

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ENGENHARIA DE BIOPROCESSOS E
BIOTECNOLOGIA
CAMPUS DOIS VIZINHOS

ANA PAULA MIOLA PERIN

**PROPOSIÇÃO DE UM SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES
PARA MICROCERVEJARIA VISANDO O APROVEITAMENTO
ENERGÉTICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DOIS
VIZINHOS
2021

ANA PAULA MIOLA PERIN

**PROPOSIÇÃO DE UM SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES
PARA MICROCERVEJARIA VISANDO O APROVEITAMENTO
ENERGÉTICO**

**PROPOSAL OF BREWERY WASTEWATER TREATMENT SYSTEM AIMING
BIOGAS PRODUCTION**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Dois Vizinhos, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Bioprocessos e Biotecnologia.

Orientadora: Profa. Dr^a. Marina Celant De Prá.
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Bortoli

DOIS
VIZINHOS
2021

ANA PAULA MIOLA PERIN

**PROPOSIÇÃO DE UM SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES PARA
MICROCERVEJARIA VISANDO O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Dois Vizinhos – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de engenheiro de bioprocessos e biotecnologia.

Orientadora: Profa. Dra. Marina Celant De Prá
Coorientadora: Prof. Dr. Marcelo Bortoli

12 de maio de 2021

Marina Celant De Prá
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Andreia Anschau
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Gabriela Bonassa
Mestrado
Universidade Estadual do Oeste do Paraná

**DOIS VIZINHOS
2021**

RESUMO

PERIN, A.P.M. Proposição de um sistema de tratamento de efluentes para microcervejaria visando o aproveitamento energético. 2021. 51p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia – Bacharelado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, 2021.

A indústria cervejeira é parte importante no cenário econômico do Brasil. No entanto, este setor produz grandes quantidades de resíduos sólidos e líquidos, causando problemas ambientais, principalmente com a poluição das águas pelo lançamento de efluentes líquidos não tratados ou tratados ineficientemente. Com isso torna-se necessário minimizar os efeitos negativos ocasionados pelo processo produtivo da indústria cervejeira e, além disso, considerar a reutilização dos resíduos gerados pela própria indústria, aliando produção e sustentabilidade. Uma alternativa para o tratamento dos resíduos orgânicos e a geração de energia renovável é o processo de digestão anaeróbia. O objetivo desse trabalho foi realizar o estudo e dimensionamento do melhor biodigestor como parte de um processo de tratamento de resíduos de uma microcervejaria do Sudoeste do Paraná, visando um eficiente aproveitamento energético através da produção do biogás. Para tanto, foram coletadas amostras de resíduos de uma microcervejaria localizada no município de Dois Vizinhos. As amostras foram caracterizadas á concentração de Sólidos Totais (ST), Fixos (SF) e Voláteis (SV), bem como, foram determinados o pH, alcalinidade, Nitrogênio amoniacal, Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Sólidos sedimentáveis (SS). Além disso, com uma pesquisa bibliométrica, descreveu-se o potencial bioquímico de biogás (PBB) e de metano (BMP) dos resíduos oriundos da indústria cervejeira. Em seguida, com os dados obtidos, foi dimensionado um biodigestor para três modelos distintos, seus custos e viabilidade de construção para definição do modelo mais adequado a microcervejaria. As amostras apresentaram a concentração de 99,50 gST.L⁻¹, de 95,30 gSV. L⁻¹, e 4,20 gSF. L⁻¹ e SS com valor de 0,063 mL. L⁻¹. Se relacionar os resultados de SV e ST apresenta um valor menor que 1, esse resultado mostra o alto grau de biodegradabilidade do efluente, este importante para a produção de biogás. O pH das amostras foi 5,94, Nitrogênio amoniacal menor que 0,2, esses dois valores estão diretamente relacionados, pois valores menores que 5,5 de pH pode ocasionar o acúmulo de ácidos orgânicos voláteis no reator. Enquanto o resultado de DQO foi 25,1 g. L⁻¹, um valor relativamente alto comparado a valores encontrados na literaturaEssas características mostram um efluente bastante biodegradável mas com uma elevada concentração de sólidos, que pode impactar na escolha do biodigestor. Foi possível dimensionar e descrever o volume e capacidade de cada biodigestor, sendo que o modelo UASB foi dimensionado com volume igual a 5.416,5 m³, o biodigestor do tipo BLC com volume de 4.333,2 m³ e o CSTR com volume de 37,5 m³. O modelo CSTR se mostrou mais vantajoso para este projeto. Pois, esse modelo possui uma alta capacidade de suportar grandes cargas de sólidos, tal resíduo que é abundante na microcervejaria. A partir disso, determinou-se que o modelo mais adequado e viável para o cenário estudado e para a implantação na microcervejaria foi o CSTR, com um custo de 207.030,00 reais, e um retorno de investimento após 10 anos de implantação de 1.285,28 reais.

Palavras-chave: Biogás. Digestão Anaeróbia. Resíduos Cervejeiros.

ABSTRACT

PERIN, A.P.M. Proposal of brewery wastewater treatment system aiming biogas production. 2021. 51 p. Course Conclusion Paper (Graduation in Bioprocess Engineering and Biotechnology - Bacharelado), Federal Technological University of Paraná, Dois Vizinhos, 2021.

The brewing industries are an important part of the Brazilian economy. However, these industries produce a large amount of solid and liquid waste, causing environmental problems and contributing to water pollution through the release of untreated liquid effluents. Thus, it is necessary to minimize the negative effects caused by the brewery production process and, at the same time, consider the reuse of residues generated by the industry itself, combining production and sustainability. An alternative for the treatment and renewable energy is the anaerobic digestion process. Then, the objective of this study was to calculate the biodigester dimensioning as part of a brewery wastewater treatment process in the Southwest of Paraná, aiming an efficient use of energy through the biogas production. The brewery wastewater samples were collected from an industry located in the southwest of Paraná. The samples were analyzed and characterized by the concentration of Total Solids (TS), Fixed (FS) and Volatile (VS), pH, alkalinity, ammoniacal nitrogen, chemical oxygen demand (COD) and sedimentable solids (SS). In addition, using a bibliometric research, the biochemical potential of biogas (BPB) and methane (BMP) residues in brewing industry were researched. The biodigester was designed and calculated for three different models, their costs and construction feasibility to choose the most suitable for the brewery industry. The samples showed the following results: 99.5 gST. L⁻¹, 95.3 gSV. L⁻¹, and 4.2 gSF. L⁻¹ and SS with 0.063 mL.L⁻¹. The pH was 5.94, ammoniacal nitrogen lower than 0.2 mgNH₃-N.L⁻¹ and COD of 25.1 g.L⁻¹. These characteristics show a very biodegradable effluent, but containing high solid concentration, which can impact the biodigester choice. It was possible to dimension and calculate the volume and capacity of each biodigester, with the UASB model resulting in a working volume of 5,416,5 m³; the BLC a working volume of 4,333,2 m³ and the CSTR with a working volume of 37.5 m³. The CSTR model proved to be more advantageous for our brewery wastewater, because it can support high solid concentration achieving high efficiency. Then, the most suitable and feasible model for the studied scenario and for the brewery implantation was the CSTR, with a cost of R\$207,030.00 and investment return after 10 years from implementation of R\$1,285.28.

Keywords: Biogas. Anaerobic digestion. Brewing Waste

LISTA DE SIGLAS

BLC	Biodigestor de Lagoa Coberta
BSG	<i>Beer Spent Grain</i>
CSTR	<i>Continuous Flow Stirred Tank Reactor</i>
DA	Digestão Anaeróbia
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EGSB	<i>Expanded Granular Sludge Bed</i>
EIS	Eletrodo de íon seletivo digital
ETE	Estação de Tratamento de Efluente
FBR	<i>Fluidized Bed Reactor</i>
PBB	Potencial Bioquímico de Biogás
BMP	Potencial Bioquímico de Metano
SF	Sólidos Fixos
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
SS	Sólidos Sedimentáveis
UASB	<i>Upstream Anaerobic Sludge Blanket</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação geográfica do número de cervejarias por município no Brasil a partir do círculos.

Figura 2. Esquema representativo do processo de produção de cerveja artesanal

Figura 3. Esquema representativo da utilização de resíduos cervejeiros para produção de biogás e biofertilizante

Figura 4. Esquema das principais etapas do processo de digestão anaeróbia

Figura 5. . Esquemas dos principais modelos de biodigestores, sendo: a) Biodigestor de Lagoa Coberta (BLC); b) Reatores de Fluxo Ascendente com Manta de Lodo (UASB); c) Leito de Lodo expandido (EGSB); d) Reator de Fluxo e Agitação Contínuo (CSTR).

Figura 6. Fluxograma do processo de produção de cerveja contendo as entradas e saídas de matéria-prima, produto final e efluentes.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais resíduos gerados a partir da produção de 100 L de cerveja

Tabela 2. Concentrações e limites para lançamento de efluentes conforme as resoluções do CONAMA

Tabela 3. Composição química do biogás

Tabela 4. Caracterização dos parâmetros provenientes do efluente analisado

Tabela 5. Resultados encontrados na literatura para potencial bioquímico de biogás e metano

Tabela 6 – Parâmetros utilizados nos cálculos de dimensionamento dos biodigestores

Tabela 7- Valores do volume dos biodigestores dimensionados

Tabela 8. Custos dos principais equipamentos necessários para a instalação do biodigestor

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 O SETOR CERVEJEIRO NO BRASIL	13
2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL.....	14
2.3 IMPACTOS AMBIENTAIS DOS RESÍDUOS CERVEJEIROS.....	15
2.4 DIGESTÃO ANAERÓBIA COMO ALTERNATIVA PARA GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS CERVEJEIROS.....	17
2.4.1 Processo microbiológico da digestão anaeróbia	18
2.4.2 Fatores que influenciam na produção de biogás.....	20
2.5 BIODIGESTORES: TIPOS E CONFIGURAÇÕES EXISTENTES.....	21
2.5.1 Principais modelos de biodigestores.....	21
2.6 PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS CERVEJEIROS	24
3 OBJETIVOS	26
3.1 OBJETIVO GERAL	26
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
4 MATERIAL E MÉTODOS	27
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MICROCERVEJARIA	27
4.2 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE	28
4.2.1 Determinação de Sólidos Totais, Fixos e Voláteis (ST, SF e SV)	28
4.2.2 Determinação de pH	29
4.2.3 Alcalinidade total	30
4.2.4 Nitrogênio amoniacal	31
4.2.5 Determinação de demanda química de oxigênio	31
4.2.6 Quantificação dos Sólidos Sedimentáveis	32
4.3 POTENCIAL BIOQUÍMICO DE BIOGÁS (PBB) E DE METANO (BMP)	32
4.4 ESCOLHA E DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR	32
4.4.1 Dimensionamento BLC	33
4.4.2 Dimensionamento UASB	33
4.4.3 Dimensionamento CSTR	34
4.5 VIABILIDADE E CUSTOS DE CONSTRUÇÃO DOS BIODIGESTORES	34
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE	34
5.2 POTENCIAL BIOQUÍMICO DE BIOGÁS E METANO.....	36
5.3 DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR	39
5.3.1 Biodigestor UASB	39
5.3.2 Biodigestor BLC	40

5.3.3 Biodigestor CSTR	40
5.4 SELEÇÃO DO BIODIGESTOR	40
5.5 VIABILIDADE ECONÔMICA E CUSTOS DE INSTALAÇÃO DO BIODIGESTOR PARA MICROCERVEJARIA	41
6 CONCLUSÕES	45

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o terceiro país com maior consumo de cerveja no mundo, de acordo Marcusso e Muller (2018), nos últimos anos, o mercado cervejeiro no Brasil teve um expressivo crescimento impulsionado pela valorização das cervejarias artesanais. O número de cervejarias artesanais legalmente instaladas no Brasil chegou a 1209 estabelecimentos no final de 2019 e atingiu a marca de 1383 cervejarias em 2020, um crescimento 204 e outras 30 cancelaram seu registro o que apresenta um crescimento de 174 cervejarias, isso é 14,4% comparado ao ano anterior. Quando comparado com o final do ano de 2018, no qual o número de cervejarias chegou a 889, podemos observar um crescimento considerável em número de novas cervejarias em poucos anos. Além disso, os registros para autorização de produção nestas cervejarias atingiram a marca de 27.329 novos produtos (MAPA, 2020).

Esses dados revelam que, mesmo em meio a crise mundial em virtude da Pandemia ocasionada pelo COVID-19, o mercado brasileiro de cerveja artesanal está em constante crescimento. No Paraná, as cervejarias chegaram a 146 novas indústrias, sendo um crescimento médio de 30,4% no último ano (MAPA, 2020). Grande parte deste avanço deve-se a expansão das microcervejarias, que é um empreendimento com caráter mais intimista que vem ganhando espaço e fidelizando clientes. A produção apresentada por elas explora um mercado cujo nicho visa atender o público que busca qualidade e tradição, através de um produto diferenciado com foco na experiência do cliente.

Com o aumento das microcervejarias, aumenta-se também a demanda por insumos e consequentemente a geração de efluentes. Para a obtenção do produto final, é necessário transformar a matéria-prima em cerveja, respeitando o processo produtivo composto por diversas etapas. A base da matéria-prima das cervejarias na sua maioria é composta de produtos orgânicos, como malte, lúpulo e fermento. Além disso, durante as etapas de produção de cerveja, uma grande quantidade de água é requisitada. Estima-se que para cada 1 L de cerveja produzido, sejam utilizados de 4 a 10 L de água potável (BRAEKEN; VAN DER BRUGGEN; VANDECASTEELE, 2004). Em um sistema global, levando em consideração entradas e saídas, para cada 10 L de cerveja produzida, são gerados aproximadamente 80 L de efluentes (FILLAUDEAU; BLANPAIN-AVET; DAUFIN, 2006).

