UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUO SÓLIDO ORGÂNICO DA INDÚSTRIA CERVEJEIRA

Isadora Arenhardt Endler

Lajeado, junho de 2021

Isadora Arenhardt Endler

AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUO SÓLIDO ORGÂNICO DA INDÚSTRIA CERVEJEIRA

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, do curso de Engenharia Química, na Universidade do Vale do Taquari – Univates, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Profº. Dr. Odorico Konrad

Lajeado, junho de 2021

RESUMO

A enorme variedade de cervejas e a grande busca da bebida têm aumentado o crescimento das indústrias cervejeiras. A alta produção de cerveja resulta em um enorme volume de resíduo dentro das indústrias, o qual necessita ser destinado de forma correta, para evitar impactos ao meio ambiente. Um dos resíduos gerados por essas indústrias é o resíduo sólido orgânico, mais conhecido como bagaço de malte, considerado uma ótima alternativa por contribuir com o aumento da energia renovável, pelo fato de possuir elevado teor de celulose. Uma técnica específica para o tratamento de resíduos sólidos é a digestão anaeróbia que auxilia na diminuição da emissão de gases efeito estufa. A digestão anaeróbia ocorre na ausência de oxigênio e é realizada em quatro etapas através de várias bactérias. Dessa forma, o objetivo desse estudo foi avaliar a produção de biogás e metano a partir do resíduo sólido orgânico, o bagaço de malte, de uma indústria cervejeira localizada no Vale do Taquari, em escala laboratorial, através da digestão anaeróbia. As amostras foram submetidas ao experimento em triplicatas, por meio de reatores de 1000 mL, preenchidos com 500g de amostra (inóculo, celulose microcristalina e bagaço de malte), mantidos na incubadora bacteriológica a temperatura mesofílica de 35 ºC. Para isso foram realizadas as análises de pH, sólidos totais, voláteis e fixos. O resultado dos sólidos voláteis do bagaço de malte foi de 96,67% e sólidos totais igual a 24,71%, consideradas porcentagens ótimas para a produção de biogás. O experimento obteve tempo de detenção de 26 dias, onde foi possível obter resultado satisfatório para o bagaço de malte. O volume de produção de biogás foi de 1.731,39 mL e produção de metano aproximadamente em 60%. Os resultados do potencial bioquímico de biogás e metano foi de 488,27 mL_N/gSV e 265,12 mL_N/gSV, respectivamente. Dessa forma, o substrato em questão tem alta capacidade de degradar a matéria orgânica e auxiliar na produção de energia renovável.

Palavras-chave: Bagaço de malte. Resíduo sólido orgânico. Digestão anaeróbia. Biogás.

ABSTRACT

The huge variety of beers and the great search for the beverage have increased the growth of the brewing industries. The high production of beer results in a huge volume of residue within the industries, which needs to be disposed of correctly, to avoid impacts on the environment. One of the waste generated by these industries is organic solid waste, better known as malt bagasse, considered a great alternative for contributing to the increase of renewable energy, due to its high cellulose content. A specific technique for the treatment of solid waste is anaerobic digestion, which helps to reduce the emission of greenhouse gases. Anaerobic digestion takes place in the absence of oxygen and is carried out in four steps by various bacteria. Thus, the aim of this study was to evaluate the production of biogas and methane from organic solid waste from a brewery located in Vale do Taquari, on a laboratory scale, through anaerobic digestion. The samples were submitted to the experiment in triplicate, using 1000 mL reactors, filled with 500g of sample (inoculum, microcrystalline cellulose and malt bagasse), kept in a bacteriological incubator at a mesophilic temperature of 35 ºC. For this, analyzes of pH, total solids, volatile and fixed, were performed. The result of volatile solids of malt bagasse was 96.67% and total solids equal to 24.71%, considered optimal percentages for the production of biogas. The experiment had a detention time of 26 days, where it was possible to obtain a satisfactory result for the malt bagasse. The volume of biogas production was 1,731.39 mL and methane production was approximately 60%. The results of the biochemical potential of biogas and methane were 488.27 mLN/gSV and 265.12 mLN/gSV, respectively. Thus, the substrate in question has a high capacity to degrade organic matter and assist in the production of renewable energy.

Keywords: Malt bagasse. Organic solid waste. Anaerobic digestion. Biogas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variedade de cervejas 9
Figura 2 - Crescimento das cervejarias inscritas por ano 10
Figura 3 - Número e crescimento médio por estado das indústrias de cervejas 10
Figura 4 - Malte em grãos antes de moer 13
Figura 5 - Lúpulo 14
Figura 6 - Levedura da espécie Saccharomyces cerevisae 15
Figura 7 - Fluxograma básico do processo de produção de cerveja 16
Figura 8 - Esquema geral do processo de digestão anaeróbia 23
Figura 9 - Local coleta do bagaço de malte 31
Figura 10 - Análise do potencial hidrogênionico 32
Figura 11 - Estufa utilizada para determinar os sólidos totais 34
Figura 12 - Forno tipo mufla usado para análose de sólidos voláteis 34
Figura 13 - Desecador usado para acondicionar as cápsulas de porcelana 35
Figura 14 - Adição da quantidade de inóculo nos reatores 37
Figura 15 - Incubadora bacteriológica e bancada com os tubos em formato de U, respectivamente 39
Figura 16 - Sensor específico para edição de CH_4 41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos ambientais dos microrganismos anaeróbios mesofílicos.....26
Tabela 2 - Classificação dos microrganismos conforme a temperatura.....27
Tabela 3 - Composição do biogás gerado a partir de resíduos orgânicos 29
Tabela 4 – Quantidade de inóculo, celulose microcristalina e amostra inseridas em cada triplicata 38
Tabela 5 - Potencial hidrogeniônico das amostras.....43
Tabela 6 - Valores de sólidos voláteis, totais e fixo.....44

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Produção diária de biogás e metano do inóculo.....45
Gráfico 2 - Produção diária de biogás e metano da celulose microcristalina 46
Gráfico 3 - Resultados do potencial de biogás e metado obtidos no experimento de digestão anaeróbia 47
Gráfico 4 - Produção diária de biogás e metano do bagaço de malte.....48
Gráfico 5 - Produção acumulada de biogás e metano do experimento.....49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%	Por Cento
ºC	Graus Celsius
ATP	Adenosina Trifosf
CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de Carbono
g	Gramas
GNV	Gás Natural Veicular
H_2	Hidrogênio
H_2O	Água
H_2S	Sulfeto de Hidrogênio
kg	Quilograma
mL	mililitro
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
N	Nitrogênio
NH_3	Amônia
O_2	Oxigênio
P	Fósforo
PBB	Potencial Bioquímico de Biogás
PBM	Potencial Bioquímico de Metano
pH	Potencial Hidrogeniônico
PIB	Produto Interno Bruto
S	Enxofre
SF	Sólidos Fixos

ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
TDH	Tempo de Detenção Hidráulico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 7
1.1 Objetivo Geral 8
1.2 Objetivos Específicos 8

2. REFERENCIAL TEÓRICO 7
2.1 Indústria Cervejeira 7
2.1.1 Matérias-primas na produção da cerveja 11
2.1.2 Etapas do processo de fabricação da cerveja 15
2.2 Resíduos sólidos orgânicos gerados no processo 22
2.3 Tratamento de resíduos orgânicos por digestão anaeróbia 23
2.3.1 Hidrólise 24
2.3.2 Acidogênese 24
2.3.3 Acetogênese 25
2.3.4 Metanogênese 25
2.4 Requisitos do processo de digestão anaeróbia 26
2.4.1 Temperatura 27
2.4.2 Condições do pH 27
2.4.3 Tempo de detenção Hidráulica 28
2.4.4 Nutrientes 28
2.5 Características do biogás 29

3. METODOLOGIA 30
3.1 Levantamento dos dados para coleta 30

3.2 Procedimentos da coleta 31
3.3 Experimento digestão anaeróbia 32
3.3.1 Potencial Hidrogeniônico (pH) 32
3.2.2 Sólidos Totais, Voláteis e Fixos 33
3.2.3 Inóculo 36
3.2.4 Potencial Bioquímico de biogás e metano (PBB e PBM) 37
3.2.5 Caracterização do biogás e relação ao teor de metano 40

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 42
4.1 Resíduo gerado no processo de produção de cerveja 42
4.2 Resultados Físico-Química 43
4.2.1 Potencial Hidrogeniônico (pH) 43
4.2.2 Sólidos voláteis, fixos e totais 44
4.3 Ensaio de digestão anaeróbia 45

5. CONCLUSÃO 50

REFERÊNCIAS 52

1. INTRODUÇÃO

Do latim *bibere*, com o significado de “beber”, a cerveja possui registros na cultura na maior parte das civilizações antigas, sendo que sua possível origem é o Oriente Médio ou Egito. O primeiro regulamento sobre o processo de fabricação foi realizado em 1516 na Baviera, o qual determinava que somente malte de cevada, água e lúpulo seriam utilizados como ingredientes para a produção de cerveja (MARTINS; FUZIOKA; SILVA, 2014).

Em 1808, a cerveja foi inserida no Brasil por D. João VI. Isso resultou na indústria cervejeira instalada com vinte e sete cervejarias consignadas em menos de cem anos. Esse avanço da indústria no país é pelo fato do clima ser apropriado e a qualidade da bebida ser boa, aumentando assim o consumo constante o ano inteiro (MARTINS; FUZIOKA; SILVA, 2014).

Atualmente, a bebida alcoólica mais consumida no mundo é a cerveja devido às características sensoriais juntamente com seus benefícios à saúde, valor nutricional e a variedade de apresentações, tendo enorme aceitação popular. Na última década, o Brasil ganhou destaque com a cerveja fazendo com que o mercado tenha um crescimento de forma significativa, alcançando, entre os maiores do mundo, o quarto lugar no ranking mundial, sendo a China, Estados Unidos e Alemanha os países que lideram o topo da lista (PAYÁ *et al*.,2019).

De acordo PAYÁ *et al.* (2019) as categorias mais comuns são Lager, Ale, Lambic, além das híbridas. A fermentação realizada durante o processo de produção,

a combinação ou adição de matéria prima, como aveia, são alguns dos fatores que diversificam as categorias das cervejas.

O acréscimo em busca da bebida e a grande variedade de cervejas, resultou em um crescimento elevado de indústrias cervejeiras. O MAPA (2020) apresenta um crescimento em 36% em comparação a 2018, representando um total de 1.209 cervejarias registradas no Brasil. A maior parte das indústrias estão localizadas nos estados do Sul e Sudeste, sendo que a cidade com maior número é Porto Alegre, com 39 estabelecimentos registrados.

Com o crescimento das indústrias cervejeiras, as microcervejarias também ganharam espaço no Brasil, sendo que muitas delas iniciaram suas atividades em bares e pubs. Todo esse sucesso é devido aos consumidores terem a possibilidade de comprar produtos diferenciados, melhores e de custo elevado auxiliando para o crescimento das cervejas artesanais (MATOS *et al.,* 2011).

A alta produção nas indústrias resulta em um grande volume de geração de resíduos dentro das cervejarias, sendo necessário realizar a destinação apropriada com o intuito de diminuir o impacto ao meio ambiente e manter a cadeia revigorada (HASAN *et al.,* 2018).

De acordo com VERONEZE *et al.* (2019), a composição dos efluentes gerados nas indústrias cervejeiras possibilita o tratamento em processos fermentativos devido a sua matéria orgânica obter alta qualidade, possibilitando a geração de compostos energéticos, como o biogás. Dessa forma, o tratamento biológico é muito utilizado devido à grande parte dos resíduos serem orgânicos e pelo fato do crescimento dos processos com altas cargas orgânicas, o tratamento anaeróbio se tornou atraente pelo ponto de vista econômico (PONTES; SANTOS; DOS SANTOS SOUZA, 2016).

A digestão anaeróbia, denominada também por processo fermentativo, é uma opção adequada e eficiente, pois parcela da matéria orgânica é degenerada na ausência de oxigênio (VERONEZE *et al.*, 2019). Essa reação bioquímica é realizada em quatro etapas através de muitos tipos de bactérias, sendo que as principais são as metanogênicas responsáveis pela formação de metano (PONTES; SANTOS; DOS SANTOS SOUZA, 2016).

O método de digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos oriundos do processo fabril industrial tem sido estudado e aplicado por ser uma alternativa para a contribuição no aumento de energia renovável, obtendo como resultado o biogás, que pode ser utilizado na geração de energia elétrica, térmica e, mais recentemente como biocombustível análogo ao gás natural veicular (GNV) (POLASTRI *et al.*, 2019).

Dessa maneira, o presente estudo tem como objetivo avaliar a produção de biogás e metano que pode ser obtido, em escala laboratorial, a partir dos resíduos sólidos orgânicos gerado na indústria cervejeira.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar a produção de biogás e metano que pode ser obtida, em escala laboratorial, a partir do resíduo orgânico gerado na indústria cervejeira.

1.2 Objetivos Específicos

- Identificar o principal resíduo orgânico gerado na indústria cervejeira em questão e sua respectiva destinação atual;
- Caracterizar o resíduo orgânico gerado em maior volume, por meio de análises físicas e químicas;
- Quantificar, em escala laboratorial, a produção de biogás a partir da digestão anaeróbia do resíduo orgânico que representa maior volume de geração na indústria pesquisada;

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Indústria Cervejeira

A cerveja possui registros na cultura na maior parte das civilizações antigas, sendo que sua possível origem é o Oriente Médio ou Egito. O primeiro regulamento sobre o processo de fabricação foi realizado em 23 de abril de 1516 na Baviera, o qual determinava que somente malte de cevada, água e lúpulo seriam utilizados como ingredientes para a produção de cerveja, pois naquela época era desconhecida a levedura como ingrediente para a fermentação (MARTINS; FUZIOKA; SILVA, 2014). Esse regulamento foi publicado pelo duque Guilherme IV da Baviera como a Lei da Pureza, sendo um dos decretos alimentares mais antigo da Europa (PINHEIRO, 2019).

Em 1808, a cerveja foi inserida no Brasil por D. João VI, resultando na indústria cervejeira instalada com vinte e sete cervejarias consignadas em menos de cem anos. Esse avanço da indústria no país é pelo fato do clima ser apropriado e a qualidade da bebida ser boa, aumentando assim o consumo constante o ano inteiro (MARTINS; FUZIOKA; SILVA, 2014).

