



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
UNIDADE ACADÊMICA CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA



ISADORA BASTOS RUEGER

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS GERADO NA DIGESTÃO  
ANAERÓBIA DA BIOMASSA PROVENIENTE DE UMA CERVEJARIA  
ARTESANAL**

Maceió  
2021

ISADORA BASTOS RUEGER

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS GERADO PELA DIGESTÃO  
ANAERÓBIA DA BIOMASSA PROVENIENTE DE UMA CERVEJARIA  
ARTESANAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim

Coorientador: Msc. Gabryel Pontes Lima

Maceió  
2021

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

Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

- R919a Rueger, Isadora Bastos.  
Aproveitamento energético do biogás gerado na digestão anaeróbica da biomassa proveniente de uma cervejaria artesanal / Isadora Bastos Rueger. – 2021.  
45 f. : il. color.
- Orientador: Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim.  
Coorientador: Gabryel Pontes Lima.  
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2021.
- Bibliografia: f. 42-45.
1. Indústria cervejeira. 2. Bagaço de malte. 3. Digestão anaeróbica. 4. Biogás. 5. Energia renovável. 6. Aproveitamento energético. I. Título.

CDU: 66.0: 620.91

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Regina e Alexandre, por todo o amor, cuidado, carinho, oportunidades. Minha jornada não seria a mesma sem seus incentivos e esforços para que eu chegasse até aqui. Vocês são uma inspiração diária para mim e eu sou eternamente grata pelo papel que sempre exerceram. Essa conquista é nossa!

A minha vó Lene e tia Ana, pilares na minha vida e duas das maiores incentivadoras que tive durante o curso de Engenharia Química. Meu amor por vocês é imensurável!

A toda minha família, pelos ensinamentos e exemplo, que tiveram um papel único na minha formação como pessoa. Sou grata pelo carinho de cada um.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Lucena, por todo o suporte, atenção e encorajamento, que foram essenciais para dar continuidade a este trabalho num período tão difícil.

Ao meu co-orientador, Gabryel e as colegas Hamyne e Nadjane, por toda a ajuda, pelas reuniões e dúvidas tiradas, que foram diferenciais para a construção desse trabalho.

A minha irmã e companheira de TCC, Ana Lara, por ter sido força em muitos momentos do curso e ter entrado comigo nesse projeto, caminhando ao meu lado e sendo suporte em meio a tantas dúvidas e angústias. Esse momento é nosso!

À Carol Nonô, por ser uma pessoa incrivelmente solícita e disposta a ajudar em todos os momentos. Sem você esse trabalho não seria!

As minhas irmãs, Natasha, Fernanda, Gabriela e Stephanie, verdadeiros presentes que a vida colocou em meu caminho e que sempre foram amor, cuidado, paciência, suporte e companheirismo. Obrigada por serem essas pessoas incríveis!

Aos meus companheiros da graduação, Carol, Leticia, Wallisson, Nathália, Isabela, Marília, Isabelle e Rayssa, pelas tardes no Bira, os risos no CAEQ, os almoços no shopping. Nem todos seguimos o mesmo caminho, mas o meu PI sempre estará no meu coração.

A Universidade Federal de Alagoas, pelo ensino gratuito e de qualidade, pelas diversas oportunidades que me foram dadas nesse período de graduação, pelo papel essencial para a construção da pessoa que sou e da profissional que serei. A UFAL resiste!

A todos que, de alguma forma, colaboraram para essa conquista. Meu mais verdadeiro obrigado!

*“Caminho se conhece andando então vez em quando é bom se perder”*  
(Chico César)

## RESUMO

A indústria cervejeira tem mostrado cada vez mais seu potencial, sendo uma das que mais cresce e se destaca no cenário mundial. Tal fato traz uma preocupação ambiental associada à elevada geração de resíduos, sendo o bagaço do malte (BSG) a maior parcela dentre estes. A digestão anaeróbia surge como uma opção não só para o tratamento desse resíduo, mas também para a produção de biogás, que se caracteriza uma energia renovável e limpa, possuindo diversas aplicações sendo uma delas a utilização nas próprias indústrias. Dessa forma, o presente trabalho visa analisar a digestão anaeróbia como uma forma de agregar valor ao resíduo de uma cervejaria artesanal, fazendo o aproveitamento energético do biogás produzido na mesma. Para a obtenção de resultados, quantificou-se a massa de bagaço do malte produzida em um ano, apresentando uma média diária de 94,77 kg para a soma dos dois rótulos mais representativos em termos de volume de produção da cervejaria. Com dados da produção metanogênica em digestão anaeróbia do bagaço do malte, estimou-se produção de biogás da unidade, sendo esta de 5,99 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>.dia<sup>-1</sup>. Para o aproveitamento energético, calculou-se a potência elétrica gerada considerando motores a gás, turbinas a gás e microturbinas a gás como tecnologias de conversão, podendo esta chegar a 438,53 kWh.mês<sup>-1</sup>. Portanto, o bagaço do malte pode ser utilizado para suprir parcialmente a demanda de energia elétrica da cervejaria artesanal, e ainda pode ser utilizado como combustível para a caldeira responsável pelo aquecimento da água utilizada na mosturação.

**Palavras-chave:** indústria cervejeira, bagaço do malte, produção de biogás, potência elétrica gerada.

## ABSTRACT

The beer industry has increasingly shown its potential, growing more and more and standing out on the world scene. This fact brings an environmental concern associated with high waste generation, with beer spent grain (BSG) being the major part among them. Anaerobic digestion appears as an option not only for the treatment of this waste, but also to produce biogas, which is characterized by being a renewable and clean energy, with several applications, one of which is to be used by the industry itself. In this way, this work intends to analyze anaerobic digestion as a way to add value to the BSG of a craft brewery through the energetic use of the biogas produced. To obtain the results, the bagasse mass produced in one year was quantified, presenting a daily average of  $94.77 \text{ kg}\cdot\text{day}^{-1}$  for the two most representative labels in terms of beer production volume. Using literature data on methanogenic production in anaerobic digestion of BSG, the biogas production estimative of the brewery was  $5.99 \text{ m}^3$  of  $\text{CH}_4\cdot\text{day}^{-1}$ . For energy use, it has been calculated the generation of electric energy considering gas engines, gas turbines and gas microturbines as conversion technologies, which could reach  $438.53 \text{ kWh}\cdot\text{month}^{-1}$ . Therefore, BSG can be used to partially supply the electricity demand in the craft brewery and can also be used as fuel for the boiler responsible for the heating of the water used in the wort preparation.

**Keywords:** beer industry, beer spent grain (BSG), biogas production, generation of electric energy.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Crescimento de cervejarias no Brasil.....	16
Figura 2 – Fluxograma de processo genérico da produção de cerveja.....	16
Figura 3 – Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.....	19
Figura 4 – Matriz energética brasileira em 2019.....	20
Figura 5 – Comparação entre as matrizes energéticas brasileiras e mundiais em 2018.....	21
Figura 6 – Chope Pilsen e IPA.....	26
Figura 7 – Tanques de fermentação e armazenamento da cervejaria artesanal.....	27
Figura 8 – Bagaço do malte gerado na produção.....	27
Figura 9 – Exemplo de destinação do bagaço do malte para fins de alimentação animal.....	28
Figura 10 – Caldeira para produção de vapor utilizado no processo.....	34
Figura 11 – Chiller utilizado para resfriar os tanques.....	34
Figura 12 – Loja da cervejaria artesanal.....	35
Figura 13 – Consumo de energia elétrica da cervejaria artesanal no ano de 2020.....	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização do bagaço do malte na literatura.....	17
Tabela 2 – Estudos anteriores que avaliaram o potencial energético através da digestão anaeróbia de diversos resíduos.....	25
Tabela 3 – Produção volumétrica referente ao ano 2020.....	29
Tabela 4 – Geração de biomassa em uma produção de cerca de 1500 L de cerveja.....	29
Tabela 5 – Produção volumétrica e quantificação da massa de bagaço do malte gerada no ano de 2020.....	32
Tabela 6 – Quantificação de metano produzido no ano de 2020.....	33
Tabela 7 – Estimativa da potência elétrica gerada em motor a gás.....	36
Tabela 8 – Estimativa da potência elétrica gerada em turbinas a gás.....	37
Tabela 9 – Estimativa da potência elétrica gerada em microturbinas a gás.....	37
Tabela 10 – Comparativo entre energia gerada na DA e consumida pela cervejaria.....	38
Tabela 11 – Comparativo entre vazão de metano gerada na DA e consumida pela cervejaria na produção e economia mensal .....	39

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

BMP	Potencial Bioquímica do Metano
BSG	Bagaço do malte
CH <sub>4</sub>	Metano
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
DA	Digestão Anaeróbia
DQO	Demanda química de oxigênio
ETE	Estação de tratamento de efluente
GEE	Gases efeito estufa
H <sub>2</sub> S	Ácido Sulfídrico
IPA	India Pale Ale
NH <sub>3</sub>	Amônia
PCI	Poder calorífico Inferior
pH	Produto hidrogeniônico
PIB	Produto Interno Bruto
ST	Sólidos totais
SV	Sólidos voláteis
UFAL	Universidade Federal de Alagoas

