudo mostrou que o biogás era uma solução factível tanto para a geração de energia elétrica quanto para a redução da poluição ambiental na Tanzânia.

Entre os trabalhos que investigaram materiais de origem agrícola, podemos destacar pesquisas como a de Almomani (2020), que realizou um estudo na Universidade do Qatar, para avaliar o desempenho do processo da digestão anaeróbia, usando resíduos sólidos agrícolas e esterco de vaca, sem e com pré-tratamento químico, com o uso de bicarbonato de sódio (NaHCO<sub>3</sub>). O estudo constatou que com a aplicação de NaHCO<sub>3</sub> ao substrato, houve uma melhora na biodegradabilidade em pelo menos 43% em relação ao substrato não tratado. A codigestão de resíduos sólidos agrícolas e esterco de vaca, a uma proporção de 70:30, com uma temperatura de operação ≤ 55°C e com um teor de umidade na faixa de 34% a 48%, aumentou a concentração de metano acumulado em pelo menos 23% em comparação com substratos brutos. Além disso, o autor desenvolveu um algoritmo de rede neural artificial, para modelar e otimizar a produção acumulada de metano, por meio da digestão anaeróbia em condições mesofílicas e termofílicas. O modelo foi desenvolvido como função da temperatura operacional, da composição do substrato e da dose química. Com base nas simulações realizadas, o estudo confirmou a capacidade do modelo de prever o comportamento da digestão anaeróbia e identificar as condições ótimas de operação.

Outra análise utilizando resíduos agrícolas foi realizada por Krzywik e Szwaja (2017), que estudou o potencial de fermentação de batatas parcialmente apodrecidas (pútridas em 10 a 20% do volume). O experimento foi realizado em escala laboratorial, com um reator de

volume de 140 dm<sup>3</sup>. Durante o experimento, o teor de metano no biogás da fermentação mesofílica das batatas pútridas foi inferior em até 12% quando comparado ao biogás gerado a partir de milho, mas, ainda assim, pode ser considerado satisfatório. O autor verificou que as batatas podres, mesmo não sendo tão eficientes quanto o milho, não prejudicam o processo de digestão anaeróbia e, portanto, não reduzem a capacidade do processo, nem matam as arqueas metanogênicas. Assim, o artigo conclui que o uso desse resíduo como biomassa para geração de biogás se mostrou uma alternativa válida para o seu aproveitamento, uma vez que este é um material obtível sem custos.

Os substratos de origem urbana também apresentam aplicações vantajosas. Um estudo realizado por Damrongsak e Chaichana (2020), no norte da Tailândia, utilizou o biogás, gerado em um aterro sanitário, como fonte de energia térmica para uso residencial em cozinha, em substituição ao GLP (Gás Liquefeito de Petróleo). Duzentas famílias foram beneficiadas com a construção de duas usinas de biogás. O custo da energia térmica foi reduzido em relação ao que se pagava anteriormente, passando de 12 USD/ mês com GPL, para até 3 USD/mês com o biogás. Outra contribuição foi no âmbito da diminuição da poluição ambiental produzida pelos resíduos sólidos urbanos, reduzindo a liberação de metano (CH<sub>4</sub>) para a atmosfera em 400 kg/dia, quantidade equivalente a 10000 kg de CO<sub>2</sub>. O uso do biogás foi avaliado pelos autores como uma fonte alternativa de energia térmica viável para uso residencial e contou com a colaboração de um aterro sanitário, das famílias beneficiadas e do governo local.

Outro estudo desta categoria foi realizado por Hernández e González (2016), que usaram um conjunto de nove indicadores, referentes a aspectos de sustentabilidade econômica, social e ambiental, para avaliar o impacto da instalação de uma planta de biogás, de pequeno porte, na sustentabilidade energética de um restaurante localizado na Cidade do México. Dois cenários foram considerados. O primeiro, denominado cenário base, representou a situação do restaurante antes da instalação da planta de biogás, usando como fonte de energia, para cozinhar, apenas o GLP. O segundo cenário, denominado cenário de biogás, considerou o restaurante após a instalação da central de biogás, utilizando o recurso como combustível complementar para cozinhar. Os indicadores foram linearmente normalizados usando uma escala variando de 0 a 1, correspondendo a um nível crescente de sustentabilidade energética. Os indicadores de aspecto econômico foram em média de 0,67 para o cenário base e 0,68 para o cenário de biogás; os de aspecto social, 0,52 e 0,54; e os de aspecto ambiental, 0,17 e 0,49, respectivamente. Os autores concluíram que a instalação da planta de biogás impactou positivamente a sustentabilidade energética do restaurante. Além

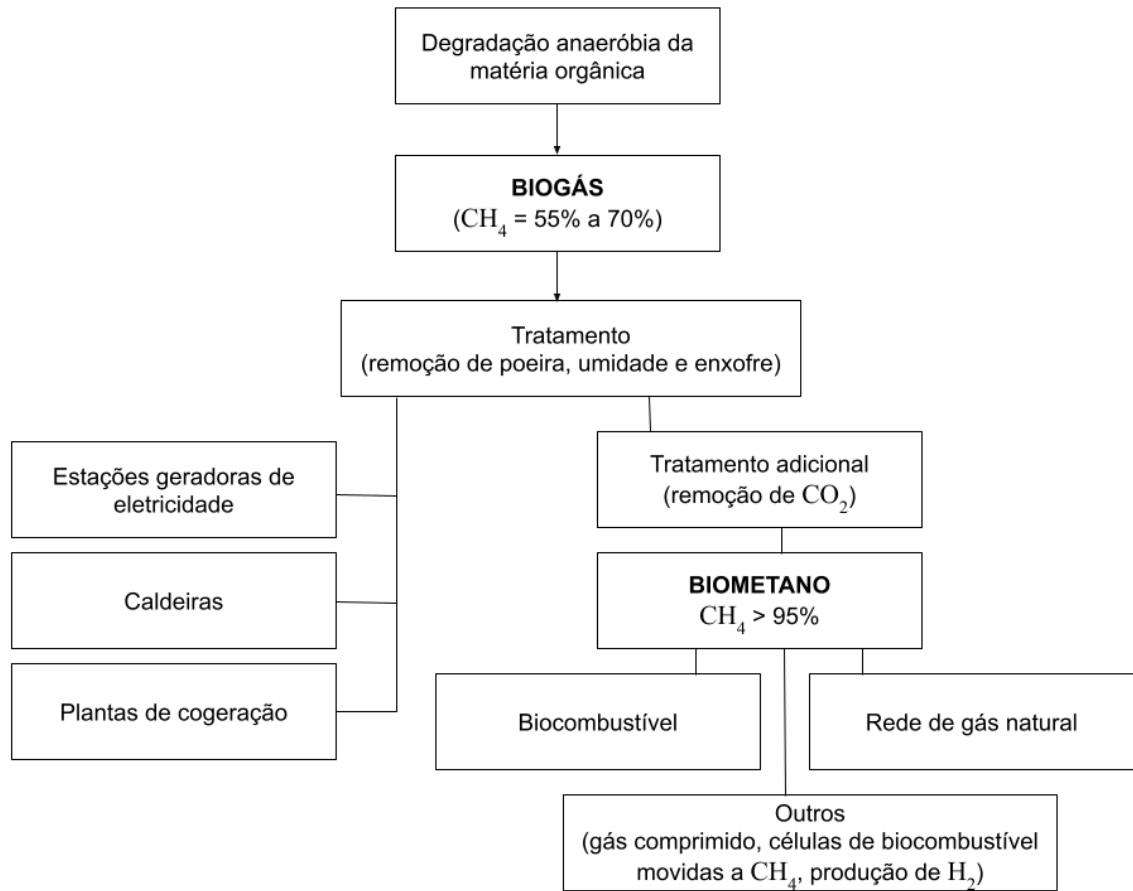
disso, as avaliações mostraram como os indicadores podem fornecer elementos objetivos para um exame detalhado das contribuições do biogás no fortalecimento da sustentabilidade energética de cidades de países em desenvolvimento.

O uso crescente da utilização do biogás é decorrente de uma série de benefícios associados, como o potencial de reduzir emissões de gases de efeito estufa e a capacidade de converter uma variedade de resíduos em energia limpa (BAREDAR; KHARE; NEMA, 2020). Os estudos apresentados nesta seção mostraram diferentes trabalhos que, usando o processo biológico da fermentação anaeróbia para geração de biogás, trataram resíduos de diferentes categorias, agregando valor aos mesmos e contribuindo para uma gestão adequada desses materiais.

### **3.3 Aproveitamento energético do biogás**

O biogás pode ser considerado uma promissora fonte renovável de energia por possuir um ciclo contínuo de uso e produção baseado no aproveitamento de resíduos diversos. E, ainda que não possa ser considerado um substituto para a matriz energética atual, pode ser uma opção suplementar, capaz de contribuir para a solução dos crescentes problemas ambientais atuais. Seu aproveitamento energético pode ser feito utilizando diferentes abordagens. A Figura 1 mostra um fluxograma com alternativas para a conversão do biogás em energia.

**Figura 1 - Fluxograma com opções para conversão de biogás em energia**



Fonte: Adaptado de Raboni e Urbini (2014).

Como mostrado na figura acima, após um tratamento de remoção de umidade, poeira e sulfeto de hidrogênio, o biogás pode ser direcionado para a produção de eletricidade (em centrais elétricas), de calor (com uso de caldeiras) e produção combinada de calor e energia em plantas de cogeração. O biometano, proveniente do biogás, pode ser direcionado para a geração de biocombustível ou ser injetado na rede de gás natural. Ademais, há possibilidade de compressão do gás e aplicações energéticas como em células de combustível movidas a CH<sub>4</sub> e produção de H<sub>2</sub>.

Diferentes fontes de combustível podem ter seu potencial teórico de energia determinado através do poder calorífico inferior (PCI), em Kcal/m<sup>3</sup>, com o biogás apresentando um valor em torno de 5500 Kcal/m<sup>3</sup> e o metano com 8500 Kcal/m<sup>3</sup> (SANTIAGO; SANTIAGO, 2019).

Dentre as várias aplicações dadas ao biogás, a geração de eletricidade tende a potencializar o seu aproveitamento energético, além disso, o emprego de sistemas de

cogeração, com a recuperação da energia térmica dissipada, pode incrementar a eficiência da recuperação energética em acionadores primários (FUESS, 2017).

No contexto da indústria de cerveja, uma aplicação importante para o aproveitamento do biogás é a geração de energia elétrica. Para isso, neste trabalho, três tipos de acionadores primários foram considerados: microturbinas a gás (MCG), motores a gás (MG) e turbinas a gás (TBG).

### 3.3.1 Microturbinas a gás

Microturbinas a gás (MTG) são turbinas a gás de pequeno porte, podendo ter uma potência de apenas 1 kW (BREEZE, 2016), acopladas a geradores, usando diversos tipos de combustíveis para produzir energia elétrica (NOROOZIAN; ASGHARIAN, 2017).

Uma MTG tipicamente apresenta um rendimento entre 20 e 30%, alcançando desempenho acima de 80% através do aproveitamento do calor dissipado em sistemas de cogeração térmica, além de produzir, em geral, uma potência entre 25 e 500 kW (ASGHARIAN; NOROOZIAN, 2016). Assim, elas entregam uma eficiência relativamente alta que, combinada com baixas emissões de poluentes e suas dimensões reduzidas, constituem os principais motivos para seu emprego em sistemas de geração distribuída (STEPHANIE, 2003).

Esse tipo de acionador primário é projetado para operar por longos períodos sem manutenção e com uma diversificada lista de possíveis aplicações. E, do mesmo modo que as turbinas de grande porte, as microturbinas se baseiam no ciclo de Brayton. Neste tipo de ciclo termodinâmico, o ar atmosférico é comprimido e agregado com um combustível em uma câmara de combustão. O gás resultante da combustão é expandido e utilizado para mover a turbina, gerando energia mecânica para ativar um compressor e um gerador elétrico (WEI et al., 2009).

### 3.3.2 Turbinas a gás

Turbinas a gás são um tipo contínuo de máquina térmica, operando normalmente através de um ciclo de Brayton, utilizando o ar atmosférico como fluido de trabalho para converter energia potencial de um gás comprimido e aquecido em energia cinética, através da sua expansão, que move as lâminas da turbina que, por sua vez, rotacionam seu eixo realizando trabalho mecânico (ISLAM et al., 2020).