Nos anos de 1870 ocorreu um crescimento considerável na produção da cerveja no Brasil, sendo que a concentração das cervejarias se localizava no Rio Janeiro, São Paulo e Rio Grande do Sul. Assim, a primeira indústria cervejeira fundada foi na cidade de Porto Alegre, por Friederich Christoffel, alçando a produção de 1 milhão de garrafas em 8 anos. As empresas Brahma e Antarctica, foram

fundadas em 1880 no Rio de Janeiro e São Paulo, respectivamente. Em julho de 1999, anuncia-se a primeira multinacional brasileira, a Ambev, resultado da fusão das duas empresas, tornando-se assim a segunda maior produtora de cerveja mundial, atrás apenas de empresa americana, Anheuser Bush (PINHEIRO, 2019).

Conforme o Decreto nº 9.902, de 8 de julho de 2019, a legislação brasileira caracteriza a cerveja como a bebida resultante da fermentação, a partir da levedura cervejeira, do mosto de malte de cevada ou de extrato de malte, que é submetido anteriormente a um processo de cozimento acrescentando lúpulo ou extrato de lúpulo, possibilidade em que uma parte do malte de cevada ou do extrato de malte poderá ser parcialmente trocado por adjunto cervejeiro (BRASIL, 2019).

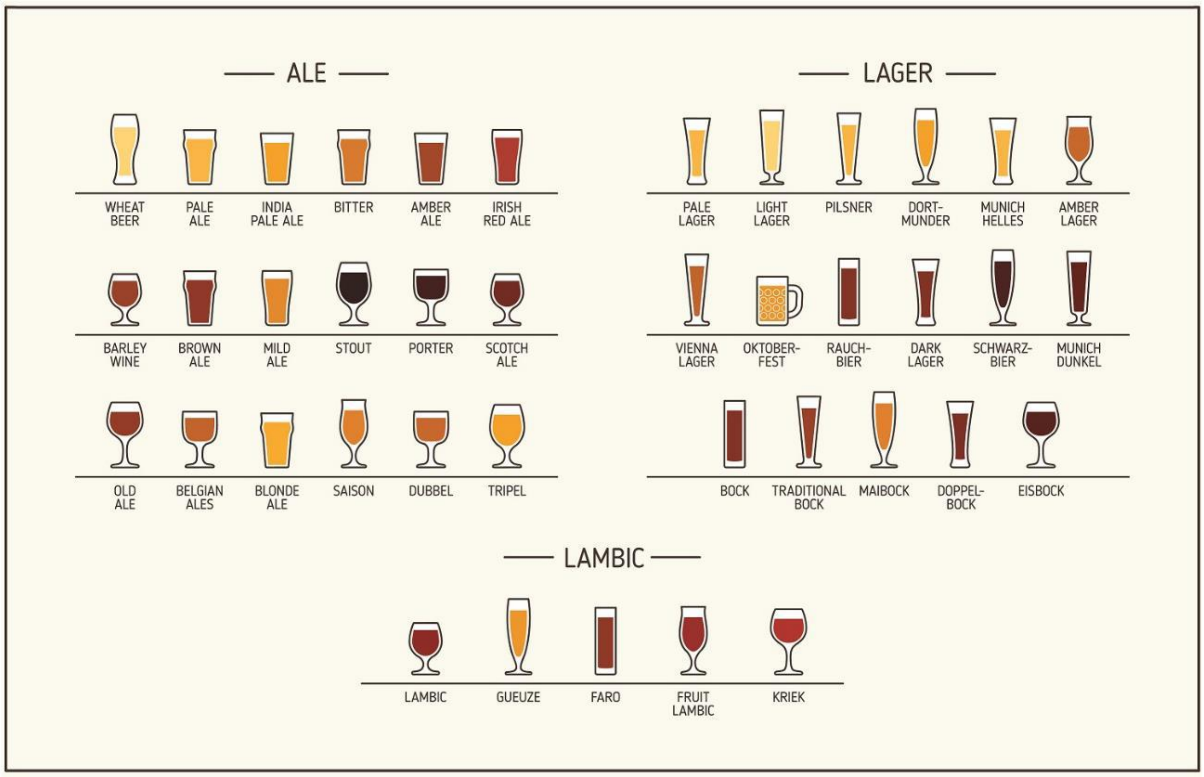
Indiferente de países com climas tropicais ou não, a cerveja está presente na maioria das celebrações de bares, em restaurantes ou nas casas dos próprios consumidores, transformando-se em fato universal de forma que o desejo por ela tem tomado relevância no mundo. A cerveja é a bebida mais consumida, está entre as cinco mais consumidas no mundo e a terceira entre os brasileiros (PINHEIRO, 2019).

De acordo com BELTRAMELLI (2014, p.24), por muitos anos a cerveja foi considerada uma bebida rica, devido sua composição conter os mesmos ingredientes do pão, como vitaminas e minerais, devido a isso, antigamente foi apelidada de pão líquido.

Conforme a Associação Brasileira da Indústria Cervejeira, as indústrias cervejeiras têm enorme resultado na economia, pelo fato de ser um dos melhores setores da economia, alavancando a cadeia produtiva, que tem início nas atividades da agricultura e na importação dos insumos até a distribuição final, que abrange grandes frotas de veículos brasileiros, para disponibilizar a bebida em diversos mercados, transformando-se acessível para 99% da população do Brasil (VERONEZE *et al.*, 2019). Dessa forma, a indústria de cerveja corresponde pelos consideráveis 1,6% do PIB nacional, possuindo 2,7 milhões de pessoas empregadas, dentre empregos diretos, indiretos e induzidos, por toda extensão da cadeia produtiva, obtendo aproximadamente 21 bilhões de reais em tributos (MAPA, 2019).

Conforme PAYÁ *et al.* (2019) as categorias mais comuns são Lager, Ale, Lambic, além das híbridas. A fermentação realizada durante o processo de produção, a combinação ou adição de matéria prima, como aveia, são alguns dos fatores que diversificam as categorias das cervejas. A figura 1 representa a variedade de cervejas.

Figura 1 - Variedade de cervejas



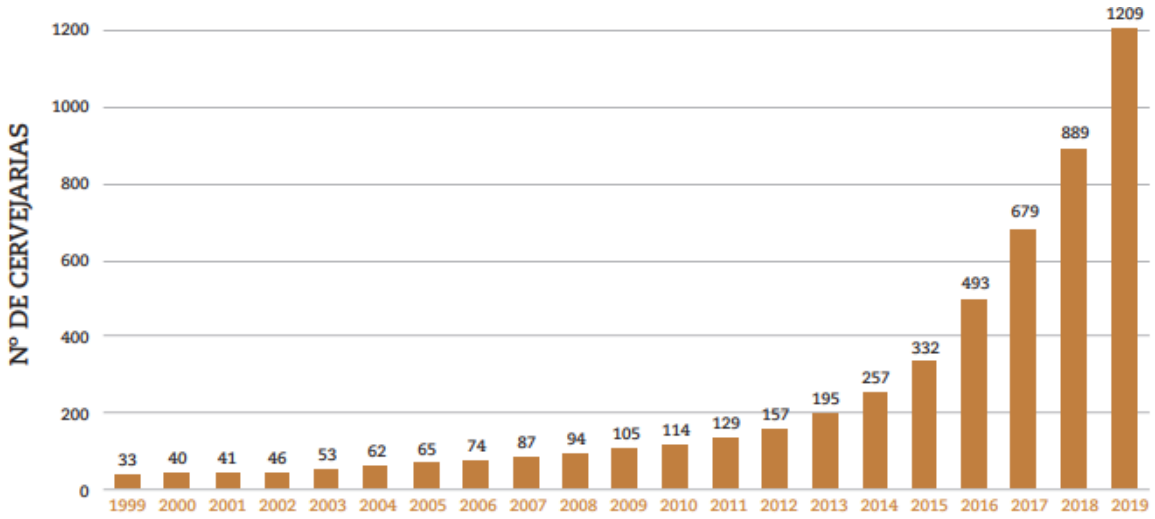
Fonte: Cervejeiros de Portugal (2018).

Gradativamente, os consumidores estão mais exigentes no momento da degustação ideal da bebida. Qualidades como espuma consistente, estável e cremosa bem como um sabor harmonioso entre componentes usados na elaboração se tornaram primordiais (TOZETTO, 2017).

A indústria de cerveja no Brasil atingiu o número de 1.209 cervejarias inscritas em 26 Unidades da Federação, sendo que apenas no estado do Acre não há cervejarias inscritas. O gráfico da figura 1 demonstra que em 2019 obteve-se um crescimento de 320 novas indústrias cervejeiras inscritas, o que resulta em aproximadamente uma cervejaria por dia no país. Na figura 2 pode-se observar o

crescimento nos últimos 20 anos das cervejarias inscritas no Ministério da Agricultura, Pecuária e Estabelecimento (MAPA, 2019).

Figura 2 - Crescimento das cervejarias inscritas por ano



Fonte: MAPA (2019).

Abaixo, a figura 3 demonstra o número e o crescimento médio das indústrias de cerveja nos dez primeiros estados nos últimos 3 anos (MAPA, 2019).

Figura 3 - Número e crescimento médio por estado das indústrias de cervejas

Nº	UF	2017	2018	2019	Crescimento médio
1	SP	124	166	241	39,5%
2	RS	142	184	236	28,9%
3	MG	87	116	163	36,9%
4	SC	78	104	148	37,8%
5	PR	67	93	131	39,8%
6	RJ	57	62	78	17,3%
7	ES	11	17	34	77,3%
8	GO	21	25	28	15,5%
9	BA	7	12	20	69,0%
10	RN	6	9	20	86,1%

Fonte: MAPA (2019).

Considerada a bebida de maior qualidade, as cervejas artesanais se estabeleceram no mercado com o valor agregado ser superior quando comparada com as cervejas tradicionais, devido sua produção ser controlada e acompanhada pelos produtores (PAYÁ *et al.*, 2019).

O desenvolvimento em quantidade de microcervejarias é baixo, porém o mercado está crescendo. A adversidade para adquirir matérias-primas assim como, a falta de equipamentos qualificados para baixa escala, a elevada carga tributária, o processo dos órgãos fiscalizadores, são alguns dos fatores que dificultam o crescimento das microcervejarias (VENTURINI FILHO, 2010).

2.1.1 Matérias-primas na produção da cerveja

2.1.1.1 Água

A água é o constituinte fundamental da bebida, em volume, excedendo 92% do total, sendo que para cada litro de bebida produzida em média são usados 12 litros de água em todo procedimento de fabricação da cerveja. Atualmente, possui recursos técnicos que permitem ajustar as características da água de acordo com as formulações, sendo possível evidenciar os sabores maltados e de amargor através da elevada concentração de sais de cálcio, magnésio e sulfato (ANDRADE; MEGA; NEVES, 2011).

Conforme MATOS *et al.* (2011, p. 24):

> A cerveja terá sabor e outros caracteres afetados por todos os seus ingredientes, mas a água fornece a leveza, a qualidade, e a confiabilidade do produto. A água tem papel fundamental na qualidade final do produto, pois é o ingrediente em maior quantidade, sendo que deve ser cristalina e de fonte natural, quando possível.

Para a produção de cerveja, a água deve ser filtrada, livre de impurezas, sem adição de cloro, sem sabor e cheiro, inofensiva, que não provoque contaminação, para ser útil de nutrientes para as leveduras que atuam no processo de fermentação. Em relação a dureza, a água que possui alto teor de sulfato de cálcio, apresenta uma dureza permanente resultando em cervejas amargas. Já a água com baixo teor de cálcio e magnésio, considerada água mole, é utilizada para a produção da cerveja Pilsen (TOZETTO, 2017).

Referente ao pH da água para a produção de cerveja, é ideal que se obtenha uma pH ácido para favorecer a ação enzimática do grão de cereal, que resulta em um

maior rendimento de maltose e teor alcoólico. Controlar o pH da água para o processo é indispensável, uma vez que o pH alcalino pode originar na dissolução de substâncias presente no malte e nas cascas dos cereais, que tornará o processo da bebida desagradável. Dessa forma, o pH ideal para a fabricação da bebida é entre 6,5 e 7,0 (OLIVEIRA, 2011).

2.1.1.2. Malte

Antes de ser usada como matéria-prima para a fabricação da cerveja, a cevada precisa passar pela etapa de conversão do amido, presente na sua composição, em açúcar fermentativo, ambos indispensáveis para a elaboração da cerveja. Essa modificação de enzimas é denominada de malteação, subdividida em três estágios: a maceração ou embebição, a germinação e a secagem. Todo esse processo se faz necessário para a produção de enzimas usadas na transformação das matérias-primas no mosto cervejeiro (BELETI *et al.*, 2012).

O malte é o constituinte da fonte de carbono da bebida, pois concede sabor, cor, além de atuar na formação de espuma da cerveja. Esse ingrediente oferece enzimas fundamentais nos rompimentos das cadeias de polímeros, do qual os amidos e as proteínas são existentes do ingrediente em específico, originando açúcares fermentativos que dão “corpo” e doçura para bebida (LEWIS e YOUNG, 2002).

De diversas formas quanto ao seu tamanho e cor, o malte tem ação direta na coloração, odor e sabor da cerveja produzida, sendo necessário apresentar cascas, empregadas no auxílio de filtro na clarificação do mosto da cerveja (TOZETTO, 2017). A figura 4 apresenta o aspecto do malte em grãos sem moer.

Figura 4 - Malte em grãos antes de moer

Fonte: SPIESS (2015).