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	12
<b>2. OBJETIVOS</b>	14
2.1 GERAL	14
2.2 ESPECÍFICOS	14
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	15
3.1 INDÚSTRIA CERVEJEIRA	15
<b>3.1.1 Resíduos da indústria cervejeira</b>	17
<b>3.1.2 Bagaço do malte</b>	17
3.2 DIGESTÃO ANAERÓBIA	18
3.3 POTENCIAL BIOQUÍMICO DO METANO (BMP)	19
3.4 BIOGÁS NO BRASIL	20
3.5 PRODUÇÃO DE BIOGÁS COM ÊNFASE EM RESÍDUOS DA INDÚSTRIA CERVEJEIRA	22
3.6 BIOGÁS COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA	23
<b>4. METODOLOGIA</b>	26
4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	26
4.2 OBTENÇÃO DE DADOS E INFORMAÇÕES	28
<b>4.2.1 Produção anual da cervejaria</b>	28
<b>4.2.2 Quantificação da biomassa gerada na produção cervejeira da fábrica</b>	29
<b>4.2.3 Estimativa da produção de Biogás</b>	29
4.3 CONVERSÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA	30
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	32
5.1 PRODUÇÃO DE BAGAÇO DO MALTE DA CERVEJARIA ARTESANAL	32
5.2 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE METANO	33
5.3 CONSUMO ENERGÉTICO DA CERVEJARIA ARTESANAL	33

5.4	GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS.....	36
5.4.1	Motores a gás.....	36
5.4.2	Turbinas a gás.....	36
5.4.3	Microturbinas a gás.....	37
5.5	APROVEITAMENTO ENERGÉTICO.....	38
6.	CONCLUSÕES.....	40
7.	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	41
	REFERÊNCIAS.....	42

## 1. INTRODUÇÃO

Na sociedade atual, a maioria das atividades humanas estão associadas à geração de detritos, sendo a industrial responsável por uma quantidade ainda mais significativa dos mesmos. Tal aspecto gera uma preocupação ambiental, pois estes resíduos, oriundos dos mais diversos processos industriais, possuem em sua maioria alto grau de complexidade, tornando-se assim, um potencial fator de degradação do meio ambiente, se não tratados e descartados conforme as legislações vigentes.

A indústria cervejeira é uma das que mais vem se consolidando no cenário global. O Brasil é um dos maiores consumidores do produto e em termos de produção, o setor impacta em bilhões o Produto Interno Bruto (PIB) do nosso país, que ocupa a posição de terceiro maior fabricante mundial, com 13,3 bi de litros produzidos, atrás, somente, da China (46 bi) e dos Estados Unidos (22,1 bi). Com o crescimento exponencial dessa indústria, surge a preocupação com a geração de efluentes e resíduos por essa atividade (SINDICERV, 2019).

Devido à natureza de suas operações e quantidade significativa de produto fabricado, a indústria cervejeira é caracterizada pela elevada geração de efluentes, que em sua maioria possuem altos teores de carga orgânica e sólidos. Alguns dos impactos ambientais causados pelo setor cervejeiro são a geração de grandes quantidades de resíduos sólidos de etapas como a de filtração, odores da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), emissão de gases de combustão, entre outros (SANTOS & RIBEIRO, 2005).

O bagaço do malte (BSG) compõe a maior fração de resíduo gerado no processo de fabricação da cerveja, representando 85% dos subprodutos obtidos. Devido ao seu perfil rico em proteínas e açúcares, o bagaço do malte é amplamente utilizado como insumo na alimentação de animais. Porém, seu alto teor de umidade e necessidade de tratamentos prévios são vistos como problemáticas para a aplicação do mesmo em fins nutricionais. Surge então a oportunidade de redirecionar o uso dessa biomassa, visando sempre a destinação sustentável da mesma (MUSSATO, 2014).

A grande disponibilidade e valiosa composição química do BSG, torna possível sua utilização em diversas áreas, como nas indústrias de papéis, polímeros, alimentícia e na produção de energia, com destaque para o biogás, que possui alto teor energético e poder calorífico, sendo composto basicamente por metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Este pode ser produzido através da digestão anaeróbia (DA), que, a partir da atividade de

comunidades de microrganismos, converte substratos ricos em matéria orgânica em um efluente tratado e biogás (PIRES et al., 2012).

A DA vem sendo adotada como forma de tratamento de efluentes industriais. Dentre as vantagens de sua utilização, destaca-se elevada redução de carga orgânica dos mesmos, baixo custo de implantação e operação das plantas de tratamento (baixo consumo de energia) e produção de biogás rico em gás metano, se destacando como uma fonte de energia limpa, renovável e com grande potencial de desenvolvimento no nosso país (CHERNICHARO, 1997).

Cada vez mais inserido na matriz energética brasileira, o biogás também representa uma alternativa para suprir a demanda energética de indústrias, que possuem elevados custos inerentes à produção e funcionamento das mesmas. Considerando estes fatores e as características do bagaço do malte, surge a possibilidade de associação da biomassa gerada pela indústria cervejeira ao processo de digestão anaeróbia como forma de obtenção deste biogás, a fim de agregar valor a um subproduto e diminuir os custos de operação das fábricas.

O trabalho desenvolvido visou o estudo teórico da produção de metano em uma cervejaria artesanal, proveniente da digestão anaeróbia do bagaço do malte residual da mesma, assim como a análise da aplicação como fonte de energia na fábrica em questão, podendo esta contribuir com a redução de custos de produção e com a destinação sustentável do seu principal resíduo.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 GERAL

Avaliar o potencial de produção de biogás do bagaço de malte via digestão anaeróbia e seu aproveitamento na geração de energia.

### 2.2 ESPECÍFICOS

- Quantificar a geração de biomassa residual de uma cervejaria artesanal de Maceió-AL;
- Estimar a produção de metano da unidade a partir de digestão anaeróbia do bagaço do malte;
- Avaliar o consumo energético da cervejaria artesanal;
- Estimar a conversão energética da biomassa.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o crescimento populacional desordenado e o elevado grau de industrialização dos bens de consumo utilizados, a problemática de resíduos gerados pela atividade humana em sua vida cotidiana, principalmente na sua necessidade da atividade industrial, se torna ainda mais evidente.

#### 3.1 INDÚSTRIA CERVEJEIRA

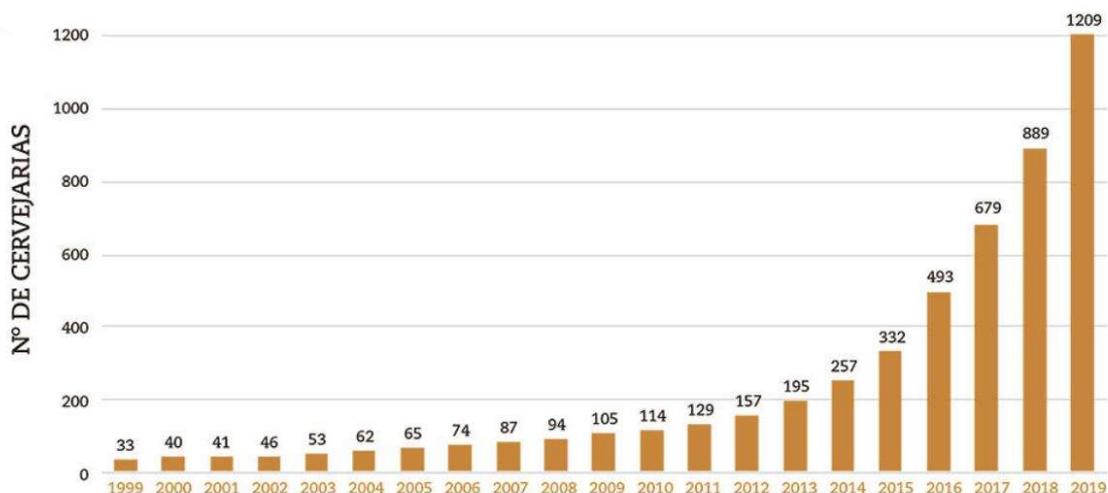
A cerveja é uma das invenções mais antigas do homem. Nascida na Mesopotâmia, de uma suposta fermentação acidental de cereais que inicialmente visava a produção de pães, a cerveja possui um contexto histórico na humanidade. Sendo utilizada até como moeda de troca, na Idade Média essa bebida era uma das mais consumidas nos lares, por ser uma opção barata e acessível, e nos mosteiros, que tiveram um importante papel no desenvolvimento de técnicas para o aperfeiçoamento da produção da mesma (SILVA, 2016).

Por muito tempo, a história da cerveja esteve fortemente ligada à Europa, principalmente pela tradição na produção da mesma na Alemanha e na Inglaterra. Foi neste continente, no século XVI, que foi decretada a Lei da Pureza, determinando a utilização apenas de água, malte, levedura e lúpulo na produção da bebida, ingredientes os quais que se popularizaram e se tornaram os principais utilizados, influenciando na qualidade da cerveja até a atualidade (DANTAS, 2016).

Com a imigração europeia ao Brasil, deu-se a chegada da cerveja e também o início da consolidação da produção da mesma em terreno nacional. As primeiras cervejarias instaladas em nosso país são datadas do século XIX, no Rio de Janeiro por imigrantes alemães. Devido a chegada de tecnologias de refrigeração ao país, a produção de cervejas deixou de se dar em pequenas cervejarias artesanais e ganhou um cunho mais industrial, o que gerou uma explosão no número de cervejarias no início do século XX, sendo este exponenciado pelo processo de substituição de importações (LIMBERGER, 2013).

O aumento do consumo da cerveja em países subdesenvolvidos, gerou um crescimento na produção mundial dessa bebida e o Brasil seguiu essa tendência. Em 2016, ocupou-se o posto de terceiro maior produtor de cerveja no mundo. Atualmente, o setor cervejeiro representa 2% do PIB brasileiro, emprega cerca de 2,7 milhões de pessoas e hoje centenas já se espalham por todo território nacional, em forma de grandes indústrias ou pequenas cervejarias artesanais. A Figura 1 mostra o crescimento das cervejarias no Brasil (MARCUSO & MULLER, 2017; SINDICERV, 2019).