Por possuir índices bastante reduzidos de emissão de dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio (NOx), este tipo de turbina é um dos meios mais limpos de produção de energia elétrica. Adicionalmente, elas apresentam uma potência na faixa entre 500kW e 250MW (KRARTI, 2018).

### 3.3.3 Motores a gás

Um motor a gás é um tipo de motor de combustão interna que utiliza gases como combustível, empregados em geral para a produção de energia, especialmente energia elétrica, a partir do aproveitamento de substâncias como biogás e gás natural.

Comparado com outros tipos de motores, motores a gás podem ser considerados acionadores de alta eficiência e baixo impacto ambiental, quando utilizados com os gases supracitados. Adicionalmente, ao contrário das turbinas a gás, eles ainda podem ter um bom desempenho funcionando com biogás de baixa qualidade (ROSKILLY et al., 2012).

### 3.3.4 Comparativo entre as tecnologias

A Tabela 1 apresenta um comparativo entre os três tipos de acionadores primários discutidos acima, trazendo informações sobre potência e rendimento relativos ao seu uso com biogás, juntamente com informações sobre emissões de óxidos de nitrogênio atrelados ao uso de cada um deles.

**Tabela 1 - Comparativo entre as tecnologias disponíveis para conversão em energia elétrica.**

	Rendimento com biogás	Emissões de NOx	Potência
Motores a gás	30% a 34%	< 3000 ppm Motores com baixa emissão: < 250 ppm	30kW – 20MW
Turbinas a gás	20% a 30%	Média aprox. 35 a 50 ppm	500kW – 150MW
Microturbinas a gás	24% a 28%	< 9 ppm	30kW – 100MW

Fonte: PECORA, 2006.



Os motores e turbinas apresentam diferenças com relação às suas características, como a potência associada à geração de eletricidade e o rendimento com o uso do biogás. Desta forma, ao se optar pelo uso de um destes acionadores, devem ser consideradas diferenças relacionadas ao modelo escolhido e às condições apresentadas pelo local onde serão implementadas as tecnologias, de forma que seja possível a minimização de perdas e o melhor aproveitamento energético.

### **3.4 Potencial Bioquímico de Metano**

O processo de degradação de material orgânico em condições de ausência de oxigênio dá origem ao biogás, que possui em sua composição uma fração majoritária de metano e dióxido de carbono. Vários fatores podem interferir ao longo do processo, influenciando no seu desempenho, como o tempo de retenção hidráulica, a taxa de carga orgânica, o pH, a temperatura, os nutrientes e a composição do substrato utilizado. Para se verificar a capacidade de conversão do substrato em metano, um teste do potencial bioquímico de metano (BMP) pode ser realizado.

Segundo Koch et al. (2020), o teste BMP é um método padrão realizado em escala laboratorial, para avaliar a biodegradabilidade do substrato sob condições controladas, capaz de monitorar a produção de biogás ou metano acumulado durante o período do teste, fornecendo informações capazes de otimizar o processo. Ademais, o teste de BMP também pode ser usado para avaliar a eficácia do processo de DA de uma forma geral, para calcular a quantidade residual de material orgânico disponível para um tratamento posterior e identificar a parte restante do material não biodegradável.

As diretrizes para padronizar os procedimentos nos testes de BMP foram desenvolvidas por Angelidaki et al. (2009), e devem considerar vários aspectos para que o procedimento seja bem-sucedido, como características e composição dos substratos, tamanho das partículas, atividade do inóculo, quantidade de réplicas suficientes para fornecer resultados estatísticos confiáveis, composição de macro ou micronutrientes, composição da mistura, coleta de dados, bem como o relatório e interpretação de dados obtidos.

Os testes de BMP são utilizados em vários estudos para investigar o potencial de produção de biogás da biomassa de diferentes origens, como resíduos de frutas, casca de café e palha (SUHARTINI et al., 2020). Este cálculo é importante para obter uma visão dos parâmetros de projetos que devem ser analisados na construção de digestores anaeróbios (HOLLIGER et al., 2016).

### 3.5 Equação de Gompertz modificada

O modelo de Gompertz é um modelo matemático de série temporal, nomeado em homenagem ao matemático inglês Benjamin Gompertz, que utiliza uma função sigmoide (Equação 1),

$$X = a \cdot \exp[-e^{-ct+b}] \quad (1)$$

para reproduzir e prever o comportamento de crescimento de sistemas em um dado período de tempo, com  $a$ ,  $b$  e  $c$  representando constantes e  $t$  uma medida de tempo. Ele é largamente empregado em diversos campos da ciência, com aplicações frequentes na descrição do crescimento de animais e plantas, bem como do volume de bactérias e populações de diversos organismos (TJORVE; TJORVE, 2017).

Contudo, visando uma descrição mais precisa da dinâmica de alguns sistemas biológicos, com o uso de parâmetros fisicamente mais significativos, Zwietering et al. (1990) propuseram algumas alterações à versão original da equação de Gompertz.

A taxa de crescimento foi redefinida como na equação 2 a seguir,

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= a \cdot \exp[e^{-ct+b}](-e^{-ct+b}) \cdot (-c) \\ \frac{dX}{dt} &= ac \cdot \exp[e^{-ct+b}] \cdot e^{-ct+b} \end{aligned} \quad (2)$$

Tendo em vista que a velocidade máxima de crescimento  $t_m$  ocorre no ponto em que a primeira derivada da velocidade é nula, sendo  $X$  a Eq. 1, é possível verificar que no ponto de maior velocidade de crescimento, a função de Gompertz apresenta um ponto de inflexão, que permite calcular o valor de  $t_m$ :

$$\begin{aligned} \frac{d^2X}{d^2t} &= ac^2 \cdot \exp[-e^{-ct+b}] (e^{-ct+b})^2 - ac^2 \cdot \exp[-e^{-ct+b}] (e^{-ct+b}) \\ \frac{d^2X}{d^2t} &= 0 \\ \frac{d^2X}{d^2t} &= ac^2 \cdot \exp[-e^{-ct_m+b}] (e^{-ct_m+b}) [(e^{-ct_m+b}) - 1] \\ t_m &= \frac{b}{a} \end{aligned}$$

A concentração no ponto de máxima velocidade de produção é encontrada substituindo  $t_m$  na equação 1 (equação de Gompertz),

$$X = a \cdot \exp[-e^{-ct_m + b}] = a \cdot \exp[-e^{-c\frac{b}{c} + b}] = \frac{a}{e}$$

$$\mu_m = c \ln\left(\frac{a}{e}\right) = c$$

que nos dá o valor de  $c$ , a taxa de crescimento no ponto de máxima velocidade de produção. A velocidade máxima de produção é obtida aplicando  $t_m$  na Equação 2.

$$V_m = \frac{dX_m}{dt} = ac \cdot \exp[-e^{-ct_m + b}] e^{-ct + b} = \frac{ac}{e}$$

Assim, a curva tangente  $X$  no ponto de inflexão  $t_m$  é,

$$X = \frac{ac}{e}t + k$$

$$\text{com } t = t_m = \frac{b}{c} \text{ y } X_m = \frac{a}{e},$$

$$\frac{a}{e} = \frac{ac}{e} \frac{b}{c} + k$$

$$k = \frac{a}{e} (1 - b)$$

$$X = \frac{ac}{e}t + \frac{a}{e} (1 - b) = \frac{a}{e} [ct + (1 - b)]$$

Definindo o tempo de latência  $t_{lag}$  (o período da fase 'lag') como o tempo no qual a curva tangente no ponto de inflexão intercepta o eixo da abscissa, é possível encontrar o tempo de latência em  $X=0$ :

$$0 = ct_{lag} + (1 - b)$$

$$t_{lag} = \frac{b-1}{c}$$

Com este resultado, calcula-se o valor do parâmetro  $b$ :

$$b = ct_{lag} + 1$$

$$\text{e, com } v_m = \frac{ac}{e},$$

$$b = \frac{v_m e}{a} \cdot t_{lag} + 1$$

E, com isso, tem-se por fim a chamada função modificada de Gompertz (Equação 3):

$$X = a. \exp\left[- e^{\frac{v_m}{a}(t_{lag} - t) + 1}\right] \quad (3)$$

A partir desta equação é possível calcular quantidades como a produção acumulada de metano (Equação 4)

$$M = Y a. \exp\left[- e^{\frac{v_m}{a}(t_{lag} - t) + 1}\right] \quad (4)$$

com Y sendo uma constante utilizada para ampliar a imagem da função,  $v_m$  a taxa de produção de metano, t o tempo de incubação dos reatores e  $t_{lag}$  o tempo da fase lag, conforme citado anteriormente.

E, tomando o limite em que o tempo tende ao infinito, obtém-se o potencial de metanogênico (Equação 5):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} M = Ya \quad (5)$$

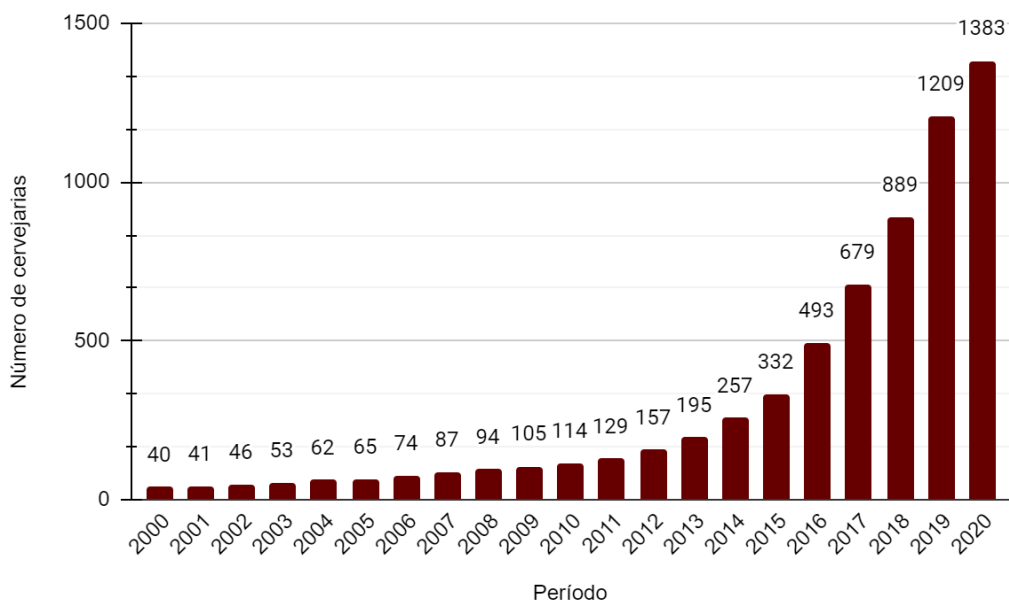
### 3.6 Indústria da cerveja

A cerveja é atualmente a quinta bebida mais consumida no mundo. O consumo global de cerveja no ano de 2018, medido em 170 países, foi de aproximadamente 1,8879 bilhão de hectolitros. Neste mesmo ano, a produção mundial da bebida ultrapassou 1,94 bilhão de hl, fazendo da sua indústria uma das mais importantes no cenário econômico global (RACHWAL et al., 2020).

O Brasil é um dos líderes mundiais nos rankings de consumo e produção de cerveja, neste último ocupando a terceira colocação, com uma produção de 13,3 bilhões de litros, sendo superado apenas por China (46 bilhões de litros) e Estados Unidos (22,1 bilhões de litros) (SINDICERV, 2021). Diante deste cenário, a bebida assume papel de destaque tanto na cultura quanto na economia nacional, sendo responsável por 2% do PIB, participando de uma ampla cadeia de negócios que se estende do agronegócio ao varejo de pequeno porte (CERVBRASIL, 2016).

Segundo o Anuário da Cerveja de 2020, documento do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, o mercado deste produto segue em plena expansão, com um total de 1383 cervejarias registradas no ministério, um crescimento de 14,4% com relação ao ano anterior, com representantes em todos os estados da federação (MAPA, 2021). O Gráfico 4 mostra o número de registros de estabelecimentos entre os anos de 2000 e 2020.