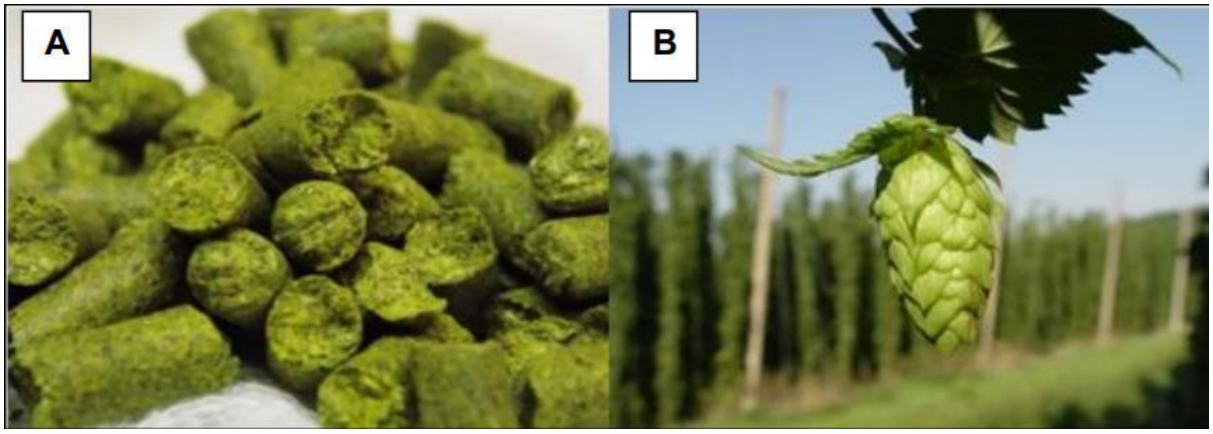
2.1.1.3 Lúpulo

O lúpulo (*Humulus luplus*) pertence à família da Cannabaceae, é uma planta herbácea perene, classificada como dicotiledôneas, trepadeira e com característica dioica, ou seja, produz flores femininas e masculinas. A distribuição da planta é realizada em regiões do hemisfério norte e regiões temperadas, sendo que a prioridade é nas regiões da Europa, Ásia (cento e norte), África do Norte e América do Norte (NOVAES *et al.*, 2019).

Somente as flores femininas que não fertilizaram são utilizadas comercialmente, pelo fato de possuir a lupulina, substância fundamental de aplicação, é peça importante na produção da cerveja, enquanto as masculinas são usadas para miscigenação e aperfeiçoamento de novas variedades (NOVAES *et al.*, 2019).

Sua principal aplicação é no bioprocesso na fabricação da cerveja. O lúpulo beneficia a fermentação, mas não aumenta o teor de álcool da bebida, é um ingrediente insubstituível que concilia aroma e sabor, além de possuir características antibióticas, ser antisséptico e conservante, aumentando a vida útil da cerveja (VERONEZE *et al.*, 2019). A maneira mais frequente utilizada na indústria, é em formato de pellets. A figura 5 apresenta a flor fêmea de lúpulo e em forma de pellets.

Figura 5 - Lúpulo



[A]: Pellets e [B] Flor fêmea do lúpulo

Fonte: PAYÁ *et al.* (2019).

Entretanto, o lúpulo apresenta outras vantagens além das citadas. A adição do lúpulo na bebida foi satisfatória para os apreciadores de cerveja, pois apresenta o sabor amargo, já conhecido atualmente, e outros aromas de novas receitas. Estudos comprovam que o lúpulo também auxilia na permanência da espuma na cerveja (PINHEIRO, 2019).

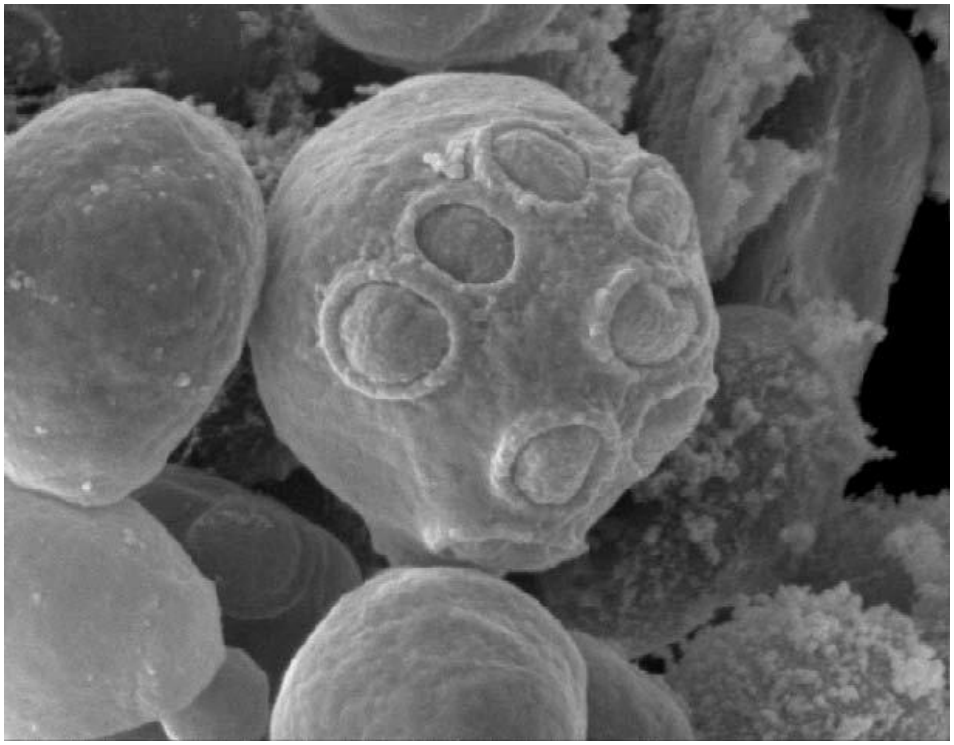
De acordo com PINHEIRO (2019), as resinas presentes nas glândulas lupulinas possuem os componentes responsáveis pelo sabor amargo do lúpulo, denominados de alfa-ácidos e beta-ácidos, sendo que a primeira tem maior participação na fonte de amargor.

2.1.1.4 Levedura

A levedura é um microrganismo eucarionte, unicelular, livre de clorofila que pertence ao Reino Fungi, tem a capacidade de se reproduzir por gemulação ou brotamento. A conversão da matéria-prima em álcool é realizada através de microrganismos, normalmente leveduras da espécie *Saccharomyces cerevisae*, mediante a fermentação alcoólica. Com o objetivo de alcançar sucesso na fermentação, conforme as especificações técnicas, é de extrema importância que se misture ao mosto uma quantidade de leveduras suficiente a fim de converter os açúcares em álcool e gás carbônico, através de condições definidas metabolizando

os açúcares fermentescíveis a fim de se produzir álcool, gás carbônico, energia na forma de ATP e calor (PAYÁ *et al.*, 2019). Na figura 6 apresenta-se uma micrografia da levedura da espécie *Saccharomyces cerevisae.*

Figura 6 - Levedura da espécie *Saccharomyces cerevisae*

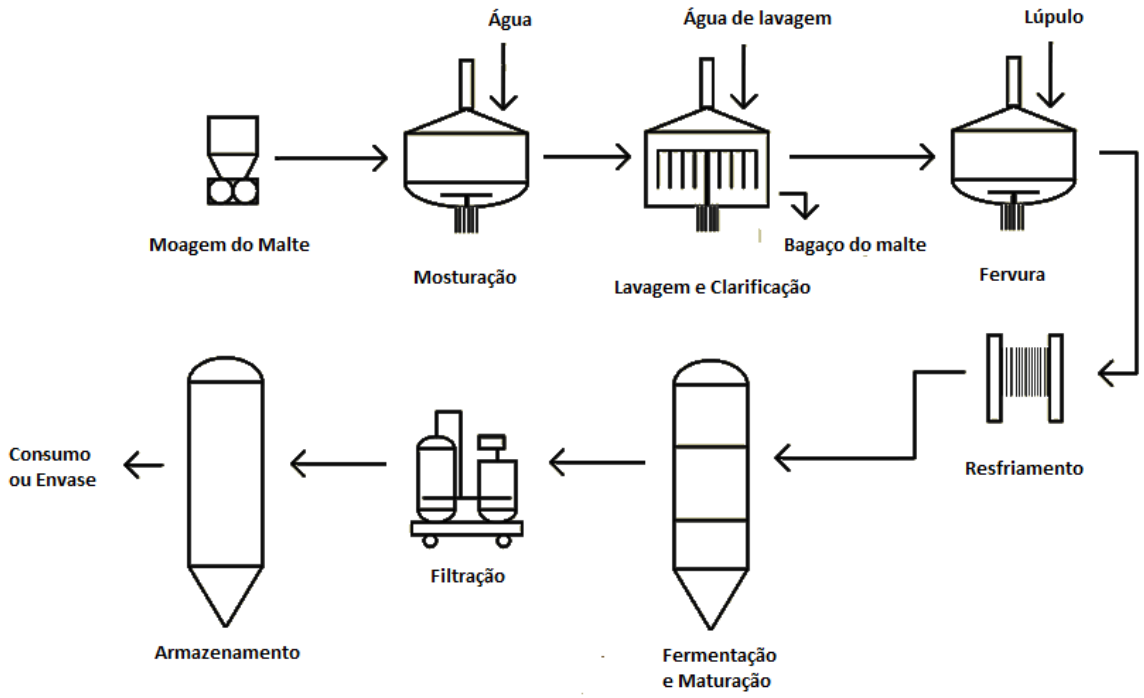


Fonte: MARTINEZ (2017).

2.1.2 Etapas do processo de fabricação da cerveja

O processo de fabricação da cerveja se divide nas seguintes etapas: moagem do malte, mosturação, lavagem e clarificação, fervura, resfriamento, fermentação e maturação, filtração, armazenamento, e por fim, consumo ou envase. A Figura 7 demonstra um fluxograma básico das etapas do processo de produção de cerveja.

Figura 7 - Fluxograma básico do processo de produção de cerveja



Fonte: TOZETTO (2017).

2.1.2.1 Moagem do malte

Nessa etapa o malte é inserido em moinho a fim de realizar a exposição do amido do endosperma ao dividir as cascas da semente de malte, e aumentar a área superficial para que, na próxima etapa, as enzimas possam atuar. Como as cascas do malte são utilizadas para o processo de filtração, o mesmo não é esmagado, e sim triturados em rolos cilíndricos, por isso essa etapa é totalmente física (MATOS *et al.*, 2011).

2.1.2.2 Mosturação

A mosturação, também denominada de brassagem, é a etapa do processo em que o malte é umedecido em água quente para hidratá-lo e ativar as enzimas que, dessa forma, irão converter o amido contido nos grãos em açúcares. Devido às reações físicas e bioquímicas que ocorrem, esse é um dos processos mais complexo

na fabricação da cerveja (MATOS *et al*., 2011). Durante essa etapa, o controle de temperaturas e tempo são indispensáveis para auxiliar todas as reações bioquímicas (PAYÁ *et al*., 2019). Através da influência da temperatura, as enzimas existentes no grão de cevada maltada, iniciam a hidrólise do amido, convertendo o amido em maltose e outros açúcares, além de remover substâncias não tão favoráveis para a cerveja, como proteínas, vitaminas, taninos, etc (MATOS *et al.*, 2011). Durante o processo de mosturação, 90% dos amidos são solúveis a 45,5 ºC e conseguem atingir a solubilidade a 65 ºC. Para auxiliar na hidratação dos amidos, pode-se mexer ou até mesmo esmagar os grãos, sendo que muitas faixas de temperaturas auxiliam no processo de quebrar as proteínas que envolvem esses grãos. Após a hidratação, o amido possui a facilidade de se solubilizar, tanto pelo calor ou através da combinação de calor e ação enzimática (MATOS *et al.*, 2011).

2.1.2.3 Lavagem e clarificação

A etapa de lavagem e clarificação, chamada também de filtração do mosto, é indispensável para a qualidade da cerveja, sendo que os sólidos possuem alta quantidade de enzimas e proteínas coaguladas, resultado de amido não transformado, material graxo, silicatos e polifenóis. Essa etapa se torna importante pelo fato de que essas substâncias têm a capacidade de prejudicar sabores, odores, viscosidade, além do visual da bebida (REITENBACH *et al.*, 2010).

O processo em questão tem o intuito de separar a fase sólida da fase líquida, ou seja, isolar o bagaço de malte do mosto cervejeiro, que é a parte importante do processo de fabricação (TOZETTO, 2017).

Os principais equipamentos utilizados para a filtração do mosto são a tina-filtro e o filtro-prensa de placas. O equipamento tina-filtro possui um fundo falso perfurado com baixa granulometria, onde a casca, que foi protegida no processo de moagem, clarifica o mosto e a filtragem é realizada da seguinte maneira: a) o mosto é colocado na tina-filtro, onde somente o líquido passa, retendo o bagaço; b) o líquido que passou pelo fundo da tina, é transportado através de uma bomba hidráulica e retorna para a parte superior da torta, o bagaço, que ficou retido na primeira etapa. Dessa maneira,

o mosto realiza esse ciclo diversas vezes até o momento em que o mesmo esteja claro e sem impurezas, e só após é levado para a caldeira de fervura. Já a torta de bagaço é lavada para uma possível extração de açúcares que permaneceram retido nas partículas sólidas (MATOS *et al*., 2011).

No equipamento filtro-prensa, o mosto contendo os sólidos é transportado através de bomba hidráulica para quadros que dispõem de placas de suporte com telas de polipropileno, que além de impedir a passagem das cascas, possui um efeito filtrante melhor, que corresponde à baixa porosidade. As etapas são parecidas com o equipamento tina-filtro: bombeamento de mostura, clarificação por circulação, filtração do mosto primário e por fim, a lavagem do bagaço para separação do extrato residual (MATOS *et al*., 2011).

2.1.2.4 Fervura

Nessa etapa do processo é realizada a fervura do mosto, etapa que acontece a esterilização, a desnaturação das proteínas e enzimas, a concentração do mosto, a retirada dos compostos sulfurosos, além de ocorrer o escurecimento do mosto, por meio da reação de Maillard. A adição do lúpulo ocorre nessa etapa e é feita normalmente em duas etapas: ao iniciar a fervura, para verificar o amargor e ao final da fervura, encarregado para verificar o aroma característico da cerveja (TOZETTO, 2017).

A fervura efetiva leva geralmente 80 minutos, acrescido de 30 minutos para o aquecimento do líquido (PAPAZIAN, 2014). Ao final da fervura, o mosto é transportado para outro tanque. O intuito dessa etapa é realizar a decantação do excesso de proteína desnaturada durante a fervura, com um tempo de repouso em torno de meia hora (MORADO, 2009).

2.1.2.5 Resfriamento

Para a etapa de resfriamento é utilizado o chiller, equipamento que realiza os movimentos dos fluidos com o objetivo de reduzir a temperatura (PAYÁ *et al*., 2019).

Para o resfriamento possui duas condições diferentes: O resfriamento rápido, com a formação do *cold break*, uma mistura de proteínas que receberam choque térmico, que se precipitam em grandes coágulos. As proteínas do *cold break* possuem a característica de não se dissolverem mais após a precipitação. E o resfriamento lento, não afetando as proteínas devido não ocorrer o choque térmico, originando o *chill haze.* O *chill haze* é classificado normalmente como um problema de equilíbrio visual e de conservação do sabor, por isso o resfriamento deve ocorrer na forma rápida (MATOS *et al*., 2011).