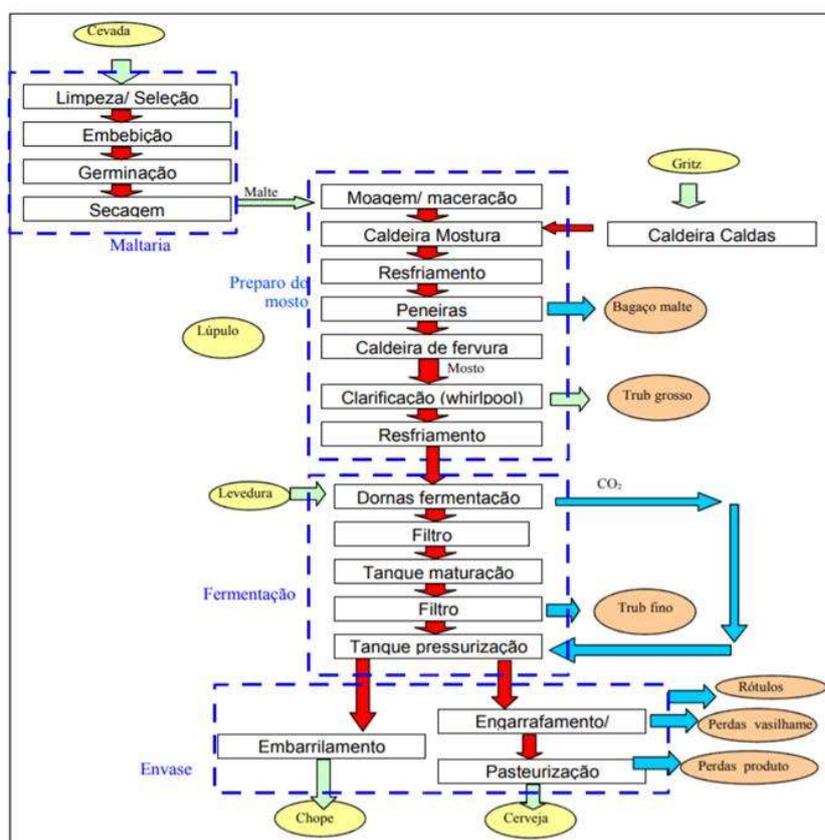
Figura 1 – Crescimento de cervejarias no Brasil



Fonte: BEER ART, 2020.

Em geral, o processo de produção da cerveja se dá através das etapas de maltaria, mosturação, fermentação, maturação e envase. O principal objetivo é a fermentação da cevada, através da conversão dos açúcares presentes no grão em álcool. A Figura 2 apresenta as principais etapas do processo cervejeiro, com as matérias-primas e insumos (entradas) e resíduos gerados (saídas) (SANTOS & RIBEIRO, 2005).

Figura 2 - Fluxograma de processo genérico da produção de cerveja



Fonte: SANTOS & RIBEIRO, 2005.

### 3.1.1 Resíduos da indústria cervejeira

Para atender a grande demanda desse mercado que vem se consolidando, a indústria cervejeira produz bilhões de litros anualmente, o que gera uma elevada quantidade de resíduos. Estima-se que 25% do material utilizado na produção da cerveja se converta em algum tipo de resíduo. Outra característica desse processo é a ampla gama dos subprodutos gerados, sendo os principais resíduos sólidos e os efluentes líquidos (RODRIGUES, 2010; SANTOS & RIBEIRO, 2005).

Devido ao grande número de operações de limpeza, a indústria cervejeira gera grandes montantes de efluentes líquidos, sendo sua maioria com composição dependente dos tipos de cerveja produzidos, presença e tipo de levedura utilizada, qualidade dos processos de filtração e tipos de adjuntos utilizados na produção da cerveja. Já os resíduos sólidos são gerados majoritariamente nas etapas de filtragem e envase. Dentre estes, destacam-se o bagaço do malte, o trub grosso e o trub fino (SANTOS & RIBEIRO, 2005).

### 3.1.2 Bagaço do malte

O bagaço do malte, resíduo gerado na filtração do mosto após a caldeira de mostura, é o principal em termos de quantidade. Estima-se uma faixa de 14 a 20 kg de bagaço de malte a cada 100 L de cerveja produzidos. Trata-se de uma biomassa lignocelulósica, com alto teor de carboidratos, fibras e proteínas, conforme é visto na Tabela 1 (SANTOS & RIBEIRO, 2005).

Tabela 1 – Caracterização do bagaço do malte na literatura

	<b>Bochman et al. (2015)</b>	<b>Vitanza et al. (2016)</b>	<b>Oliveira et al. (2018)</b>
<b>DQO</b>	356,2± 4,5 <sup>a</sup>	1,48 <sup>c</sup>	331±37 <sup>e</sup>
<b>Sólidos Totais</b>	21,1±0,1 <sup>b</sup>	18,7 <sup>d</sup>	219±24 <sup>e</sup>
<b>Sólidos Voláteis</b>	20,1±0,1 <sup>b</sup>	97,5 <sup>d</sup>	210±23 <sup>e</sup>
<b>Proteínas</b>	24,4 ±0,7 <sup>b</sup>	25 <sup>d</sup>	63±3 <sup>e</sup>
<b>Lignina</b>	24,6±1,1 <sup>b</sup>	12,5 <sup>d</sup>	-

<sup>a</sup> g DQO.kg<sup>-1</sup>; <sup>b</sup> % de SV; <sup>c</sup> g DQO.g<sup>-1</sup> ST; <sup>d</sup> % de ST; <sup>e</sup> g.kg<sup>-1</sup>

Fonte: AUTORA, 2021.

Algumas das variadas aplicações que podem ser dadas à essa grande quantidade de resíduo produzida é a utilização do mesmo para a nutrição humana e animal, produção de carvão vegetal, material adsorvente em tratamentos químicos e a produção de energia por queima ou por produção de biogás via fermentação anaeróbia (MATHIAS et al., 2014).

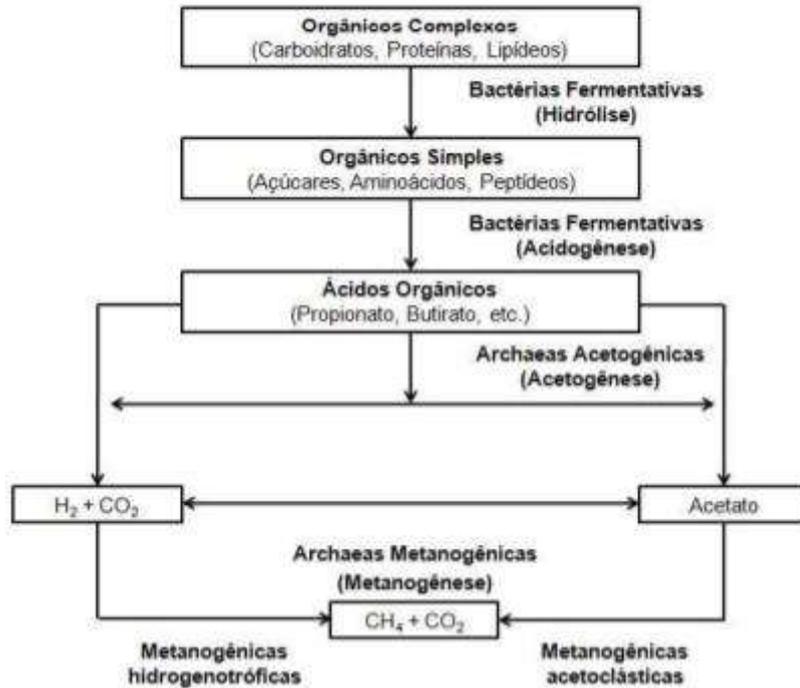
### 3.2 DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia é um processo já amplamente utilizado para o tratamento de esgoto e resíduos industriais. Esse processo utiliza a ação de microrganismos na degradação de resíduos, produzindo um efluente com reduzida carga orgânica e energias em forma de biogás. Alguns já comumente utilizados como substrato para a digestão anaeróbia são provenientes das indústrias alimentícia, sucroalcooleira, de laticínios, cervejeira, além de resíduos da cultura de animais (KORRES et al., 2013).

O tratamento utilizando a digestão anaeróbia se dá primeiramente na decomposição de um material orgânico complexo (carboidratos, proteínas e lipídeos) em compostos orgânicos simples (ácidos orgânicos de cadeias curtas, dióxido de carbono e aminoácidos) por exoenzimas excretadas por bactérias fermentativas. Logo em seguida, as bactérias acetogênicas atuam convertendo os produtos gerados pelo primeiro grupo em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Por fim, as arqueas metanogênicas convertem o acetato e o hidrogênio produzido em metano e dióxido de carbono (CHERNICHARO, 2007).

Esse processo é dividido nas etapas de hidrólise, acidogênese, acetogênese, metanogênese e sulfetogênese (uma rota alternativa que depende do perfil do substrato para ocorrer). A digestão anaeróbica caracteriza-se como um sistema ecológico balanceado, em que todos os microrganismos envolvidos exercem uma função e cada etapa depende do produto da anterior (CHERNICHARO, 2007).

Figura 3 – Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia



Fonte: CHERNICHARO, 2007.

Uma das principais vantagens desse tratamento é a obtenção do biogás, que é composto majoritariamente de metano ( $\text{CH}_4$ ) e gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), e em uma pequena parcela de gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), e amônia ( $\text{NH}_3$ ). Essa composição varia de acordo com o processo, fatores como substrato utilizado, tipo de reator e parâmetros do processo possuem grande influência na mesma. Posteriormente, o biogás produzido pode ser utilizado na geração de energia elétrica, como gás de cozinha, para fins de iluminação e como combustível de transportes (TCHOBANOGLOUS, 2014; KORRES et al., 2013).

### 3.3 POTENCIAL BIOQUÍMICO DO METANO (BMP)

A fim de se conhecer o potencial de produção de metano dos resíduos a serem utilizados como substrato para a digestão anaeróbia, faz-se necessário uma análise que possa avaliar a capacidade de transformação da matéria orgânica contida no gás de interesse. Para isso, utiliza-se o BMP, teste que geralmente é realizado na fase inicial da digestão anaeróbia para se conhecer o volume de metano produzido (HOLLIGER, 2016).