**Gráfico 4 - Número de cervejarias registradas entre os anos de 2000 e 2020.**



Fonte: Adaptado de Anuário da Cerveja 2020 (MAPA, 2021).

### 3.6.1 Processo de produção

A cerveja é uma bebida alcoólica produzida por meio do processo de fermentação da cevada, no qual ocorre a conversão dos açúcares contidos nos grãos de cevada em álcool. Outras etapas realizadas são capazes de conferir características organolépticas, pretendidas no produto ao final das etapas. De uma forma geral, o processo de produção de cerveja conta com a obtenção do malte, preparo do mosto, fermentação, processamento da cerveja e envase (CETESB, 2005).

O malte é resultante do tratamento dos grãos de cevada, que passam por várias etapas, desde a limpeza até a seleção de acordo com o tamanho, para serem embebidos em água quente, proporcionando condições para o processo de germinação. Em seguida, o excesso de água é retirado e os grãos germinados são secados em estufas. Com eles secos, ocorre a caramelização dos grãos dando origem ao malte (CETESB, 2005).

O mosto é elaborado por meio do processo de cozimento do malte, que origina um fluido contendo açúcares que serão fermentados por bactérias, produzindo o álcool. Seu preparo consiste na moagem dos grãos maltados seguida da maceração, processo no qual os grãos moídos são misturados com água aquecida para ativar enzimas presentes nos grãos capazes de realizar a quebra de substâncias. Outra fonte de açúcar, denominada de adjunto, como o milho, arroz e trigo, também pode ser utilizada junto do malte a depender do tipo de cerveja final que se deseja obter (CETESB, 2005).

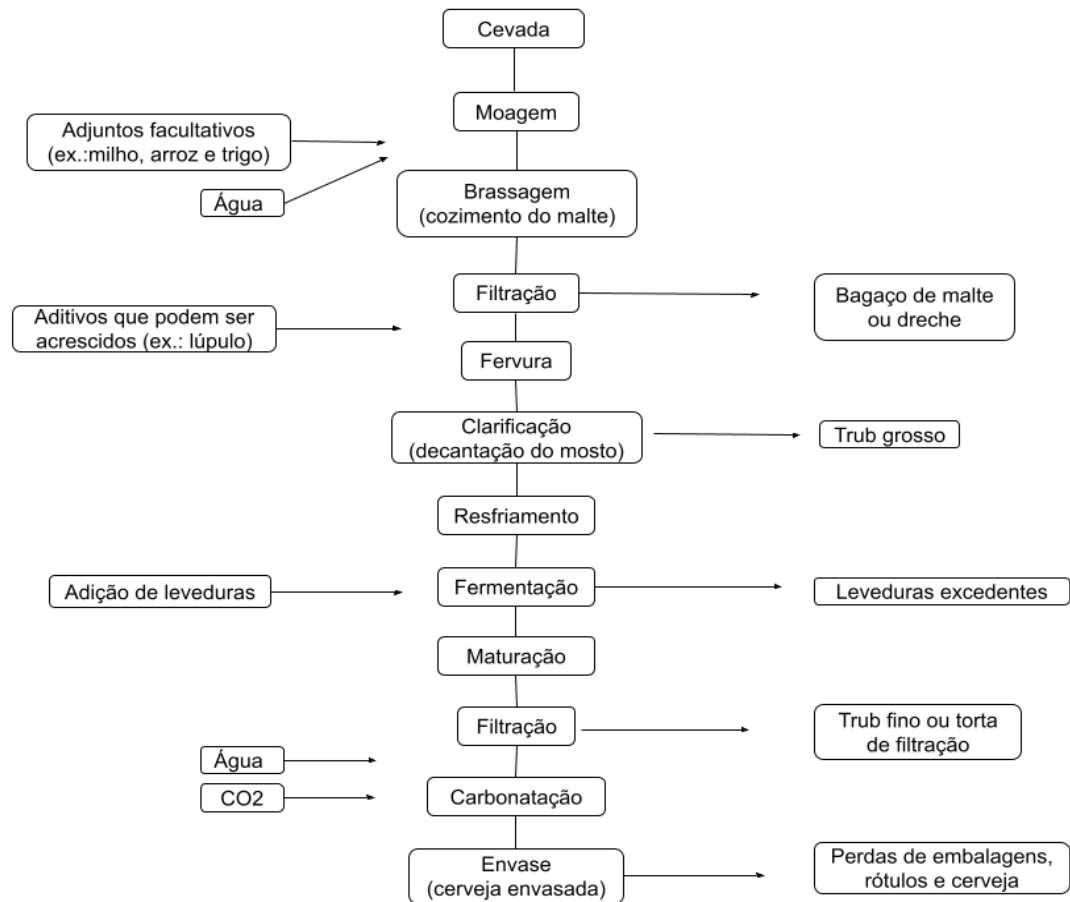
Os resíduos de grãos de malte e adjunto são separados do mosto por meio de filtração, sendo a parte sólida dos resíduos denominada de bagaço de malte ou dreche. O líquido resultante é aquecido em caldeiras até a sua estabilização. Em seguida podem ser adicionados aditivos, como o lúpulo, capazes de agregar características como o sabor e odor, a depender de cada tipo de cerveja. Alguns resíduos derradeiros podem estar contidos no fluido, tornando necessária a realização da clarificação, que pode ser feita por meio da decantação do mosto, ocorrendo a separação dos resíduos sólidos, denominados de trub grosso.

Uma vez clarificado, o mosto é resfriado e passa pelo processo de fermentação, que é responsável pela conversão dos açúcares em  $\text{CO}_2$  e álcool. As leveduras, encarregadas pela fermentação, após o processo, podem ter uma parte reutilizada e o excedente pode ser enquadrado como resíduo desta etapa.

O mosto fermentado passa por uma etapa de maturação, na qual o mesmo é colocado em dornas para descansar e possibilitar a separação de microrganismos e outras substâncias. Por meio de filtração, são retiradas impurezas contidas no líquido e o resíduo sólido dessa etapa é chamado de trub fino ou torta de filtração, que possui conteúdo rico em nitrogênio. Por fim, a cerveja passa pela etapa de carbonatação, com a injeção de gás carbônico e pode ser envasada.

A Figura 2 mostra, resumidamente, uma ilustração do procedimento de produção da cervejaria.

**Figura 2 - Fluxograma do processo geral de produção de cerveja e alguns resíduos gerados.**



Fonte: Adaptado de Olajire, 2012.

O fluxograma exhibe as etapas do processo industrial, desde a moagem da cevada ao envase da cerveja, bem como os resíduos originados em algumas das fases de sua fabricação.

### 3.6.2 Principais resíduos gerados no processo.

A indústria cervejeira gera ao longo de sua operação uma variedade de subprodutos que podem ser administrados de forma a proporcionar sua reciclagem, aumentando seu valor agregado, de maneira a contribuir como fonte de rendimento para a própria cervejaria. Dentre as várias aplicações que podem ser dadas para estes resíduos, algumas são: a utilização dos resíduos dentro da própria fábrica, como por exemplo, o CO<sub>2</sub> produzido na fermentação, que pode retornar ao processo sendo injetado na carbonatação (ELSHANI et al., 2018); a produção de biogás; a comercialização do bagaço do malte para a fabricação de ração animal (ABREU et al., 2021).

Nas várias etapas do processo cervejeiro, os resíduos podem ser configurados como sólidos, efluentes líquidos e emissões atmosféricas. Os resíduos sólidos são produzidos sobretudo nas etapas de filtração, envase e tratamento dos efluentes. Alguns desses subprodutos são garrafas quebradas, lodo de estações de tratamento, excesso de levedura, obtida durante o processo de fermentação, e grãos gastos (CETESB, 2005).

Os grãos gastos configuram o principal resíduo produzido, em termos de quantidade. São compostos de restos de casca e polpa dos grãos de malte usados, podendo se encontrar misturados, em suspensão ou dissolvidos no mosto, sendo classificados em três categorias, de acordo com as diferentes características, a saber: bagaço de malte, gerado na filtração do mosto; o trub grosso, retirado após a clarificação; e o trub fino, adquirido na segunda filtração. Os efluentes líquidos são gerados principalmente atrelados a frequentes operações de limpeza, no momento de envase. Já as emissões atmosféricas são principalmente de gases de combustão, material particulado, poeira e odor (CETESB, 2005).

#### 3.6.2.1 Bagaço de malte

O bagaço de malte é proveniente do esgotamento dos grãos de malte moídos, que tiveram seus compostos solúveis de interesse retirados para serem usados no preparo do mosto. Esse subproduto representa o resíduo sólido de maior quantidade, com aproximadamente 85% do total. Em geral, cerca de 100 kg de grãos processados geram por volta de 130 Kg de bagaço úmido, com umidade entre 80 e 85%, o que representa em torno de 14 a 20 kg de bagaço para cada hectolitro de cerveja produzida (MATHIAS; MELLO; SERVULO, 2014).

O bagaço de malte tem valor nutricional inferior quando comparado com a mesma quantidade de cevada seca, no entanto a umidade facilita a digestão pelo gado, o que o torna uma opção para a comercialização como subproduto para a produção de ração animal. Na cervejaria, a combustão do bagaço de malte pode oferecer uma possibilidade de geração de energia térmica e elétrica, trazendo benefícios para a própria indústria (OLAJIRE, 2012).

#### 3.6.2.2 Levedura excedente

A levedura excedente pode ter uma parte recuperada e usada em uma segunda fermentação, retornando para o processo produtivo e o restante não utilizado pode ser direcionado para diferentes fins, como na indústria de ração animal como suplemento, por ser



um material rico em proteínas e vitamina B. Este subproduto gera perdas de cerveja entre 1,5 e 3% do volume total de cerveja produzida (OLAJIRE, 2012).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo foram apresentados os procedimentos metodológicos aplicados para a realização da pesquisa discutida na presente dissertação. Foi descrita a elaboração de três cenários para avaliação da produção de energia a partir do biogás resultante dos resíduos da indústria. Nestes cenários, três tipos de acionadores primários foram considerados para a geração de energia elétrica: microturbinas a gás (MCG), com rendimento entre 24% e 28%, motores a gás (MG), com rendimento que variaram entre 30% e 34% e turbinas a gás (TBG), com rendimento entre 20% e 30%. Somado a essas tecnologias, foi adotado o uso de um gerador com um rendimento de 87%, levando-se em consideração a faixa de rendimento de 85% a 90% como a adequada para o uso das tecnologias supracitadas (LIMA; PASSAMANI, 2012).

A fim de avaliar o melhor cenário para produção metanogênica a partir do tratamento dos resíduos da cervejaria estudada, avaliou-se o BMP gerado por reatores contendo as misturas de levedura fermentada e bagaço de malte em diferentes proporções, a saber 1:2; 1:4,5 e 1:9, respectivamente. Foi calculado também o mesmo potencial para os dois resíduos separadamente.

### 4.1 Procedimento experimental

O monitoramento da produção de biometano foi realizado durante 55 dias no Laboratório de Controle Ambiental (LCA), localizado no Centro de Tecnologia da UFAL. A fermentação anaeróbia foi realizada em 12 reatores de 120 mL (Figura 3), usando 60 mL de volume reacional, com 20% de inóculo, operados em batelada e com a DQO inicial do substrato fixada em 5mg/L.

Inicialmente, o substrato e o inóculo foram caracterizados através de análises físico-químicas, descritas na seção 4.3.1.

Cinco cenários distintos foram montados, conforme a tabela abaixo:

Tabela 2 - Reatores e substratos utilizados.

Reatores	Substratos
RF	levedura fermentada
RB	bagaço de malte
RFB 1:2	levedura fermentada e bagaço na proporção de 1 para 2
RFB 1:4,5	levedura fermentada e bagaço na proporção de 1 para 4,5
RFB 1:9	levedura fermentada e bagaço na proporção de 1 para 9

Fonte: Autora, 2021.

Um cenário contendo apenas reatores com levedura fermentada (RF) e outro com os reatores contendo somente bagaço de malte (RB). E cenários referentes às misturas em diferentes proporções de levedura fermentada e bagaço (1:2; 1:4,5 e 1:9), respectivamente, representados pelos reatores RFB1:2, RFB1:4,5 e RFB1:9. Também foram realizados ensaios controle, em paralelo, sem adição de substratos, para computar as produções individuais do inóculo e, por conseguinte, do próprio substrato. Todos os ensaios foram realizados em duplicata.