2.1.2.6 Fermentação e maturação

O processo de fermentação se inicia após a levedura (*Saccharomyces cerevisiae*) ser inoculada com o mosto já resfriado e aerado (SANTOS, 2005). Nessa etapa, os microrganismos vão se reproduzir, ingerir os açúcares fermentativos, além de produzir álcool, dióxido de carbono, e outros ésteres, ácidos e álcoois superiores que vão transferir as características organolépticas para a cerveja. Na indústria, a fermentação acontece em tanques fechados, que são cobertos por uma camisa externa que possibilita a passagem do fluido refrigerante, como amônia ou etileno glicol, que mantém o sistema na temperatura adequada, podendo essa variar. No processo de fermentação, o objetivo primordial, quanto a qualidade, é a obtenção de cervejas com atributos sensoriais, químicas e físico-químicas conforme desejado (MATOS *et al*., 2011).

Diversos são os aspectos a serem cuidados para que se obtenha uma cerveja de boa qualidade durante a fermentação, como: selecionar uma ótima cepa de levedura, pois essa deverá flocular e decantar no tanque de fermentação no final do processo, definir se a cerveja será de baixa ou alta fermentação, qual a concentração celular a ser usada, dados de crescimento e morte celular do microrganismo, tempo e determinar quanto ao término da fermentação (REITENBACH, 2010). O processo de fermentação alcoólica conserva os alimentos tanto pela diminuição do pH, como pela formação do etanol, condições essas que alguns microrganismos, como as leveduras, sobrevivem (FERREIRA, 2006).

Matos *et al*. (2011) cita algumas das reações físico-químicas que ocorrem durante a etapa de fermentação da cerveja, como: enfraquecimento do extrato, redução do pH de 5,4 ~ 5,7 para 4,0 ~ 4,6, acarretando na alteração da cor para cor mais clara, diminuição do oxigênio dissolvido e a modificação nas proporções das proteínas, diminuindo em até 25% da quantidade total durante a etapa.

De forma apropriada, a fermentação ocorre no momento em que a levedura usa os açúcares para extrair o que necessita para sobreviver e gera CO_2, assim podendo ser classificada em duas etapas: a fase de fermentação primária ou atenuativa e a fase secundária ou de acondicionamento, também denominado de maturação (MATOS *et al*., 2011).

A etapa de maturação se inicia após a retirada do fermento, quando ocorre a diminuição da temperatura no tanque (TOZETTO, 2017), e quando a cerveja obtida (cerveja verde) é transferida para o tanque de maturação, ou para a garrafa (em produção artesanal), onde será conservada por tempos variáveis a temperatura próximo de 0 ºC (MATOS *et al*., 2011). Nesta etapa acontecem diversas reações físico-químicas de modificação quanto ao aspecto visual da cerveja, além de acrescentar aromas sabores específicos a bebida (MORADO, 2009).

A maturação é a fase importante para sedimentar as partículas existentes em suspensão e ainda estimular outras reações de esterificação para produzir aromatizantes essenciais para a bebida. Essa etapa pode prolongar-se de 4 a 42 dias, dependendo do método utilizado e da cerveja produzida (MATOS *et al*., 2011).

2.1.2.7 Filtração

Depois da maturação a cerveja segue para a etapa de filtração. De modo geral, a etapa de filtração não modifica a composição, nem o sabor da cerveja, a bebida é filtrada para retirar os fragmentos menores que estão em suspensão (REITENBACH *et al*., 2010). Depois dessa etapa a cerveja aumentará o equilíbrio microbiológico, como também o físico-químico, devido a quantidade de leveduras suspensão serem retiradas (MATOS *et al*., 2011).

Reitenbach *et al*. (2010) comenta outro benefício da filtração, que é o padrão da cerveja dentro da garrafa, devido o líquido da parte inferior ser mais denso que na parte superior. Algumas pessoas que desconhecem essa técnica, consideram esse fato como falta de qualidade da bebida. Quando não ocorre a etapa de filtração, são adicionados estabilizantes e antioxidantes, pois dessa forma restam leveduras em suspensão ricas em vitaminas, que melhoram ainda mais a cerveja.

2.1.2.8 Armazenamento

Durante o armazenamento, os processos da maturação da bebida seguem acontecendo podendo a cerveja “passar do ponto”, por esse motivo é ideal realizar a filtração com o intuito de diminuir esses processos (MATOS *et al*., 2011).

É indispensável realizar uma etapa denominada de *priming*, que constitui da adição de uma mistura de açúcar, água e limão, e tem como objetivo fornecer mais substrato para os microrganismos existentes na cerveja absorverem e gerarem gás carbônico e etanol nas medidas esperadas. Isso tudo pelo fato de que o gás carbônico gerado ao longo do processo de fermentação se perde para o meio nas fases posteriores.

2.1.2.9 Consumo ou envase

Ao realizar o envase da bebida, é necessário tomar alguns cuidados específicos quanto a exposição da cerveja com oxigênio para evitar futura oxidação (MATOS *et al*., 2011).

Hughes (2014), mestre cervejeiro, salienta a etapa final da produção da cerveja, como sendo uma fase que exige cuidado, tanto na higienização como na sanitização das garrafas que irão receber a bebida. Dentre os métodos e produtos que podem ser utilizados, pode-se destacar os mais comuns, a esterilização por calor, a utilização de ácidos ou outro sanitizante. O processo de envase pode ser efetuado por meio de máquinas ou manual, porém o primeiro é mais seguro.

2.2 Resíduos sólidos orgânicos gerados no processo

De acordo com ARANTES (2017), durante a fabricação da cerveja são produzidos diversos resíduos que possuem sólidos, açúcares e leveduras, dentre outros, que são gerados em operações como filtração, descarga dos equipamentos, na lavagem de contêineres e na limpeza de tanques, tubulações, cubas e pisos. Tendo em vista a destinação correta para os resíduos sólidos orgânicos gerados na produção de cerveja e proporcionando a geração de energia sem poluentes causadores do efeito estufa, é possível realizar o aproveitamento energético desses resíduos através da digestão anaeróbia (POLASTRI *et al*., 2019).

Referente ao volume de resíduo gerado, o bagaço de malte é considerado o maior volume de resíduo sólido gerado na produção de cerveja, pois representa a fração sólida que caracteriza, aproximadamente, 85% dos resíduos produzidos durante todo o processo (SANTOS, 2005; MUSSATO; DRAGONE; ROBERTO, 2006). Devido ao bagaço de malte possuir elevado teor de celulose, lignina e polissacarídeos não celulósicos, esse tende apresentar certa resistência na degradação anaeróbia (SANTOS, 2005). Porém, esses materiais são citados como uma boa alternativa para a digestão anaeróbia, pelo fato de ser uma técnica específica para o tratamento dos resíduos sólidos, assim como na produção de metano como fonte de energia limpa e, consequentemente, na diminuição da emissão de gases do efeito estufa (HASAN *et al*., 2018).

A utilização dos resíduos sólidos abundantes em matéria orgânica para gerar biogás é a maneira de propiciar sua recuperação, pois sua transformação de energia acontece pelo fato de serem introduzidos novamente no processo da produção, possibilitando sua conversão e obtenção de benefício em forma de energia elétrica ou térmica (HASAN *et al*., 2018).

Quanto aos resíduos sólidos orgânicos, muitas são as técnicas e estudos que estão sendo implantadas e pesquisados, respectivamente, com o objetivo de possibilitar a reutilização, assim como minimizar os riscos ambientais provocados ao dispor, irregularmente, os resíduos sólidos orgânicos. Os métodos biológicos, nas condições aeróbias ou anaeróbias, é uma das técnicas com intuito na reciclagem e

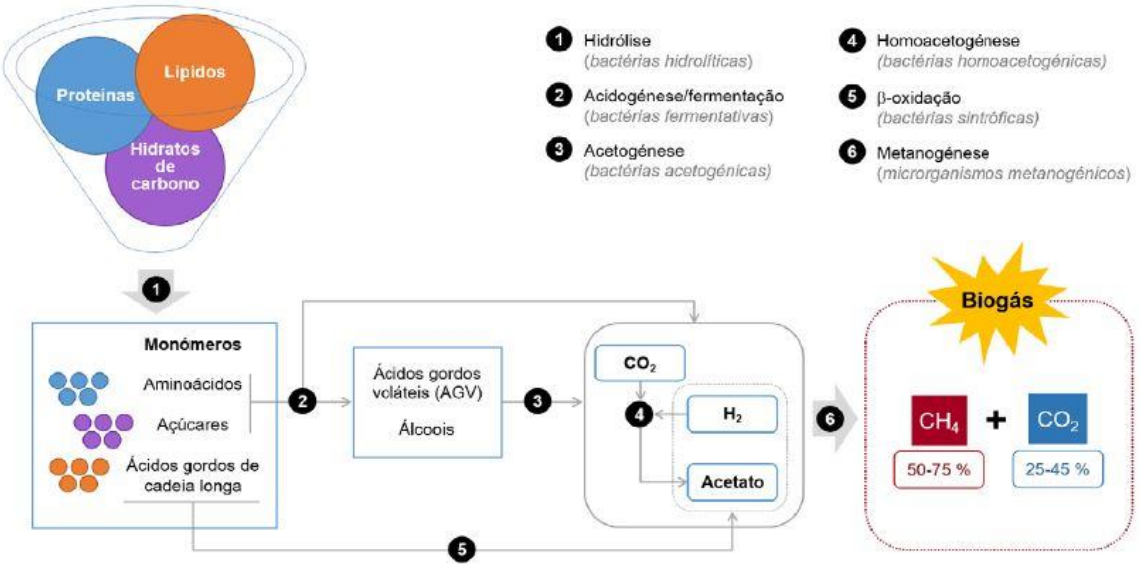
reconhecimento dos resíduos orgânicos por meio da transformação em compostos orgânicos a serem utilizados na agricultura ou ainda pela produção de biogás, formado por metano, oxigênio e gás carbônico, mediante a digestão anaeróbia com a recuperação energética ou aplicação como gás natural (MAGALHÃES *et al*.., 2016).

O descarte impróprio dos restaurantes com desperdícios de alimentos e resíduos orgânicos, bem como a geração contínua dos resíduos sólidos orgânicos pelas indústrias cervejeiras são ações que colaboram para o agravante assunto do lixo no país, dessa forma resultando em uma situação ambiental crítica (MAGALHÃES *et al*., 2016).

2.3 Tratamento de resíduos orgânicos por digestão anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia é um método metabólico complexo que necessita de um conjunto de microrganismos para promover a matéria orgânica presente no resíduo em metano e dióxido de carbono, em condições anaeróbias (potencial redox < - 200 mV). A digestão anaeróbia é marcada por quatro etapas de degradação, sendo estas ilustradas na Figura 8: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (KUNZ *et al*., 2019).

Figura 8 - Esquema geral do processo de digestão anaeróbia



Fonte: CAVALEIRO (2020).

Como por ser observado, em cada etapa da digestão anaeróbia atua um grupo específico de microrganismos responsável pela formação de subprodutos distintos, que levam à conversão da matéria orgânica complexa ao biogás.

2.3.1 Hidrólise

O processo de hidrólise acontece através da atividade das enzimas extracelulares expelida pelos microrganismos hidrolíticos. Essa fase degenera os compostos que possuem massa molecular elevada, como lipídios, proteínas e polissacarídeos em matéria orgânica menos complexas e solúveis.

A velocidade em que ocorre a degradação na etapa de hidrólise depende das propriedades do substrato, ou seja, se houver dificuldade para degradar a substância orgânica, por ela ser complexa, pode-se levar em conta como etapa limitante da digestão anaeróbia, pelo fato de ser primordial a velocidade global de degradação. Os carboidratos necessitam poucas horas, enquanto as proteínas e os lipídios necessitam de mais dias (KUNZ *et al*., 2019).

2.3.2 Acidogênese

As pequenas moléculas produzidas na etapa de hidrólise são usadas como substratos por diversos microrganismos anaeróbios e facultativos, sendo essas degradadas a ácidos orgânicos de cadeia curta, como por exemplo: ácido butírico, propiônico e acético), além de álcoois, óxidos de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, dióxido de carbono e hidrogênio (KUNZ *et al*., 2019).

Os carboidratos existentes na etapa de acidogênese, como a glicose, são degenerados em piruvato, e após transformado em ácido lático pelo conjunto de microrganismos *Lactobacillales* e etanol através da atividade das leveduras. Já os ácidos graxos se degradam por meio dos microrganismos *Acetobacter* por β-oxidação, enquanto os aminoácidos são degenerados por meio do *Clostridium Botulinum* em pares, através da reação de Stickland (KUNZ *et al*., 2019).

2.3.3 Acetogênese

Durante a fase de acetogênese as matérias decorrentes da etapa de acidogênese são modificadas, através dos microrganismos acetogênicas, em ácido acético, hidrogênio e gás carbônico (ARAÚJO *et al*., 2017).

KUNZ *et al*. (2019) relatam ainda que esse grupo de microrganismos é denominado de acetogênicos pelo fato de realizar reações de acetogênese, essas estabelecidas como endotérmicas. Um exemplo de reação acetogênica é a degeneração do ácido propiônico para acetato e dióxido de carbono.

Na etapa de acetogênese, os microrganismos acetogênicos definem uma interação biológica com as arqueas metanogênicas e os microrganismos homoacetogênicos, dessa forma permitindo que todas tenham crescimento igual para viabilizar a produção de acetato desde os ácidos orgânicos (KUNZ *et al*., 2019).

2.3.4 Metanogênese

Na etapa de metanogênese, os materiais resultantes das etapas anteriores, ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono, por fim são transformados em metano e gás carbônico (ARAÚJO *et al*., 2017). Essas reações acontecem devido as arqueas metanogênicas, porém o meio onde ocorre essa etapa tem como requisito primordial ser anaeróbio. Na metanogênese, todas as reações que acontecem são exotérmicas (KUNZ *et al*., 2019).

Devido a compatibilidade pelos substratos e ao tamanho da produção de metano, as bactérias metanogênicas são classificadas em dois grupos: as bactérias acetoclásticas, responsáveis pela formação de 70% do metano através do ácido acético, além de auxiliar no controle do pH e as bactérias hidrogenotróficas responsáveis pelo restante da parcela de metano produzido (VERONEZE *et al*., 2019).