Esse teste é feito em escala de laboratório, em reatores em batelada com o substrato inoculado e sob condições de temperatura e pressão controladas, a fim de se manter o ambiente anaeróbio. Os ensaios duram cerca de 60 dias e durante esse período são realizadas análises do

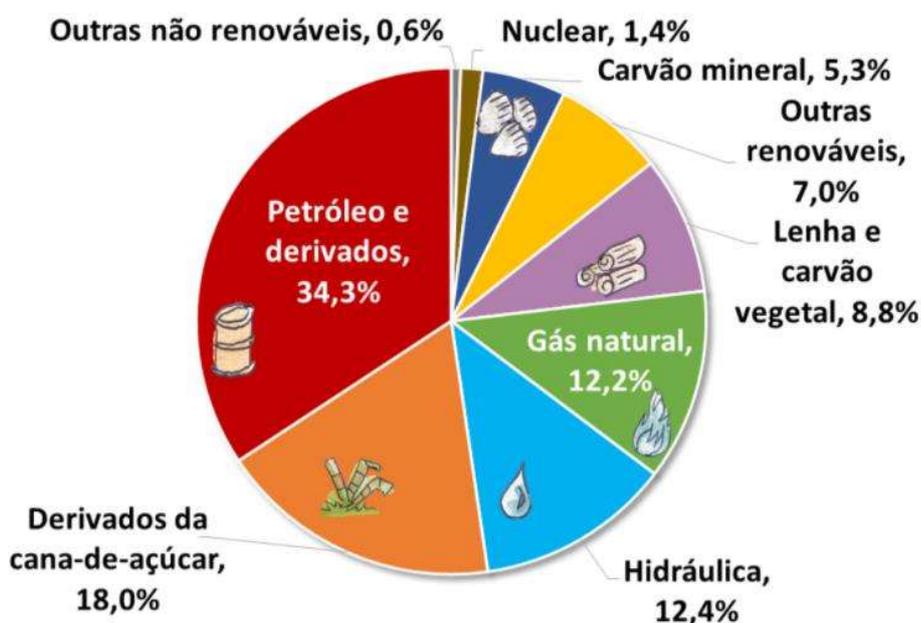
biogás produzido de forma a obter-se informações que auxiliem na elaboração de uma curva que mostre a produção acumulada de metano. A partir da mesma, pode-se avaliar o potencial metanogênico do resíduo utilizado (PEARSE et al., 2018).

Para a obtenção de um teste BMP válido, recomenda-se a padronização de alguns parâmetro e condições, como: cuidados com a origem e o armazenamento do substrato e do inóculo; a preparação e análise das bateladas; as condições de incubação dos ensaios e medição do biogás obtido. Estes se fazem necessários pois, são fatores que podem influenciar fortemente nos resultados (HOLLIGER, 2016).

### 3.4 BIOGÁS NO BRASIL

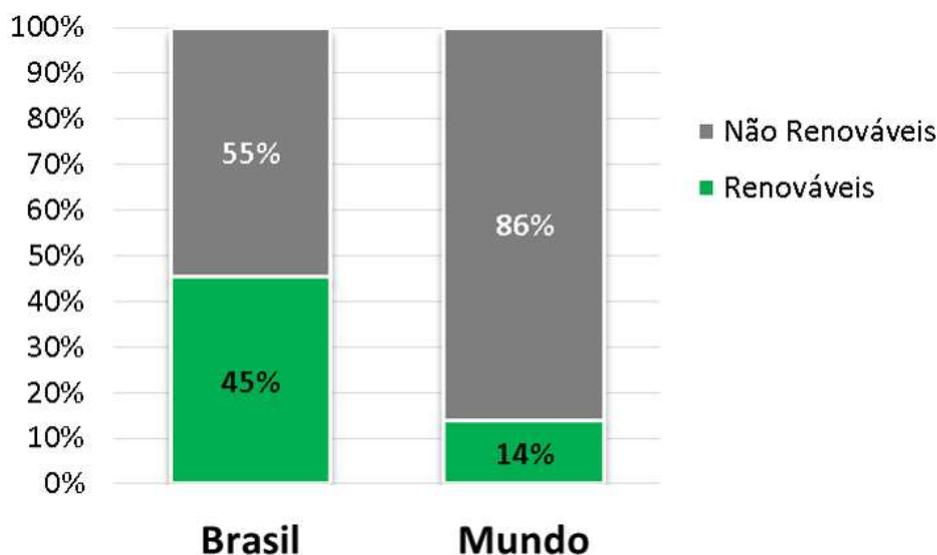
A produção de energia no Brasil possui um aspecto que o diferencia do padrão do resto do mundo: uma das matrizes energéticas mais limpas, sendo cerca de 45% da mesma composta de fontes renováveis, superando a média mundial, de 14% (Figura 4 e 5). Neste cenário, destacam-se a energia hidráulica, a solar, de hidrogênio, eólica, biomassa e biogás, que possibilitam a substituição da matriz fóssil em um futuro próximo (BORSCHIVER & DA SILVA, 2014).

Figura 4 – Matriz energética brasileira em 2019



Fonte: EPE, 2020.

Figura 5 – Comparação entre as matrizes energéticas brasileiras e mundiais em 2018



Fonte: EPE, 2020.

Em um país onde a agropecuária é uma das principais atividades que movimentam a economia, a geração de resíduos desse setor e de outros tornam-se uma preocupação ambiental que pode ser redirecionada para solução energética. A biomassa produzida pode ser utilizada em processos como a digestão anaeróbia, com objetivo de tratar esses resíduos e gerar energia em forma de biogás (ZANETTE, 2009).

O biogás é uma das energias renováveis que mais cresce e se estabelece atualmente. Apesar de sua pequena participação na matriz energética mundial, sua produção caracteriza uma forma de gestão eficiente e inteligente de resíduos orgânicos, gerando energia que pode ser convertida em elétrica e térmica, reduzindo impactos ambientais causados pela utilização de combustíveis fósseis e suas emissões de gases efeito estufa (GEE) (CIBIOGÁS, 2020).

Apesar do grande potencial, a viabilização do biogás como fonte energética no Brasil enfrenta uma série de desafios, como o baixo investimento de setores públicos e privados, a escassez de tecnologias nacionais para a produção do mesmo, a necessidade de capacitação de mão-de-obra para atuar na área. Para a expansão do biogás em nosso país, são necessárias medidas como reconhecimento, apoio por políticas públicas e fortalecimento por iniciativas do setor privado. Estas ajudariam a validar o uso dessa forma alternativa de energia e até ampliar seu uso em domicílios, indústrias, automóveis, entre outras aplicações (MARIANI et al., 2014).

### 3.5 PRODUÇÃO DE BIOGÁS COM ÊNFASE EM RESÍDUOS DA INDÚSTRIA CERVEJEIRA

A utilização de resíduos da indústria cervejeira como substrato para a digestão anaeróbia já é amplamente aplicada. Na Áustria, por exemplo, um terço do bagaço do malte produzido já é destinado a esse fim. Com o objetivo de ampliar utilização do BSG em plantas de biogás, vários estudos vêm sendo realizados, reconhecendo não só o potencial do bagaço do malte como também o de outros resíduos dessa indústria para a geração de metano, uma forma de energia alternativa (KORRES et al., 2013).

Ezeonu & Okaka (1996) estudaram a eficiência da digestão anaeróbia do bagaço do malte em um reator em batelada de 1000 mL operado em uma faixa de temperatura de 28 a 33 °C. Utilizou-se excretos de galinha (20 g) junto ao bagaço do malte (100 g) diluídos em 800 mL de água. O reator foi inoculado com 20 mL de rúmen de vaca. Após 15 dias de operação, obteve-se uma produção total de biogás de 3476 cm<sup>3</sup>/100 g de substrato alimentado, sendo 66% desse valor constituído de metano.

Vitanza et al. (2016) avaliaram o potencial bioquímico de metano (BMP) do bagaço do malte e do excesso de levedura. O experimento foi conduzido em reatores em batelada de 5 L em várias razões substrato/inóculo por um período de 6 a 12 dias, em condições mesofílicas (35 °C) e com auxílio de agitação magnética. Utilizou-se lodo de um digestor anaeróbio de tratamento de águas residuárias para fins de inoculação. A produção específica de metano foi de 0,255 L CH<sub>4</sub>/g DQO para o excesso de levedura e 0,284 L CH<sub>4</sub>/g DQO para o bagaço do malte, o grau de conversão do bagaço do malte foi de 81,1% enquanto que o do excesso de levedura foi de 72,9%.

Oliveira et al. (2018), estudaram o BMP em ensaios com o bagaço do malte e o excesso de levedura separados e juntos, e com a mistura dos dois em co-substrato com diversas porcentagens de glicerol bruto. O trabalho foi realizado em reatores em batelada de 600 mL em uma temperatura de 37°C, utilizando lodo de um reator anaeróbio de tratamento de esgoto de uma cervejaria. Com os resultados obtidos, constatou-se que a maior produção de metano se deu na co-digestão do bagaço do malte e levedura com 10% de glicerol ((573 ± 9) L /kg de SV). É importante destacar que estes resultados dos ensaios de digestão anaeróbia do bagaço do malte foram utilizados como base de cálculo para o presente trabalho.

Bochmann et al. (2015) investigaram a digestão anaeróbia do BSG com e sem pré-tratamentos térmicos do substrato (com temperaturas de 100, 120, 140, 160, 180 e 200 °C), a fim de comparar a produção de metano. Foi realizado um teste BMP em reatores em batelada

(frascos de 500 mL), com temperatura de 37 °C e pH de 7,3, inoculados com uma mistura de lodo de um reator de uma estação de tratamento de águas residuais local e de uma usina de biogás agrícola alimentada com esterco de suíno. Obteve-se uma produção máxima de 493,7 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV com o pré-tratamento térmico do BSG à 140 °C.