O pH inicial dos reatores foi ajustado manualmente, com o uso de HCl (1M), para atingir a neutralidade.

Para garantir as condições de anaerobiose, o *headspace* dos reatores foi borbulhado com N<sub>2</sub> (g) por um período de 1 minuto. Posteriormente, os reatores foram tampados com septos de borracha e um lacre de metal. Foram acopladas a cada reator válvulas por onde o gás foi coletado.

Durante todo o tempo do experimento os reatores foram mantidos sob uma temperatura de 35±1°C e rotação de 120 rpm. Amostras de gás foram coletadas diariamente para verificar a produção metanogênica.

**Figura 3 - Reatores usados na digestão anaeróbia.**



Fonte: Autora, 2021.

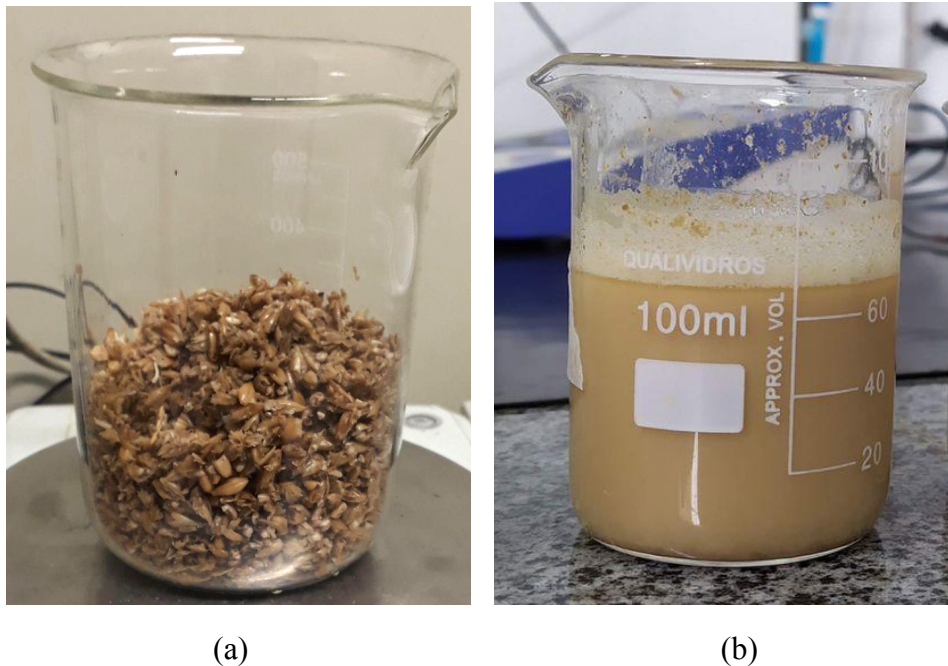
Na figura acima são exibidos 12 frascos Duran GL.45, usados para a montagem dos reatores, e suas respectivas válvulas acopladas, utilizadas para controlar o fluxo de gás.

#### **4.2 Substratos.**

As informações coletadas presencialmente para a elaboração deste trabalho foram obtidas em uma cervejaria artesanal, localizada no bairro Tabuleiro dos Martins, na cidade de Maceió, Alagoas.

Dentre os resíduos da produção, o bagaço do malte é o mais volumoso. Ele é retirado após a filtragem do mosto e armazenado em bombonas de 200 litros. A levedura excedente, oriunda da etapa de fermentação, é responsável por uma quantidade menor do volume total do efluente gerado, que, no entanto, confere uma maior fração de carga poluidora do processo cervejeiro. Esses resíduos são mostrados na Figura 4.

**Figura 4 - Bagaço de malte residual (a) e levedura fermentada (b)**



Fonte: Autora, 2021.

O bagaço de malte (à esquerda) e a levedura fermentada (à direita) foram coletados na indústria após o final do processo de produção de cerveja e foram usados como substratos para a geração de metano.

#### **4.3 Inóculo**

O lodo utilizado como inóculo foi proveniente de um reator UASB, coletado de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) localizada em Maceió-AL, que apresentou valores de sólidos totais, fixos e voláteis de 30, 6 e 24 g/L, respectivamente, com um pH de 6,38 (LIMA, 2020).

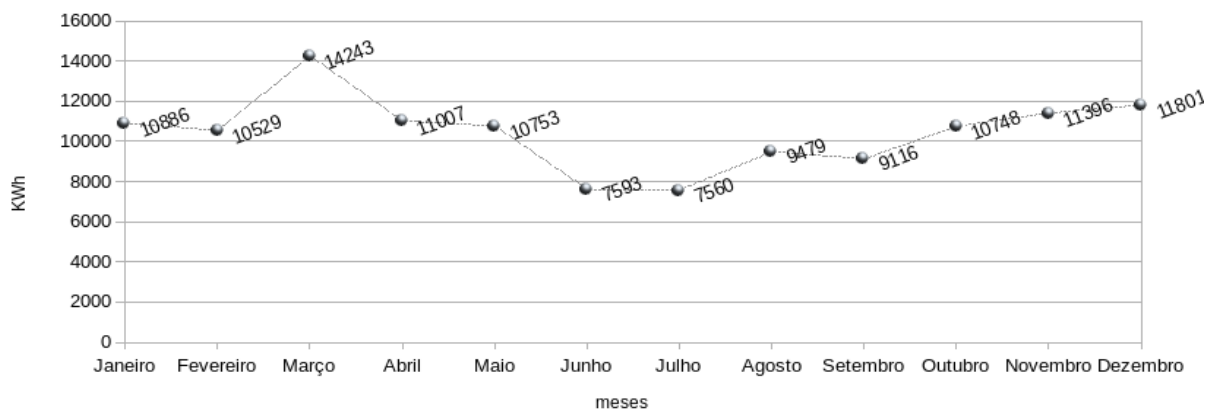
#### **4.4 Obtenção dos dados e informações**

As informações apresentadas sobre a produção de cerveja, bem como registros do consumo de energia elétrica e gás natural, foram referentes ao ano de 2020. As caracterizações do bagaço de malte e da levedura excedente foram realizadas no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA) e os dados da produção metanogênica foram obtidos no Laboratório de Controle Ambiental (LCA), ambos localizados no Centro de Tecnologia da UFAL.

#### 4.4.1 Consumo energético da cervejaria

O consumo mensal da cervejaria durante o ano de 2020 foi analisado. Os valores das faturas mensais da concessionária de energia elétrica foram disponibilizados pela cervejaria, como mostra o Gráfico 5, o consumo anual foi de 125111 kWh, com uma média mensal de 10425,92 kWh.

**Gráfico 5 - Consumo de energia elétrica na cervejaria no ano de 2020.**



Fonte: Autora, 2021.

Ao analisar o consumo energético descrito no gráfico identifica-se uma oscilação entre alguns registros, com valores mais baixos nos meses de junho e julho e um aumento no mês de março, o que pode ser justificado pela variação da produção no decorrer do ano, que resulta em um gasto energético inconstante.

O consumo de energia térmica se dá na caldeira, um equipamento utilizado para a produção de vapor. Ela é alimentada com gás natural e promove o aquecimento da água, que, em forma de vapor com alta pressão, é utilizada para o aquecimento das panelas de mostura. O consumo de gás natural na indústria, para o mês de fevereiro de 2021, foi de 840 m<sup>3</sup>. De acordo com a administradora do local, esse consumo mensal não apresenta grandes variações quando comparado com valores de outros meses, com um consumo médio mensal em torno de 800 m<sup>3</sup>, no ano de 2020.

#### 4.4.2 Análises físico-químicas

As análises físico-químicas foram realizadas para obter a caracterização dos substratos e monitoramento dos reatores no início e no final do processo. Os parâmetros avaliados foram: o Potencial Hidrogeniônico (pH), a Demanda Química de Oxigênio (DQO), os Sólidos Totais (ST), Sólidos Fixos Totais (SFT), Sólidos Voláteis Totais (SVT) e Carboidratos Totais (CHT). A caracterização está resumida na Tabela 3:

**Tabela 3 - Análises físico-químicas.**

Análise	Unidade	Método	Metodologia
pH	-	Potenciométrico	
DQO	mg/l	Espectrométrico	APHA, AWWA e WEF (2012).
Série de sólidos	g/l	Gravimétrico	
CHT	mg/l	Espectrométrico	Dubois et al. (1956).

Fonte: Autora, 2021.

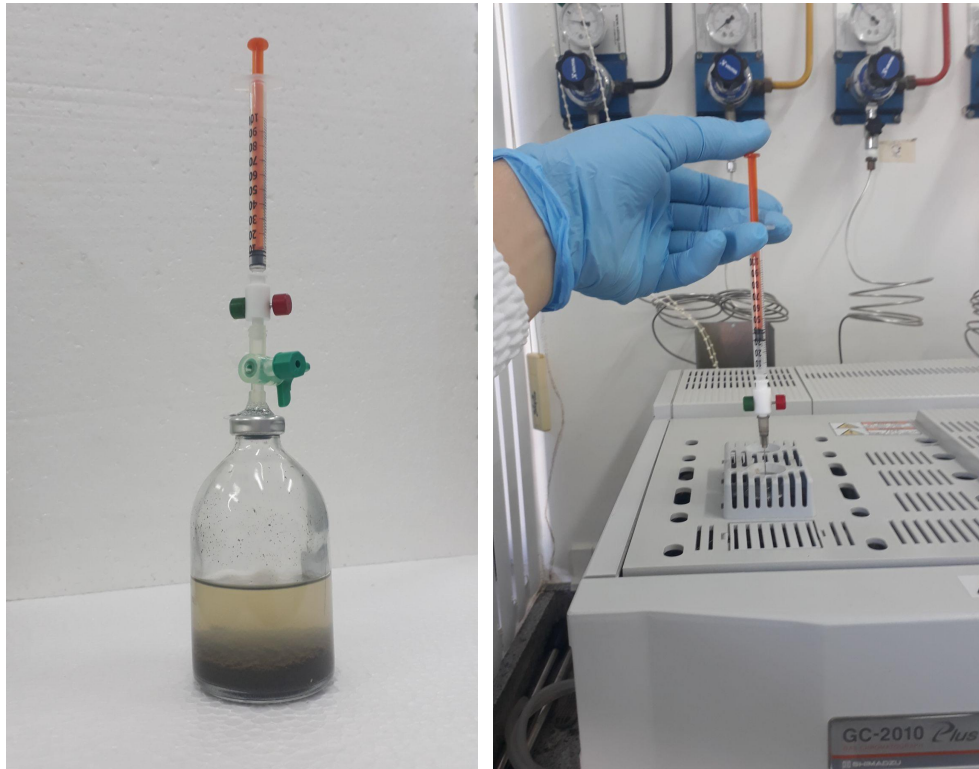
A determinação do pH foi realizada com a utilização do medidor de pH da marca MS TECNOPON®, modelo mPA210. Para as determinações da série de sólidos referente ao bagaço de malte, foi realizada uma mistura do bagaço com água destilada, com uma composição de 20% de bagaço. Foram usados filtros de papel qualitativo com porosidade de 14 µm para a filtração. As medições de absorvância das amostras de DQO e carboidratos foram realizadas usando o espectrofotômetro da KASUAKI®, modelo IL-226.

O lodo passou por análise de série de sólidos e verificação do pH.

#### 4.4.3 Cromatografia gasosa

A composição do biogás gerado durante a produção fermentativa nos reatores, foi monitorada ao longo de 55 dias por meio da técnica de cromatografia gasosa. O metano foi detectado com o uso do cromatógrafo gasoso Shimadzu® modelo GC-2010 (software GC Solution), contando com o argônio como gás de arraste. A temperatura do injetor foi mantida a 30 °C, a do detector a 200 °C e a da coluna a 230 °C. Para a análise da composição do gás, 0,3 mL do biogás contido no headspace foi retirado e injetado manualmente no cromatógrafo gasoso com o auxílio de uma seringa, como demonstrado na Figura 5.

**Figura 5 - Coleta do biogás no headspace (a) e injeção manual no cromatógrafo (b)**



Fonte: Autora, 2021.