As equações 1 e 2 apresentam as reações realizadas através das bactérias acetoclásticas e as hidrogenotróficas, respectivamente.

$$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2 \quad (1)$$

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2\ H_2O \quad (2)$$

2.4 Requisitos do processo de digestão anaeróbia

Por se configurar como um processo biológico realizado por microrganismos anaeróbios mesofílicos, a digestão anaeróbia depende de vários parâmetros que necessitam de controle e monitoramento (Tabela 1), dentre eles: temperatura, pH, concentração de matéria orgânica, presença de nutrientes, umidade, alcalinidade, assim como o potencial redox (POLASTRI *et al*., 2019; KUNZ *et al*., 2019). Isso por que o meio necessita disponibilizar condições ótimas para o desenvolvimento dos microrganismos, e para que estes possam assim realizar a conversão da matéria orgânica, conforme desejado (POLASTRI *et al*., 2019).

Tabela 1 - Requisitos ambientais dos microrganismos anaeróbios mesofílicos

Parâmetros	Hidrólise/Acidogênese	Metanogênese
Temperatura (ºC)	25 - 35	32 - 42
pH	5,2 - 6,3	6,7 - 7,5
Relação C:N	10 - 45	20-30
Concentração matéria seca (%)	< 40	< 30
Potencial Redox (mV)	+ 400 até - 300	< - 200
Relação de C:N:P:S necessária	500 : 15 : 5 : 3	600 : 15 : 5 : 3
Elementos traços	-	Essencial: Ni, Co, Mo, Se

Fonte: Adaptado pela autora com base em Wellinger *et al.* (2013).

No processo de digestão anaeróbia são utilizados biodigestores que podem ser caracterizados pelo método de alimentação (batelada ou contínuo), forma de alimentação (ascendente ou laminar), acúmulo dos sólidos dentro do reator (>20%

digestão sólida, 10 a 15% semissólida e <10% úmida) e técnica de agitação (sem mistura, mistura parcial ou completa) (KUNZ *et al*., 2019).

2.4.1 Temperatura

Durante a digestão anaeróbia, a etapa de fermentação é conduzida especificamente pela temperatura, minimizando o tempo de retenção da massa na parte interna do biodigestor. Com isso, quanto mais o processo de fermentação acontecer em temperaturas altas, maior será a porcentagem de metano na composição do biogás, garantindo assim um poder calorífico mais elevado para a mistura (ARAÚJO *et al*., 2017).

A temperatura também atua na velocidade de crescimento e no metabolismo dos microrganismos, auxiliando na atividade da população dentro do biodigestor. Conforme a temperatura, os microrganismos são classificados em três grupos diferentes (Tabela 2) (KUNZ *et al*., 2019).

Tabela 2 - Classificação dos microrganismos conforme a temperatura

Grupos	Temperatura ótima de Crescimento (ºC)
Termofílicos	60
Mesofílicos	37
Psicrofílicos	15

Fonte: Adaptado pela autora com base em Kunz *et al*. (2019).

Os autores Kunz *et al*. (2019) citam outros benefícios com a elevação da temperatura, como: a solubilidade dos compostos orgânicos aumenta, progresso nas velocidades das reações bioquímicas e a crescente taxa na eliminação de patógenos.

2.4.2 Condições do pH

Quanto ao pH, cada grupo de microrganismos têm diferente ponto ótimo, como o princípio da temperatura. Durante as fases de hidrólise e acidogênese, o pH ideal é

entre 5,2 a 6,3. Já nas fases de acetogênese e metanogênese o pH ideal é entre 6,5 a 8 (ARAÚJO *et al*., 2017).

Grande parte dos problemas que ocorrem durante a digestão anaeróbia está relacionado a abundância dos ácidos voláteis, afetando na diminuição do pH. Isso acontece devido os ácidos orgânicos voláteis possuírem resultados contraditórios durante o processo de digestão anaeróbia por serem de espécies intermediárias (KUNZ *et al*., 2019).

2.4.3 Tempo de detenção Hidráulica

O tempo de detenção hidráulica (TDH) significa quanto tempo a matéria se mantém no biodigestor, podendo variar de 4 a 60 dias, conforme os substratos usados na alimentação do biodigestor e dos demais fatores (ARAÚJO *et al*., 2017).

Um dos fatores mais significativos para concluir o dimensionamento do digestor anaeróbio é o tempo que os microrganismos precisam para realizar os metabolismos dos sólidos voláteis. Resíduos com facilidade de degradação (como o açúcar) necessitam de baixos TDH, já os resíduos complexos, que são lentamente degradáveis, exigem mais tempo para metabolizar (VERONEZE *et al*., 2019).

2.4.4 Nutrientes

Nitrogênio, fósforo e enxofre são os nutrientes contidos nas células dos microrganismos anaeróbios nas quantidades próximas de 12, 2 e 1%, respectivamente, de toda matéria seca. Além disso, são essenciais para a digestão anaeróbia as relações de 700:5:1 correspondentes à demanda biológica de oxigênio, nitrogênio e fósforo (KUNZ *et al*., 2019).

Para um ótimo desempenho do processo anaeróbio são fundamentais os íons de enxofre, potássio, cálcio, magnésio, cloro e sulfato. Já para auxiliar no crescimento das células dos microrganismos anaeróbios são relevantes elementos com baixa

concentração como ferro, cobre, zinco, magnésio, molibdênio e vanádio (KUNZ *et al*., 2019).

2.5 Características do biogás

A digestão anaeróbia gera como subprodutos um resíduo digerido (digestato) e o biogás. Em função das suas características típicas, contendo metano como componente principal, o biogás pode ser utilizado como fonte energia térmica ou elétrica, quando usado na produção combinada, pelo fato de representar uma fonte de energia renovável (CAVALHEIRO, 2020). A Tabela 3 ilustra a composição característica do biogás.

Tabela 3 - Composição do biogás gerado a partir de resíduos orgânicos

Componentes	**Concentração (%)**
Metano (CH_4)	55 - 70
Dióxido de carbono (CO_2)	35 - 40
Água (H_20)	2 - 7
Sulfeto de hidrogênio (H_2S)	2
Nitrogênio (N_2)	< 2
Oxigênio (O_2)	< 2
Hidrogênio (H_2)	< 1
Amônia (NH_3)	< 0,05

Fonte: Adaptado pela autora com base em Cecchi *et al*. (2003).

O rendimento de biogás e a sua composição variam, especialmente, conforme a qualidade do resíduo incorporado ao digestor, influenciada pelo seu nível de diluição e tempo de retenção (XAVIER; LUCAS JR, 2010). A inclusão de um substrato adicional, promovendo codigestão, é outro fator que tende a contribuir com este rendimento (HIDALGO; MARTIN-MARROQUÍN, 2014).

3. METODOLOGIA

O presente estudo avaliou um tipo de resíduo orgânico de uma indústria cervejeira, Cervejaria Prost Bier, localizada no município de Estrela – Rio Grande do Sul. O substrato utilizado no estudo é maior resíduo orgânico gerado na indústria pesquisada.

3.1 Levantamento dos dados para coleta

O levantamento dos dados e informações para a execução do experimento foi efetuada com um funcionário da empresa em questão que acompanha a produção diariamente. Foi solicitado informação sobre quantidade aproximada de produção da indústria e sua respectiva geração de resíduo sólido orgânico.

O maior resíduo gerado na empresa é o bagaço de malte. Quanto a produção, são utilizados 400 kg de malte para cada brasagem, resultando em 2.500 litros de mosto cervejeiro. Após a fervura do malte, o mesmo é retiro para descarte, totalizando entre 500 a 600 kg de resíduo gerado. A massa do bagaço de malte aumenta devido a grande quantidade de umidade adquirida no processo. Atualmente, são realizadas em média, 3 brasagens diárias conforme cronograma de produção da empresa.

3.2 Procedimentos da coleta

Para o procedimento de coleta do substrato é importante obter cuidados, sendo que ao realizar uma coleta de amostras para experimentos, é necessário priorizar que a mesma esteja mais representativa possível. Isso auxilia para que suas características sejam iguais ou bastante semelhantes ao sistema do qual foi retirada, evitando assim o risco na obtenção de resultados com erros ou que não permitam expressar a realidade (KUNZ; PALHARES, 2004).

De acordo com Kunz e Palhares (2004), há também a orientação quanto a preservação e o transporte das amostras, já que as mesmas exigem cuidados e procedimentos para que mantenham suas características originais. Além disso, os autores salientam que os frascos de coleta necessitam estar limpos e, ao realizar a coleta, deve-se fazer uma lavagem tripla com a amostra. É necessário que os frascos sejam identificados com dados claros referente a data de coleta, local e origem. Durante o transporte da amostra até o laboratório, a mesma não pode estar exposta ao sol. E se esse intervalo for superior a 4 horas, a amostra precisa ser mantida sob refrigeração para evitar degradação da mesma.

O substrato utilizado no estudo foi coletado na sede da empresa, no dia 08 de março de 2021. Realizou-se a coleta do bagaço de malte (maior resíduo gerado dentro do processo) no local onde o mesmo é retirado após a lavagem e clarificação, etapa onde ocorre a separação do bagaço de malte do mosto cervejeiro. Na Figura 9 pode-se observar o local da coleta do bagaço de malte.

Figura 9 – Local da coleta do bagaço de malte.

Fonte: Da autora (2021).

Atualmente, todo resíduo sólido orgânico gerado na empresa é destinado para suinocultores, os mesmos retiram o resíduo na própria empresa.

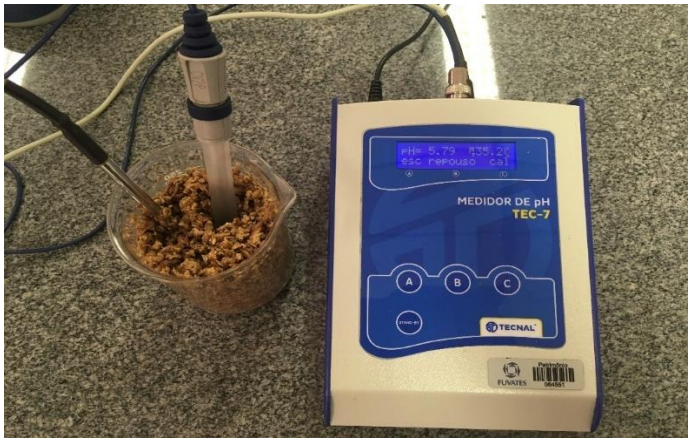
3.3 Experimento digestão anaeróbia

O presente estudo foi elaborado em escala laboratorial, e em batelada pelo fato de que a aplicação da amostra e do inóculo ocorre uma única vez, seguindo a metodologia descrita pela norma alemã VDI 4630 (2006) que usa o teor de sólidos totais e voláteis do substrato para definição da quantidade de material a ser usado no reator. A caracterização das amostras foi realizada através das análises de pH e sólidos (fixos, totais e voláteis). Os itens a seguir apresentam a metodologia utilizada para cada uma das análises realizadas para a determinação da amostra.

3.3.1 Potencial Hidrogeniônico (pH)

Para determinar o pH da amostra que foi avaliada, utilizou-se o pHmetro da marca TECNAL, modelo TEC-7. O medidor de pH tem capacidade de medir o potencial de hidrogênio, em uma escala que varia de 0 (acidez máxima) a 14 (basicidade máxima), identificando se a amostra é ácida, básica ou neutra e também mede a temperatura da amostra (TECNAL, 2020). A Figura 10 apresenta a análise do potencial hidrogeniônico da amostra em estudo.

Figura 10 – Análise do potencial hidrogeniônico (pH)



Fonte: Da autora (2021).

Através da análise de pH, foi possível verificar que a amostra do substrato obteve resultado com um pH ácido, conforme esperado.

3.2.2 Sólidos Totais, Voláteis e Fixos

Geralmente, a remoção de sólidos totais em processos de biodigestão anaeróbia é consequência da conversão dos sólidos voláteis, já que os sólidos fixos não se alteram por relacionarem-se com a parcela inorgânica do substrato.

Para a determinação dos sólidos totais, cada amostra foi inserida em cápsulas de porcelana que, anteriormente a isso, foram calcinadas e pesadas. O valor da massa da cápsula mais a amostra foi anotado. Após direcionou-se o material para a estufa de secagem (Figura 11) da marca SP LABOR, modelo SP-400, onde a amostra permaneceu por aproximadamente 24 horas, a temperatura de ± 105ºC. Durante o processo de eliminação do teor de umidade da amostra na estufa, é utilizada a técnica do calor seco. Através da equação 1 foi estabelecido o percentual de sólidos presentes em cada amostra.

$$\text{Sólidos Totais (\%)} = \frac{(A-B)\ x\ 100}{C-B} \qquad (1)$$

Onde:

A = Peso pós-estufa

B = Peso da cápsula

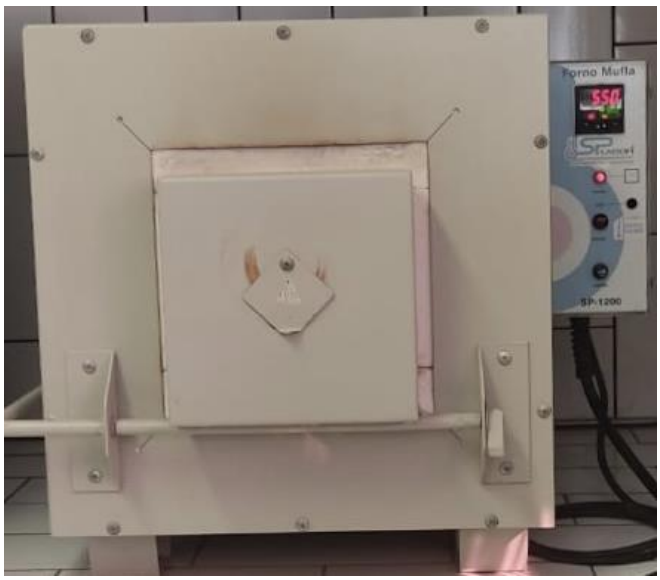
C = Peso da cápsula + amostra

Figura 11 - Estufa utilizada para determinar os sólidos totais

Fonte: Da autora (2021).

A partir do material seco obtido na análise dos sólidos totais, foi possível determinar o valor dos sólidos voláteis e fixos. Encaminhou-se a matéria seca para um forno do tipo mufla (Figura 12) sob a temperatura de 550°C por, aproximadamente, 4 horas. Este equipamento é usado no método de calcinação que se baseia em volatilizar as substâncias da amostra estipulada. Depois deste método, cada amostra foi inserida no dessecador (Figura 13) para esfriar e após pesou-se. Através das equações 2 e 3 foi possível realizar os cálculos para a determinação dos percentuais de sólidos voláteis e fixos.