A degradação do bagaço do malte pode ser afetada devido sua natureza lignocelulósica, dificultando assim a ação dos microrganismos. Para isso, técnicas de pré-tratamentos vêm sendo desenvolvidas a fim de facilitar a conversão de macromoléculas em moléculas mais simples, possibilitando a digestão anaeróbia. Os pré-tratamentos são divididos em físicos, químicos e biológicos. Os mesmos contribuem também na diminuição do tempo de degradação do resíduo (KORRES et al., 2013).

Conforme visto nos trabalhos citados, existem resultados satisfatórios para a associação do resíduo gerado em indústrias cervejeiras à digestão anaeróbia, gerando biogás com altos teores de metano. A aplicação da DA nessas indústrias pode ser um diferencial econômico e sustentável, trazendo uma solução inteligente para a gestão de resíduos orgânicos associada ao aproveitamento energético do biogás gerado na mesma.

### 3.6 BIOGÁS COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA

O aumento exponencial dos custos de concessão de energia elétrica e de combustíveis e a demanda pelos mesmos vem sendo um fator determinante para a aplicação de tecnologias alternativas para a obtenção destes insumos que são essenciais para o funcionamento de indústrias. O biogás surge como uma alternativa, com geração descentralizada próxima ao ponto de carga, que alivia custos inerentes a produção, podendo até mesmo suprir a demanda energética total das fábricas (SZYMANSKI et al., 2010).

O biogás pode ser aproveitado de diferentes formas: através da queima direta, da conversão em eletricidade, como combustível alternativo visando a injeção em linhas de gás natural, podendo até mesmo substituí-lo quando purificado. A purificação do biogás se faz necessária para atender a especificação da aplicação desejada, aumentar o poder calorífico do gás e padronizar o gás produzido, além de evitar danos aos equipamentos pela presença de subprodutos como ácido sulfídrico (FONSECA, 2019; ZANETTE, 2009).

A partir da digestão anaeróbia, torna-se possível a obtenção do biogás contendo de 50 a 70% de metano, sendo este uma aposta no setor de transportes como combustível veicular. O poder calorífico inferior (PCI) do metano é de aproximadamente 8500 kcal/m<sup>3</sup>. Já o PCI do biogás, sem nenhum tipo de tratamento, é de cerca de 5500 kcal/m<sup>3</sup>, dependendo da quantidade de metano presente na sua composição (SANTOS, 2019).

Para a conversão energética do biogás, ocorre a transformação da energia química contida em suas moléculas em energia mecânica através de um processo de combustão controlada, onde essa energia mecânica ativa um alternador que a converte em energia elétrica. Dentre as tecnologias disponíveis para geração de energia elétrica a partir deste, destacam-se as turbinas a gás e os grupos de geradores de combustão interna. Outra possibilidade para o aproveitamento do biogás é a co-geração, que transforma a energia térmica de um combustível em mais de uma forma útil, como as energias mecânicas (COSTA, 2006).

O biogás já é responsável pela transformação de diversos setores. Em pequenas propriedades, este pode atuar como protagonista na economia circular, agregando valor a resíduos coletados e voltando como fonte de renda para proprietários rurais ou comerciantes locais. Já em escalas industriais, pode ser atrelado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável na Indústria, Inovação e Infraestrutura, além de atuar na redução de custos com energia elétrica, na obtenção de créditos de carbono, entre outros (CIBiogás, 2021)

A exemplo, tem-se a produção de indústrias cervejeiras, que consomem cerca de 26 kWh/hL de energia térmica e 9 kWh/hL de energia elétrica. Utilizando-se todos os resíduos dessa produção e aplicando à digestão anaeróbia, pode-se produzir biogás capaz de gerar cerca de 17 kWh/hL, suprimindo assim aproximadamente 50% da demanda para essas energias, trazendo um retorno financeiro para indústria e uma destinação mais sustentável para os resíduos da mesma (KORRES et al., 2013).

A Tabela 2 mostra alguns trabalhos que analisaram a aplicação de resíduos industriais na digestão anaeróbia como forma de obtenção do biogás para geração de energia elétrica.

Tabela 2 – Estudos anteriores que avaliaram o potencial energético através da digestão anaeróbia de diversos resíduos

<b>Referência</b>	<b>Substrato</b>	<b>Produção de biogás</b>	<b>Potencial elétrico do biogás</b>
<b>Salazar (2014)</b>	Resíduos de uma indústria de bebidas	220 m <sup>3</sup> .dia <sup>-1</sup>	36,70 kWh.dia <sup>-1</sup>
<b>Ferreira (2015)</b>	Resíduos Alimentares	23 m <sup>3</sup> .dia <sup>-1</sup>	Até 2.055 kWh.mes <sup>-1</sup>
<b>Fonseca (2019)</b>	Esgoto sanitário	Média de 2511,56 m <sup>3</sup> .dia <sup>-1</sup>	Média de 7.680,17 kWh.dia <sup>-1</sup> com rendimento máximo do gerador
<b>Santos (2019)</b>	Resíduos da avicultura de postura	170,99 m <sup>3</sup> .dia <sup>-1</sup> para os dejetos de aves	2510,97 MWh.ano <sup>-1</sup> considerando rendimento máximo em um motor a gás

Fonte: Autora, 2021.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A cervejaria artesanal, localizada no distrito industrial de Maceió-AL, possui uma produção semanal de cerca de 3000 litros, sendo esta concentrando nos tipos Pilsen e India Pale Ale (IPA) (Figura 6), que são os rótulos com produção recorrente, e podendo ser comercializada em forma de cerveja ou chope. Essa produção chega ao cliente de forma indireta através do consumo em bares, restaurantes e supermercados ou por venda direta ao consumidor, tanto na loja da fábrica como na participação de eventos.

Trabalhando com 6 tanques (Figura 7) e totalizando um armazenamento de 9000 litros, a cervejaria realiza produção de cada rótulo em dias separados, e o processo completo leva cerca de 7 dias, entre as fases de maltaria, mosturação e filtração. Após esse tempo, o chope é envasado e a cerveja ainda passa por um processo de pasteurização para ser engarrafada.

O bagaço do malte, principal resíduo da produção em termos de quantidade e objeto deste estudo, é retirado após a filtragem do mosto e armazenado em bombonas de 200 litros (Figura 8), sendo geralmente destinado à fabricação de ração animal (Figura 9).

Figura 6 – Chope Pilsen e IPA



Fonte: Autora, 2021.

Figura 7 – Tanques de fermentação e armazenamento da cervejaria artesanal



Fonte: Autora, 2021.

Figura 8 – Bagaço do malte gerado na produção



Fonte: Autora, 2021.

Figura 9 – Exemplo de destinação do bagaço do malte para fins de alimentação animal



Fonte: PAIVA, 2019.

## 4.2 OBTENÇÃO DE DADOS E INFORMAÇÕES

Devido à pandemia do novo coronavírus e às restrições causadas pela mesma, os dados da cervejaria utilizados no estudo foram coletados através de entrevistas com o mestre cervejeiro e a gerente da unidade, além de visitas para reconhecimento de características do processo e do resíduo utilizado na digestão anaeróbia.

Também foram cedidas planilhas de informações de produção do ano de 2020 e boletos com registros do consumo de energia elétrica e gás natural da cervejaria para utilização no trabalho. A caracterização do resíduo e dados da produção metanogênica foram obtidos de Oliveira et al. (2018), que foi utilizado como principal referência deste trabalho.

### 4.2.1 Produção anual da cervejaria

Através das planilhas da produção anual de 2020 disponibilizadas, analisou-se informações de volume (L) produzido na cervejaria artesanal. Durante esse período, foram

produzidos cerca de 8 tipos diferentes de cerveja e chope na cervejaria artesanal, onde destacam-se os rótulos Pilsen e IPA, que foram estudados nesse trabalho.

Tabela 3 – Produção volumétrica referente ao ano 2020

<b>Tipo de Rótulo</b>	<b>Produção Volumétrica (L)</b>	<b>% da Produção</b>
<b>Pilsen</b>	85372,5	92%
<b>IPA</b>	5808	6%
<b>Total</b>	91180,5	98%

Fonte: Autora, 2021.

#### 4.2.2 Quantificação da biomassa gerada na produção cervejeira da fábrica

Diante do cenário exposto e dos objetivos do presente trabalho, quantificou-se o bagaço do malte obtido no processo produtivo cervejeiro através de dados cedidos pela cervejaria. Os mesmos estão dispostos na tabela abaixo (Tabela 4) e são especificados para dois dos rótulos produzidos, que representam cerca de 98% da produção da mesma.

Tabela 4 – Geração de biomassa em uma produção de cerca de 1500 L de cerveja

<b>Tipo de Rótulo</b>	<b>Massa de Bagaço prozido em 1500 L de produção (kg)</b>
<b>Pilsen</b>	550
<b>IPA</b>	850

Fonte: Autora, 2021.

#### 4.2.3 Estimativa da produção de Biogás

Utilizou-se dados da produção de metano de Oliveira et al. (2018), onde foi executada uma digestão anaeróbia em ensaios BMP em reatores de 600 mL com volume útil de 100 mL, sendo 80 mL de bagaço do malte e 20 mL de inóculo em forma de lodo de um reator anaeróbio de tratamento de efluentes. Os reatores operaram com temperatura de 37°C e foi adicionado um meio anaeróbio preparado segundo metodologia de Angelidaki et al. (2009).