Além do volume expressivo de água potável utilizado na fabricação de cerveja e sua consequente produção de efluentes líquidos, esses resíduos provenientes das cervejarias contém alto teor de sólidos e carga elevada de matéria orgânica, as quais necessitam de manejo e tratamento adequados antes de serem lançados aos corpos hídricos ou sistema de coleta de

esgotos. Quando não dispostos corretamente, esses efluentes podem causar a contaminação da água e do solo e trazer outros impactos ambientais, como a disseminação de microrganismos, a eutrofização de ambientes, além da emissão de gases como odor desagradável, atração de vetores, dentre outros problemas (SIMATE *et al.*, 2011). Sendo assim, o correto uso da água e tratamento adequado dos seus resíduos, surgem como grande obstáculo para as cervejarias, principalmente em função da dificuldade de incorporação dos custos de tratamento e disposição final dos mesmos (FILLAUDEAU; BLANPAIN-AVET; DAUFIN, 2006).

Dentre as tecnologias disponíveis para tratamento desses efluentes, a digestão anaeróbia desponta como uma alternativa promissora, pois além de degradar os poluentes orgânicos de elevado potencial poluidor, é capaz de gerar biogás, que é uma energia renovável. O processo da digestão anaeróbia consiste na degradação do material orgânico através de microrganismos anaeróbios, gerando como subprodutos da reação biogás e fertilizante. Esse processo é geralmente aplicado utilizando reatores anaeróbios, também conhecidos como biodigestores, em efluentes com elevadas concentrações de matéria orgânica (KOTHARI *et al.*, 2014).

Os biodigestores anaeróbios são unidades reacionais alimentadas com substrato orgânico operando com microrganismos. O propósito deste mecanismo é a produção e coleta de biogás, além de evitar a liberação do substrato no meio ambiente. O biogás oriundo da digestão anaeróbia pode ser empregado de diversas formas, seja com o aproveitamento do seu potencial elétrico, injeção na rede de gás ou combustão direta (SIMATE *et al.*, 2011). Estão atualmente disponíveis diferentes tipos e modelos de biodigestores, que são construídos a partir das características do efluente gerado, bem como, considera-se a viabilidade econômica e eficiência, para a tomada de decisão sobre a instalação e utilização.

Sabendo disso, a utilização de resíduos cervejeiros visando a produção de biogás pode ser uma excelente maneira de aproveitar o potencial energético desse substrato, além de contribuir com o tratamento do efluente em questão e de reduzir a emissão de gases do efeito estufa e gastos com a compra externa de energia. Para isso, se faz necessário o estudo específico e pontual da microcervejaria e dos resíduos gerados por ele.

Considerando o aumento expressivo das microcervejarias no Sudoeste do Paraná e o potencial desses resíduos para a produção de biogás é que surgiu a hipótese deste trabalho. Conhecer a dinâmica de operação de uma microcervejaria identificando os processos geradores de resíduos, bem como realizar a caracterização do mesmo e estudar projeções dimensionais de biodigestores para aplicação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O SETOR CERVEJEIRO NO BRASIL

Atualmente, o Brasil é o terceiro país com maior consumo de cerveja no mundo, e quando analisado o consumo per capita, esta posição cai para décima sétima colocação (SEBRAE, 2020). De acordo com estudo concluído pelo MAPA, o mercado cervejeiro no Brasil teve um crescimento importante nos últimos anos. A cerveja é a quinta bebida mais consumida no mundo, ficando atrás apenas do leite, chá, refrigerante e café, e consiste em um segmento importante para a economia (FILLAUDEAU; BLANPAIN-AVET; DAUFIN, 2006).

O setor cervejeiro é um dos mais expressivos na economia brasileira, participou em 2018 com 2% do PIB nacional, empregando 2,7 milhão de pessoas e favorecendo empregos diretos, indiretos e induzidos, gerando em média R\$ 28 bilhões em salários e recolhendo R\$ 21 bilhões de tributos ao país (CERVBRASIL, 2019). Apesar destes números, o setor promete crescer ainda mais, visto que, o consumo *per capita* médio é de 64 L.dia⁻¹ por pessoa, o que acarretará um consumo, e conseqüentemente uma comercialização, maior do que a atual (SEBRAE, 2020).

O ramo cervejeiro possui um grande potencial a ser explorado, além de favorecer oportunidade para o crescimento de novos modelos de cervejarias (SILVA; FARIA, 2008). Nesse contexto, surge um novo conceito de produção de cerveja, tratando-se das microcervejarias, que consistem em um modelo de produção de cerveja mais compacto, com capacidade de produção de até 200.00,00 L.mês⁻¹, direcionando toda sua produção ao consumo local, por isso, a principal característica das microcervejarias é a produção artesanal.

A produção de cerveja artesanal segue um processo de produção tradicionalista sem adição de aditivos e geralmente não passa pela etapa de pasteurização tão pouco são filtradas. As etapas de produção são realizadas respeitando o tempo necessário para cada tipo de cerveja, além de ser produzida com matéria-prima da mais alta qualidade. Além disso, é um empreendimento de baixo investimento inicial e com tecnologia produtiva bem estabelecida (FERREIRA, *et al.*, 2011).

Segundo um estudo realizado pelo Serviço Brasileiro de Apoio ao Empreendedor (SEBRAE), os estados brasileiros com maior crescimento no setor de microcervejarias foram o Rio Grande do Sul em primeiro lugar, seguido de São Paulo, Minas Gerais e Santa Catarina (Figura 1). O estado do Paraná vem em quinta colocação no ranking brasileiro de microcervejarias com um total de 146 fábricas instaladas em 2020.

Figura 1. Representação geográfica do número de cervejarias por município no Brasil a partir do círculos.



Fonte: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2020.

2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL

A cerveja artesanal, produzida pelas microcervejarias, é oriunda de um processo de fabricação cauteloso e focado na qualidade do produto final. Por isso, sua produção é feita em pequena escala. Sendo assim, cada etapa é minuciosamente acompanhada e controlada pelos produtores e na maioria das vezes boa parte dos processos são realizados manualmente. Além disso, o processo de produção tende a ser mais lento, devido ao respeito do tempo de cada etapa do processo, enquanto nas grandes cervejarias prezam por maiores volumes em menos tempo (ABRACERVA, 2019).

A produção de cerveja artesanal é um processo muito bem estabelecido e com tecnologia já implementada, visando a diversidade de estilos a serem produzidos. A forma de produção busca oferecer ao consumidor final um produto fresco e para isso não se faz necessária a etapa de pasteurização. Além disso, são utilizados ingredientes da melhor qualidade, sendo estes compostos de produtos orgânicos, como o malte, o lúpulo e o fermento. A Figura 2 apresenta um esquema representativo do processo de produção de uma cerveja artesanal.

Figura 2. Esquema representativo do processo de produção de cerveja artesanal



Fonte: Autora, 2020.

A primeira etapa do processo consiste na moagem dos grãos de malte, que são quebrados para a exposição do amido. Após a moagem, inicia-se a fase de mosturação, na qual enzimas presentes no malte degradam o amido em moléculas de menor peso molecular. Na etapa clarificação do caldo açucarado (mosto) é separado o bagaço do malte. A separação ocorre geralmente através de filtros-prensa, sendo descartado após esta etapa. A fase de fervura é realizada logo após a clarificação, e tal processo serve para esterilização do mosto e para a isomerização do lúpulo. Na etapa de fermentação adiciona-se o fermento, que consome as moléculas de açúcar presentes no mosto para produzirem álcool (ARAÚJO; SILVA; MINIM, 2003). Posteriormente, condiciona-se a cerveja para o processo de maturação, onde ela fica em repouso a temperaturas negativas para estabilizar as propriedades organolépticas. Por fim, é feita a injeção de CO₂ e envase para distribuição.

2.3 IMPACTOS AMBIENTAIS DOS RESÍDUOS CERVEJEIROS

Conhecido o processo produtivo da cerveja é possível reconhecer as principais etapas geradoras de resíduos. Durante as etapas de produção da cerveja são originados 4 resíduos principais, que são: as águas residuais, o bagaço do malte, o *trub* e o fermento. Entre esses processos, também consome-se grandes quantidades de água. Estima-se que para cada 1 L de cerveja produzido, sejam gerados de 4 a 10 L de águas residuárias (BRAEKEN; VAN DER BRUGGEN; VANDECASTEELE, 2004). As principais operações geradoras de resíduos líquidos são as etapas de lavagem, filtração e limpeza de equipamentos. Nelas, está presente uma carga orgânica que varia de 1.611 a 1.784 mg.L⁻¹.m⁻³ de cerveja produzida (ARANTES *et*

al., 2017).

Por outro lado, os resíduos sólidos são providos dos demais ingredientes, como o malte, que consiste em grãos de cevada que passam por um processo de germinação conhecido por malteação. A cevada, que é o cereal utilizado em maior quantidade na produção de cerveja, serve como fonte de energia para os microorganismos (MUSSATTO, *et al.* 2006). Após a sua utilização na etapa de mosturação, o malte é filtrado, originando um subproduto chamado de *Beer Spent Grain (BSG)* que é conhecido no Brasil como bagaço de malte. Esse resíduo úmido, é o mais abundante entre os resíduos sólidos, sendo gerado cerca de 20 a 30 kg a cada 100 L de cerveja produzidos (Tabela 1) (KLAGENBOECH; THOMAZINI; SILVA, 2011; VIEIRA; BRAZ, 2009). O BSG já foi utilizado como suplemento alimentar e ração para gado, mas nos últimos anos é considerado como um substrato energético. A produção mundial de BSG foi estimada em $38,6 \times 10^6$ toneladas (MUSSATTO; DRAGONE; ROBERTO, 2006). Portanto, torna-se como interesse econômico a produção de energia renovável a partir desse substrato (BOUGRIER, *et al.*, 2018).

Tabela 1 - Principais resíduos gerados a partir da produção de 100 L de cerveja

Tipos de Resíduo	Proporção (100 L de cerveja fabricada)
Bagaço de malte	20 a 30 kg
Água	1000 L
Fermento	5 L
<i>Trub</i>	1 kg úmido

Fonte: Adaptado de Bonato ; Caten, 2016.

Além do malte, o lúpulo é um ingrediente adicionado durante a fervura em menores quantidades. As principais funções do lúpulo na fabricação de cerveja é atribuir amargor, odor e, devido aos seus princípios ativos, inibir a ação de microrganismos indesejados na etapa de fermentação. Embora produzidos em pequenos volumes, ainda assim se enquadram como potenciais poluidores (OLAJIRE, 2012).

Após a fervura e resfriamento, inclui-se o fermento, que pode ser um grupo de leveduras, bactérias ou fungos. Os quais possuem função semelhante no mosto da cerveja que é a degradação de açúcares e produção de etanol. Para cada 100 L de cerveja produzidos, são adicionados 57,5 g de fermento e gerados 5 L de fermento a serem descartados (MORADO,

2011).

Ademais, após a etapa de maturação, obtêm-se o *trub*, que é um conjunto de sobras do processo de fervura, este inclui partículas de lúpulo, malte, fermento e proteínas coaguladas (FILLAUDEAU; BLANPAIN-AVET; DAUFIN, 2006).

Encontram-se na legislação vigente, CONAMA 357 e 430, as regras para as condições de lançamento de efluentes. Na Seção III estão estabelecidas as normas para microempresas com descrição das condições e padrões para efluentes destinados a coleta do sistema de esgoto sanitário conforme dados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Concentrações e limites para lançamento de efluentes conforme as resoluções do CONAMA.

Parâmetro	Limite	CONAMA
pH	Entre 5 e 9	430
DQO	Máx. 120 mg.L ⁻¹	357
Temperatura	Inferior a 40°C	430
Materiais Sedimentáveis	Até 1mL.L ⁻¹	430
Substâncias Solúveis	Até 100 mL.L ⁻¹	430

Fonte: Brasil (2005,2011).

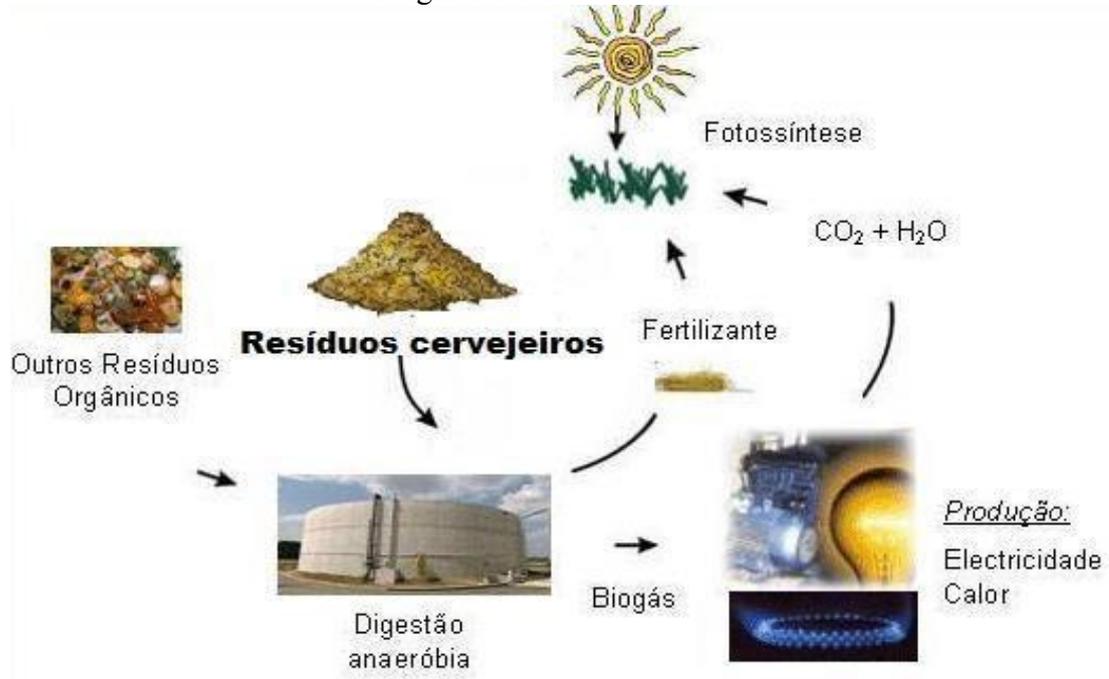
Tais efluentes citados são caracterizados de modo geral, como potenciais poluidores devido a elevada concentração de DQO e por serem gerados em grandes volumes. Devido aos riscos que podem causar a descarga descontrolada destes, é justificada a necessidade de tratamento adequado desses efluentes a fim de cumprir com as normativas exigidas e visando mitigar os possíveis danos ambientais decorrentes (SANTOS *et al.*, 2008).