Figura 12 - Forno tipo mufla usado para análise de sólidos voláteis



Fonte: Da autora (2021).

Figura 13 - Dessecador usado para acondicionar as cápsulas de porcelana

Fonte: Da autora (2021).

$$\text{Sólidos Voláteis (\%)} = \frac{(A - D)\ x\ 100}{A - B} \quad (2)$$

Onde:

A = Peso pós-estufa

B = Peso da cápsula

D = Peso pós-mufla

$$\text{Sólidos Fixos (\%)} = \frac{(D - B)\ x\ 100}{A - B} \quad (3)$$

Onde:

A = Peso pós-estufa

B = Peso da cápsula

D = Peso pós-mufla

3.2.3 Inóculo

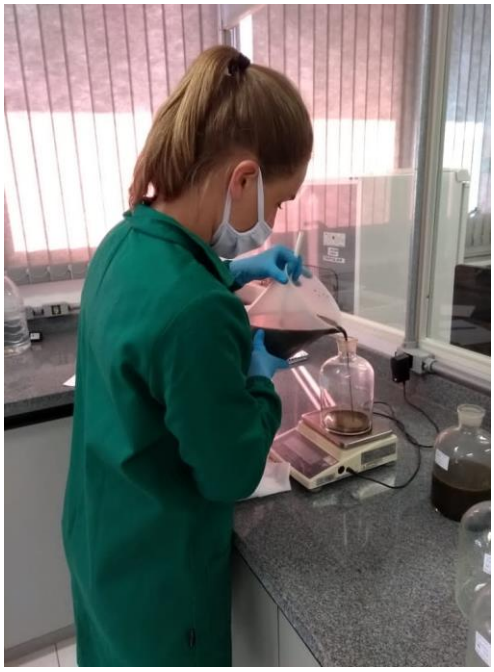
Para aumentar o desempenho do processo de digestão anaeróbia, uma alternativa é a aplicação de um inóculo, que tem a responsabilidade de acelerar o início da produção de biogás. É apropriado que este inóculo seja um lodo anaeróbio com a mesma composição do material teste, mas já digerido ao processo, contendo microrganismos específicos da digestão anaeróbia, com a capacidade de fermentar o novo material em um curto tempo de detenção.

Para obter bons resultados nos testes de fermentação, a atividade do lodo (inóculo anaeróbio) usado é de extrema importância. É necessário que o inóculo tenha uma concentração de matéria seca (sólidos voláteis) maior que 50% dos sólidos totais (KUNZ *et al*., 2019).

Alguns materiais que possuem a habilidade de produzir biogás são utilizados para garantir a atividade do inóculo anaeróbio, sendo um deles a celulose microcristalina que tem capacidade de produzir de 740 a 750 $L_N.kg_{SVadic}^{-1}$. Durante o processo, o mínimo a ser recuperado de biogás pelo substrato é de 80%, pois quando se atinge esse valor de recuperação, o inóculo possui atividade biológica ótima (KUNZ *et al*., 2019).

No ensaio da digestão anaeróbia foram utilizados reatores de 1000 mL, os quais foram preenchidos com 500 g de amostra e inóculo, e a análise foi realizada em duas triplicatas. As quantidades adicionadas em cada reator foram estabelecidas conforme as propostas da VDI 4630 (2006). O momento da adição do inóculo nos reatores pode ser visualizado na Figura 14.

Figura 14 – Adição da quantidade de inóculo nos reatores.



Fonte: Da autora (2021).

3.2.4 Potencial Bioquímico de biogás e metano (PBB e PBM)

O experimento de digestão anaeróbia foi conduzido em escala laboratorial, operado em batelada e fundamentado nas orientações da norma alemã VDI 4630 (2006) para identificar a quantidade de Potencial Bioquímico de Biogás (PBB) e o Potencial Bioquímico de Metano (PBM) dos substratos.

Conforme os autores Steinmetz *et al*. (2016), o potencial bioquímico de biogás e de metano de certo substrato relaciona-se ao valor máximo de gás obtido em condições estabelecidas. Esse valor é expressado como volume de biogás ou de metano por unidade de massa de matéria orgânica, conhecida como sólidos voláteis. Para isto, os experimentos de digestão anaeróbia são acompanhados em batelada, empregando um volume pequeno de amostra de substrato, que é incubado em condições mesofílicas juntamente com o inóculo anaeróbio.

Para realizar a avaliação do potencial de produção biogás e metano, preparou-se triplicatas com inóculo e amostra, inóculo e celulose microcristalina, e somente

inóculo. A quantidade de amostra, inóculo e celulose que foram inseridas em cada reator das triplicatas é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Quantidade de inóculo, celulose microcristalina e amostra inseridas em cada triplicata

Triplicata	Quantidade Inóculo (g)	Quantidade celulose microcristalina (g)	Quantidade amostra (g)
Inóculo	500,02		
	500,07		
	500,07		
Celulose Microcristalina	496,96	3,05	
	496,97	3,05	
	496,97	3,05	
Bagaço de Malte	487,96		12,05
	487,96		12,06
	487,96		12,07

Fonte: Da autora (2021).

Ao término da preparação dos reatores, os mesmos foram alocados em uma incubadora bacteriológica adaptada, onde permaneceram em temperatura mesofílica (35 ºC) por um período de 26 dias. De acordo com Konrad *et al*. (2013) e Konrad *et al*. (2021), a incubadora está interligada em um sistema automatizado de medição de biogás, o qual indica os volumes diários de biogás produzido em cada reator. O sistema em questão é relacionado com o deslocamento do fluido dentro de um tubo, em formato de U, que é promovido pela entrada de um determinado volume de gás em seu interior. Assim, o movimento do fluido é determinado pelo sensor óptico e registrado em uma memória, a qual calcula os volumes de biogás produzido em cada reator levando em consideração a equação dos gases ideias. Na Figura 15 é possível visualizar a incubadora bacteriológica e bancada com os tubos em formato de U.

Figura 15 – Incubadora bacteriológica e bancada com os tubos em formato de U, respectivamente

Fonte: Da autora (2021).

Dessa forma, o volume de biogás e metano que acumulou da amostra foi dividido pela quantidade de matéria orgânica que foi misturada no reator. Porém, com a adição do inóculo, obteve-se presença de resíduos orgânicos referentes a ele, que produziram uma determinada quantidade de biogás durante processo anaeróbio, onde subtraiu-se o volume total acumulado para então obter a produção certa desde substrato (BIOPROCESS CONTROL, 2016). Com a equação 6 é possível expressar os valores de PBB e PBM.

$$\text{PBB ou PBM} = (Vs - Vb \times (\frac{mSVis}{mSVib})) / mSVs \quad (6)$$

Onde:

Vs = Volume acumulado (biogás ou metano) do substrato com inóculo (amostra)

Vb = Volume acumulado (biogás ou metano) do branco (somente inóculo)

mSVis = massa de sólidos voláteis correspondentes ao inóculo na amostra
mSVib = massa de sólidos voláteis correspondentes ao inóculo no branco
mSVs = massa de sólidos voláteis correspondentes ao substrato na amostra

3.2.5 Caracterização do biogás e relação ao teor de metano

Conforme Prati (2010), o mesmo cita o biogás como uma mistura de gases, de modo que o tipo e a porcentagem alteram conforme as características dos substratos e das condições do processo de biodigestão dos mesmos. Os principais elementos do biogás são o metano (CH_4), o dióxido de carbono (CO_2), o sulfeto de hidrogênio (H_2S), a amônia (NH_3) e água, sendo que os dois primeiros predominam (KONRAD *et al*., 2013). Sulfeto de hidrogênio, nitrogênio, hidrogênio e monóxido de carbono são outros gases que compõem o biogás, porém em quantidades menores (PRATI, 2010).

O metano determina o poder calorífico e o potencial energético do biogás, por esse motivo é o que desencadeia maior interesse dentre os gases que compõem o biogás. Dessa forma, o poder calorífico do biogás é equivalente a porcentagem de gás metano existente na mistura, que pode variar entre 40 a 75% (MARI, 2014).

O teor de metano presente no biogás foi avaliado por meio de um sensor específico, *Advanced Gasmitter*, (Figura 16) que tem a possibilidade de detectar a quantidade de metano presente na mistura gasosa e apresentar os dados em percentual.

Figura 16 - Sensor específico para a medição de CH_4.

Fonte: Da autora (2021).

Através do sensor específico foi possível acompanhar a produção de metano do experimento a cada 2 dias, até o momento em que se estabilizou a produção.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será apresentado os resultados das análises dos sólidos e pH, assim como a descrição do experimento da digestão anaeróbia e seus respectivos resultados.

4.1 Resíduo gerado no processo de produção de cerveja

O material utilizado no estudo é o bagaço de malte, considerado maior resíduo orgânico gerado dentro da indústria em questão. O mesmo é gerado após a etapa de moagem do malte, lavagem e clarificação. Semanalmente, são realizados 2 dias de produção com 3 brasagens diárias, resultando o volume em média a 16,5 toneladas de resíduo gerado. Em cada brasagem são utilizados 400 kg de malte, resultando em média, 2.500 litros de mosto cervejeiro.

Atualmente, a empresa cervejeira não possui produção diária, dessa forma a quantidade de produção resulta no volume de resíduo em 16,5 toneladas, em média. Normalmente, esse resíduo é destinado para suinocultores da região.

Para o presente trabalho, o substrato foi coletado na indústria cervejeira que disponibilizou bagaço de malte para o experimento de avaliação da produção de biogás a partir de resíduos sólidos orgânicos oriundos desse tipo de indústria. A amostra foi submetida ao experimento de digestão anaeróbia em duas triplicatas, juntamente com uma triplicata de inóculo e uma de inóculo mais celulose microcristalina.

O experimento ficou incubado durante 26 dias, entre os meses de março e abril de 2021. Dessa forma, ao longo deste capítulo será exposto os resultados das análises de caracterização da amostra, bem como os resultados da produção de biogás e metano do experimento.

4.2 Resultados Físico-Química

Em função do ensaio da digestão anaeróbia, os resultados desse item são referentes ao substrato em estudo, juntamente com os materiais necessários para o estudo, com o intuito de avaliar o potencial na produção de biogás.

4.2.1 Potencial Hidrogeniônico (pH)

Para o experimento, o potencial hidrogeniônico (pH) da amostra foi medido após a coleta, resultando em 5,79, e antes da pré-incubação das misturas. Como pode ser verificado na Tabela 5, todas as leituras de pH realizadas nos reatores antes do início do experimento ficaram dentro da faixa considerada ótima na literatura.

Tabela 5 – Potencial Hidrogeniônico das amostras.

Triplicata	pH (média)
Inóculo	8,05
Inóculo + Celulose Microcristalina	8,05
Bagaço de Malte + Inóculo	7,94

Fonte: Da autora (2021).

A literatura apresenta que os valores do potencial hidrogeniônico (pH) para a metanogênese variam bastante, porém todos se aproximam de valores neutros para o pH (LEITE, 2020). De acordo com o autor KUNZ *et al*. (2019), a faixa ótima do reator digestor tem a tarefa de respeitar a ausência das arqueas, pois os grupos fermentativos são menos sensíveis e adaptam-se a grandes variações.

4.2.2 Sólidos voláteis, fixos e totais

No estudo em questão, foi realizada uma triplica com celulose microcristalina juntamente com o inóculo para obter conhecimento do potencial de produção de biogás, onde o resultado foi satisfatório ao ponto de validar o experimento.

Na Tabela 6, apresentam-se os valores de SV, ST e SF encontrados e que foram utilizados para os cálculos das quantidades inseridas em cada reator conforme a norma alemã VDI 4630 (2006), descrita na metodologia desse trabalho.

Tabela 6 – Valores de sólidos voláteis, totais e fixos.

Amostra	SV (%)	ST (%)	SF (%)
Inóculo	46,60	2,53	53,40
Celulose Microcristalina	99,98	96,11	0,02
Bagaço de Malte	96,67	24,71	3,33

Fonte: Da autora (2021).

É possível verificar que os valores obtidos de SV da celulose microcristalina, assim como do bagaço de malte são ótimos para a obtenção considerável de biogás durante o experimento. Conforme HASAN (2018), quanto maior a quantidade de SV na amostra, maior a perspectiva de alcançar melhor e maior produção de biogás.

De acordo com OLIVEIRA (2004), um fator muito importante que deve ser considerado, quando optado pelo processo de digestão anaeróbia em busca da eficiência energética, é o teor de sólidos dos substratos. Os sólidos totais (ST) representam parte de matéria sólida que a amostra contém, mesmo após retirada a umidade. Já os sólidos não voláteis, denominados de fixos (SF), significam a parcela de matéria inorgânica ou mineral da amostra (LINS, 2017).

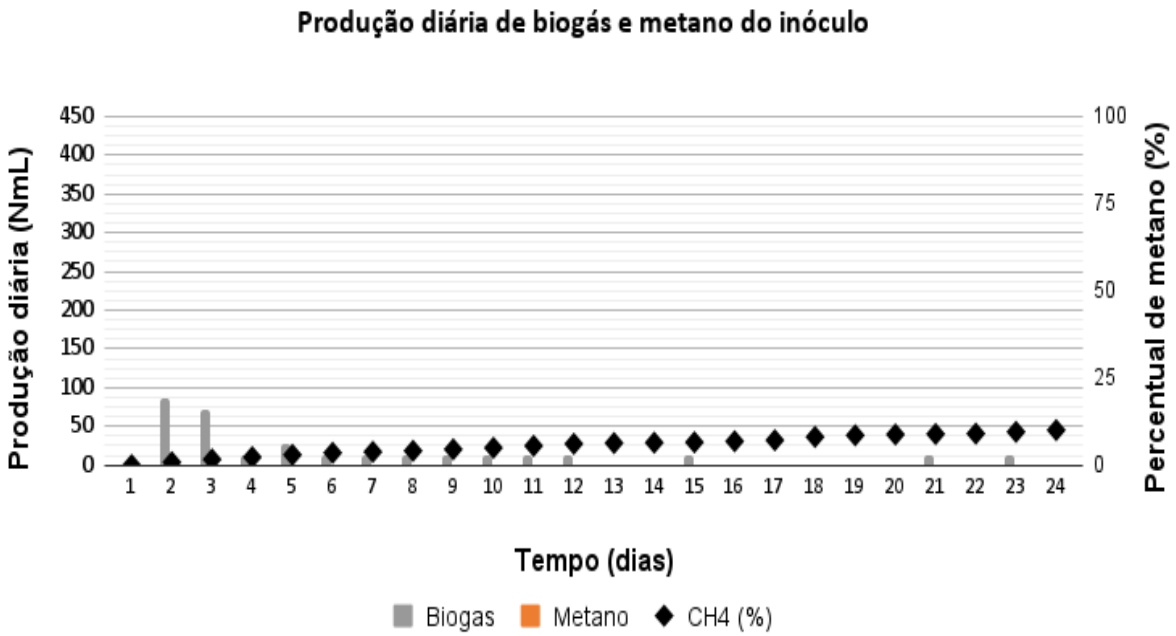
Realizar a determinação de sólidos voláteis (SV) auxilia a reconhecer qual a quantia de matéria biodegradável contida no substrato. Isso porque os SV caracterizam a parcela de matéria orgânica que têm a possibilidade de ser convertida em biogás, sendo assim, é importante que os teores sejam altos (HASAN *et al*., 2019).