A medição de metano produzido foi feita através de cromatografia gasosa e dada em mols de metano produzido. A produção volumétrica de CH<sub>4</sub> foi calculada utilizando as Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), com temperatura a 0°C e pressão 1 atm, onde 1 mol de qualquer gás ocupa um volume de 22,7 L, e foi dada, por fim, em litros, por

massa de sólidos voláteis, em quilogramas. O valor obtido foi de 301 L de CH<sub>4</sub>/kg de SV do substrato e a atividade metanogênica específica foi de 56 L/kg de SV.d.

A produção de biogás foi baseada na quantidade de metano produzida a partir da digestão anaeróbia do bagaço do malte, considerando que este gás é predominante em quantidade no biogás e em poder calorífico, segundo metodologia proposta por Santos (2019).

#### 4.3 CONVERSÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA

Com posse das informações quantitativas de produção anual da biomassa e dos resultados para os testes BMP obtidos por Oliveira et al. (2018), calculou-se a potência elétrica gerada a partir do biogás produzido na digestão anaeróbia, utilizando-se as equações dispostas abaixo, e levando-se em consideração os principais tipos de geradores de energia disponíveis no mercado (motores a gás, microturbinas e turbinas a gás).

Primeiramente, estimou-se a vazão média de biogás produzido na unidade através da Equação 1:

$$Q_{\text{biogás}} = m_{\text{BSG}} \cdot \text{BMP} \quad (1)$$

Considerando,

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

$m_{\text{BSG}}$  = média diária de bagaço do malte produzido (kg/dia);

BMP = produção de metano (L de CH<sub>4</sub>/kg de substrato)

Em seguida determinou-se a energia térmica disponível através da Equação 2:

$$E_t = Q_{\text{biogás}} \cdot \text{PCI}_{\text{biogás}} \quad (2)$$

Sendo,

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

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

Determinou-se o potencial elétrico do biogás através da Equação 3:

$$\text{PE}_{\text{biogás}} = \frac{E_t \cdot 4,184 \cdot n_{\text{tec}} \cdot n_{\text{gerador}}}{86.400} \quad (3)$$

Com,

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

4,184 = fator de conversão de “kcal” para “kJ”;

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

$n_{\text{gerador}}$  = rendimento do gerador;

86.400 = fator de conversão de dias para horas e de kJ para kWh.

Por fim, com o valor do potencial elétrico do biogás, calcula-se a potência elétrica gerada:

$$E_e = PE_{\text{biogás}} \cdot T_{\text{operação}} \quad (4)$$

Sendo,

$E_e$  = potência elétrica gerada (kWh/dia);

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

É importante levar em consideração que cada tecnologia possui seu rendimento. Testou-se as três principais tecnologias disponíveis no mercado brasileiro: os motores a gás, as turbinas a gás e as microturbinas a gás. Considerou-se uma faixa com biogás de 30% a 34% para geração por motores a gás, 20% a 30% de rendimento para as turbinas a gás e 24% a 28% de rendimento para as microturbinas a gás (SUZUKI et al., 2011).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 PRODUÇÃO DE BAGAÇO DO MALTE DA CERVEJARIA ARTESANAL

A tabela abaixo (Tabela 5) expõe a produção anual de 2020 dos rótulos Pilsen e IPA. Diante da quantificação da produção anual e da geração de resíduo a cada 1500 L de cerveja produzidas (Tabela 3), foi possível estimar a produção de bagaço do malte para o ano de 2020.

Tabela 5 – Produção volumétrica e quantificação da massa de bagaço do malte gerada no ano de 2020

<b>Tipo de Rótulo</b>	<b>Produção Volumétrica (L)</b>	<b>Quantificação de bagaço de malte (kg)</b>
<b>Pilsen</b>	85372,5	31303,25
<b>IPA</b>	5808	3291,2
<b>Total</b>	91180,5	34594,45

Fonte: Autora, 2021.

A quantidade de resíduo gerada é bastante oscilante durante o ano, levando-se em consideração que a produção mensal não é fixa e depende de fatores como a demanda e sazonalidade. Outro fator determinante para a quantificação de resíduos é o planejamento do tipo de rótulo que será produzido, que ocorre de acordo com a saída de cada estilo, o que também altera a quantidade de bagaço de malte produzido por mês.

Levando-se em consideração a produção anual da cervejaria exposta anteriormente, pode-se calcular uma média diária de bagaço do malte gerado na fábrica de 85,76 kg.dia<sup>-1</sup> para a cerveja tipo Pilsen e 9,01 kg.dia<sup>-1</sup> para a tipo IPA para fins da estimativa de produção energética.

Através da tabela 4, observa-se que a produção residual em uma batelada do rótulo IPA é maior em relação ao rótulo Pilsen, o que pode ser explicado pelo fato da IPA ser uma cerveja mais encorpada, necessitando de maior quantidade de malte em sua fabricação. Porém, considerando-se a produção anual da fábrica, cerca de 90% do bagaço de malte gerado é proveniente do rótulo Pilsen.

Isso se dá pela alta diversificação do mesmo, que é caracterizado como um processo base para a posterior produção de outros tipos de cerveja e chope. Além disso, a Pilsen ainda possui maior demanda no mercado por ser considerada uma cerveja mais leve e “fácil” de beber, já IPA possui um amargor característico que não se adequa com tanta facilidade a todo tipo de público.

## 5.2 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE METANO

Através dos ensaios BMP, obteve-se um rendimento de 301 L CH<sub>4</sub>/kg de SV. Conforme caracterização do resíduo utilizado, presente na Tabela 1, têm-se uma quantidade de 210 g de SV/kg de substrato. Dessa forma, é possível a conversão da produção para 63,21 L de CH<sub>4</sub>/kg de substrato.

De posse da geração média diária de bagaço do malte para os rótulos Pilsen e IPA, calculou-se produção de metano da cervejaria, necessária para o cálculo de potência elétrica gerada. Os valores estão dispostos na tabela abaixo:

Tabela 6 – Quantificação de metano produzido no ano de 2020

<b>Rótulo</b>	<b>Média de bagaço de malte produzido por dia (m<sub>BSG</sub>, kg.dia<sup>-1</sup>)</b>	<b>Produção de CH<sub>4</sub> da Unidade (Q<sub>biogás</sub>, em m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/dia)</b>
<b>Pilsen</b>	85,76	5,42
<b>IPA</b>	9,01	0,57
<b>Total</b>	94,77	5,99

Fonte: Autora, 2021.

A quantidade de bagaço de malte gerada na cervejaria afeta diretamente a produção metanogênica, fato que é observado na tabela acima. O volume gerado a partir de biomassa proveniente da produção do rótulo Pilsen representa 90% do total. Espera-se assim, uma maior contribuição do mesmo em termos de potência energética.

## 5.3 CONSUMO ENERGÉTICO DA CERVEJARIA ARTESANAL

As principais demandas energéticas da indústria cervejeira são provenientes do processo produtivo em si. Alguns dos equipamentos que se utilizam de energia elétrica são os tanques, os refrigeradores, o pasteurizador, a etiquetadora, a lavadora de barris e a engarrafadora. Além da energia elétrica, a fonte térmica também é essencial no processo, que conta com uma caldeira para o aquecimento da água utilizada nas panelas de mostura, sendo esta alimentada com gás natural (Figura 10).

Os tanques são resfriados por meio de um Chiller (Figura 11), sendo este uma máquina de refrigeração industrial completa que faz troca térmica utilizando água resfriada. O consumo

energético desses equipamentos pode corresponder a mais 40% do consumo total de energia da unidade (FIAMETTI, 2018).

A estrutura da cervejaria se baseia em um galpão, onde a produção ocorre, na parte administrativa e na loja (Figura 12), que contam com equipamentos como ar-condicionado, computadores, geladeira, além de iluminação. O galpão possui uma ampla abertura, que garante a ventilação e a iluminação durante o dia, garantindo uma certa economia de energia elétrica.

Figura 10 – Caldeira para produção de vapor utilizado no processo



Fonte: Autora, 2021.

Figura 11 – Chiller utilizado para resfriar os tanques



Fonte: Autora, 2021.

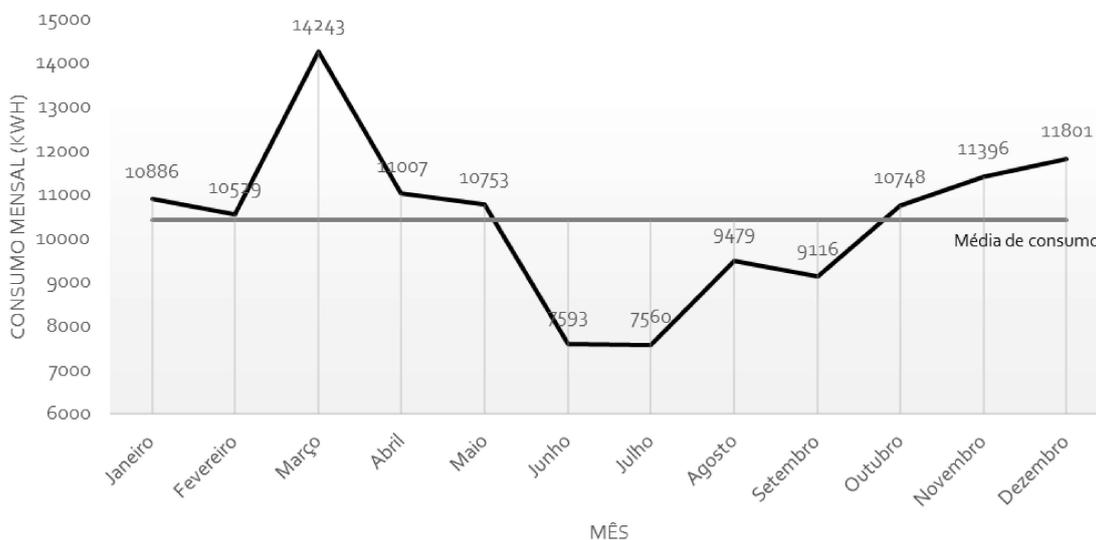
Figura 12 – Loja da cervejaria artesanal



Fonte: Autora, 2021.