A coleta do biogás (à esquerda) foi realizada diariamente com o auxílio de uma seringa acoplada à válvula que controla a passagem do fluido. A injeção manual do gás no cromatógrafo (à direita) foi realizada em seguida e para cada um dos reatores. O intervalo entre duas injeções foi de aproximadamente 12 minutos.

#### **4.5 Determinação da produção acumulada de metano**

A partir dos dados obtidos empiricamente, por meio do método de cromatografia gasosa, foram registrados os valores da produção acumulada de metano e o tempo de incubação dos reatores. Com esses valores foram confeccionados gráficos descrevendo a evolução da produção de metano em cada reator e, a partir deles, visando tornar possíveis estimativas e previsões acerca do comportamento do sistema, foram plotadas curvas teóricas elaboradas através do modelo de Gompertz modificado, descrito pela equação 3.



Para criar as curvas teóricas, foram estimados, para cada cenário, os valores da produção acumulada de metano, taxa de produção de metano e tempo de duração da fase lag. De posse desses dados, utilizando o software Excel, foram confeccionadas versões iniciais para as curvas de Gompertz. Em seguida, utilizando a ferramenta Solver, do Excel, o somatório dos erros quadráticos foi minimizado, fornecendo a versão ótima de cada curva de Gompertz modificada relativa a cada cenário com os valores finais para a produção acumulada e a taxa de produção de metano.

#### 4.6 Estimativa da conversão energética do biogás

Diferentes tecnologias podem ser usadas para efetuar a conversão energética do biogás. No caso da geração de energia elétrica, a potência gerada a partir do biogás pode ser obtida utilizando-se geradores de energia de diferentes tipos.

Para a obtenção da potência elétrica, foram usados dados quantitativos referentes à produção anual de resíduos gerados na cervejaria analisada, os resultados dos testes da produção específica de metano, obtidos em laboratório e a identificação da vazão, composição química e poder calorífico do gás.

Inicialmente, estimou-se a vazão média de biogás produzido na unidade, utilizando a Equação 6:

$$Q_{\text{biogás}} = m_{\text{BMLF}} \cdot \text{BMP} \cdot 10^{-3} \quad (6)$$

Sendo,

$Q_{\text{biogás}}$  = vazão média do biogás (m<sup>3</sup>/dia);

$m_{\text{BMLF}}$  = média diária de bagaço do malte e levedura fermentada produzidos (kg/dia);

$\text{BMP}$  = potencial bioquímico de metano (L de CH<sub>4</sub>/kg de substrato)

$10^{-3}$  = fator de conversão de L para m<sup>3</sup>.

Em seguida, foi calculada a energia térmica disponível através da Equação 7:

$$Et = Q_{\text{biogás}} \cdot \text{PCI}_{\text{biogás}} \quad (7)$$

Sendo,

$Et$  = energia térmica disponível (kcal/dia)

$Q_{\text{biogás}}$  = vazão média do biogás (m<sup>3</sup>/dia);

$PCI_{biogás}$  = poder calorífico inferior do biogás (8500 kcal/m<sup>3</sup> para o metano).

O potencial elétrico do biogás foi determinado com base na Equação 8:

$$PE_{biogás} = (Et \cdot 4,184 \cdot \eta_{tec} \cdot \eta_{gerador}) / 86400 \quad (8)$$

Sendo,

$PE_{biogás}$  = potencial elétrico do biogás (kW ou KJ/s);

$Et$  = energia térmica disponível (kcal/dia);

4,186 = fator de conversão de kcal para KJ;

$\eta_{tec}$  = eficiência da tecnologia de conversão;

$\eta_{gerador}$  = rendimento do gerador;

86400 = fator de conversão de dia para segundos;

A potência elétrica gerada pode ser obtida usando o valor do potencial elétrico calculado anteriormente, usando a Equação 9:

$$Ee = PE_{biogás} \cdot T_{operação} \quad (9)$$

com,

$Ee$  = potência elétrica média gerada (kWh/dia);

$PE_{biogás}$  = potencial elétrico do biogás (kW);

$T_{operação}$  = tempo médio de operação do motor (h/dia);

Uma vez obtidos os valores dos potenciais energéticos do biogás produzido para cada um dos três tipos de geradores, foi verificado o quanto da demanda energética da cervejaria seria suprida com o uso deste recurso.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nas análises realizadas, verificou-se os ganhos, derivados do uso do biogás, no incremento da produção de eletricidade e na economia de combustível para as caldeiras movidas a gás natural.

### 5.1 Quantificação e caracterização dos substratos

#### 5.1.1 Quantificação do bagaço de malte e levedura excedente

No ano de 2020, os rótulos de pilsen e IPA representaram um total de 98% de toda a produção da empresa, com 91180,5 litros de cerveja. Em decorrência desse processo produtivo, foram gerados aproximadamente 34594,45 Kg de bagaço de malte e 7294,42 litros de levedura excedente, efluente descartado na purga após a fermentação. Esses dados são detalhados na Tabela 4:

**Tabela 4 - Cervejas e resíduos produzidos em 2020.**

Rótulo	Produção volumétrica de cerveja em 2020 (L)	Quantificação do bagaço de malte gerado em 2020 (kg)	Quantificação da levedura excedente gerada em 2020 (L)
Pilsen	85372,5	31303,25	6829,78
IPA	5808	3291,2	464,64
Total	91180,5	34594,45	7294,42

Fonte: Autora, 2021.

Os resíduos gerados mensalmente apresentam quantidades variáveis de acordo com fatores como a disponibilidade de insumos e a sazonalidade da procura pelos consumidores. Entre estes, os resíduos provenientes da fabricação da cerveja Pilsen apresentaram maior volume quando comparados aos produzidos pela cerveja IPA. Tal fato pode ser explicado pela elevada procura pela bebida desta categoria, considerada mais suave que outros rótulos, agradando o paladar de um número maior de consumidores e conseqüentemente gerando uma maior demanda de produção.

### 5.1.2 Caracterização dos substratos

A Tabela 5 apresenta a caracterização do bagaço de malte e levedura excedente coletados na indústria.

**Tabela 5 - Caracterização dos substratos.**

Análise	Unidade	Fermentado	Bagaço de malte
pH	-	5,66	6,12
DQO	mg/L	251057,00	8044,40
CHT		37981,17	4960,50
Sólidos Totais		104,53	9,82
Sólidos Totais Fixos	g/L	6,14	0,21
Sólidos Totais Voláteis		98,39	9,61

Fonte: Autora, 2021.

## 5.2 Monitoramento dos reatores

As análises físico-químicas dos reatores foram realizadas no momento da partida do experimento e ao seu final. Nas Tabelas 6, 7, 8 e 9 foram apresentadas as concentrações iniciais e finais de carboidratos, de DQO, de sólidos voláteis e de pH de cada reator, respectivamente.

**Tabela 6 - Concentrações iniciais e finais de carboidratos de cada cenário.**

Reator	Carboidratos (mg/L) - Iniciais	Carboidratos (mg/L) - Finais
RC	2603	1701
RF	3361	1424
RB	5258	1260
RFB (1:2)	3373	1654
RFB (1:4,5)	3423	1976
RFB (1:9)	3802	1515

Fonte: Autora, 2021.

Os carboidratos são compostos químicos formados por átomos de carbono, oxigênio e hidrogênio. De acordo com sua composição, apresentam diferentes taxas de degradação no processo de geração de biogás.

Por meio da tabela acima é possível conhecer a quantidade de carboidratos consumida durante o tempo do processo estudado para cada um dos cenários. O reator (RB) contendo apenas bagaço de malte como substrato obteve o maior consumo de carboidratos com um valor em torno de 76% de remoção. Já o reator controle (RC), contendo apenas lodo, apresentou a menor remoção, com cerca de 34%. De uma forma geral, excetuando-se o reator RC, todos os reatores apresentaram um consumo de carboidratos superior a 42%.

Na Tabela 7 pode-se verificar a remoção de DQO nos reatores ao fim do processo.

**Tabela 7 - Concentrações iniciais e finais de DQO de cada cenário.**

Reator	DQO (mg/L) - Iniciais	DQO (mg/L) - Finais
RF	24509	13502
RB	37174	7598
RFB (1:2)	26371	16724
RFB (1:4,5)	37099	16836
RFB (1:9)	35013	15942

Fonte: Autora, 2021.

O reator (RB) apresentou a maior remoção de DQO quando comparada aos outros reatores, com um valor em torno de 80% de remoção. Os reatores, RFB (1:4,5), RFB (1:9), RF e RFB (1:2), apresentaram remoções de aproximadamente 55%, 54%, 45% e 37%, respectivamente. A importância desta medida reside no fato de esta quantidade atuar como um parâmetro para avaliação da degradabilidade da matéria orgânica, capaz de verificar a quantidade de oxigênio necessária para a oxidação do material analisado.

**Tabela 8 - Concentrações iniciais e finais de sólidos voláteis de cada cenário.**

Reator	Sólidos Totais Voláteis - STV (g/L) - Iniciais	Sólidos Totais Voláteis - STV (g/L) - Finais
RC	12,21	7,03
RF	10,07	7,05
RB	11,44	7,42
RFB (1:2)	10,64	7,24
RFB (1:4,5)	10,00	7,42
RFB (1:9)	10,70	6,89

Fonte: Autora, 2021.

Quanto aos sólidos voláteis (SV), foi possível monitorar o seu comportamento em cada um dos cenários. Em todos os casos houve uma remoção de mais de 25%. Podemos concluir, então, que parte da matéria orgânica do lodo foi consumida na digestão anaeróbia e o crescimento da biomassa não foi verificado. O conhecimento dos sólidos voláteis auxilia na identificação dos componentes orgânicos dos sólidos que serão biodigeridos e transformados em biogás.

Os reatores foram ajustados com o pH inicial até atingir a neutralidade, assumindo ao final do processo os valores apresentados na Tabela 9:

**Tabela 9 - pH finais em cada cenário.**

Reator	pH final
RC	7,7
RF	6,7
RB	6,1
RFB (1:2)	5,0
RFB (1:4,5)	5,9
RFB (1:9)	5,8

Fonte: Autora, 2021.

O pH é um indicador do caráter ácido ou básico dos efluentes. Como mostra a Tabela 9, foi observada uma redução no pH final em quase todos os cenários, exceto no controle. Visando a manutenção do pH próximo de 7, o uso de um alcalinizante poderia ser uma alternativa, visando a inclusão do pH na faixa de valores entre 7 e 8, o intervalo ótimo para a metagênese. O pH ácido pode ocorrer em sistemas de digestão anaeróbia onde a taxa de metanogênese é mais lenta do que a taxa acidogênica, o que pode causar um acúmulo de ácidos graxos voláteis (AKUNNA, 2015), o desequilíbrio entre a quantidade de metabólicos produzidos e a quantidade de metabólicos consumidos pode levar a falha do sistema.

### 5.3 Produção de metano nos reatores

Para a análise da produção acumulada de metano foi utilizada a média da produção de cada cenário; os dados foram ajustados ao modelo de Gompertz modificado. A Tabela 10 descreve o comportamento da produção de metano em cada cenário.