O autor LINS (2017) descreve que um substrato com um elevado teor de SV possibilita considerar alta capacidade de converter o substrato em biogás através do inóculo. Usualmente, o substrato padrão mais utilizado com o intuito de quantificar qual o potencial do inóculo é a celulose microcristalina, pois a mesma possui ótimo potencial de produção de biogás.

4.3 Ensaio de digestão anaeróbia

O experimento de digestão anaeróbia foi realizado no Centro Tecnológico da Univates – TECNOVATES. Na avaliação do inóculo obteve-se o maior pico de produção de biogás no segundo e terceiro dia, atingindo 85,05 mL e 71,15 mL, respectivamente. Nos demais dias a produção de biogás, assim como do metano, foram baixos, sendo que a porcentagem mais alta foi registrada no vigésimo quarto dia, com 10,03%. Os resultados quanto a produção de biogás e metano do inóculo podem ser visualizados no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Produção diária de biogás e metano do inóculo



Fonte: Da autora (2021).

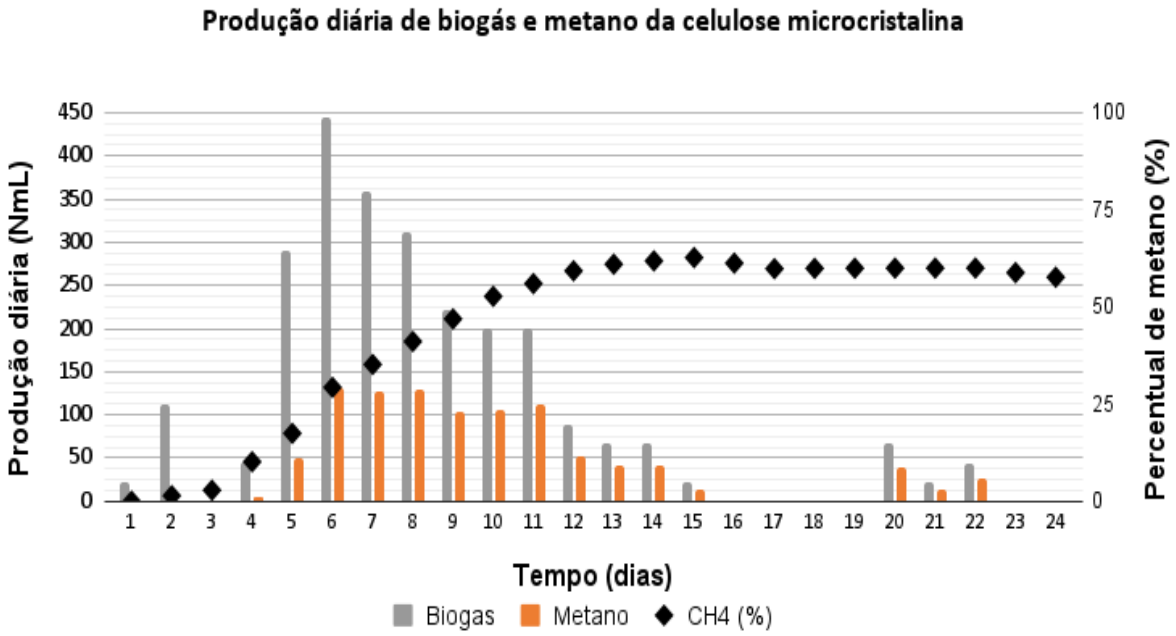
Dessa forma, os resultados obtidos quanto ao inóculo no estudo não tiveram influência direta no substrato durante a degradação da matéria, assim não sendo

responsável pela produção de biogás no experimento. Ou seja, o inóculo, por si só, não possui potencial de produção de biogás.

De acordo com XAVIER *et al*. (2010), o inóculo é um material que contém microrganismos adeptos ao processo por já ter passado pelo processo de digestão anaeróbia. Atuando como um catalizador da reação, o inóculo acelera a decomposição da matéria orgânica e, em contra partida, reduz o tempo que é necessário para a produção de biogás (PENTEADO *et al*., 2017).

A celulose microcristalina apresentou produção de biogás durante onze dias do experimento, sendo que no sexto e sétimo dia obteve-se a maior produção diária, com 445,47 mL e 358,01 mL, respectivamente, e porcentagem máxima de metano no décimo quinto dia igual a 62,73%. Por ser um substrato com alto potencial de biodegradabilidade na produção de biogás, a celulose microcristalina é um material de referência para os processos de digestão anaeróbia (MORITZ, 2017; MALLMANN, 2019). No Gráfico 2 é possível verificar a produção diária de biogás e metano da celulose microcristalina.

Gráfico 2 – Produção diária de biogás e metano da celulose microcristalina.



Fonte: Da autora (2021).

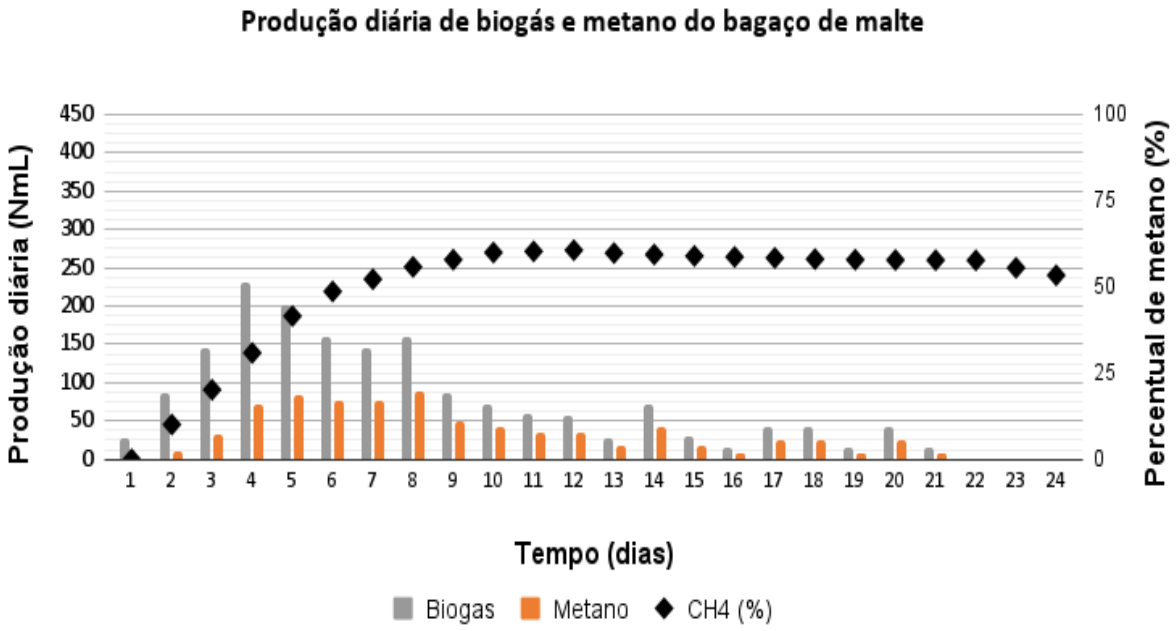
De acordo com a norma VDI 4630 (2006), a conversão de 100% da celulose microcristalina obtêm-se valores de PBB entre 740 a 750 mL_N/gSV. Para a

recuperação de biogás, o limite mínimo é de 80% (corresponde a 600 mL_N/Gsv), ou seja, valores acima do limite significa que a recuperação foi satisfatória e que a celulose possui atividade biológica apropriada para o experimento.

Dessa forma, a celulose microcristalina do presente estudo mostrou-se bastante satisfatória, pois a mesma obteve produção de biogás igual a 2.583,90 mL e porcentagem máxima de metano em 62,73%. Obteve-se também o resultado de PBB igual a 749,68 mL/gSV, o que representa 99,96% de recuperação.

Quanto a produção de biogás do bagaço de malte, o resíduo em questão apresentou produção igual a 1.731,39 mL e porcentagem máxima de metano igual a 60,62% no décimo segundo dia. Estudos apontam que os resíduos oriundos das indústrias cervejeiras, pelo fato de terem certa quantidade de lignina e celulose, possuem potencias de metano parcialmente baixos. Mesmo assim, os resultados apresentam valores aceitáveis de potencial para o uso desse resíduo para a produção de biogás. O Gráfico 3 apresenta a produção diária de biogás e metano do bagaço de malte.

Gráfico 3 – Produção diária de biogás e metano do bagaço de malte.



Fonte: Da autora (2021).

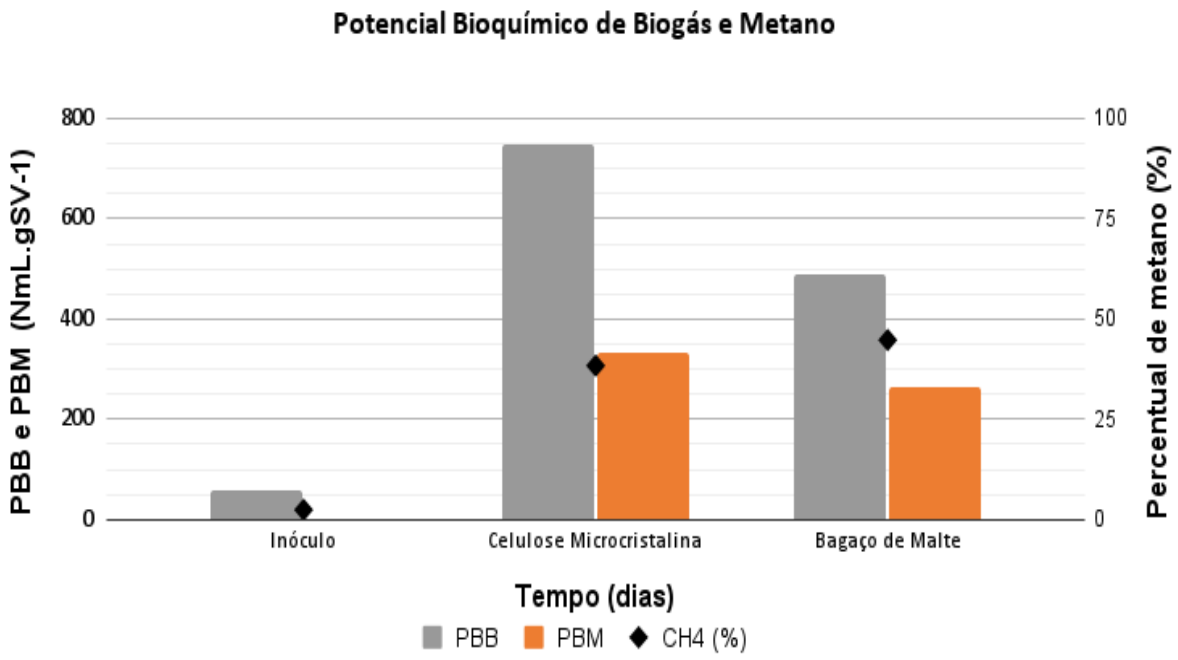
Pode-se observar que a maior produção de biogás ocorreu do quarto ao oitavo dia, sendo que o pico foi de 230,78 mL. A produção de metano mostrou-se estável a

partir do décimo primeiro dia até vigésimo segundo dia, quando a produção começou a cair e consequentemente, o experimento foi encerrado.

A variação da quantidade de biogás produzida deve-se ao inóculo, pelo fato de possuir uma concentração de microrganismos capazes e responsáveis pela real degradação da matéria orgânica contida no substrato. É de suma importância a composição do substrato para que ocorra a produção de biogás (KARLSSON *et al*., 2014).

O resultado do potencial bioquímico avaliado a partir da relação da quantidade de biogás e metano produzidos pelo substrato estão apresentados no Gráfico 4. Como é possível observar, o resultado do PBB e PBM representaram 488,27 mL_N/gSV e 265,12 mL_N/gSV, respectivamente.

Gráfico 4 – Resultados do potencial de biogás e metano obtidos no experimento de digestão anaeróbia.

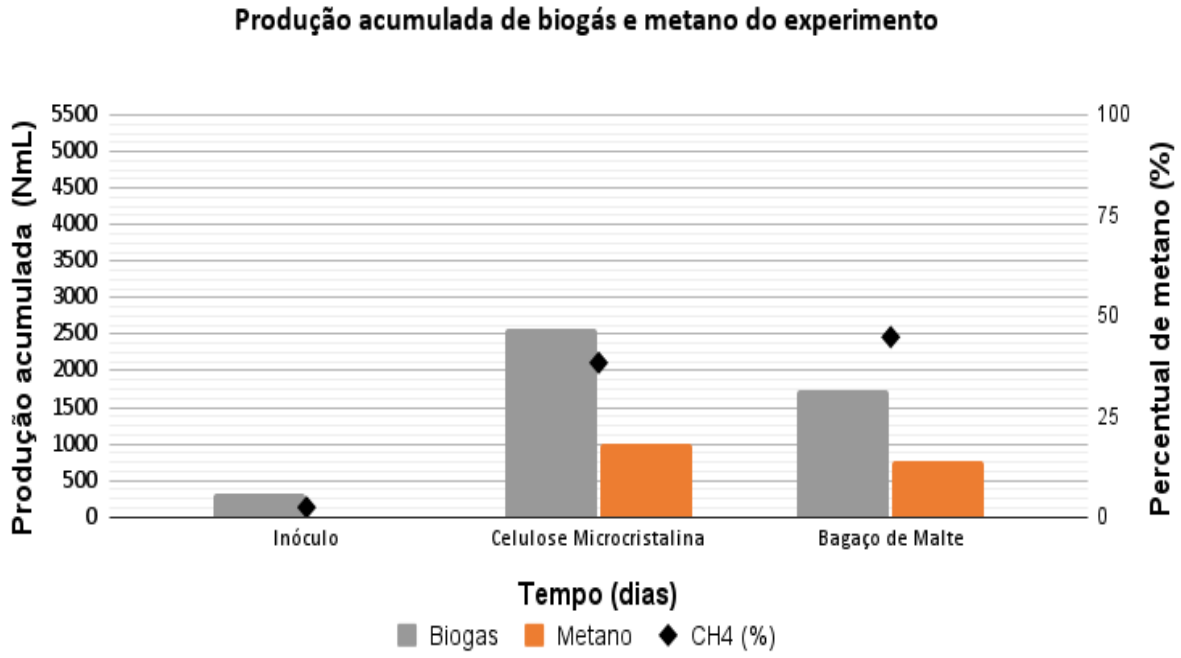


Fonte: Da autora (2021).