2.4 DIGESTÃO ANAERÓBIA COMO ALTERNATIVA PARA GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS CERVEJEIROS

Para o tratamento de efluentes cervejeiros, o processo de digestão anaeróbia (DA) pode ser um procedimento muito atrativo, pois além de degradar a matéria orgânica, proporciona dois produtos com grande interesse comercial (biogás e fertilizante) (Figura 3). O digestato obtido no final da digestão, pode ser empregado como fertilizante na agricultura, produto que possui valor comercial embutido. O produto originado é o biogás, que trata de um gás com elevado potencial energético e muito visado para substituição da energia convencional (PANJICKO, *et al.*, 2017). Além dos produtos originados do processo anaeróbio, é possível

também reduzir a emissão de gases poluentes e quantidade de matéria sólida descartada, solucionando um dos maiores problemas nas microcervejarias.

Figura 3. Esquema representativo da utilização de resíduos cervejeiros para produção de biogás e biofertilizante.



Fonte: Autora, 2020.

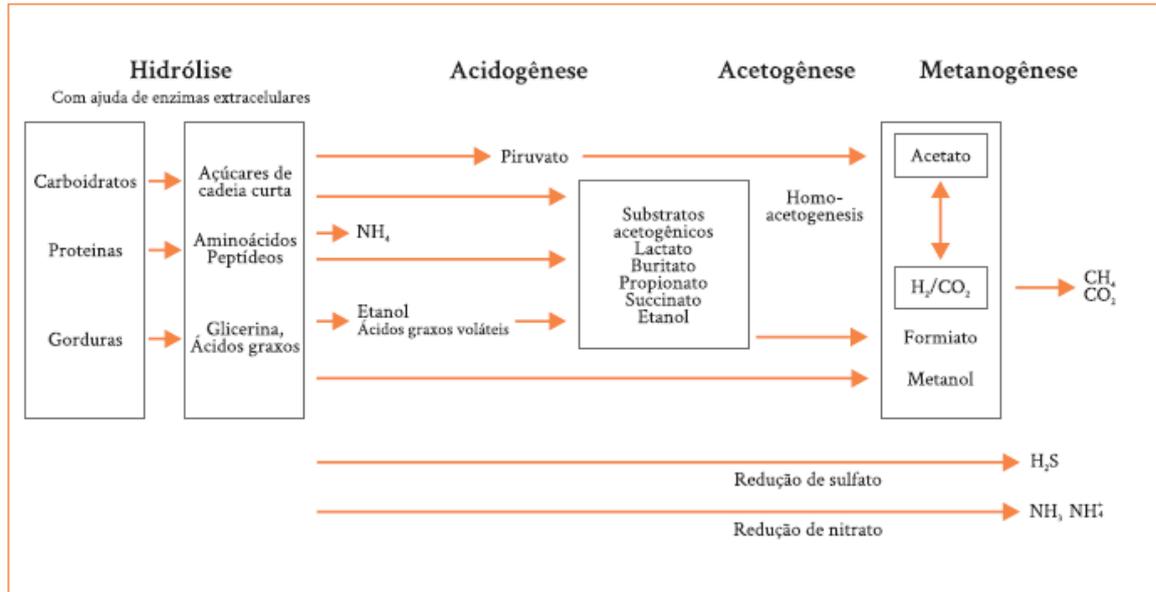
As concentrações de DQO possibilitam uma eficiente digestão anaeróbia e consequente produção suficiente de metano, oriundo do biogás (ARANTES *et al.*, 2017). Tal processo possui algumas vantagens em relação aos processos convencionais de tratamento aeróbio, como: o menor consumo de energia; a redução de volume de lodo biológico; a necessidade de menores quantidades de nutrientes; um produto final rico em gás metano; além da resistência e estabilidade do processo após longos períodos sem alimentação (METCALF & EDDY, 2016). No Brasil essas características se tornam mais um atrativo, devido às condições climáticas favoráveis do país para o processo.

2.4.1 Processo microbiológico da digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo de degradação da matéria orgânica e depende da atividade conjunta de diferentes grupos de bactérias fermentativas e archeas metanogênicas. Para isso, necessita de um meio que não haja oxigênio, que favorece a ação de bactérias sintróficas (ou acetogênicas) para formar ácido acético, H₂ e CO₂ e microrganismos metanogênicos para formar CH₄ (CHEN *et al.*, 2016). Ela é dividida em quatro principais

etapas, como é apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Esquema das principais etapas do processo de digestão anaeróbia



Fonte: Kunz, Steinmetz e Amaral (2019).

Como pode-se analisar através da Figura 4, a hidrólise consiste na etapa inicial da degradação anaeróbia, é nessa fase ocorre hidrólise de compostos de alta massa molecular, em substâncias mais simples e monômeros: açúcares, aminoácidos e ácidos graxos. Tais componentes hidrolisados servirão de substrato para as demais bactérias presentes no processo (HAWKES *et al.*, 2007).

Na etapa seguinte (acidogênese), os microrganismos acidogênicos fermentam os substratos transformados na etapa anterior, formando novos elementos (ácido propiônico, ácido butírico e acético) sendo os mais importantes ácidos voláteis precursores de gás metano.

Na terceira etapa, a acetogênese, consiste em uma fase muito crítica para o processo, pois nesta fase que são oxidados os ácidos orgânicos (acetato, propionato e butirato) os quais se em excesso podem limitar as condições ideais para o desenvolvimento dos microrganismos (CHERNICHARO, 2005).

Por fim, na metanogênese a biomassa é convertida em metano e dióxido de carbono pela ação das arquea metanogênicas (GIORDANO *et al.*, 2011). A ação dessas bactérias pode ser dividida em outros dois domínios de via metabólica: as acetoclásticas e as hidrogenotróficas. As acetoclásticas convertem acetato em metano, enquanto as hidrogenotróficas convertem dióxido de carbono e hidrogênio em metano. Destacando cerca de 70% de metano advém do

metabolismo dos microrganismos metanogênicos acetoclásticos e 30% convertido pelos microrganismos hidrogenotróficos a partir da redução do dióxido de carbono (GERALDI, 2003).

2.4.2 Fatores que influenciam na produção de biogás

Todo o processo de digestão anaeróbia é dependente da reação dos microrganismos sobre o substrato fornecido, sendo assim o sucesso de conversão depende de alguns fatores limitantes. Os principais interferentes do processo de digestão anaeróbia são essencialmente: (i) o desequilíbrio de micro e macronutrientes no meio; (ii) a variação de temperatura durante o processo; (iii) a alteração de pH devido ao substrato disposto ou ação das bactérias e; (iv) o tipo de reator selecionado (LETTINGA G.; HULSHOPOLL; ZEEMANG 1996).

Os nutrientes essenciais para o crescimento das bactérias são carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre. Sem esses elementos disponíveis em concentrações equilibradas as reações metabólicas desses organismos estariam comprometidas afetando a produção do produto final, o biogás (LESTEUR, *et al.*, 2010).

A temperatura pode ser operada em três diferentes faixas: psicofílica (10-20°C), mesofílica (30-40°C) e termofílica (50-60°C). As temperaturas ótimas dependem muito do tipo de microrganismo que está sendo utilizado. Para reatores no Brasil as temperaturas mais utilizadas são as psicofílicas e mesofílicas devido às condições ambientais favoráveis. Além disso, as bactérias mesofílicas suportam alterações de até 3°C sem reduzir a produção de biogás, isso indica uma maior estabilidade de processo (COLLINS *et al.*, 2003).

Já o pH é o parâmetro que depende diretamente do bom funcionamento global do processo de digestão anaeróbia, pois durante as etapas as bactérias necessitam de níveis específicos para realizarem suas funções. Contudo, a formação de produtos dentro do reator – principalmente durante a fase da acidogênese – pode alterar significativamente o pH do meio, sendo fatal para com microrganismos mais sensíveis e comprometendo a produção de biogás (WANG; YIN; SHEN., 2014).

No mesmo sentido, a alcalinidade está diretamente relacionada ao pH. A alcalinidade determina a capacidade de uma solução aquosa em neutralizar ácidos sendo que em sistemas anaeróbios tal neutralização decorre da presença de bicarbonatos no meio. Esse parâmetro se faz importante uma vez que as bactérias produzem ácidos, sendo o decréscimo do pH impedido pela reação de neutralização desses ácidos com as espécies que conferem alcalinidade ao meio. A ocorrência de tais reações é importante pois as archeas metanogênicas sobrevivem em faixas

estreitas de pH (6,5 a 8,0).

Outro aspecto a ser considerado é o teor de água. O teor de água dentro do biodigestor deve variar de 60% a 90% do peso do conteúdo total, sendo os biodigestores que operam com o teor de água próximo a 90% classificados como biodigestores com baixo teor de sólidos totais e aqueles com teor de água próximo à 60%, classificados como biodigestores com alto teor de sólidos totais (SIMATE, 2011).

Para que ocorra o processo de digestão anaeróbia, é necessária a existência de uma unidade reacional, também conhecida como biodigestores. Existem diversas configurações de reatores, parâmetros de processamento e possibilidades de operação existentes, os quais irão afetar diretamente a produção de biogás e serão abordados com detalhes na sequência.

2.5 BIODIGESTORES: TIPOS E CONFIGURAÇÕES EXISTENTES

Os biodigestores são caracterizados como sendo uma tecnologia central que acelera o processo de decomposição de matéria orgânica, via processo de biodigestão anaeróbia realizada por microrganismos (OLIVEIRA; HIGARASHI, 2006). O mecanismo de decomposição realizado por eles, conforme supracitado, é o mesmo para qualquer tipo de reator, o que varia é a tecnologia empregada nos modelos existentes, visando sempre a melhor eficiência e a redução dos custos com os investimentos (ALVES *et al.*, 2010).

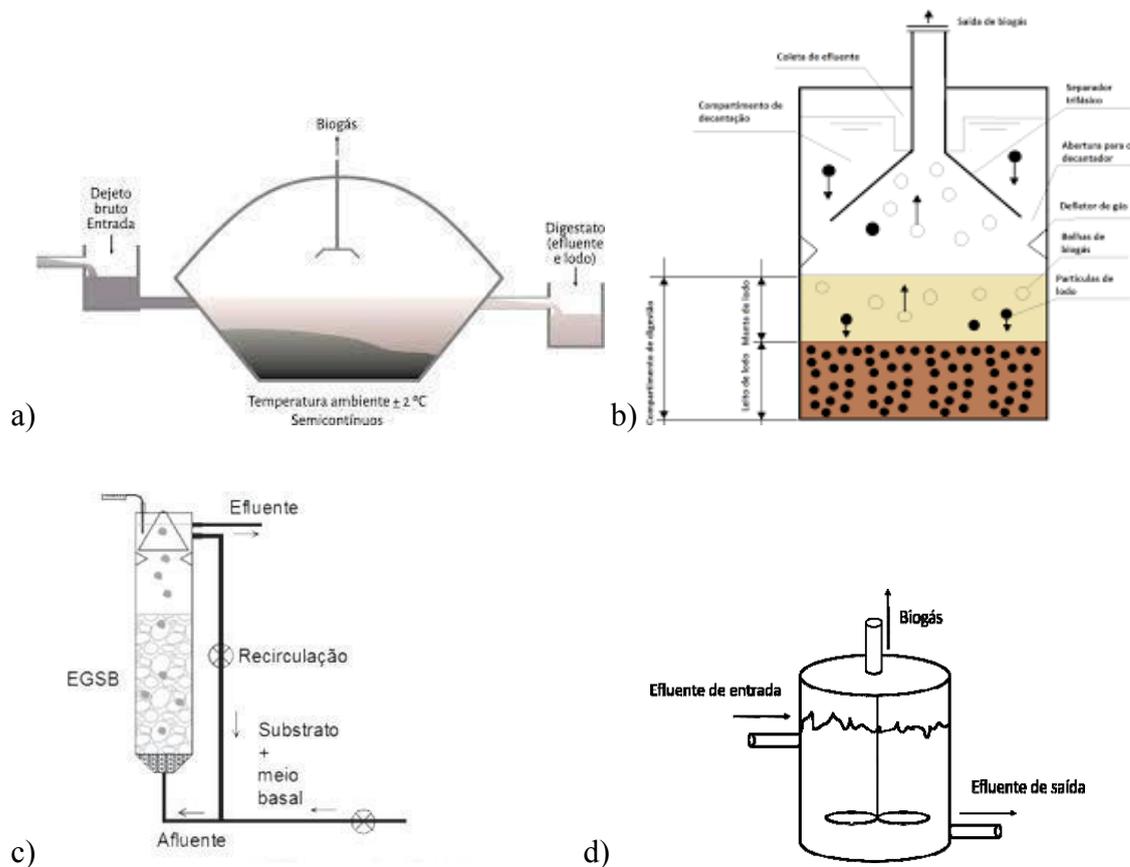
De uma forma geral, os biodigestores consistem em tanques alimentados de forma automatizada com substrato orgânico. O sistema transporta o resíduo para os fermentadores onde se encontram os microrganismos responsáveis pela digestão (WANG *et al.*, 2016). Este processo gera o biogás, que devido ao seu potencial energético é armazenado para utilização posterior (BOCHER *et al.*, 2008; WANG *et al.*, 2016).