**Tabela 10 - Comportamento da produção de metano em cada cenário.**

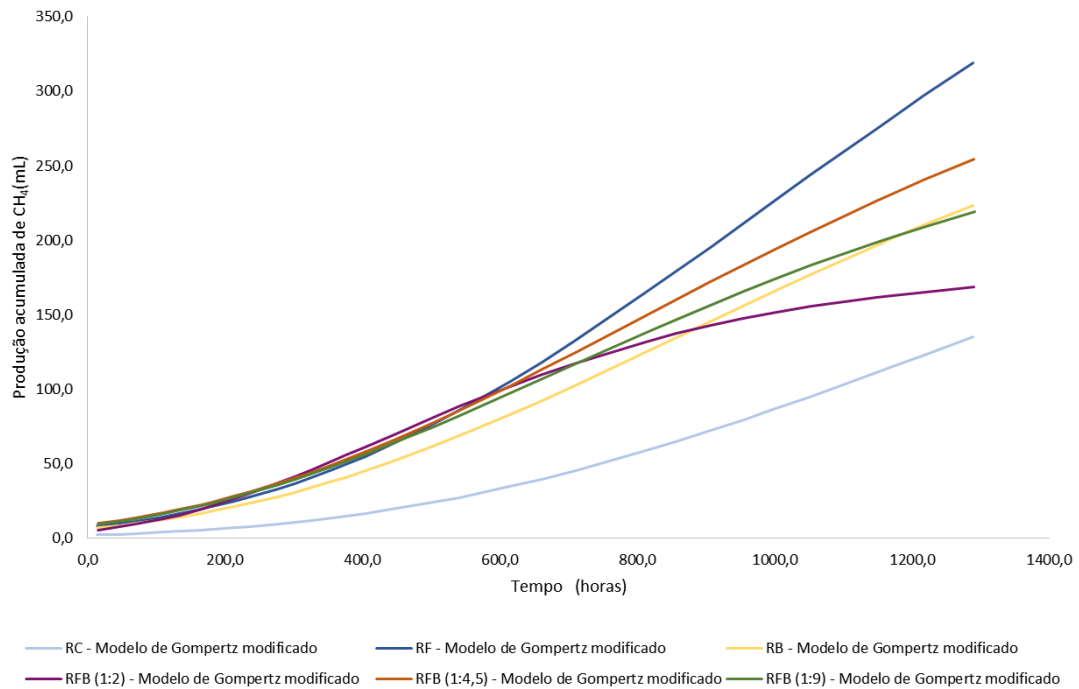
	Reator RC	Reator RF	Reator RB	Reator RFB (1:2)	Reator RFB (1:4,5)	Reator RFB (1:9)
<b>M (mL)</b>	135,00	319,10	223,40	168,40	254,20	218,90
<b>t<sub>lag</sub> (h)</b>	495,46	317,38	243,54	98,28	192,93	144,94
<b>R<sup>2</sup></b>	0,99	0,996	0,99	0,99	0,99	0,98

Fonte: Autora, 2021.

A tabela acima mostra os melhores cenários para produção de metano (M), juntamente com o tempo da fase lag ( $t_{lag}$ ) de cada reator e uma medida de referência do ajuste entre os valores experimentais e a curva de Gompertz, dado por  $R^2$ .

A produção de metano acumulada alcançou o maior valor no cenário RF, onde apenas a levedura fermentada foi utilizada como substrato, atingindo um valor de 319,1 mL ao final dos 55 dias de estudo. O segundo melhor cenário foi o RFB (1:4,5), que utilizou uma mistura de levedura fermentada com bagaço de malte em uma proporção equivalente à encontrada na indústria analisada, atingindo uma produção acumulada de metano de 254,2 mL. O cenário RB, contendo apenas o bagaço de malte como substrato, conseguiu uma produção acumulada de metano de 223,4 mL, apresentando o terceiro melhor desempenho. Os cenários RFB (1:9), RFB (1:2) e RC apresentaram valores de 218,9 mL, 168,4 mL e 135 mL, respectivamente, de metano acumulado ao longo do tempo estudado.

Para fins de comparação, no Gráfico 6 são apresentados todos os cenários simultaneamente.

**Gráfico 6 - Todos os cenários de produção acumulada de metano.**

Fonte: Autora, 2021.

O gráfico acima permite observar o comportamento de cada um dos cenários estudados, quanto à produção acumulada de metano, de forma a oferecer uma referência para facilitar a análise dos seus desempenhos.

Por meio dos resultados dos ensaios de biodegradabilidade, foi realizado o cálculo do BMP para cada um dos reatores analisados. Os valores obtidos nos reatores controle foram subtraídos nos dados e apresentados na Tabela 11 contendo o BMP (em mL de CH<sub>4</sub>/g de sólidos voláteis) relativo a cada cenário.

**Tabela 11 - Resultados experimentais obtidos ao final dos ensaios de biodegradabilidade.**

BMP (mL de CH <sub>4</sub> /g de sólidos voláteis)				
RF	RB	RFB (1:2)	RFB (1:4,5)	RFB (1:9)
304,7	128,8	52,3	198,7	130,7

Fonte: Autora, 2022.

O maior BMP foi obtido com RF, a saber 304,7 mL CH<sub>4</sub>/g SV, implicando uma maior biodegradabilidade em comparação com os outros cenários. O segundo melhor valor foi alcançado com o RFB (1:4,5), com 198,7 mL CH<sub>4</sub>/g SV, cenário este construído para representar a proporção real de resíduos gerados e descartados pela cervejaria. O cenário RB



alcançou um valor de 128,8 mL CH<sub>4</sub>/g SV, enquanto para o RFB (1:9) e o RFB(1:2) o BMP foi de 130,7 mL CH<sub>4</sub>/g SV e 52,3 mL CH<sub>4</sub>/g SV, respectivamente. Um trabalho semelhante, realizado por Oliveira, Alves e Costa (2018), analisou o BMP para reatores com características análogas às adotadas neste estudo, obtendo valores de BMP de 515 mL CH<sub>4</sub>/g SV, 301 mL CH<sub>4</sub>/g SV e 411 mL CH<sub>4</sub>/g SV para cenários contendo, respectivamente, apenas levedura fermentada, apenas bagaço de malte e uma mistura de levedura fermentada com bagaço de malte na proporção de 1:9. A diferença entre os resultados dos dois trabalhos pode ser justificada pela diferença da composição do bagaço de malte, fator influenciado pela região de produção (ČATER et al., 2015; GONÇALVES et al., 2015; BOCHMANN et al., 2015), bem como por outras divergências pontuais, como o uso de inóculos distintos e a interrupção do experimento deste trabalho antes da estabilização dos reatores.

Outro fator que pode ter influência sobre os resultados é a presença de celulose contida nos grãos. Por se tratar de um composto com uma estrutura formada por cadeias de celulose unidas entre si por ligações de hidrogênio, essas fibras celulósicas são protegidas por hemiceluloses e ligninas. Sendo assim, os processos hidrolíticos não são triviais, uma vez que existe uma complexa interação entre a celulose e hemicelulose contidas nas paredes das células vegetais como também entre os polissacarídeos e ligninas (OGEDA; PETRI, 2010).

## **5.4 Geração de energia elétrica a partir do biogás**

A potência elétrica gerada a partir dos resíduos utilizados neste estudo foi calculada com base nas equações (6), (7), (8) e (9), apresentadas anteriormente, com os dados de produção de metano da caracterização dos substratos. Esse cálculo foi realizado visando identificar o quanto do consumo de energia da cervejaria no ano de 2020 poderia ter sido suprido usando-se o biogás proveniente dos resíduos gerados na unidade.

### **5.4.1 Estimativa da produção de metano**

Os ensaios de BMP permitiram a identificação de diferentes valores de rendimento de metano para os diferentes cenários estudados. Foram selecionados os três cenários com os melhores desempenhos de geração do biogás.

Foram construídos três panoramas utilizando os dados calculados por meio da digestão anaeróbia realizada em laboratório. O primeiro contou com dados do cenário RF, que utilizou apenas a levedura fermentada, o segundo foi referente ao cenário RFB (1:4,5), que

continha a mistura de levedura fermentada e bagaço de malte numa proporção semelhante à encontrada na indústria, e o terceiro, referente ao cenário RB, que utilizou apenas o bagaço de malte.

De posse da geração média de bagaço de malte e levedura fermentada, calculou-se a possível produção mensal de metano na cervejaria, via digestão anaeróbia, usando os dados de cada um dos três panoramas montados. Os valores foram dispostos na Tabela 12:

**Tabela 12 - Quantificação dos resíduos e possíveis taxas de produção de metano gerado.**

	Geração média de resíduos por mês (kg/mês)		Taxa de produção mensal de metano na cervejaria (m <sup>3</sup> de CH <sub>4</sub> /mês)
Levedura fermentada	600	Cenário RF	30,04
		Cenário RFB (1:4,5)	125,57
Bagaço de malte	2843	Cenário RB	94,24

Fonte: Autora, 2021.

A disponibilidade de resíduos influencia diretamente na produção metanogênica. A levedura fermentada apresenta uma menor contribuição de volume de metano gerado (30,04 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/mês), mesmo apresentando o melhor resultado quando se refere a produção acumulada de metano ao longo do experimento. Tal fato pode ser explicado pela quantidade desse resíduo produzido pela cervejaria. Já o bagaço de malte, encontrado em maiores quantidades, gerou uma produção acumulada de metano de 94,24 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/mês. Com a mistura dos dois resíduos, no entanto, foi obtida uma maior produção acumulada, com um valor correspondente a 125,57 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/mês, o que demonstra uma maior produção dos resíduos utilizados juntos.

#### 5.4.2 Energia elétrica

A energia elétrica gerada usando o biogás proveniente dos três cenários encontra-se na Tabela 13 abaixo. Foram considerados três acionadores primários com diferentes rendimentos:

**Tabela 13 - Estimativa da energia elétrica produzida.**

Cenários	Energia elétrica	Motores a gás	Turbinas a gás	Microturbinas a gás
RF	Com rendimento inferior (kWh/mês)	79	52	63
RFB (1:4,5)		328	219	263
RB		246	164	197
RF	Com rendimento superior (kWh/mês)	89	79	73
RFB (1:4,5)		372	328	307
RB		279	246	230

Fonte: Autora, 2021.

Quando comparados os diferentes cenários entre si, o RFB (1:4,5) apresentou o valor mais alto de produção de energia elétrica, tanto para o rendimento inferior quanto superior, apresentando com esse último valores de 372 kWh/mês com o uso de motores a gás, 328 kWh/mês usando turbinas a gás e 307 kWh/mês com a utilização de microturbinas a gás. O cenário usando o metano proveniente do cenário RB apresentou o segundo melhor desempenho, com valores de rendimento superior de 279, 246 e 230 kWh/mês com o uso de motores a gás, turbinas a gás e microturbinas a gás, respectivamente. Ficando o cenário RF com os valores menos favoráveis para sua utilização, com valores referentes ao uso de motores a gás, turbinas a gás e microturbinas a gás, de 89, 79 e 73 kWh/mês, respectivamente. Em função da sua eficiência de conversão, os motores a gás garantiriam uma maior geração de energia elétrica para todos os três cenários

No entanto, para eleger a tecnologia mais adequada para a indústria, é importante considerar alguns outros fatores (por exemplo, o custo dos acionadores) que podem auxiliar na busca da forma de conversão mais adequada.

#### 5.4.3 Aproveitamento energético

Para verificar quanto da demanda energética da indústria seria suprida pela energia elétrica gerada por cada acionador primário estudado, os valores obtidos com o rendimento superior dos acionadores foram comparados com o consumo médio mensal da empresa no ano de 2020, como mostra a Tabela 14.

**Tabela 14 - Aproveitamento energético possível do metano.**

Cenários		Energia elétrica gerada por mês (kWh)	Consumo médio de energia da fábrica no mês (kWh)	% consumo suprido
RF	Motores a gás	89		1
	Turbinas a gás	79		1
	Microturbinas a gás	73		1
RFB (1:4,5)	Motores a gás	372		4
	Turbinas a gás	328	10425,92	3
	Microturbinas a gás	307		3
RB	Motores a gás	279		3
	Turbinas a gás	246		2
	Microturbinas a gás	230		2

Fonte: Autora, 2021.

De acordo com os dados apresentados, os resíduos utilizados são capazes de suprir até 4% do consumo médio mensal da cervejaria. Esse valor baixo pode ser justificado pelo pequeno volume de resíduos gerado e utilizáveis para produção de biogás e pela perda energética que ocorre durante o processo de conversão do biogás em energia elétrica, levando em consideração que o rendimento da melhor tecnologia analisada é de 34%. Para fins de comparação, em um trabalho no ano de 2015, onde se estudou o potencial de produção energética do biogás do bagaço de malte residual de uma cervejaria em Cuba, Lafargue e Ríos (2015) concluíram ser possível uma economia de 9,4% no consumo de energia elétrica da indústria através do uso do gás.