O PBM é a maneira de avaliar se é possível a realização do experimento de digestão anaeróbia, pois o mesmo estipula a biodegradabilidade da amostra e qual a capacidade de produção de metano. Já o PBB e o volume de biogás acumulado (Gráfico 5) do substrato demonstram que os microrganismos obtiveram capacidade

para assimilar o material e consequentemente apresentar uma satisfatória conversão da matéria orgânica. O Gráfico 5 apresenta a produção acumulada de biogás e metano do experimento.

Gráfico 5 – Produção acumulada de biogás e metano do experimento



Fonte: Da autora (2021).

Como é possível verificar no gráfico acima, o potencial de metano do substrato ficou próximo do potencial da celulose microcristalina. Quanto ao inóculo, o mesmo não apresentou um valor de PBM significativo pelo fato de ser um material que já passou pelo processo de digestão anaeróbia e conter microrganismos adeptos ao método. Dessa forma, sua produção de biogás foi baixa devido aos microrganismos estarem inativos e não possuírem mais material para degradar.

5. CONCLUSÃO

Este estudo foi realizado com o propósito de avaliar um resíduo sólido orgânico oriundo de uma indústria cervejeira, devido à alta demanda de produção e a possibilidade de utilização do mesmo para produção de energia renovável. A empresa que disponibilizou o substrato, tem interesse quanto a produção de biogás, assim como nos resultados obtidos.

O substrato de bagaço de malte avaliado nesse estudo apresentou resultados positivos e com potencial bioquímico para produção de biogás. A celulose microcristalina atingiu o critério definido nas normas para validação do experimento. Com isso, através do experimento, foi possível comprovar que o bagaço de malte é um material propício para o processo de digestão anaeróbia.

Durante o experimento, foi possível alcançar a porcentagem máxima de produção de metano próxima a 60%. A capacidade de produção de metano do experimento ficou próximo ou semelhante aos citados na literatura.

Já os resultados de PBB e PBM do resíduo sólido orgânico em questão, apresentou valores próximo ao da celulose microcristalina e mostrou ser um material com fácil biodegradação com os microrganismos presentes na digestão anaeróbia. Com os dados obtidos quanto ao potencial do resíduo, é possível criar projetos de biodigestores nas industrias, com o intuito de aumentar a produção e consumo de energia renovável. Portanto, é necessário realizar mais experimentos de digestão anaeróbia durante o ano, com o intuito de adquirir maiores informações sobre a

produção de biogás, já que o bagaço de malte é a maior quantidade de resíduo sólido orgânico gerado nas industrias cervejeiras.

Com o pH da amostra ideal para o experimento e obtendo bons resultados de sólidos voláteis, foi possível a produção de biogás e metano das triplicatas. Ao realizar a trituração de uma pequena quantidade de amostra, foi possível obter um pH inferior. Dessa forma, em um próximo estudo, acredita-se que ao se utilizar o bagaço de malte triturado, o material ficará mais exposto e consequente será possível obter melhores resultados.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Cristiano José de. MEGA, Jéssica Francieli; NEVES, Etney. A produção da cerveja no Brasil. **Revista Hestia Citino**. Joinville, v.1, n.1, p. 21-29, 2011.

APHA. American Public Health Association. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 22º ed. Washington (USA), 2012.

ARANTES, M K.; ALVES, H.J.; SEQUINEL, R.; DA SILVA, E. A. **Treatment of brewery wastewater and its use for biological production of methane and hydrogen. INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY,** v. 42, p. 26243-26256, 2017.

ARAÚJO, Ana Paula Caixeta *et al*. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico.** 2017.

BELETI, Marcos Antônio; DUARTE, Felipe; GEORG-KRAEMER, Janaína Endres. A temperatura no desenvolvimento da atividade das enzimas (1-3, 1-4)-β-glucanases e degradação de β-glucanos durante a malteação. **Ciência Rural**, v. 42, n. 3, p. 467-473, 2012.

BELTRAMELLI, Mauricio. **Cervejas, brejas e birras**. 2.ed. São Paulo: Leya, 2014, p. 24.

BENACI, Vanessa. **Avaliação de métodos de análise para carbono orgânico em amostras de interesse agronômico.** Dissertação de Mestrado. Instituto Agronômico de Campinas, Curso de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, 2010.

BIOGÁS – Portal do Biogás. Disponível em: <https://www.portaldobiogas.com /biogas/>. Acesso em 14 junho de 2021.

BIOPROCESS CONTROL. Manual de operação AMTPS II. 2016. Disponível em: <http://bioprocesscontrol.com/media/1511/bioprocess-control-manual-ampts-ii-ampts-ii-light.pdf>. Acesso em 13 junho de 2020.

BRASIL. Decreto nº 9.902, de 8 de julho de 2019. Altera o Anexo ao Decreto nº 6.871, de 4 de junho de 2009, que regulamenta a Lei nº 8.918, de 14 de julho de 1994, que dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização. **Portal Oficial da Presidência da República do Brasil**, 09 Julho 2019. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2019/Decreto/D9902.htm>. Acesso em: 08 maio 2020.

CAVALEIRO, Ana Júlia; ALVES, Madalena M. Digestão anaeróbia. **Revista de Ciência Elementar**, v. 8, n. 1, 2020. Disponível em: <https://rce.casadasciencias.org/rceapp/art/2020/009/>. Acesso em 06 junho 2020.

CECCHI, F.; TRAVERSO, O.; PAVAN, P.; BOLZONELLA, D.; INNOCENTI, L. Characteristics of the OFMSW and behavior of the anaerobic digestion process. In: MATA-ALVAREZ, L. (ed.): **Biomethanisation of the organic fraction of municipal solid wastes.** IWA Publishing, London, 2003.

Cervejeiros de Portugal, 2018. Disponível em: <https://www.cervejeirosdeportugal.pt/variedades/>. Acesso em 21 maio 2020.

DONAGEMA, Guilherme Kangussú *et al*. Manual de métodos de análise de solo. **Embrapa Solos-Documentos (INFOTECA-E)**, 2011.

FERREIRA, J.C. LFBM, Aula I Prof. Júlio C. Ferreira. **Disciplina de Vegetais Inferiores**. 2006. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/7058998/Leveduras-I>. Acesso em 31 maio 2020.

HASAN, Camila *et al*. **EVALUATION OF THE BIOGAS PRODUCTION POTENTIAL FROM BEER MANUFACTURE RESIDUES**, 2018.

HASAN, Camila; FEITOSA, Anny Kariny; DE ALMEIDA, Maria Cristina. PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS: ANÁLISE DOS TEORES DE SÓLIDOS TOTAIS, VOLÁTEIS E FIXOS EM AMOSTRAS PRÉ E PÓS DIGESTÃO ANAERÓBIA1. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 1, p. 257-273, 2019.

HIDALGO, D.; MARTÍN MARROQUÍN, J.M. Effects of inoculum source and co digestion strategies on anaerobic digestion of residues generated in the treatment of waste vegetable oils. **Journal of Environmental Management** , v. p. 17 22 , 2014 . **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.04.004.

HUGHES, Greg. Cerveja feita em casa: Tudo sobre os ingredientes, os equipamentos e as técnicas para produzir a bebida em vários estilos. **Publifolha.** 1 ed. São Paulo, 2014.

KARLSSON, T. *et al*. **Manual Básico de Biogás**. 1ª edição. Editora Univates. Lajeado/RS, 2014.

KONRAD, O.; LUMI, M.; HEBERLE, A. N. A.; TONETTO, J. F.; CASARIL, C. E. **A influência da codigestão de óleo vegetal residual na geração de biogás por**

lodo de estação de tratamento de efluentes. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 2, p. 1-20, 2013.

KONRAD, Odorico *et al*. Comparação de dois sistemas de medição de volume de gás avaliando o potencial bioquímico de metano. **Gestão da Qualidade Ambiental**, 2021.

KUNZ, Airton; PALHARES, Julio Cesar Pascale. **A importância do correto procedimento de amostragem para avaliação das características dos dejetos de suínos.** Concórdia: EMBRAPA – CNPSA, 2004.

KUNZ, Airton; STEINMETZ, Ricardo Luis Radis; DO AMARAL, André Cestonaro. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. **Embrapa Suínos e Aves-Livro científico (ALICE)**, 2019.

LEITE, Nathalia Pereira. **Digestão anaeróbia de resíduos de alimentos em distintas cargas orgânicas**. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

LEWIS, Michael J.; JOVEM, Tom W. **Brewing**. 2. ed. Nova Iorque: Publishers, Kluwer Academic/ Plenum, v. 1, p.375, 2002.

LINS, Leonardo Pereira *et al*. **Produção de biogás a partir de resíduos de bovinocultura leiteira por meio da codigestão com macrófitas da espécie Salvinia**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

MAGALHÃES, Geísa Vieira Vasconcelos *et al*. III-128-AVALIAÇÃO DO USO DE DIFERENTES INÓCULOS NA BIODIGESTÃO DO RESÍDUO ORGÂNICO VISANDO A PRODUÇÃO DE BIOGÁS, 2016.

MALLMANN, Paula Sabrina. **Avaliação do potencial metanogênico na codigestão do pó de tabaco com dejeto suíno**. 2019.

MARI, Angelo Gabriel. **Digestão anaeróbia de dejetos suínos na presença de produtos de limpeza e desinfecção na fase acidogênica.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura. Cascavel/PR: UNIOESTE, 2014.

MARTINEZ, M. Levedura. **Info Escola,** 2017. Disponível em: <http://www.infoescola.com/reino-fungi/levedura/> Acesso em 06 maio 2020.

MARTINS, Izadora F., FUZIOKA, Pâmela U., SILVA, Alexsandro M. **Processo de Produção da Cerveja.** II Simpósio da Assistência Farmacêutica, Centro Universitário São Camilo, 2014. Disponível em: <http://www.saocamilo-sp.br/novo/eventos-noticias/saf/resumo-24.pdf> Acessado em 20/01/2020.

MATOS, Ricardo Augusto Grasel *et al*. **Cerveja: panorama do mercado, produção artesanal, e avaliação de aceitação e preferência.** 2011.

MORADO, Ronaldo. Larousse da cerveja. São Paulo: Larousse do Brasil, 2009. p. 357.

MORITZ, Felipe. **Produção de biogás a partir de resíduos de frigorífico de peixes**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PAYÁ, Ana Laura *et al*. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL ADICIONADA DE AVEIA (Avena sativa). **Revista Engenharia em Ação UniToledo**, v. 4, n. 2, 2019.

PAPAZIAN, Charlie. **The Homebrewer's Companion**. New York: Harper Collins Publishers Inc, 2014. 2 ed.

PENTEADO, Mauricio Cabral *et al*. Análise do potencial de geração de biogás a partir da biodigestão anaeróbia da vinhaça e bagaço de cana. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 3, n. 1, p. 26-33, 2017.

PINHEIRO, Bruno Hideaki Okoti. **Processo cervejeiro e a comercialização da cerveja.** 2019.

POLASTRI, Paula *et al*. **POTENCIAL DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS POR MEIO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DO BAGAÇO DE MALTE**, 2019.

PONTES, Maria Laiz de Fátima Cabral; SANTOS, Keliana Dantas; DOS SANTOS SOUSA, Thiago Roque. **Análise Quantitativa Da Biodegradabilidade De Resíduos Orgânicos Descartados No Processo De Produção De Cerveja Para Produção De Biogás**, 2016.

PRATI, Lisandro. **Geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por biodigestores.** Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, 2010.

SANTOS, Alessandra Marques. **Estudo das influências da complementação de nutrientes no mosto sobre o processo de fermentação alcoólica em batelada. 2008. 77 f**. 2019. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Química e Biotecnologia)–Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

SANTOS, M. S. dos. **Cervejas e refrigerantes - Série P+L**. São Paulo: CETESB, 2005. Disponível em:<https://cetesb.sp.gov.br/consumosustentavel/wp-content/uploads/sites/20/2013/11/cervejas_refrigerantes.pdf>. Acesso em 01 junho 2020.

SPIESS, Silvano. O que é Malte? **O Caneco**. 17 maio 2020. Disponível em: <http://www.ocaneco.com.br/afinal-o-que-e-malte/>. Acesso em 21 maio 2020.

STEINMETZ, R. L. R.; MEZZARI, M. P.; SILVA, M. L. B. da; KUNZ, A.; AMARAL, A. C. do; TÁPPARO, D. C.; SOARES, H. M. Enrichment and acclimation of an anaerobic mesophilic microorganism's inoculum for standardization of BMP assays. **Bioresource Technology**, v. 219, p. 21-28, 2016.

TECNAL. Medidor de pH microprocessado R-TEC-7-MP. São Paulo; 2020. Disponível em: <https://tecnal.com.br/ptBR/produtos/lamina/11271_medidor_de_ph_microprocessado>. Acessado em 05 maio 2021.

TOZETTO, Luciano Moro *et al*. **Produção e caracterização de cerveja artesanal adicionada de gengibre (Zingiber officinale)**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

VDI 4630. **Fermentation of organic materials.** Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. 92 p. Germany: Verein Deutscher Ingenieure – VDI, 2006.

VENTURINI FILHO, Waldemar Gastoni. **Tecnologia de Bebidas: Bebidas alcoólicas.** v.1. São Paulo: Blucher, 2010.

VERONEZE, Maria Luiza *et al*. **Avaliação da produção de biogás a partir de água residuária de cervejaria.** 2019.

WELLINGER, A., MURPHY, J., BAXTER, D. (Ed.) **The biogas handbook: science, production and applications**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. 476 p.