Os biodigestores podem ser classificados de acordo com o tipo de substrato, nível de investimento e condições ambientais. A avaliação dos parâmetros é uma etapa muito importante, pois é a partir desses resultados que a seleção do reator ideal é consolidada.

2.5.1 Principais modelos de biodigestores

São apresentados na Figura 5, no formato de esquema, os principais modelos de biodigestores atualmente utilizados para operação do processo de digestão anaeróbia.

Figura 5. Esquemas dos principais modelos de biodigestores, sendo: a) Biodigestor de Lagoa Coberta (BLC); b) Reatores de Fluxo Ascendente com Manta de Lodo (UASB); c) Leito de Lodo expandido (EGSB); d) Reator de Fluxo e Agitação Contínuo (CSTR).



Fonte: Adaptado; Metcalf ; Eddy, 2016.

O biodigestor de lagoa coberta (BLC) (ver Figura 5a) é conhecido também como modelo canadense, possui formato horizontal e com maior área de exposição ao sol. São apresentados na forma de um tanque feito de alvenaria revestidos com material gessintético e de largura maior que profundidade. Dispõe de uma manta superior para reter o biogás produzido. Também, possui uma caixa para coleta do efluente liberado e uma válvula que fica conectada a saída do biogás. Este modelo apresenta baixo nível tecnológico empregado, quando comparado aos demais modelos existentes. Por essa razão, sua construção e operação são relativamente simples, além de necessitar de menor investimento. É indicado para o tratamento de resíduos com teor de sólidos entre 0,5 e 3% e são empregado para o tratamento de sólidos orgânicos (ROOS; MARTIN; MOSER, 2004). Biodigestores do tipo BLC apresentam alguns pontos negativos diante a sua configuração, como a formação de zonas de isolamento dos microrganismos, que impede que o substrato entre em contato com o microrganismo reduzindo a eficiência do processo (CANTRELL *et al.*, 2008).

Um dos reatores anaeróbios mais populares no tratamento de resíduos cervejeiros é o modelo (UASB) (Figura 5b) como são conhecidos no Brasil, do inglês *Upstream Anaerobic*

Sludge Blanket (UASB) (MUNGANGA, 2013). Ele atua com a entrada das águas residuais na parte inferior do tanque vertical, que passa para cima através de um denso leito de lodo anaeróbio onde os microrganismos estão presentes. Após o contato com o substrato, o biogás é liberado e na medida que as concentrações aumentam, são carregadas para a parte superior do reator, sendo separado com o auxílio de um separador trifásico (Figura 5b) (METCALF; EDDY, 2005; SIMATE, *et al.*, 2011). Esse tipo de biodigestor suporta alta carga orgânica volumétrica com valores que variam de 0,5 a 8,0 Kg.m⁻³.d⁻¹. Já as concentrações de Sólidos Totais devem ser baixas, (menores de 2%), por questões hidrodinâmicas, Dentre as principais vantagens desse sistema, podemos citar os baixos custos de projeto, implantação, operação e manutenção. Além da eficiência na remoção de poluentes, também possibilita a recuperação de subprodutos úteis (VADLANI; RAMACHANDRAN, 2008).

Outro modelo de biodigestor muito utilizado industrialmente, são os *Expanded Granular Sludge Bed* (EGSB) (ver Figura 5c). Esse tipo de reator consiste de uma variação do modelo UASB a qual surgiu para suprir as limitações de tratamento com elevadas cargas volumétricas e altas concentrações de sólido, desenvolvidas pelo modelo anterior. Ambos os modelos se diferem pela relação altura/diâmetro e velocidade das partículas do efluente, sendo que com uma maior velocidade ascendente resulta em maior eficiência de tratamento, pois melhora as condições de mistura. Ele foi desenvolvido para operar com elevadas cargas orgânicas e em baixas temperaturas (LETTINGA; HULSHOPOLL; ZEEMANG, 1996; KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019). Este reator tem sido muito empregado para o tratamento de cervejarias e de processos alimentícios, seu desenvolvimento hidrodinâmico resulta em um alto grau de homogeneidade proporcionando o contato necessário do substrato e microrganismo (SEGHEZZO, *et al.*, 1998).

Já os *Continuous Flow Stirred Tank Reactor* (CSTR) (ver Figura 5d) são conhecidos como reatores de mistura contínua, e são empregados em sistemas de ETE que possuam substratos mais densos, com teor de sólidos de 15% que suporta elevadas cargas orgânicas (1 a 4 Kg.m⁻³.dia⁻¹). São geralmente utilizados nos setores agropecuários, indústrias alimentícias e tratamento de lodos sanitários (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019). Seu sistema de agitação apresenta maiores custos de implementação e manutenção, mas em contrapartida a agitação aumenta a área de contato entre substrato e microrganismo favorecendo a produção de biogás. Outra vantagem desse modelo de reator, é o sistema de temperatura, devido ser um fator importante para a atuação das bactérias. O seu controle possibilita a estabilização do meio reacional, garantindo uma maior capacidade de produção (GONÇALVES, *et al.*, 2001).

2.6 PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS CERVEJEIROS

Com o crescimento acelerado das indústrias cervejeiras no Brasil, o acúmulo de resíduos dessa atividade gera conflitos de disposição inadequada, e muitas vezes isso ocorre por falta de informações. Com o biogás, por exemplo, é possível obter-se subproduto para geração de energia (FERREIRA *et al.*, 2018). Além disso, a produção de biogás a partir dos resíduos da fermentação oferecem uma opção viável para alcançar uma redução considerável no uso de combustível fóssil.

Visando contribuir para a solução da crise energética e ambiental mundial, diversos pesquisadores têm se empenhado em esclarecer o potencial de utilização energética dos resíduos da indústria cervejeira. Panjicko *et al.* (2017) demonstram que o resíduo oriundo da cervejaria pode ser digerido anaerobicamente com sucesso e usado para a produção de biogás, em sua pesquisa os autores relatam que o processo geral alcançou uma eficiência total de degradação de sólidos entre 75,9 e 83,0%, além disso, a produção específica média de biogás foi de $414 \pm 32 \text{ L.kg}^{-1}$, enquanto a produção de biometano foi de $224 \pm 34 \text{ L.kg}^{-1}$ de sólidos totais adicionados.

No mesmo sentido, Oliveira, Alves e Costa (2018) utilizaram dois subprodutos de uma cervejaria para investigar o potencial de produção de biogás a partir do bagaço do malte e o excedente de fermento, no estudo citado o bagaço do malte teve $301 \pm 5 \text{ L.kg}^{-1}$ de volume de metano produzido, já o excedente de fermento teve como resultado $515 \pm 4 \text{ L.kg}^{-1}$, demonstrando o potencial para formação do biogás, além disso, os autores trazem informações a respeito do potencial de eletricidade desses subprodutos estudados, que foi de 206kWh por metro cúbico de cerveja produzida, o que satisfaz 80% do consumo elétrico da cervejaria em questão.

Quando compararam os efluentes de uma cervejaria com efluentes domésticos e industriais para avaliar a atividade metanogênica, Albuquerque et al (2016) perceberam que o inóculo oriundo de uma indústria de cervejaria, apresentou um maior desempenho com uma atividade metanogênica de $0,80 \text{ gDQO.gSV} \cdot \text{d}^{-1}$, volume máximo de metano de 21,98 mL e 67,5% de metano presente no biogás.

Já Zhang; Zang (2017) usaram resíduos de cervejarias pré-tratados com calcinado, a fim de aumentar a produção de hidrogênio fermentativo, os resultados do estudo demonstraram que o uso de lodo calcinado pode fornecer pH adequado para uma produção eficiente de hidrogênio, influenciando positivamente na sua produção.

No entanto, ao longo da pesquisa bibliográfica sobre o tema, nota-se que a qualidade do

biogás depende de algumas condições essenciais para o metabolismo dos microrganismos decompositores dentro dos digestores (pH, alcalinidade, temperatura, substrato). As concentrações dos componentes do biogás dependem das condições fornecidas ao processo de digestão e do modelo de biodigestor, conforme apresentado na Tabela 3 (MAO; FENG; WANG, 2015).

Tabela 3. Composição química do biogás

Gás	Concentração (%)
Metano (CH ₄)	50-80
Dióxido de carbono (CO ₂)	20-40
Hidrogênio (H)	1-3
Nitrogênio (N)	0,5-3
Gás sulfídrico e outros (H ₂ S)	1-5

Fonte: Adaptado de Coldebella, 2006

O biogás com um percentual de 70% de metano, possui um poder calorífico de aproximadamente 23.380 MJ.m⁻³, quando comparado ao do gás natural que é de 37.300 MJ.m⁻³, notamos potencialidade no uso do biogás devido a sua origem renovável, uma vez que é produzida pela degradação de resíduos orgânicos. Estudos realizados por Siqueira, *et al.* (2019), indicam que cerca de 1500 kg.dia⁻¹ de resíduos orgânicos produzidos por uma microcervejaria são capazes de produzir um volume entre 163 a 184 m³.dia⁻¹ de biogás, ou seja, embora o seu poder calorífico seja menor que o do gás natural, deve-se levar em consideração sua origem renovável (KATUWAL; BOHARA, 2009).

Por sua vez, a utilização do biogás pode ocorrer de diversas maneiras e cada uma dessas formas exige um grau de tratamento do gás. As possíveis formas de utilização são o aproveitamento elétrico, injeção na rede de gás, combustão direta, aproveitamento térmico e como combustível (HOLUBAR *et al.*, 2003).

Portanto, a fonte de biogás oriunda de resíduos cervejeiros é uma excelente maneira de aproveitar o potencial energético desse poluidor, além de reduzir a emissão de gases do efeito estufa e reduzir gastos com a compra externa de energia.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Realizar o estudo e dimensionamento do melhor biodigestor como parte de um processo de tratamento de resíduos de uma microcervejaria do Sudoeste do Paraná, visando um eficiente aproveitamento energético através da produção do biogás.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a caracterização físico-química dos resíduos oriundos da microcervejaria;
- Estudar os possíveis biodigestores para utilização em microcervejaria, frente às características qualitativas e quantitativas dos resíduos;
- Dimensionar um biodigestor adequado para a realidade da microcervejaria;
- Estudar a viabilidade econômica da implantação do biodigestor.

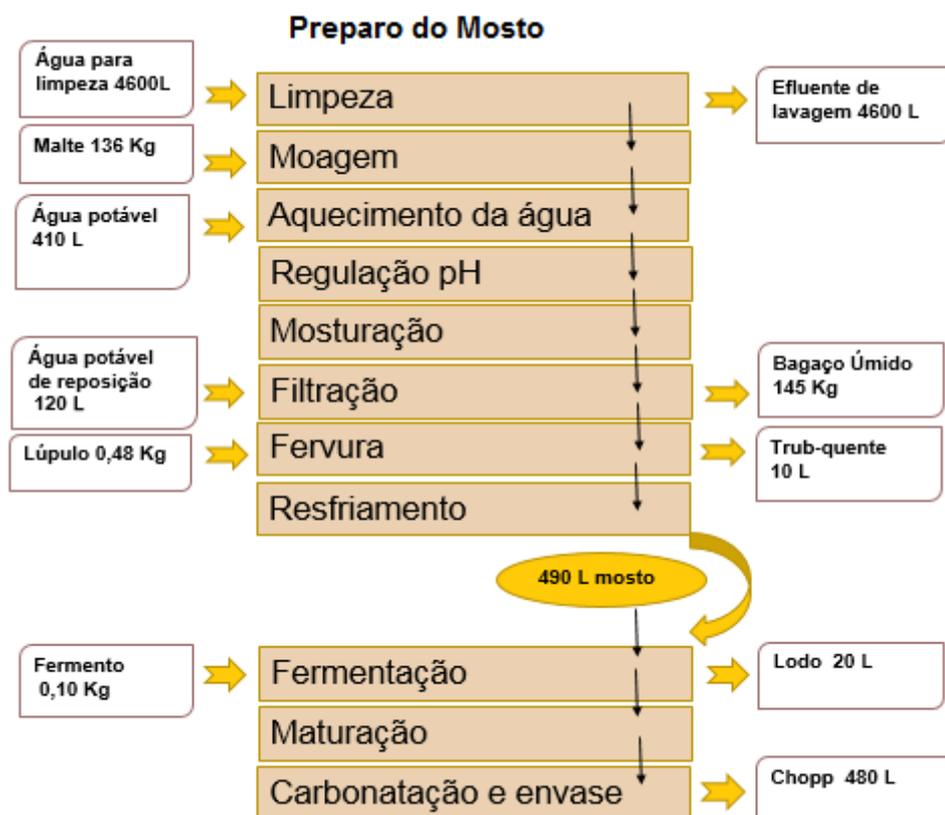
4 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Biotecnologia Ambiental e Alimentos (LABIA) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) no Câmpus Dois Vizinhos.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MICROCERVEJARIA

A microcervejaria base deste estudo, onde foram coletadas amostras dos resíduos, é uma microcervejaria situada no município de Dois Vizinhos-PR que atua há aproximadamente 2 anos na região, a qual possui uma produção média de 16.000 L. mês⁻¹ de cerveja e possui como principal estilo de produção a cerveja Pilsen. Para a produção de 500 L da cerveja Pilsen, são inicialmente necessários 410 L de água potável, 136 kg de malte, 0,48 kg de lúpulo e 0,10 kg de fermento biológico. A Figura 6 mostra o fluxograma completo do processo de produção de cerveja da microcervejaria em questão.