Os resultados, encontrados por meio dos cálculos para a obtenção da potência elétrica resultante da biodigestão como tecnologia de tratamento de resíduos cervejeiros, indicam um caminho para o aproveitamento energético de parte dos resíduos gerados. Mesmo suprimindo uma porcentagem diminuta da energia requerida pela indústria, o não aproveitamento dos restos do processo produtivo pode se caracterizar como desperdício energético. Ademais, o biogás pode ser utilizado para gerar eletricidade em horários em que a concessionária de energia elétrica cobra valores mais elevados no preço da tarifa<sup>1</sup>, potencializando outras estratégias de redução de gastos com a compra de energia. Contudo, é importante ressaltar a necessidade da consideração de aspectos ambientais e econômicos para uma definição precisa da viabilidade da aplicação das opções tecnológicas aqui analisadas.

<sup>1</sup> O custo energético em horários de ponta é mais elevado quando comparado aos demais períodos do dia devido à sobrecarga dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Partindo da produção de energia elétrica obtida através dos cálculos anteriores, determinou-se o potencial de recuperação da energia do biogás resultante da biodigestão do bagaço de malte e levedura fermentada. No entanto, outras soluções podem ser apresentadas para o aproveitamento energético do biogás. Uma das opções é sua utilização na caldeira- que auxilia no aquecimento da água utilizada na etapa de mosturação, indispensável para o processo de fabricação- alimentada com gás natural. De acordo com a resolução ANP nº 16/2008, que estabelece os parâmetros de qualidade para o GN, o teor de metano deve representar um mínimo de 85% da sua composição. Assim, após passar por um processo de purificação, o biogás pode passar a ser usado como combustível queimado nas caldeiras.

Com base no consumo médio mensal de gás natural, de 800 m<sup>3</sup> para o ano de 2020, dos quais cerca de 680 m<sup>3</sup> correspondem a metano, e nos dados de vazão média mensal de biogás produzidos a partir dos substratos utilizados, foi calculado o quanto da necessidade de energia térmica da indústria poderia ser atendida com a aplicação do biogás direcionada para as caldeiras, como pode ser observado na Tabela 15:

**Tabela 15 - Consumo de energia térmica suprida com o uso do biogás.**

Cenários	Volume de CH <sub>4</sub> no gás natural utilizado em um mês (m <sup>3</sup> )	Produção de CH <sub>4</sub> proveniente da digestão anaeróbia (m <sup>3</sup> /mês)	Consumo suprido (%)
RF		30,5	4,5
RFB (1:4,5)	680	127,3	18,7
RB		95,5	14,1

Fonte: Autora, 2021.

Direcionar o uso do biogás proveniente do cenário RFB (1:4,5) para gerar energia térmica nas caldeiras poderia proporcionar uma situação capaz de suprir até 18,7% do total mensal de gás natural requerido pela cervejaria. Assim, quase um quinto da demanda de gás natural exigida pela fábrica poderia ser suprida com a utilização do metano dos resíduos do próprio local.

Os cenários RF e RB poderiam satisfazer, respectivamente, 4,5% e 14,1% da exigência mensal de gás natural. De acordo com a Agência Reguladora de Serviços Públicos do Estado de Alagoas (ARSAL), o valor da tarifa para concessão de gás natural no estado corresponde a R\$ 2,18/m<sup>3</sup> (ARSAL, 2021). Com a utilização do biogás nas caldeiras da cervejaria, usando a produção do cenário RFB (1:4,5), seria possível uma economia de R\$ 277,55 na compra mensal de gás natural, o equivalente a R\$ 3.330,60 por ano. Usando o metano gerado nos

cenários RF e RB, poderiam ser feitas economias mensais de R\$ 66,39 e R\$208,29, respectivamente; o equivalente a R\$796,68 e R\$ 2.499,48 por ano.

## 6 CONCLUSÕES

Visando a valorização e o reaproveitamento de resíduos industriais por meio da produção de biogás, foram quantificados o bagaço de malte e a levedura fermentada resultantes do processo de fabricação de uma cervejaria localizada no estado de Alagoas, no ano de 2020. Esses resíduos foram utilizados como substratos para o processo de digestão anaeróbia para a obtenção de biogás. Um estudo do aproveitamento energético desse gás dentro da cervejaria foi realizado, com o propósito de analisar a viabilidade do seu uso para o suprimento das necessidades energéticas do processo produtivo da unidade.

Para a análise de aproveitamento energético, foram elaborados cinco cenários para a avaliação da produção acumulada de metano. O maior valor foi registrado no cenário RF, onde a levedura fermentada foi utilizada como único substrato, atingindo um valor de 319,1 mL ao final do estudo. O segundo melhor resultado foi do cenário RFB (1:4,5), que utilizou uma mistura de levedura fermentada com bagaço de malte em uma proporção equivalente à encontrada na indústria analisada, alcançando uma produção de metano de 254,2 mL. O cenário RB, que utilizou como substrato somente o bagaço de malte, conseguiu uma produção de 223,4 mL, o terceiro melhor desempenho. Os cenários RFB (1:9), RFB (1:2) e RC produziram 218,9 mL, 168,4 mL e 135 mL de  $\text{CH}_4$ , respectivamente.

O melhor valor de BMP foi alcançado no cenário RF, com 304,7 mL  $\text{CH}_4/\text{g}$  SV. O cenário que simulou as condições reais de geração de resíduos da cervejaria estudada, o RFB (1:4,5), apresentou um BMP de 198,7 mL  $\text{CH}_4/\text{g}$  SV. O cenário RB obteve um resultado de 128,8 mL/g.

Três tecnologias diferentes (motores a gás, turbinas a gás e microturbinas a gás) foram usadas para estimar a conversão energética do biogás. Com isso, foi calculada a potência elétrica em cada um dos três melhores cenários para a geração de metano (RFB (1:4,5), RF e RB). Conforme esperado, em virtude da sua capacidade de conversão energética, os motores a gás tiveram a melhor performance. Assim, com o uso deste tipo de acionador primário, o cenário RFB geraria uma potência elétrica de 372 kWh/mês, o RF 279 kWh/mês e o RB 89 kWh/mês.

A cervejaria apresentou um consumo médio mensal de energia elétrica de 10425,92 kWh/mês no ano de 2020. De acordo com este resultado, seria possível suprir o equivalente 4% da demanda por energia elétrica mensal da unidade, utilizando motores a gás alimentados com biogás provenientes do cenário RFB (1:4,5). Embora esta porcentagem represente uma

parcela pequena do consumo da cervejaria, esta estratégia conseguiria otimizar os valores gastos com a aquisição de energia elétrica se fosse realizada para alimentar a fábrica em horários de ponta, quando a tarifa da concessionária elétrica é mais alta.

O consumo médio mensal de gás natural da cervejaria, utilizado como combustível para o aquecimento da caldeira, foi de cerca  $800 \text{ m}^3 \cdot \text{mês}^{-1}$  para o ano de 2020. Este gás natural poderia ser substituído, parcialmente, pelo biogás gerado pelos substratos analisados no presente estudo. O cenário RFB (1:4,5) poderia prover até 18,7% do total mensal de gás natural requerido pela cervejaria. Com o uso dos cenários RF e RB, poderia ser suprida uma parcela de 4,5% e 14,1%, respectivamente, da necessidade da indústria. Deste modo, com o uso do metano proveniente do cenário RFB (1:4,5), uma economia de R\$ 3.330,60 por ano poderia ser alcançada na compra de gás natural.

A partir dos resultados obtidos ao longo do estudo, foi mostrado como a produção de biogás, derivada dos substratos da indústria, permite a elaboração de estratégias através das quais a empresa pode agregar valor aos seus resíduos e gerar um melhor aproveitamento de recursos naturais e financeiros.



## **7 PERSPECTIVAS FUTURAS**

Como perspectivas futuras, pretende-se realizar uma avaliação da viabilidade econômica da implementação de cada uma das tecnologias analisadas nesta dissertação para conversão do biogás em energia térmica e elétrica, considerando custos de implantação e operação, a fim de encontrar a tecnologia mais adequada, do ponto de vista econômico, para uma possível utilização na fábrica.

Uma outra proposta de continuidade do presente estudo consiste na elaboração de um inventário de GEE para a cervejaria, junto com a análise dos ganhos trazidos pela utilização do biogás, no que diz respeito à redução da emissão desses gases, visando auxiliar com dados concretos a busca por ferramentas que proporcionem uma redução de impactos ao meio ambiente atrelados às emissões da indústria.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, K. S. F.; GUIM, A.; CARVALHO, F. F. F.; FERREIRA, M. de A.; MONNERAT, J. P. I. do. S.; FERNANDES, J. V. C.; LIMA, A. C. C. P.; DOS SANTOS, C. C. C.; DA SILVA NETO, J. F. Effects of additives in wet brewery residue silage on lamb carcass traits and meat quality. **Tropical Animal Health and Production**, v. 53, n. 1, p. 85, 2021.
- AKUNNA, J. C. Anaerobic treatment of brewery wastes. *In: **Brewing Microbiology: Managing Microbes, Ensuring Quality and Valorising Waste**. [S. l.]: Elsevier, 2015. p. 407–424.*
- ALMOMANI, F. Prediction of biogas production from chemically treated co-digested agricultural waste using artificial neural network. **Fuel**, v. 280, p. 118573, 2020.
- ANGELIDAKI, I.; ALVES, M.; BOLZONELLA, D.; BORZACCONI, L.; CAMPOS, J. L.; GUWY, A. J.; KALYUZHNYI, S.; JENICEK, P.; VAN LIER, J. B. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. **Water Science and Technology**, v. 59, n. 5, p. 927–934, 2009.
- ARSAL. **Resolução ARSAL nº 04, de 02 fevereiro de 2021**. [s. l.], 2021a. Disponível em: <http://www.arsal.al.gov.br/>. Acesso em: 28 jul. 2021.
- ASGHARIAN, P.; NOROOZIAN, R. Modeling and simulation of microturbine generation system for simultaneous grid-connected/islanding operation. *In: 2016, **2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering, ICEE 2016**. : IEEE, 2016. p. 1528–1533.*
- BARENDAR, P.; KHARE, V.; NEMA, S. Biogas energy system. *In: **Design and Optimization of Biogas Energy Systems**. 1. ed. [S. l.]: Elsevier, 2020. p. 1–31.*
- BOCHMANN, G.; DROSG, B.; FUCHS, W. Anaerobic digestion of thermal pretreated brewers' spent grains. **Environmental Progress and Sustainable Energy**, v. 34, n. 4, p. 1092–1096, 2015.
- BRASIL, V. C. B.; GUIMARÃES, B. P.; EVARISTO, R. B. W.; CARMO, T. S.; GHESTI, G. F. Buckwheat (*Fagopyrum esculentum moench*) characterization as adjunct in beer brewing. **Food Science and Technology (Brazil)**, v. 41, n. suppl 1, p. 265–272, 2021.
- BREEZE, P. Microturbines. *In: **Gas-Turbine Power Generation**. [S. l.]: Elsevier, 2016. p. 77–82.*

ČATER, M.; FANEDL, L.; MALOVRH, Š.; MARINŠEK LOGAR, R. Biogas production from brewery spent grain enhanced by bioaugmentation with hydrolytic anaerobic bacteria. **Bioresource Technology**, v. 186, p. 261–269, 2015.

CAVALCANTI, I. F. de A.; FERREIRA, N. J.; DIAS, M. A. F. da S.; SILVA, M. G. A. J. da. **Tempo e Clima no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.  
 CERVEBRASIL. **ANUÁRIO 2016 - CervBrasil**. [S. l.: s. n.]. Disponível em: [http://www.cervbrasil.org.br/novo\\_site/anuarios/CervBrasil-Anuario2016\\_WEB.pdf](http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/anuarios/CervBrasil-Anuario2016_WEB.pdf). Acesso em: 22 out. 2021.

CERVIERI JUNIOR, O. Panoramas Setoriais 2030 Bebidas. *In: Panoramas setoriais 2030: desafios e oportunidades para o Brasil*. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social Descrição:, 2017. p. 78.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2ª ed. Belo Horizonte: UFMG, v. 5, 2016.

CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; GASTALDI, M. An economic analysis of biogas-biomethane chain from animal residues in Italy. **Journal of Cleaner Production**, v. 230, p. 888–897, 2019.

DALPAZ, R.; KONRAD, O.; CÂNDIDO DA SILVA CYRNE, C.; PANIS BARZOTTO, H.; HASAN, C.; GUERINI FILHO, M. Using biogas for energy cogeneration: An analysis of electric and thermal energy generation from agro-industrial waste. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 40, p. 100774, 2020.