Através de histórico anual disponível na fatura da concessionária de energia elétrica fornecida pela cervejaria, avaliou-se consumo referente ao ano de 2020 (Figura 13), que possui uma média de 10400 kWh mensais.

Figura 13 – Consumo de energia elétrica da cervejaria artesanal no ano de 2020 (em kWh)



Fonte: Autora, 2021.

É importante observar a oscilação do consumo ao longo do ano, que está diretamente ligada à produção, mas também associada à sazonalidade. Meses como Junho e Julho se destacaram pelo menor consumo energético, estes também são os períodos mais chuvosos em nosso país, demandando menos de alguns equipamentos como ar-condicionados e ventiladores.

## 5.4 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS

Utilizando-se as equações 1, 2 e 3 e dados de produção metanogênica da unidade obtidos anteriormente, calculou-se a potência elétrica gerada a fim de comparação com o consumo da cervejaria industrial no ano de 2020, para análise da viabilidade da aplicação da digestão anaeróbia como forma de geração de energia elétrica para a fábrica.

Considerando a dependência da potência elétrica ao rendimento da tecnologia ( $n_{tec}$ ) que fará a conversão do biogás, testou-se alguns entre os tipos mais utilizados para esse fim, a título de comparação da viabilidade de aplicação de cada uma delas. Adotou-se um rendimento do gerador ( $n_{gerador}$ ) de 87%, considerando que a faixa de rendimento para um gerador adequado para as tecnologias citadas é de 85 a 90% (Lima et al., 2012).

### 5.4.1 Motores a gás

Os motores de combustão interna movidos a gás possuem rendimentos ( $n_{tec}$ ) que variam entre 30% (inferior) a 34% (superior). Com base nesses valores, calculou-se a potência elétrica ( $E_e$ ) para os dois tipos de rótulo estudados (Tabela 7)

Tabela 7 – Estimativa da potência elétrica gerada em motor a gás

<b>Rótulo</b>	<b>Potência Elétrica Gerada (<math>E_e</math>, kWh.mês<sup>-1</sup>) <math>n_{tec} = 30\%</math></b>	<b>Potência Elétrica Gerada (<math>E_e</math>, kWh.mês<sup>-1</sup>) <math>n_{tec} = 34\%</math></b>
<b>Pilsen</b>	425,15	481,84
<b>IPA</b>	44,70	50,66
<b>Total</b>	469,85	532,50

Fonte: Autora, 2021.

### 5.4.2 Turbinas a gás

Já o rendimento ( $n_{tec}$ ) das turbinas a gás varia entre 20% (inferior) a 30% (superior). Com base nesses valores, calculou-se a potência elétrica ( $E_e$ ) para a produção metanogênica cervejaria (Tabela 8).

Tabela 8 – Estimativa da potência elétrica gerada em turbinas a gás

<b>Rótulo</b>	<b>Potência Elétrica Gerada (<math>E_e</math>, kWh.mês<sup>-1</sup>) <math>n_{tec} = 20\%</math></b>	<b>Potência Elétrica Gerada (<math>E_e</math>, kWh.mês<sup>-1</sup>) <math>n_{tec} = 30\%</math></b>
<b>Pilsen</b>	283,43	425,15
<b>IPA</b>	29,80	44,70
<b>Total</b>	313,23	469,85

Fonte: Autora, 2021.

### 5.4.3 Microturbinas a gás

Por fim, as microturbinas a gás operam com rendimento ( $n_{tec}$ ) na faixa de 24% (inferior) a 28% (superior). Calculou-se a potência elétrica gerada para essa tecnologia (Tabela 9).

Tabela 9 – Estimativa da potência elétrica gerada em microturbinas a gás

<b>Rótulo</b>	<b>Potência Elétrica Gerada (<math>E_e</math>, kWh.mês<sup>-1</sup>) <math>n_{tec} = 24\%</math></b>	<b>Potência Elétrica Gerada (<math>E_e</math>, kWh.mês<sup>-1</sup>) <math>n_{tec} = 28\%</math></b>
<b>Pilsen</b>	340,12	396,81
<b>IPA</b>	35,76	41,72
<b>Total</b>	375,88	438,53

Fonte: Autora, 2021.

A conversão da energética do biogás depende de vários fatores relacionados à composição e características do mesmo, que devem se adequar ao tipo de tecnologia que se pretende utilizar. Além disso, deve-se considerar o rendimento de cada uma delas. Como foi observado, o maior rendimento dos motores a gás garantiu uma maior conversão em energia elétrica utilizando-se o biogás. Em casos de co-geração, as turbinas a gás possuem maior eficiência (Suzuki et al., 2011).

## 5.5 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

Com base no consumo energético do ano de 2020 da cervejaria artesanal em questão, mostrado na Figura 13, comparou-se a potência elétrica total gerada a partir das três tecnologias de conversão testadas à média mensal da demanda energética da fábrica, para fins de análise de formas para suprir a mesma utilizando o biogás produzido na digestão anaeróbia do bagaço do malte (Tabela 10).

Tabela 10 – Comparativo entre energia gerada na DA e consumida pela cervejaria

<b>Gerador</b>	<b>Potência Elétrica Gerada (kWh.mês<sup>-1</sup>)</b>	<b>Consumo médio de energia elétrica (kWh.mês<sup>-1</sup>)</b>	<b>% consumo suprido</b>
<b>Motores a gás</b>	532,50	10425,92	5%
<b>Turbinas a gás</b>	469,85		5%
<b>Microturbinas a gás</b>	438,53		4%

Fonte: Autora, 2021.

Analisando os valores expostos na tabela acima, percebe-se um baixo percentual de consumo de energia elétrica suprido pelo biogás gerado, o que pode ser explicado pela quantidade de resíduo gerado ou pela perda energética que ocorre durante a geração elétrica, levando em consideração que o maior rendimento dentre as tecnologias é de 34%.

Diante desse fato, outras soluções podem ser pensadas para o aproveitamento do biogás produzido. A caldeira é um dos equipamentos mais importantes na cervejaria pois auxilia no aquecimento da água utilizada na mosturação. Seu combustível é o gás natural, que possui composição de cerca de 85% de metano, possibilitando o uso do biogás produzido na digestão anaeróbia do bagaço do malte como combustível para queima na caldeira, após purificação. (PETROBRÁS, 2012)

Sabendo-se que a média de consumo mensal de gás natural da cervejaria é em torno de 800 m<sup>3</sup>, nos quais 680 m<sup>3</sup> correspondem a metano, através da vazão média mensal total de metano produzida na unidade ( $Q_{\text{biogás}}$ ), foi possível analisar tal aplicação. Calculou-se também a economia feita, caso adotada a digestão anaeróbia para a produção do biogás e a utilização deste para alimentação da caldeira, considerando-se uma tarifa para concessão de gás natural no estado de Alagoas de R\$ 2,18/m<sup>3</sup> (ARSAL, 2021).

Nota-se que ainda não foi possível suprir toda a demanda de gás natural, mas já se observa um maior impacto no consumo da cervejaria e um corte em gastos do processo produtivo (Tabela 11).

Tabela 11 – Comparativo entre vazão de metano gerada na DA e consumida pela cervejaria na produção e economia mensal

<b>Produção de CH4 da Unidade (Q<sub>biogás</sub>, em m<sup>3</sup> de CH4.mês<sup>-1</sup>)</b>	<b>Consumo médio de gás natural (m<sup>3</sup> de CH4. mês<sup>-1</sup>)</b>	<b>% consumo suprido</b>	<b>Economia mensal da cervejaria (R\$)</b>
182,23	680	27%	397,26

Fonte: Autora, 2021.

Apesar de não conseguir suprir o consumo elétrico total, um cenário que também poderia trazer um retorno financeiro para a cervejaria em questão seria geração de energia elétrica a partir do biogás apenas em horários de ponta, sendo estes horários em que o preço da tarifa de concessão de energia elétrica é mais alto devido ao aumento da demanda pela mesma.

O custo energético no horário de ponta aumenta consideravelmente comparado aos demais devido à sobrecarga dos sistemas de geração, transmissão e distribuição. O biogás surge como uma alternativa parcial à concessão de energia elétrica que possibilitaria a redução do custo da cervejaria em questão (COSTA, 2011).

Outras aplicações para o biogás produzido ainda podem ser previstas. Conforme citado, o biometano já vem sendo utilizado como combustível de automóveis, existindo apenas a necessidade de adaptação dos mesmos com o kit GNV e limpeza do biogás para o aumentar da concentração de metano, atendendo às especificações da ANP para uso veicular. Pode-se assim, considerar seu uso nos veículos da cervejaria artesanal estudada (CETESB, 2017).

## 6. CONCLUSÕES

O presente trabalho visou o estudo da utilização da biomassa proveniente de uma cervejaria artesanal em uma digestão anaeróbia a fim de se obter o biogás e aproveitá-lo energeticamente como forma de suprir demandas inerentes ao processo de fabrico.

Quantificou-se a biomassa gerada em processos produtivos no ano de 2020. Considerando dois dos rótulos produzidos, obteve-se uma produção média diária de 85,176 kg.dia<sup>-1</sup> para a cerveja tipo Pilsen e 9,01 kg.dia<sup>-1</sup> para a tipo IPA, estimando uma produção diária de metano de 5,42 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>.dia<sup>-1</sup> e 0,57 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>.dia<sup>-1</sup>, respectivamente.

Calculou-se uma produção de potência elétrica gerada total considerando três tecnologias: os motores a gás, as turbinas a gás e as microturbinas a gás, obtendo-se valores de até 532,50 kWh.mês<sup>-1</sup>, 469,85 kWh.mês<sup>-1</sup> e 438,53 kWh.mês<sup>-1</sup>, respectivamente. Percebe-se assim que os motores a gás são a tecnologia com melhor aproveitamento energético para o caso estudado.