Figura 6. Fluxograma do processo de produção de cerveja contendo as entradas e saídas de matéria-prima, produto-final e efluentes.



Fonte: A autora 2021.

A sanitização dos equipamentos é o primeiro processo realizado, e gera em média 4.600

L de águas residuárias contendo água, agentes desinfetantes e resquícios de resíduos. Após a limpeza inicia-se a produção propriamente dita, com a adição do malte e água em panela aquecida. Na etapa de mosturação, são retirados 145 kg de bagaço de malte úmido. Na etapa seguinte, é completado o volume da panela com mais 120 L de água e em seguida adicionado o lúpulo. No final da fervura são retirados resíduos sólidos de malte e lúpulo, os quais são chamados de *trub-quente*. Após a retirada do *trub-quente*, o mosto é transferido para os tanques de fermentação de 1.000 L, passando pelos trocadores de calor por onde são resfriados, até temperatura ideal para adição do fermento.

Água utilizada no resfriamento não é descartada e sim armazenada para utilização na limpeza. O mosto fica em processo de fermentação nos tanques por 21 dias e após esse período o volume de 480 L de cerveja são transferidos em barris de inox, que ficam armazenados em container de refrigeração. O restante do volume presente no tanque é chamado de lodo, que nada mais é que o fermento. Geralmente o lodo é utilizado por no máximo quatro novas brasagens (dois dias) e após a última utilização é descartado gerando em média 20 L de resíduo orgânico.

4.2 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE

As amostras de resíduos foram coletadas nas etapas geradores de efluentes da Figura 6.

Para isso, foram coletados 500 mL de amostra das águas residuais obtidas em diferentes etapas do processo produtivo. Inicialmente, as amostras foram coletadas ao final de cada etapa geradora de resíduo. Esse processo se deu em cada brasagem efetuada por cinco dias. No último dia as amostras foram transferidas para um recipiente de maior volume e então as amostras foram mantidas sob refrigeração no laboratório, para posterior análise.

A partir disso procedeu-se com a caracterização físico-química do efluente coletado através de análises de: sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF), sólidos voláteis (SV), potencial hidrogeniônico (pH), alcalinidade, nitrogênio amoniacal (N-NH₃), sólidos sedimentáveis (SS e Demanda Química de Oxigênio (DQO)). Todas as metodologias e técnicas analíticas realizadas estão descritas na sequência.

4.2.1 Determinação de Sólidos Totais, Fixos e Voláteis (ST, SF e SV)

O preparo do material para análise iniciou-se com a calcinação por 1 hora em forno-mufla a 550° C. Após esse procedimento a cápsula foi transferida para o dessecador até esfriar em temperatura ambiente e pesada (P1). Em seguida, 10 mL de amostra foram transferidos para as

cápsulas, as quais foram encaminhadas para estufa ($105 \pm 2^\circ\text{C}$) onde permaneceram por um período não inferior a 12 horas até perder totalmente a umidade e atingir o peso constante. Após a secagem, a cápsula retornou para o dessecador até que houvesse seu resfriamento, prosseguiu-se então para a segunda pesagem (P2). Todas as substâncias que permaneceram na cápsula após a total secagem de um determinado volume de amostra, foram considerados os sólidos totais da amostra. A partir da Equação 1 obteve-se o resultado final da análise.

$$ST = \frac{P_2 - P_1}{Vol} \cdot 1000 \quad (1)$$

Em que: ST: sólidos totais; P₂: Peso da segunda pesagem (g); P₁: Peso da primeira pesagem (g); Volume da amostra (mL).

A determinação dos sólidos fixos ocorreu por meio da calcinação da amostra. Após a cápsula ser retirada da estufa e resfriada no dessecador, seguiu para o forno-mufla ($550 \pm 50^\circ\text{C}$), onde permaneceu por 50 minutos. Após este tempo, foi transferida para o dessecador até atingir a temperatura ambiente e então realizou-se uma terceira pesagem (P3). Todas as substâncias que permaneceram na cápsula após a calcinação em forno-mufla foram consideradas sólidos fixos.

Para atingir o resultado final do procedimento se fez uso da Equação 2.

$$SF = \frac{P_3 - P_1}{Vol} \cdot 1000 \quad (2)$$

Em que: ST: sólidos totais; P₃: Peso da terceira pesagem (g); P₁: Peso da primeira pesagem (g); Volume da amostra (mL).

Já os sólidos voláteis foram calculados pela subtração entre os sólidos totais e os sólidos fixos, ou seja, todas as substâncias que se volatilizam após a calcinação no forno- mufla, conforme Equação 3.

$$SV = ST - SF \quad (3)$$

Em que: SV: Sólidos voláteis; ST: Sólidos Totais; SF: Sólidos Fixos.

4.2.2 Determinação de pH

A medição do pH foi realizada por meio do equipamento pHmetro digital marca *Highmed* modelo HMC150 com eletrodo de pH, previamente calibrado com solução tampão de pH 4,0 e 7,0, conforme indicado pelo APHA, método 4500-H + B. (APHA, 2017). Após o processo de calibração, realizou-se as medições dos valores de pH por meio da inserção do eletrodo nas amostras, estas sob agitação, até a obtenção do valor estável.

4.2.3 Alcalinidade total

Para determinar a alcalinidade utilizou-se da técnica laboratorial conhecida por titulação, com a adição gradual da substância ácida. A adição foi até que o mesmo reagisse completamente. Com auxílio de um pHmetro digital, o ponto de equilíbrio da reação foi identificado. Soluções de ácido sulfúrico (H_2SO_4) nas concentrações ($0,005 \text{ mol.L}^{-1}$) e uma solução de carbonato de sódio $0,025 \text{ mol.L}^{-1}$, foram preparadas para a titulação padrão da análise.

Inicialmente foi titulado 20 mL da solução de carbonato de sódio com ácido sulfúrico até que atingisse o pH 4,5. O valor medido na bureta foi anotando a fim de calcular a molaridade do ácido seguindo a equação apresentada na Equação 4:

$$M = \frac{10 \cdot A \cdot B}{106 \cdot C} \quad (4)$$

Em que: M: molaridade do ácido padronizado (mol.L^{-1}); A: massa de Na_2CO_3 pesado para 1 L (g); B: volume de solução de Na_2CO_3 (mL); C : média do volume da solução de ácido gasto na titulação (mL).

Para execução da análise real, foi titulado 50 mL da amostra com ácido até atingir pH de 4,5 para expressar os resultados da análise (Equação 5):

$$mg \text{ CaCO}_3.L^{-1} = M \cdot E \cdot 100000 \quad (5)$$

Em que: M: molaridade do ácido padronizado (mol.L^{-1}); E: volume de titulante gasto (mL); D: volume de amostra (mL)

4.2.4 Nitrogênio amoniacal

Para determinar as concentrações de nitrogênio amoniacal da amostra, foi utilizado um eletrodo de íon seletivo digital (EIS). O equipamento consiste em um eletrodo de vidro alocado no interior de cilindro plástico, na parte inferior uma membrana permeável a gás separa a amostra da solução eletrolítica de referência de amônia contida no interior do cilindro.

Para realizar a análise da amostra, foi adicionado 100 mL de efluente em um béquer de 50 mL, sob agitação magnética, em seguida o eletrodo de íon seletivo foi posto em contato com a solução do béquer, até que houvesse a estabilização do equipamento. Em seguida adicionou-se aproximadamente 3 gotas de solução de hidróxido de sódio, com o objetivo de deslocar o equilíbrio de todo o nitrogênio amoniacal para amônia e então realizada uma nova medição.

A análise dos resultados obtidos pelo equipamento, foram posteriormente convertidos em mg. L^{-1} . Uma curva de calibração foi realizada com uma concentração de amônia conhecida, para que houvesse precisão na leitura dos resultados obtidos através da amostra, por meio da equação da reta.

4.2.5 Determinação de demanda química de oxigênio

Esta análise foi realizada seguindo o método de refluxo fechado colorimétrico em espectrofotômetro, conforme metodologia 5220D proposta no *Standard Methods* (APHA, 2017). O princípio da técnica consiste na oxidação das amostras em meio fortemente ácido, onde há presença de dicromato em excesso, que quando oxidado, apresenta coloração laranja e depois de reduzido, passa a apresentar coloração verde, estas sendo absorvidas na região visível do espectro e podem ser medidas via espectrofotometria.

Para a construção da curva de calibração foram preparados 5 padrões de solução de biftalato de potássio com DQO entre 40 e 500 $\text{mg de O}_2. \text{L}^{-1}$. Em seguida preparou-se a solução digestora, 500 mL de água destilada dissolvidos em 4,9 g de dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), tendo sido previamente seco em uma temperatura de 150°C durante 2 horas. Adicionou-se lentamente 167 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado e 33,3 g de sulfato de mercúrio (Hg_2SO_4). Logo após a dissolução e resfriamento, realizou-se a diluição em balão volumétrico de 1000 mL.

Após o preparo das soluções, os ensaios foram preparados para a construção da curva padrão, com a adição de 1,5 mL da solução digestora no tubo de ensaio, 3,5 mL de solução de ácido sulfúrico e 2,5 mL da solução de biftalato de potássio. Em seguida, os tubos foram

transferidos para estufa com temperatura de 150°C por 2 horas para que houvesse o processo de digestão. A finalização desta etapa se deu com o resfriamento dos tubos e a decantação dos sólidos no fundo do tubo, e então posteriormente mensurou-se a absorvância em comprimento de onda de 600 nm.

A partir da curva padrão estabelecida e a equação gerada, as amostras foram preparadas para análise, substituiu-se 2,5 mL da solução de biftalato pelo efluente e foram repetidos os demais procedimentos com os reagentes citados anteriormente.

Para a leitura em espectrofotômetro, o equipamento foi zerado por meio da solução prova não digerida como amostra. O valor da absorvância dado pelo equipamento foi transformado em $\text{mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ através da equação gerada pela curva padrão.

4.2.6 Quantificação dos Sólidos Sedimentáveis

Este teste busca determinar a quantidade de sólidos em suspensão que podem ser retidos por decantação, representando o material formador dos bancos de lodo quando há despejo nos rios. Para esta análise se fez uso da técnica com o cone de Imhoff, o qual foi numerado e teve suas paredes internas lavadas com água, em seguida recebeu 1 L da amostra homogeneizada que permaneceu em repouso. Após 45 minutos, o cone foi rotacionado em 360° para promover o desprendimento dos sólidos aderidos à parede do cone, porém com cuidado para que não houvesse a ressuspensão de sólidos sedimentados. Após um tempo de 60 minutos, a leitura final foi realizada (posição da interface lodo/líquido sobrenadante), anotando-se o resultado em ml.L^{-1} .

4.3 POTENCIAL BIOQUÍMICO DE BIOGÁS (PBB) E DE METANO (BMP)

Foi realizado um levantamento bibliográfico utilizando a literatura existente, a cerca do potencial bioquímico de biogás e de metano dos resíduos oriundos da indústria cervejeira a partir de consultas nas plataformas de informação científica *Web of Science* (WoS), produto da *Thomson Reuters*, e *Scopus*, da *Elsevier*, além das plataformas simples de busca, incluindo artigos científicos preferencialmente com *Digital Object Identifier System* (DOI) e conferências, bem como, monografias, dissertações e teses. Com a pesquisa e leitura sobre o tema, foi possível obter valores existentes nesses resíduos para a produção de biogás.

4.4 SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR

A partir dos resultados obtidos na caracterização físico-química do efluente coletado,

atrelado a caracterização da microcervejaria, volume de geração de efluente e espaço disponível, os seguintes modelos de biodigestores foram considerados para dimensionamento: Biodigestor de Lagoa Coberta (BLC); Reator de Fluxo Ascendente com Manta de Lodo (UASB) ou do inglês *Upstream Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) e Reator de Fluxo e Agitação Contínuos ou *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR).

Após a realização das análises físico-químicas, avaliou-se os resultados e determinou-se as variáveis utilizadas no procedimento de dimensionamento dos biodigestores, para em seguida selecionar o biodigestor mais adequado de acordo com os parâmetros avaliados, com base nas equações descritas por Kunz, Steinmetz e Amaral (2019).

4.4.1 Dimensionamento dos modelos BLC, UASB e CSTR

Para os modelos de biodigestores BLC, UASB e CSTR foi previamente calculado o volume de sólidos a partir da equação 6:

$$V_{sól} = \frac{M}{D} \quad (6)$$

Em que: $V_{sól}$: Volume do sólido (L); M: Massa do sólido (kg); D: Densidade dos sólidos (kg.m^{-3}).

Para a determinação da concentração de sólido voláteis no substrato, foi calculado a partir da equação 7 apresentada a seguir:

$$S_o = \frac{Sv_{liq} \cdot V_{liq} + Sv_{so} \cdot V_{so}}{V_{liq} + V_{so}} \quad (7)$$

Em que: S_o : Concentração de sólidos voláteis no substrato (kgSV.m^{-3}); Sv_{liq} : Sólidos voláteis do líquido (g.L^{-1}); V_{liq} : Volume líquido (L); Sv_{so} : Sólidos voláteis do sólido (g.L^{-1}); V_{so} : Volume sólido (L).