DAMRONGSAK, D.; CHAICHANA, C. Biogas initiative from municipal solid waste in northern Thailand. **Energy Reports**, v. 6, p. 428–433, 2020.

ELSHANI, A.; PEHLIVANI, K.; KELMENDI, B.; CACAJ, I. Possibility and determination of the use of CO<sub>2</sub> produced by the production of beers. **Journal of Pharmaceutical Sciences and Research**, v. 10, n. 5, p. 1229–1230, 2018.

EUROPEAN BIOGAS ASSOCIATION. **European Biogas Association Annual report 2019 10 years promoting renewable gas**. Bruxelas: relatório anual, 2019.

FU, S. F.; XU, X. H.; DAI, M.; YUAN, X. Z.; GUO, R. B. Hydrogen and methane production from vinasse using two-stage anaerobic digestion. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 107, n. 189, p. 81–86, 2017.

FUESS, L. T. **Biodigestão anaeróbia termofílica de vinhaça em sistemas combinados do tipo acidogênico-metanogênico para potencialização da recuperação de bioenergia em biorrefinarias de cana-de-açúcar de primeira geração**. 2017 - Tese (Doutorado em

Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

FURFARI, S. The energy system. *In: Oil and Gas Journal*. [S. l.]: Elsevier, 2007. v. 105p. 19.

GIELEN, D.; BOSHELL, F.; SAYGIN, D.; BAZILIAN, M. D.; WAGNER, N.; GORINI, R. The role of renewable energy in the global energy transformation. **Energy Strategy Reviews**, v. 24, n. Janeiro, p. 38–50, 2019.

GONÇALVES, I. C.; FONSECA, A.; MORÃO, A. M.; PINHEIRO, H. M.; DUARTE, A. P.; FERRA, M. I. A. Evaluation of anaerobic co-digestion of spent brewery grains and an azo dye. **Renewable Energy**, v. 74, p. 489–496, 2015.

GOMEZ, C. C. Biogas as an energy option. *In: The Biogas Handbook: Science, Production and Applications*. Alemanha: Elsevier, 2013. p. 1–16.

GUERINI FILHO, M.; LUMI, M.; HASAN, C.; MARDER, M.; LEITE, L. C. S.; KONRAD, O. Energy recovery from wine sector wastes: A study about the biogas generation potential in a vineyard from Rio Grande do Sul, Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 29, n. 2018, p. 44–49, 2018.

HOLLIGER, C. *et al.* Towards a standardization of biomethane potential tests. **Water Science and Technology**, v. 74, n. 11, p. 2515–2522, 2016.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Genebra: [s. n.], 2014. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf). Acesso em: 20 nov. 2020.

IPCC. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Genebra: [s. n.], 2007. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4\\_syr\\_full\\_report.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf). Acesso em: 20 nov. 2020.

ISLAM, M. M.; HASANUZZAMAN, M.; PANDEY, A. K.; RAHIM, N. A. Modern energy conversion technologies. *In: Energy for Sustainable Development*. [S. l.]: Elsevier, 2020. p. 19–39.

HERNÁNDEZ, S. J.; GONZÁLEZ, A. C. Assessing the Impact of Biogas on the Energy Sustainability of an Urban Restaurant in Mexico. **Ingeniería, Investigación y Tecnología**, v. 17, n. 1, p. 61–71, 2016.

KIVAISI, A. K.; RUBINDAMAYUGI, M. S. T. The potential of agro-industrial residues for production of biogas and electricity in Tanzania. **Renewable Energy**, v. 9, n. 1- 4 SPEC. ISS., p. 917–921, 1996.

KOCH, K.; HAFNER, S. D.; WEINRICH, S.; ASTALS, S.; HOLLIGER, C. Power and Limitations of Biochemical Methane Potential (BMP) Tests. **Frontiers in Energy Research**, v. 8, p. 1–4, 2020.

KRARTI, M. Integrated Design of Communities. *In: Optimal Design and Retrofit of Energy Efficient Buildings, Communities, and Urban Centers.* [S. l.]: Elsevier Inc., 2018. p. 385–470.

KRZYWIKA, A.; SZWAJA, S. Putrid Potatoes as Biomass Charge to an Agricultural Biomass-to-Biogas Power Plant. **Energy Procedia**, v. 118, p. 40–45, 2017.

LAFARGUE, T. A.; RÍOS, L. L.. Propuesta tecnológica para el aprovechamiento energético del bagazo de cebada malteada de la cervecería Hatuey. **Tecnología Química**, v. 35, n. 3, p. 256–270, 2015.

LIMA, A. C. G.; PASSAMANI, F. C. **Avaliação Do Potencial Energético Do Biogás Produzido No Reator Uasb Da Ete-Ufes**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

LIMA, G. P. **Produção de bio-hidrogênio a partir de frutas e vegetais residuais em reatores anaeróbios em batelada**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020.

MAPA. **Anuário da cerveja 2020 - Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/com-crescimento-de-14-4-em-2020-numero-de-cervejarias-registradas-no-brasil-passa-de-1-3-mil/anuariocerveja2.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2021.

MARAFON, A. C.; SALOMON, K. R.; AMORIM, E. L. C.; PEITER, F. S. Use of sugarcane vinasse to biogas, bioenergy, and biofertilizer production. *In: Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives.* [S. l.]: Elsevier, 2019. p. 179–194.

MARONEZE, M. M.; ZEPKA, L. Q.; VIEIRA, J. G.; QUEIROZ, M. I.; JACOB-LOPES, E. A tecnologia de remoção de fósforo: Gerenciamento do elemento em resíduos industriais. **Revista Ambiente e Agua**, v. 9, n. 3, p. 445–458, 2014.

MATHIAS, T. R. S.; MELLO, P. P. M.; SERVULO, E. F. C. Caracterização De Resíduos Cervejeiros. *In*: 2015, São Paulo. **Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2014. p. 3805–3812.

MET OFFICE. **What is climate change?**. [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.metoffice.gov.uk/weather/climate-change/what-is-climate-change>. Acesso em: 3 nov. 2020.

MILANEZ, A. Y.; GUIMARÃES, D. D.; MAIA, G. B. da S.; SOUZA, J. A. P. de; LEMOS, M. L. F. Biogás de resíduos agroindustriais : panorama e perspectivas. *In*: **Biogás | BNDES Setorial 47**. [S. l.]: Departamento do Complexo Agroalimentar e de Biocombustíveis da Área de Indústria e Serviços do BNDES, 2018. v. 47p. 221–276.

NADALETI, W. C. Utilization of residues from rice parboiling industries in southern Brazil for biogas and hydrogen-syngas generation: Heat, electricity and energy planning. **Renewable Energy**, v. 131, p. 55–72, 2019.

NOAA. **Global Monitoring Laboratory, Carbon Cycle Greenhouse Gases: Trends in Atmospheric CO<sub>2</sub>**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>. Acesso em: 3 nov. 2020.

NOROOZIAN, R.; ASGHARIAN, P. Microturbine Generation Power Systems. *In*: **Distributed Generation Systems: Design, Operation and Grid Integration**. [S. l.]: Elsevier, 2017. p. 149–219.

OGEDA, T. L.; PETRI, D. F. S. Hidrólise Enzimática de Biomassa. **Química Nova**, v. 33, n. 7, p. 1549–1558, 2010.

OLAJIRE, A. A. The brewing industry and environmental challenges. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 102817, 2012.

OLIVEIRA, A. M.; AMORIM, N. C. dos S.; AMORIM, E. L. C.; SALOMON, K. R. Two phases fermentative process for hydrogen and methane production from cassava wastewater. **Journal of Health & Biological Sciences**, v. 5, n. 2, p. 137, 2017.

OLIVEIRA, J. V.; ALVES, M. M.; COSTA, J. C. Biochemical methane potential of brewery by-products. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 20, n. 2, p. 435–440, 2018.

OTLES, S.; SAKALLI, A. Industry 4.0: The Smart Factory of the Future in Beverage Industry. *In*: **Production and Management of Beverages**. [S. l.]: Elsevier, 2019. p. 439–469.

PARSAEE, M.; KIANI DEH KIANI, M.; KARIMI, K. A review of biogas production from sugarcane vinasse. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, p. 117–125, 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**. 152 p. Dissertação de Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo - PIPGE, 2006.

RABONI, M.; URBINI, G. Production and use of biogas in Europe: a survey of current status and perspectives. **Revista Ambiente e Agua**, v. 9, n. 3, p. 445–458, 2014

RACHWAŁ, K.; WAŚKO, A.; GUSTAW, K.; POLAK-BERECKA, M. Utilization of brewery wastes in food industry. **PeerJ**, v. 8, p. e9427, 2020.

ROBERTS, W. O. The Genesis Strategy Climate and Global Survival. **Interdisciplinary Science Reviews**, New York, v. 1, n. 3, p. 268–269, 2012.

ROSKILLY, A.; WANG, Y.; MIKALSEN, R.; YU, H. Use of biofuels in a range of engine configurations. *In: Comprehensive Renewable Energy*. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2012. v. 5p. 343–356.

ROVEROTO, G. P.; TELES, J. C.; VUITIK, G. A.; BATISTA, J. S. D. S.; BARANA, A. C. Craft Brewery Wastewater Treatment: a Fixed-Bed Single-Batch Reactor with Intermittent Aeration to Remove COD and TN. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 64, p. 1–14, 2021.

SANTIAGO, H. da S.; SANTIAGO, E. L. G. Potencial energético utilizando a produção de biogás em tratamento de esgoto. **Engineering Sciences**, v. 7, n. 1, p. 73–80, 2019.

CETESB - Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. Cervejas e Refrigerantes. São Paulo: [s. n.], 2005. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 15 nov. 2022.

SANTOS, I. F. S.; BRAZ VIEIRA, N. D.; DE NÓBREGA, L. G. B.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 131, p. 54–63, 2018.

SCHNEIDER, S. H.; MESIROW, L. E. **The Genesis Strategy: Climate and Global Survival**. 1. ed. New York: Plenum Press, 1976. v. 1

SINDICERV. **O setor em números - SINDICERV**. Disponível em: <https://sindicerv.com.br/o-setor-em-numeros/>. Acesso em: 21 jul. 2021.

STEPHANIE, H. **The Handbook of Microturbine Generators**. Oklahoma: PennWell, 2003.

SUHARTINI, S.; NURIKA, I.; PAUL, R.; MELVILLE, L. Estimation of Biogas Production and the Emission Savings from Anaerobic Digestion of Fruit-based Agro-industrial Waste and Agricultural crops residues. **Bioenergy Research**, v. 14, n. 3, p. 844–859, 2020.

TILIO NETO, P. de. **Ecopolítica das mudanças climáticas: o IPCC e o ecologismo dos pobres**. 1. ed. Rio de Janeiro: Centro Edelstein de Pesquisas Sociais, 2010. 155 p.

TJØRVE, K. M. C.; TJØRVE, E. The use of Gompertz models in growth analyses, and new Gompertz-model approach: An addition to the Unified-Richards family. **PLoS ONE**, v. 12, n. 6, p. e0178691, 2017.

VILVERT, A. J.; SALDEIRA JUNIOR, J. C.; BAUTITZ, I. R.; ZENATTI, D. C.; ANDRADE, M. G.; HERMES, E. Minimization of energy demand in slaughterhouses: Estimated production of biogas generated from the effluent. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 120, p. 11, 2019.

VINET, L.; ZHEDANOV, A. A “missing” family of classical orthogonal polynomials. **Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical**, v. 44, n. 8, p. 1689–1699, 2011.

VURAL, G. How do output, trade, renewable energy and non-renewable energy impact carbon emissions in selected Sub-Saharan African Countries? **Resources Policy**, v. 69, p. 7, 2020.

WEI, H.; ZIPING, W.; MING, N.; JIANHUA, Z.; YUANBO, G.; CHONG, W. Dynamic modelling and simulation of microturbine generation system for the parallel operation of microgrid. *In: 2009, 1st International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN '09*. : IEEE, 2009. p. 1–8.

ZWIETERING, M. H.; JONGENBURGER, I.; ROMBOUTS, F. M.; VAN'T RIET, K. Modeling of the bacterial growth curve. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 56, n. 6, p. 1875–1881, 1990.