Levando em consideração a média mensal de 10425,92 kWh.mês<sup>-1</sup> consumidos pela cervejaria, foi possível suprir cerca de 5% da demanda de energia elétrica da mesma utilizando o biogás produzido na digestão anaeróbia. Nota-se que apesar de não suprir a demanda total da cervejaria, a potência elétrica gerada pode até ser uma forma de retorno financeiro considerável quando utilizada em horários de ponta, onde a tarifa da concessionária elétrica possui um valor diferenciado.

O biogás gerado também pode ser aproveitado na utilização como combustível para a caldeira. O consumo médio de gás natural da cervejaria é de cerca de 680 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>. mês<sup>-1</sup> enquanto o volume produzido na digestão anaeróbia do bagaço do malte é de 182,23 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>. mês<sup>-1</sup>, suprimindo assim cerca de 27% da demanda da mesma. Ainda se vislumbram outras formas de aproveitamento do metano gerado, como por exemplo em veículos da cervejaria.

Diante dos fatos expostos, mostra-se que a digestão anaeróbia do bagaço do malte pode ser considerada na cervejaria artesanal em questão, pois além de viabilizar formas de aproveitamento energético que aliviam custos do processo, também caracteriza um tratamento do resíduo desse resíduo, abordando aspectos de sustentabilidade e trazendo um retorno positivo para a marca.

## 7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se:

- Realizar a digestão anaeróbia do bagaço do malte em co-substrato com os demais resíduos provenientes da produção cervejeira.
- Testar formas de pré-tratamento dessa biomassa para neutralizar o aspecto lignocelulósico do mesmo.

## REFERÊNCIAS

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**, [S.L.], v. 59, n. 5, p. 927-934, 1 mar. 2009. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2009.040>.

BEER ART. **O mapa da cerveja no Brasil**. Disponível em: <https://revistabeerart.com/news/cervejarias-brasil>. Acesso em: 15 abr. 2021.

BOCHMANN, G.; DROSG, B.; FUCHS, W.. Anaerobic digestion of thermal pretreated brewers' spent grains. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, [S.L.], v. 34, n. 4, p. 1092-1096, 6 abr. 2015. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/ep.12110>.

BORSCHIVER, S, DA SILVA, A.L.R... Mapeamento tecnológico para purificação de biogás e seu aproveitamento: panorama mundial e iniciativas nacionais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20, 2014, Florianópolis. **Proceedings** [...]. Rio de Janeiro: Blucher, 2014. p. 8757-8765.

CETESB. **Brasil já testa carros abastecidos com biogás**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/2017/02/15/brasil-ja-testa-carros-abastecidos-com-biogas/>. Acesso em: 24 mar. 2021.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. **Reatores anaeróbios**. 1 ed. Belo Horizonte: UFMG, 1997.

COSTA, Alafim Santos. **Geração na ponta: solução energética para o horário de pico**. 2011. 30 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. 2006. 176 f. 2006. PhD Thesis. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

DANTAS, Vitória Nascimento. **A trajetória da cultura cervejeira e sua introdução no Brasil**. 2016. 12 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Humanas, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

EPE. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletric>. Acesso em: 13 mar. 2021.

EZEONU, F. C.; OKAKA, A. N. C.. Process Kinetics and Digestion Efficiency of Anaerobic Batch Fermentation of Brewer's Spent Grains (BSG). **Process Biochemistry**, Awka, v. 31, n. 1, p. 7-12, 1996.

FERRAZ, Camilla da Silva. **Resolução ARSAL N° 4 DE 02/02/2021**. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=408879>. Acesso em: 08 abr. 2021.

FERREIRA, Bernardo Ornelas. **Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás**. 2015. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

FIAMETTI, Rafael Augusto. **Estudo de Caso: Eficiência Energética em Sistemas de climatização por Água Gelada**. 2018. 43 f. Monografia Especialização em Eficiência Energética - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

FONSECA, Murilo Venancio. **Aproveitamento energético do biogás gerado no tratamento de esgotos sanitários: estudo de caso da ETE Brasília Sul com enfoque na digestão anaeróbia de lodos gerados**. 2019. 79 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

HOLLIGER, Christof et al.. Towards a standardization of biomethane potential tests. **Water Science And Technology**, [S.L.], v. 74, n. 11, p. 2515-2522, 19 set. 2016. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2016.336>.

KORRES, Nicholas E.; O'KIELY, Padraig; BENZIE, John A.H.; WEST, Jonathan S.. **Bioenergy production by anaerobic digestion: using agricultural biomass and organic wastes**. Abingdon: Routledge, 2013.

LIMA, Ana Carolina Guedes; PASSAMANI, Fernanda Caliman. **Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES. 2012**. 106 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Vitória, 2012.

LIMBERGER, Silvia Cristina. O setor cervejeiro no brasil: gênese e evolução. **Cadernau**, Guarapuava, p. 1-17, 2013.

MARCUSSO, Eduardo Fernandes; MÜLLER, Carlos Vitor. **A cerveja no brasil: O ministério da agricultura informando e esclarecendo**. Ministério da Agricultura, 2017. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/pastapublicacoes-DIPOV/a-cerveja-no-brasil-28-08.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2020.

MARIANI, Leidiane, et al.. Políticas públicas e privadas de incentivo ao uso do biogás na matriz energética brasileira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 09, 2014.

MATHIAS, T. R. S.; MELLO, P.P.M. de; SERVULO, E. F. C. Caracterização de resíduos cervejeiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20., 2014, Florianópolis. **Proceedings** [...] . Rio de Janeiro: Blucher, 2014.

OLIVEIRA, J. V.; ALVES, M. M.; COSTA, J. C.. Biochemical methane potential of brewery by-products. **Clean Technologies And Environmental Policy**, [S.L.], v. 20, n. 2, p. 435-440, 6 jan. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10098-017-1482-2>.

PEARSE, Laretta Feyisetan; HETTIARATCHI, Joseph Patrick; KUMAR, Sunil. Towards developing a representative biochemical methane potential (BMP) assay for landfilled

municipal solid waste – A review. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 254, p. 312-324, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.069>.

TCHOBANOGLIOUS, George; STENSEL, David H.; TSUCHIHASHI, Ryujiro; BURTON, Franklin; ABU-ORF, Mohammad; BOWDEN, Gregory; PFRANG, William. **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery**. New York: McGraw-Hill, 2014.

MUSSATTO, S.I.; DRAGONE, G.; ROBERTO, I.C.. Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications. **Journal of Cereal Science**, [S.L.], v. 43, n. 1, p. 1-14, jan. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcs.2005.06.001>.

PAIVA, Vitor. **Cãolorado, a cerveja (sem álcool, claro) criada pela Colorado só para cachorros**. Hypheness, 2019. Disponível em: <<https://www.hypheness.com.br/2019/07/caolorado-a-cerveja-sem-alcool-claro-criada-pela-colorado-so-para-cachorros/>>. Acesso em: 23 mar. 2021.

PETROBRÁS. **Seminário sobre gás**. Disponível em: <[http://sites.petrobras.com.br/minisite/premiatecnologia/pdf/TecnologiaGas\\_Seminario\\_GAS.pdf](http://sites.petrobras.com.br/minisite/premiatecnologia/pdf/TecnologiaGas_Seminario_GAS.pdf)>. Acesso em: 23 mar. 2021.

PIRES, Eduardo J.; RUIZ, Héctor A.; TEIXEIRA, José A.; VICENTE, António A.. A New Approach on Brewer's Spent Grains Treatment and Potential Use as Lignocellulosic Yeast Cells Carriers. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [S.L.], v. 60, n. 23, p. 5994-5999, jun. 2012. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/jf300299m>.

REIS, Liege. **BIOGÁS NAS INDÚSTRIAS BRASILEIRAS: COMO A FONTE PODE IMPULSIONAR O SETOR?** Disponível em: <https://cibiogas.org/blog-post/biogas-nas-industrias-brasileiras-como-a-fonte-pode-impulsionar-o-setor/>. Acesso em: 13 mar. 2021.

SALAZAR, Adriane Ricartes Guimarães. **Estudo da utilização do biogás como fonte de energia renovável no processo produtivo de indústrias de bebidas**. 2014. 153 p. Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2014.

SANTOS, Isabella Maria Tenório Soares. **Utilização de resíduos de avicultura de postura para produção de energia**. 2019. 42 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

SANTOS, Mateus Sales dos; RIBEIRO, Flávio de Miranda. **Cervejas e refrigerantes**. São Paulo: CETESB, 2005.

SILVA, Hiury Araújo; LEITE, Maria Alvim; PAULA, Arlete Rodrigues Vieira de. Cerveja e sociedade. **Revista de Comportamento, Cultura e Sociedade**, 2016, 4.2: 85-91.

SINDICERV. **O setor em números**. Disponível: <<https://www.sindicerv.com.br/o-setor-em-numeros/>>. Acesso em: 13 out. 2020.

SUZUKI, Ana Beatryz Prenzier et al.. Uso de biogás em motores de combustão interna. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava, v. 4, n. 1, p. 221-237, 2011.

SZYMANSKI, Mariani Silvia Ester; BALBINOT, Rafaelo; SCHIRMER, Waldir Nagel. Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás e obtenção de créditos de carbono—estudo de caso. *Semina: Ciências Agrárias*, 2010, 31.4: 901-911.

VITANZA, R.. Biovalorization of Brewery Waste by Applying Anaerobic Digestion. **Chemical and Biochemical Engineering Quarterly Journal**, [S.L.], v. 30, n. 3, p. 351-357, 10 out. 2016. Croatian Society of Chemical Engineers/HDKI.  
<http://dx.doi.org/10.15255/cabeq.2015.2237>.

ZANETTE, André Luiz. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil**. 2009. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Planejamento Energético, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.