Para o cálculo da estimativa de volume líquido necessário foi utilizado a equação 7:

$$V_{liq} = V_f - V_i \quad (8)$$

Em que: V_{liq} : Volume líquido necessário (L); V_f : Volume final (g.L^{-1}); V_i : Volume inicial (g.L^{-1})

E em seguida foi realizado o cálculo do volume do biodigestor conforme a equação 8: volume do biodigestor utilizando a Equação 8 conforme segue:

$$V = \frac{Q \times S_o}{COV} \quad (9)$$

Em que: V: Volume do biodigestor (m^3); Q: Vazão de substrato ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$); S_0 : Concentração de sólidos voláteis no substrato ($\text{kgSV} \cdot \text{m}^{-3}$); COV: Carga orgânica volumétrica ($\text{kgSV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)

4.5 VIABILIDADE E CUSTOS DE CONSTRUÇÃO DOS BIODIGESTORES

Para a aquisição das informações a respeito dos custos unitários dos materiais utilizados para a construção do biodigestor, apontado como o mais adequado para a microcervejaria, se fez uso de uma pesquisa de preços incluindo diversas empresas que comercializam os itens necessários, bem como, realizou-se uma tomada de preços referente à mão de obra demandada.

Após a aquisição das informações a respeito dos custos e do fluxo de caixa, disponibilizadas pela microcervejaria, avaliou-se a viabilidade econômica da implantação do biodigestor a partir do indicador Valor Presente Líquido (VPL) utilizando-se a equação descrita na equação 9.

$$VPL = -FC_0 + \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1 + TMA)^j} \quad (10)$$

Em que: FC_0 : investimento inicial (em reais); FC_j : Fluxo de caixa (reais/ano); j: período de tempo considerado (anos); TMA: taxa de juros (ao ano).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE

Os resultados das análises realizadas, bem como as informações a respeito dos parâmetros avaliados, quantificados e caracterizados a partir das amostras do efluente coletadas na microcervejaria estão descritas na Tabela 4.

Tabela 4. Caracterização dos parâmetros provenientes do efluente analisado.

Parâmetro	Amostra
Sólidos Totais (ST)	99,50 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
Sólidos Voláteis (SV)	95,30 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
Sólidos Fixos (SF)	4,20 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
Sólidos sedimentáveis (SS)	0,06 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
pH	5,94
Alcalinidade Total	183 $\text{mg CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$

Nitrogênio Amoniacal	< 0,2
Demanda química de oxigênio (DQO)	25.06, 2 mg O ₂ . L ⁻¹

Fonte: A autora, 2021.

Quando a amostra é avaliada nota-se um valor para ST de 99,50 g.L⁻¹ e para SV igual a 95,30 g.L⁻¹, enquanto para SF ocorreu a quantidade de 4,20 g.L⁻¹. Esses valores são condizentes com o valor de DQO 25.06 mg O₂.L⁻¹, indicando uma quantidade expressiva de matéria orgânica promissora para ser convertida em biogás. Ainda, relacionando os valores de SV/ST, encontramos o valor de 0,96, o que indica que da totalidade de sólidos presente nos resíduos da cervejaria, aproximadamente 96% são compostos orgânicos, mostrando o alto grau de biodegradabilidade desta amostra.

Os valores encontrados para os parâmetros analisados variam bastante de acordo com a diluição do efluente, e essa diluição está relacionada às condições operacionais de cada cervejaria. Essa situação explica a diversidade de valores apresentados na literatura. As características dos efluentes estão condicionadas principalmente às peculiaridades dos processos de fabricação, bem como, às operações e tecnologia utilizadas, ao tipo de cerveja e à região de produção (SILVA, 2011).

Ao avaliarem amostras de efluente de cervejaria proveniente de uma indústria multinacional, Arruda et al. (2015) detectaram valores de 1,1 g.L⁻¹ para ST; 0,21 g.L⁻¹ para SV e 0,35 g.L⁻¹ para SF. Já Cunha (2019) relata um valor de 0,10 mL.L⁻¹ de SS em um estudo em que caracteriza o efluente gerado no processo produtivo de cerveja Pilsen, em uma indústria do Vale do Taquari, por meio de análises físico-químicas. Para avaliar a performance do reator em batelada na remoção de matéria orgânica do efluente gerado pela indústria cervejeira, Roveroto (2019) fez uso de 12 tratamentos diferentes nos quais os valores de ST, SF e SV variaram entre 0,33-0,99 mL.L⁻¹, 0,12-0,21 mL.L⁻¹ e 0,21-0,91 mL.L⁻¹ respectivamente.

O valor de pH constatado no efluente avaliado foi de 5,94, e está entre os valores indicados pelas resoluções nº 430 e 357 do CONAMA (pH 5-9) que estabelece as condições adequadas para o descarte de efluentes por parte das microempresas. Este valor de pH encontrado na amostra analisada deve ser monitorado com atenção, pois pode interferir negativamente no processo de digestão anaeróbia. De acordo com Stein (2012), a atividade microbiológica pode ser afetada quando o pH se encontra em níveis levemente ácidos, pois a maioria das bactérias alcançam sua fase ótima próximo a neutralidade.

Valores de pH entre 5,5 e 6,0 favorecem a atividade das bactérias acidogênicas (SOUZA, 1984), e dependendo da atividade podem desfavorecer a atividade das bactérias metanogênicas.

Assim, os ácidos voláteis continuam a ser produzidos e não são transformados em metano, acarretando na perda drástica da eficiência do biodigestor. Nesse cenário, a alcalinidade é consumida rapidamente, neutralizando os ácidos livres e acarretando a queda do pH. No entanto, ao consultar a literatura percebe-se diferentes valores de pH, estando numa faixa de 5,5 a 11,5, apontando o caráter voltívolo dos efluentes produzidos no setor de cervejarias (KANAGACHANDRAN; JAYARATNE, 2006; PARAWIRA et al., 2004; PORTES, 2016)

A alcalinidade determina a capacidade de uma solução aquosa em neutralizar ácidos sendo que em sistemas anaeróbios tal neutralização decorre da presença de bicarbonatos no meio. Nas amostras analisadas foi observado um valor de $183 \text{ mg CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ para alcalinidade total. Segundo Dias et al., (2008), a alcalinidade deve atingir valores entre 1000 e 5000 $\text{mgCaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ quando o processo de digestão estiver ocorrendo de forma satisfatória. Esse parâmetro se faz importante uma vez que as bactérias produzem ácidos, sendo o decaimento do pH impedido pela reação de neutralização desses ácidos com as espécies que conferem alcalinidade ao meio. A ocorrência de tais reações é importante pois as bactérias metanogênicas sobrevivem em faixas estreitas de pH (6,5 a 8,0). Em caso de implementação do biodigestor, deve-se considerar a possibilidade de suplementação de alcalinidade neste efluente, visando evitar a acidificação e fornecendo condições mais seguras e favoráveis para o sistema.

O valor observado para Nitrogênio Amoniacal foi menor que o limite de detecção ($<0,2$), esse resultado pode ser em função da degradação da amostra, devido a mesma estar muito fresca. Sendo um ponto positivo, pois concentrações elevadas podem inibir a DA.

Os efluentes gerados na microcervejaria em análise apresentam valor de DQO consideravelmente elevado em comparação aos valores relatados na literatura, que corriqueiramente encontram-se entre 2000 e 6000 mg. L^{-1} (RAO et al, 2007). A pesquisa de Seluy e Isla (2014) trazem um valor de DQO de $120.920 \text{ mg. L}^{-1}$. Os autores consideram este um valor acima do esperado, e explicam que isso se deve ao fato do efluente não incluir águas residuárias provenientes dos processos de limpeza dos tanques ou outra fonte com menor teor orgânico. Para Sereno Filho *et al.* (2013), valores elevados de DQO em efluentes da indústria de bebidas justificam-se também pela presença de substâncias de fácil degradabilidade como açúcares, amido, etanol e ácidos graxos. No caso da amostra deste estudo, a elevada concentração de matéria orgânica se justifica por conter em sua composição, além das águas residuárias de limpeza, o material sólido das etapas de filtração e *whirpool*.

5.2 POTENCIAL BIOQUÍMICO DE BIOGÁS E METANO

Ao consultar a literatura existente a respeito do potencial de produção de biogás e metano por meio de resíduos alimentares e principalmente no processo de produção nas cervejarias, foram obtidos dados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Resultados encontrados na literatura para potencial bioquímico de biogás e metano.

Tipo de informação que contém no trabalho		Autor
Metano mLCH ₄ .gSV ⁻¹		
1000 mL	-	Rocha (2003)
Aplicações dos resíduos	Aplicações dos resíduos	Mussatto; Dragone e Roberto (2006)
-	Aumento de 38 %	Zupančič; Skrjanec e Logar (2012)
53,6 -61%	-	Malakhova <i>et al.</i> (2015)
Presença de 52,4%	429 mlCH ₄ .gSV ⁻¹	Vitanza <i>et al.</i> (2016)
515 ± 4 ¹	-	Oliveira, Alves e Costa (2018)
1,41 L	Produção de 1,3 - 8,7 L d ⁻¹	Veroneze (2019)

Fonte: A autora, 2020.

A fim de mensurar a atividade de arqueas metanogênicas de diferentes resíduos provenientes da indústria de bebidas, entre eles lodo de cervejaria, Rocha (2003) observou o potencial de conversão desse substrato em metano, buscando colaborar para o entendimento do tratamento anaeróbico desses resíduos. Para tanto, foi aplicado o teste de atividade metanogênica específica (AME) para determinar a atividade metanogênica do lodo de cervejaria, chegando a registrar um potencial máximo de produção de metano, por parte das metanogênicas acetoclásticas, de 1000 ml CH₄.gSV⁻¹.

Outras importantes características e aplicações dos resíduos gerados no processo de produção de cerveja são descritos por Mussatto; Gragone e Roberto (2006). Para os autores a degradação completa do material está condicionada e é limitada pela hidrólise do material fibroso do bagaço de malte. Por outro lado, são apresentadas algumas diferentes formas de pré-tratamento para aumentar a taxa de fermentação, entre eles: tratamento químico-térmico com NaOH 0,2 M a 70 °C, moagem do resíduo, bem como tratamento enzimático com fungos produtores de celulase com bagaço de malte como substrato único. Tais informações são

essenciais para o entendimento dos processos que levam à formação dos teores de biogás.

Já Zupančič; Skrjanec e Logar (2012) apresentaram algumas possibilidades de melhora na produção de biogás oriundo do fermento de cerveja, em que uma concentração de fermento a 0,7%, levou a uma melhora no biogás, alcançando uma produção de 38,5 % a mais. Com um experimento em que avaliaram a produção de biogás com o uso de bagaço de malte como substrato e como co-substrato folhas e caules moídas de *Helianthus tuberosus* L. (alcachofra), bem como a aplicação do resíduo fermentado de BDM como aditivo de solo em cultura de alface (*Lepidium sativum* L.), Malakhova *et al.* (2015) concluíram que a biotransformação de substrato mais eficaz ocorreu em temperaturas consideravelmente elevadas, com a mistura do co-substrato em 100 g L⁻¹ de bagaço, resultando na produção de 61,0% de metano, por outro lado, sem a adição do co-substrato, apenas 53,6% de metano foi detectado. As culturas de alface apresentaram significativo crescimento após a suplementação do solo com o resíduo fermentado. Assim, é possível afirmar, com os resultados do referido estudo, que existe elevado potencial para utilização completa dos resíduos gerados na produção de cerveja para produção de biogás e aplicação como suprimento do solo. Outras avaliações foram realizadas por Vitanza *et al.* (2016) que, por meio da biometanização, avaliaram o potencial bioquímico de metano existente no bagaço de malte. Os autores detectaram uma produção de biogás de 429 mlCH₄.gSV⁻¹, e a composição de metano (CH₄) presente no biogás foi de 52,4%.

Utilizando dois resíduos oriundos da indústria cervejeira (bagaço de malte e excedente de fermento) em separado e a co-digestão de ambos, Oliveira; Alves e Costa (2018) investigaram o potencial bioquímico de metano, ou seja, o volume de metano produzido por sólidos voláteis do substrato desses subprodutos, a partir de ensaios de biodegradabilidade anaeróbia em lote. O excedente de fermento 515 ± 4 L.Kg⁻¹ apresentou o melhor resultado, mostrando maior biodegradabilidade quando comparado ao bagaço de malte 301 ± 5 L.Kg⁻¹.

Quando a mistura dos substratos foi avaliada, percebeu-se a produção de diferenças significativas nos valores de PBM quando comparado ao PBM do bagaço de malte, chegando a 411 L. Kg⁻¹. Essas diferenças observadas entre os substratos analisados se dão, segundo os autores, devido a maior DQO presente no excedente de fermento, e também pela celulose presente no bagaço de malte, sendo este último considerado um dos compostos com maiores dificuldades na degradação anaeróbia.

Mais recentemente, Veroneze (2019) avaliou a produção de biogás em reatores anaeróbios tratando a água residuária de indústria cervejeira, após instalar e avaliar os oito tratamentos aplicados no ensaio, a autora relata que, em relação ao volume de biogás produzido,

a melhor condição operacional dentre as avaliadas para produção volumétrica se deu no reator que atingiu $8,7 \text{ L d}^{-1}$ de biogás, sendo justificado pela alta concentração de açúcar, já a melhor condição operacional para produção de metano atingiu $1,41 \text{ L CH}_4.\text{d}^{-1}$. Os resultados relatados demonstram uma produção promissora de biogás a partir de água residuária de cervejaria contribuindo para o potencial de uso deste resíduo.

Com todos esses ensaios e resultados é possível notar o grande potencial de uso dos resíduos orgânicos gerados pelos processos de produção em cervejarias e microcervejarias, favorecendo o uso de processos fermentativos para o seu tratamento, e possibilitando a geração de compostos energéticos por meio da digestão anaeróbia a partir de diferentes microrganismos que trabalham em consórcio promovendo a conversão de compostos orgânicos complexos em compostos mais simples. Observa-se também a variação existente quanto às características dos resultados encontrados, isso se deve à heterogeneidade da matéria prima utilizada na fabricação, como também, as peculiaridades nos processos de produção.

5.3 DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR SELECIONADO

Foram analisados cenários de uso de três diferentes modelos de biodigestores (UASB, BLC e CSTR), a fim de dimensionar e apontar o biodigestor com maior potencial de uso no processo de tratamento de resíduos da microcervejaria em estudo. A produção de cerveja da microindústria é de 16000 L.mês^{-1} , sendo este o valor utilizado para realizar uma estimativa preliminar do aproveitamento energético por meio da produção do biogás, através do fermento residual do processo de produção de cerveja.

Para gerar as estimativas a respeito dos biodigestores, foram considerados os seguintes parâmetros: vazão de substrato (Q), concentração de sólidos voláteis no substrato (S_0), Carga orgânica volumétrica (COV), Volume útil (V_{liq}), em que se tomou por base os resultados observados no estudo e valores contidos na literatura (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

5.3.1 Biodigestor UASB

No processo de dimensionamento do biodigestor UASB foram utilizadas as Equações 6,7,8 e 9. Chegou-se ao valor de vazão de substrato de $105,27 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ com uma concentração de sólidos voláteis no substrato de $20,58 \text{ g.L}^{-1}$, calculado a partir do volume gerado na indústria ($184000 \text{ L.dia}^{-1}$, por dia de produção, sendo produzido 4 dias na semana). Calculando uma média diária, levando em consideração alimentação contínua, ou seja, 7 dias na semana, chega-

se no valor de vazão de $105,27 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. Também, foi estimado o volume produzido de sólidos através da Equação 6 resultando no valor $936,5 \text{ L}$. Já o valor de carga orgânica volumétrica foi considerado $0,5 \text{ kg}_{\text{sv}} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ seguindo informações levantadas por meio de pesquisa bibliográfica. Dessa forma, o volume do biodigestor do tipo UASB dimensionado para as características da microcervejaria analisada foi de $5.416,5 \text{ m}^3$.

5.3.2 Biodigestor BLC

Para o biodigestor BLC dimensionado foram utilizados os mesmos valores de volume de sólido da amostra ($936,5 \text{ L}$) e de sólidos voláteis ($20,58 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), correspondentes à massa total de sólidos (236 Kg) e aos sólidos totais. Também, foi mantida a capacidade de vazão diária do biodigestor de $105,27 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, o que resultou em um biodigestor do tipo BLC com volume de $4.333,2 \text{ m}^3$.

5.3.3 Biodigestor CSTR

Para o dimensionamento do biodigestor modelo CSTR, o cenário foi ajustado para um teor de sólidos de 8%, utilizando um fator de segurança de 0,2 e limite de operação de 10%. Tais parâmetros foram utilizados para a estimativa do volume líquido necessário que foi de $1884,70 \text{ L}$. Calculou-se uma nova concentração de sólidos para o CSTR que atingiu o valor de 9,3%, estando este dentro do limite pré-estabelecido. Por fim, calculou-se o volume do biodigestor CSTR para sólidos, resultando em volume do reator de $37,5 \text{ m}^3$. A Tabela 7 apresenta a síntese dos volumes de dimensionamento obtidos para cada modelo de biodigestor para a amostra da microcervejaria.

5.4 SELEÇÃO DO BIODIGESTOR

A partir do dimensionamento dos biodigestores, bem como o cálculo de seus respectivos volumes (Tabela 7), foi possível inferir sobre a capacidade deles no tratamento dos resíduos provenientes da microcervejaria.

Tabela 7- Valores do volume dos biodigestores dimensionados.

Volume (m³)	Modelo de Biodigestor
5.416,5	UASB
4.333,2	BLC
37,5	CSTR

Fonte: A autora, 2021.

De acordo com os resultados encontrados para os volumes dos biodigestores, percebe-se a capacidade demandada para suprir o tratamento dos resíduos do processo de produção, apresentando valores elevados de volume para os modelos UASB e BLC, tornando a implantação dos mesmos inviáveis para a microcervejaria situada no perímetro urbano da cidade de Dois Vizinhos. Por isso, considerando volume encontrado para o biodigestor CSTR e considerando a capacidade do mesmo em suportar maiores volumes de sólidos em comparação aos demais modelos observados, considera-se o mesmo o ideal para implementação no estudo de caso em questão. Além disso, levou-se em consideração o interesse da empresa na comercialização do biogás, visto que o CSTR é o mais indicado e utilizado pelas empresas que possuem esse propósito. Assim, conclui-se que o CSTR foi o modelo de biodigestor mais adequado para ser implementado na microcervejaria parte desse trabalho.

Este modelo de biodigestor é amplamente utilizado no tratamento de efluentes e resíduos orgânicos provenientes da agroindústria com boa degradabilidade, quando o substrato é homogêneo, como por exemplo, no processamento de frutas, vinhos e cervejas (MCIDADES, 2015). Além disso, é o modelo mais difundido entre as empresas da Europa. O CSTR tem capacidade de controlar parâmetros como temperatura, pH e nível de biomassa, é um sistema amplamente utilizado em plantas de biogás, sendo muito eficaz pelo fato de executar a codigestão, aceitando uma concentração mais elevada de sólidos. Por não haver acúmulo de lodo no reator, de acordo com Kunz; Steinmetz e Amaral (2019), o tempo de retenção hidráulica e o tempo de retenção de sólidos são iguais, durando entre 15 e 30 dias de acordo com o substrato em digestão.

É importante ressaltar que, respeitando o limite de operação do CSTR (10% de sólidos) foi adotado um fator de segurança e o dimensionamento do biodigestor foi calculado com 8% de sólidos, consistindo em uma quantidade de 1884,70 L a ser acrescentado no biodigestor para que o limite de operação seja respeitado. Assim, parte do efluente líquido será descartado em esgoto doméstico, visto que a empresa possui licença sanitária para a realização desse descarte.

5.5 VIABILIDADE ECONÔMICA E CUSTOS DE INSTALAÇÃO DO BIODIGESTOR PARA MICROERVEJARIA

Ao implantar um biodigestor se faz necessário construir uma estrutura para o

funcionamento do mesmo. O modelo de biodigestor CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*) consiste em um tanque de agitação que mantém o conteúdo em homogeneização. Este modelo de biodigestor demanda uma tecnologia mais complexa por ser automatizado e por isso é extremamente vantajoso e eficiente quando há a intenção de se comercializar o biogás produzido.

Esses modelos costumam ser integrados pelos seguintes componentes (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019):

- Sistema de alimentação: responsável pelo carregamento do substrato do local de estocagem até o biodigestor;
- Sistema de agitação: otimiza a produtividade do biogás e pode ser com tecnologia mecânica, hidráulica ou pneumática.

Dessa forma, sugere-se que o sistema de biodigestão do tipo CSTR a ser construído na microcervejaria seja composto por:

- a) Digestor anaeróbio contendo o sistema de agitação pneumática por se tratar de considerando uma concentração de sólidos no biodigestor de 20,58 g/l, permitindo a recirculação de biogás, causando homogeneização no meio reacional por borbulhamento no líquido e válvula de segurança;
- b) Tanque de armazenamento do digerido;
- c) Gasômetro;
- d) Gerador de conversão de energia.

Os resíduos serão direcionados até o digestor anaeróbio, que será composto de uma caixa d'água tipo tanque com tampa de rosca de 20000 L em polietileno. O armazenamento do gás será em reservatório do tipo gasômetro, formado por uma manta de PVC de alta resistência instalado sobre uma base de concreto, constituído por uma membrana exterior, um interior, e outra inferior.

Sugere-se ainda o uso de uma caixa d'água comum de 1000 L em polietileno para acondicionar o material tratado, em seguida, o mesmo será direcionado para um reservatório de longa duração a fim de estabilizar o material digerido, tratando-se também de uma caixa d'água em fibra de vidro com volume de 10.000,00 L. Para a homogeneização do material dentro do digestor será instalado um motor, e para a conversão do biogás em energia elétrica se fará uso de um grupo gerador de energia 100 kVa MWM. Foi considerado um o acréscimo de 50% do valor total dos custos referente à mão de obra, mais os acessórios (tubos e conexões) (ARQUITECASA, 2016), para estimar o investimento inicial.

A tabela 8 apresenta o levantamento dos valores unitários para cada item necessário para a construção do biodigestor CSTR.

Tabela 8. Custos dos principais equipamentos necessários para a instalação do biodigestor.

Função	Equipamento	Preço R\$
Biodigestor	Tanque Polietileno de 20.000L tampa de rosca	10.100,00
Biodigestor (agitação)	Bomba de agitação pneumática	8.000,00
Armazenamento do digerido	Caixa d'água de polietileno com tampa - 1000 L	320,00
Armazenamento longa duração	Caixa d'água fibra de vidro de 10.000 L c/ tampa	5.000,00
Gasômetro	Membranas PVC	70.000,00
Motor de conversão	Grupo gerador de energia 100 kVa MWM	45.000,00
TOTAL (equipamentos)		138.420,00
Mão de obra e demais acessórios		69.210,00
TOTAL		207.630,00

Fonte: A autora, 2021.

Um detalhe importante a ser considerado é que para os cálculos de viabilidade desse modelo não foi considerado nenhum sistema de aquecimento. Isso porque o efluente sai do sistema produtivo com temperatura média de 40-50°C, o que seria suficiente para manter o aquecimento dentro do biodigestor em questão.

A partir dos valores contemplados na tabela 8, o custo inicial de implantação do CSTR na microcervejaria seria de R\$ 207.630,00. Com base nos custos e no Fluxo de Caixa que possui valor de 34.000,00, sendo estas informações obtidas junto à microcervejaria, foi possível determinar o Valor Presente líquido do projeto de implantação considerando um período de 10 anos. Após o cálculo deste indicador considerando os parâmetros já citados, chegou-se ao um VPL de R\$1.285,28, sendo este maior que zero, indicando a viabilidade de implantação do projeto na microcervejaria.

A fim de corroborar com os resultados encontrados quanto a viabilidade de implantação

do biodigestor, é importante citar trabalhos que evidenciam o sucesso do uso de resíduos cervejeiros para geração de energia, como o realizado por Cordeiro (2011) que, ao analisar a capacidade energética de resíduos oriundos de cervejaria, mediante análise da viabilidade econômica, demonstrou que as novas configurações propostas para o trabalho das caldeiras na microcervejaria observado foram viáveis, e o regime mais rentável apresentou uma redução de 49,98% nos custos com gás natural, gerando uma economia considerável por ano. A autora conclui que o uso desses resíduos como fonte energética é economicamente viável.

Com isso, vislumbra-se, a partir do uso do biodigestor, uma possível redução de custos com eletricidade na empresa, agregando valor aos resíduos do processo de produção, como também, há a possibilidade de comercialização do material digerido, e do biogás produzido.

6 CONCLUSÕES

As características do efluente estudado mostram que existe a necessidade de um tratamento adequado para a remoção da matéria orgânica. Com base nos resultados encontrados com o desenvolvimento das metodologias propostas foi possível inferir sobre as características físicas e químicas do efluente analisado, bem como, sua concordância com as exigências da legislação vigente, assim servindo como base para a tomada de decisão quanto ao sistema de tratamento dos efluentes.

A utilização de biodigestores através do processo de DA são potenciais pois permitem a utilização do biogás como energia térmica ou elétrica na cervejaria. Com as informações a respeito de PBB e PBM adquiridas em consulta à literatura, pode-se afirmar que os resíduos oriundos das indústrias cervejeiras possuem alta capacidade para a produção de biogás, extendendo-se esse potencial à microcervejaria deste trabalho.

Entre os modelos de biodigestores dimensionados, o modelo CSTR foi o que mais se adequou à realidade da microcervejaria, sendo este o escolhido para implantação e recomendado com base nos resultados encontrados e no valor de VPL, aceitando-se o projeto do biogás.

7 REFERÊNCIAS

ABRACERVA. **Abracerva e Sebrae publicam o primeiro estudo sobre cervejarias**. 2019. Disponível em: <<https://abracerva.com.br/2019/10/16/abracerva-e-sebrae-publicam-estudo-sobre-cervejarias/>>. Acesso em 12 de dezembro de 2020.

ALBUQUERQUE, L. V.; LIMA, N. C.; LIMA, A. C. A. de; STEFANUTTI, R.; OLIVEIRA, F. D. A. Avaliação de atividade metanogênica específica para produção de biogás a partir de resíduos sólidos orgânicos. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (CONEPETRO), II; WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO (WEPETRO), IV., 10, 11 e 12 ago. 2016, Natal – RN. **Anais [...]**, Natal – RN., 2016.

ALVES, R. T.; GUNTZEL, D. L.; REGHELIN, C. G.; BARICHELLO, R. **Geração de energia elétrica com biogás: um caso prático na Suinocultura**. Balneário Camboriú: Faculdade Avantis, 2010

APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. **American Public Health Association**, v. 23, 2017.

ARANTES, M. K.; ALVES, J. H.; SEQUINEL, R.; DA SILVA, E. A.; Treatment of brewery wastewater and its use for biological production of methane and hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 42, p. 26243-26256, 2017.

ARAÚJO, F.B.; SILVA, P.H.A.; MINIM, V.P.R. Perfil sensorial e composição físico-química de cervejas provenientes de dois segmentos do mercado brasileiro. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, n. 23, p. 121-128, 2003.

ARQUITECASA. **Simulador de Reforma e Construção**. Disponível em: <https://arquitecta.com.br/tag/simulador/>. Acesso em: 22 de setembro de 2020.

ARRUDA, C. S. de, ORTIZ, I. G., PACHECO, R. P., & BUENO, R. F.. Pós-tratamento de efluente cervejeiro com coagulantes naturais. **Interfac EHS**, v. 10, n. 1, 2015.

BRAEKEN, L.; VAN DER BRUGGEN, B.; VANDECASTEELE, C. Regeneration of brewery waste water using nanofiltration. **Water Research**, v. 38, n. 13, p. 3075–3082, 2004.

BRAILE, P. M.; CAVALCANTI, J. E. W. A. **Manual De Tratamento de Águas Residuárias Industriais**. São Paulo: CETESB, 1993.

BRASIL. **Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), nº 430**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. 13 de maio de 2011.

_____. **Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), nº 357**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. 17 de março de 2005.

_____. **Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), nº 307.** Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. 17 de fevereiro de 2002.

BOCHER, M. AGLER, M. GARCIA, A. BEERS, L. Angenent Anaerobic digestion of secondary residuals from an anaerobic bioreactor at a brewery to enhance bioenergy Generation. **J. Ind. Microbiol. Biotechnol.**, v. 35, p. 321-329, 2008.

BONATO, S. V. **Método para gestão de resíduos na cadeia cervejeira do Rio Grande do Sul.** 2015. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

BOUGRIER, D.; DOGNIN, C.; LAROCHE, V.; GONZALEZ, D.; RACLOT, J.A.; RIVERO. C. Digestão anaeróbica de grãos usados em cervejaria: exigência de adição de oligoelementos. **Bioresour. Technol.**, v. 247, p. 1193 - 1196, 2018.

CARNEIRO, H. S. Comida e Sociedade: Significados Sociais na História da Alimentação. **História: Questões & Debates**, n. 42, p. 71 – 80, 2005.

CANTRELL, K. B.; DUCEY, T.; RO, K. S.; HUNT, P. G. Livestock waste-to-bioenergy generation opportunities. **Bioresource technology**, v. 99, n. 17, p. 7941-7953, 2008.

CERVESIA – **Soluções em tecnologia cervejeira e gestão de processos: A cerveja e sua história**, 2015.

CERVBRASIL- **Associação Brasileira da Indústria da Cerveja.** 2019. Disponível em: <http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/mercado-cervejeiro/>. Acesso em: 05 de dezembro de 2020.

CHERNICHARO, C. A. L. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: **Reatores Anaeróbios.** Belo Horizonte: UFMG, 2016.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

CHEN, Y; YANG, G.; SWEENEY, Y.; FENG Household biogas use in rural China: A study of opportunities and constraint, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 545–549, 2010.

CHEN, H.; CHANG, S.; GUO, Q.; HONH, H.; WU, P. Brewery wastewater treatment using an anaerobic membrane bioreactor. **Biochemical Engineering Journal**, v. 105, p321-331, 2016.

COLLINS, G. WOODS, A. MCHUGH, S. CARTON, V. O. Flaherty Microbial community structure and methanogenic activity during start-up of psychrophilic anaerobic digesters treating synthetic industrial wastewaters. **Microbiol Ecol**, v. 46, p. 159- 170, 2003

CUNHA, L. C. **Análise de efluente bruto e proposta de estação de tratamento de efluentes em indústria cervejeira do Vale do Taquari.** 2019. 100f. Monografia – Bacharelado em Engenharia Química Civil, Universidade do Vale do Taquari, 2019.

CORDEIRO, L. G. **Caracterização de viabilidade econômica do bagaço de malte oriundo de cervejarias para fins energéticos**. 2011. 121f. Dissertação – Pós – graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal da Paraíba, 2011.

DIAS, J.; LOPES, W. S.; QUEIROZ, M.B.; OLIVEIRA, M. J.D.; BENTO, E. R. Comportamento do pH e da alcalinidade no processo de digestão anaeróbia de efluentes oleosos. **Entequi**, v. 2, p. 1-5, 2008.

FERREIRA, L. R. A.; OTTO, R. B.; SILVA, F. P.; DE SOUZA, S. N. M.; DE SOUZA, S. S.; ANDO JUNIOR, O. H. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 94, p. 440–455, 2018.

FILLAUDEAU, L.; BLANPAIN-AVET, P.; DAUFIN, G. Water, wastewater and waste management in brewing industries. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, n. 5, p. 463–471, 2006.

FERREIRA, R.H.; VASCONCELOS, M.C.R.L.; JUDICE, V.M.M.; NEVES, J.T.R. Inovação na fabricação de cervejas especiais na região de Belo Horizonte. **Perspectivas em Ciência da Informação**, n. 16, p. 171-191, 2011.

GERALDI, M. H. **The Microbiology of Anaerobic Digesters**. John Wiley & Sons, Inc, 2003.

GIORDANO, A., CANTÙ, C. Monitoring the biochemical hydrogen and methane potential of the two-stage dark-fermentative process. **Bioresour. Technol.**, v. 102, n.6, p. 4474-4479, 2011

GONÇALVES, R. F.; CHERNICHARO, C. A. L.; NETO, C. O. A.; ALEM SOBRINHO, P.; KATO, M. T.; COSTA, R. H. R.; AISSE, M. M.; ZAIAT, M. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por reatores com biofilme. In: **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. CHERNICHAR, C. A. Belo Horizonte: PROSAB, 2001.

HAWKES, F.R.; HUSSY, I.; KYAZZE, G.; DINSDALE, R.; HAWKES, D.L. Continuous dark fermentative hydrogen production by mesophilic microflora: principles and progress **Int. J. Hydrogen Energy**, p. 172-184, 2007.

HOLUBAR, P.; ZANI, L.; HAGER, M.; FRÖSCHL, W.; RADAK, Z.; BRAUN, R. Start up and recovery of a biogas reactor using a hierarchical network based control tool, *J.Chem.Technol. Biotechnol.* 78 847-854, 2003.

KANAGACHANDRAN, K.; JAYARATNE, R. Utilization potential of brewery wastewater sludge as an organic fertilizer. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 112, p. 92–96, 2006.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. A. V. Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás. **Revista de Política Agrícola**, v.15, n.3, p.28-35, 2006.

KLAGENBOECH, R., THOMAZINI, M.H., SILVA, G.M.C. Resíduo Úmido de Cervejaria: Uma Alternativa na Alimentação Animal. In.: ENCONTRO DE DIVULGAÇÃO

CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA, 3º, 2011, Toledo. Anais ... Toledo: UTFPR, 2011, p. 1-6.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R.L.R.; AMARAL, A. C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, p. 209, 2019.

KOTHARI, R. PANDEY, A.K. KUMAR, S. TYAGI, V.V. TYAGI, S.K. Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. **Renew. Sust. Energy**, v. 39, p. 174-195, 2014.

KATUWAL, H., BOHARA, A.K. Biogás: A promising renewable technology and its impact on rural households in Nepal. **Renew Sustain. Energy**, v. 13, n. 9, p. 2668–2674, 2009.

LETTINGA G.; HULSHOFPOLL, W.; ZEEMANG, G. Biological Wastewater Treatment. Part I: Anaerobic wastewater treatment. Lecture Notes. **Wageningen Agricultural University**, p. 17-28, 1996.

LESTEUR, M.; BELLON-MAUREL, V.; GONZALEZ, C.; LATRILLE, E.; ROGER, J. M.; JUNQUA, G.; STEYER, J. P.; Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: a review. **Process Biochemistry**, v. 45, p. 431–440, 2010.

MALAKHOVA, D. V.; EGOROVA, M. A.; PROKUDINA, L. I.; NETRUSOV, A.I.; TSAVKELOVA, E. A. The biotransformation of brewer's spent grain into biogas by anaerobic microbial communities. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 31, p. 2015-2023, 2015.

MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento), 2020. **Registros de Estabelecimentos**. Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/vegetal/registros-autorizacoes/registro/registro_de_estabelecimentos.

METCALF, L.; EDDY, H. P., **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse**. New York: McGraw-Hill, 2003.

MORADO, R. **Larousse da Cerveja**. São Paulo: Larousse do Brasil, 2011.

MAO C., FENG Y. WANG X., Ren Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renew Sustain Energy**, v. 45, p. 540- 555, 2015

MUSSATO, S.I., DRAGONE, G., TEIXEIRA, J.A., ROBERTO, I.C. Total reuse of brewer's spent grain and biotechnological processes for the production of added-value compounds. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON BIOENERGY, 2008, Guimarães, **Anais ...** Guimarães, 2008, p. 2-6.

MARCHIORO, V.; STEINMETZ, R. L.; AMARAL, A. C.; GASPARETO, T. C.; TREICHEL, H.; KUNZ, A. Poultry litter solid state anaerobic digestion: effect of digestate recirculation intervals and substrate/inoculum ratios on process efficiency. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 2, p. 1-10, 2018.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Tecnologias da digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: Substratos, Digestores e Uso de Biogás**. Brasília, Probiogás, 85 pag., 2015.

MUNGANGA, G. Overview of Biogas Market in South Africa, GreenCape-waste Economy Sector Manager, 2013.

MUSSATTO, G. DRAGONE, I.C. ROBERTO, S. Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications **J. Cereal Sci**, v. 4, p. 1- 14, 2006

OLAJIRE, A. A., The brewing industry and the environmental challenges, **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 1-22, 2012.

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

PANJIČKO, M.; ZUPANČIČ, G. D.; FANEDL, L.; LOGAR, M. R.; TIŠMA, M.; ZELIĆ, B. Biogas production from brewery spent grain as a mono-substrate in a two-stage process composed of solid-state anaerobic digestion and granular biomass reactors. **Journal of Cleaner Production**, n. 166, p. 519-529, 2017.

PARAWIRA, W.; KUDITA, I.; NYANDOROH, M. G., ZVAUYA, R. A study of industrial anaerobic treatment of opaque beer brewery wastewater in a tropical climate using a full-scale UASB reactor seeded with activated sludge. **Process Biochemistry**, v. 40, p 593-599, 2004.

PORTES, A. C. **Pré-tratamento de efluente de microcervejaria por adsorção empregando adsorventes alternativos**. 2016. 89 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

PROCERVA. **Estudo mapeia o setor de microcervejarias artesanais no PR**. 2018. Disponível em :<<http://www.procerva.com.br/estudo-mapeia-o-setor-de-microcervejarias-artesanais-no-pr/>>. Acesso em: 12 de dezembro de 2020.

PANJICKO, G.D. ZUPANCIC, L. FANEDL, R.M. LOGAR, M. TISMA, B. ZELI C. Biogas production from brewery spent grain as a mono-substrate in a two-stage process composed of solid-state anaerobic digestion and granular biomass reactors. **J. Clean. Prod.**, v. 166, p. 519-529, 2017

RAO, G. A.; REDDY, S. K.; PRAKASH, S. S.; VANAJAKSHI, J; JOSEPH, J.; SARMA, P. N. pH regulation of alkaline wastewater with carbono dioxide: a case study of treatment of brewery wastewater in UASB reactor coupled with absorber. **Bioresource Technology**, v.98, p 2131-2136, 2007.

ROCHA, G. A. M. **Estudo da atividade metanogênica de lodos e da biodegradabilidade anaeróbia de efluentes de indústrias de bebidas**. 2003. 120f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

ROOS, K. F.; MARTIN JR, J. B.; MOSER, M. A. A. **Manual for developing biogas systems at commercial farms in the United States**. United States: Environmental Protection Agency, 2004.

ROVEROTO, G. P. **Tratamento secundário e terciário de água residuária de micro cervejaria em reator em batelada com aeração intermitente**. 2019. 73f. Dissertação (Mestrado) Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos - Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2019.

SANTOS, I.R.; COSTA, R.C; FREITAS, U. e FILLMANN, G. Influence of Effluents from a Wastewater Treatment Plant on Nutrient Distribution in a Coastal Creek from Southern Brazil. **Braz. Arch. Biol. Technol.** V 51 n.1: pp. 153-162, 2008.

SIMATE, G. S.; CLUETT J.; IYUKE, S. E; MUSAPATIKA, E. T.; NDLOVU, S.; WALUBITA, S. F.; ALVAREZ, A. E. The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art. **Desalination**, v. 273, n. 3, p. 235–247, 2011.

SILVA, P.H.A.; FARIA, F.C. Avaliação da intensidade de amargor e do seu princípio ativo em cervejas de diferentes características e marcas comerciais. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, n. 28, p. 902-906, 2008.

SEGHEZZO, L.; ZEEMAN, G.; VAN LIER, J. B.; HAMELERS, H. V. M.; LETTINGA, G. A review: the anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. **Bioresource technology**, v. 65, n. 3, p. 175-190, 1998.

SEBRAE - SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **O lucrativo mercado da cerveja**. 2020. Disponível em: <<https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/o-lucrativo-mercado-da-cerveja-saiba-como-empresario-com-sabor/>>. Acesso em : 24 de abril de 2021.

SELUY, L. G.; ISLA, M. A. A. Process to treat high-strength brewery wastewater via ethanol recovery and vinasse fermentation. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, p 17043-17050, 2014.

SERENO FILHO, J. A.; SANTOS, A. F. M. S.; BAHÉ, J. M. C. F; GOBBI, C. N.; LINS, G. A.; ALMEIDA, J. R. Tratamento de efluentes da indústria de bebidas tem reator anaeróbico de circulação interna. **Revista internacional de ciências**, v. 3, n. 1, 2013.

SILVA, F. P. **Avaliação da eficiência do sistema de tratamento de efluentes de frigorífico – um estudo de caso em Rio Claro, SP**. 2011. 126f. Monografia (Bacharelado – Ciências Biológicas) – Universidade Estadual Paulista, 2011.

SOUZA, M. E. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. **Revista DAE**, v. 44, n. 137, p. 88- 94, 1984

STEIN, R. T. **Caracterização e avaliação do sistema de tratamento de efluentes de uma indústria alimentícia, visando o reuso**. 2012. 83f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Ambiental, Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2012.

VADLANI, K. B. Ramachandran Evaluation of UASB reactor performance during start-up operation using synthetic mixed-acid waste, **Bioresour. Technol.**, v. 99, p. 8231-8236, 2008

VERONEZE, M. L. **Avaliação da produção de biogás a partir de água residuária de cervejaria**. 2019. 75f. Dissertação (Mestrado) Mestrado em Engenharia em Energia na Agricultura - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2019.

VIEIRA, A.A., BRAZ, J.M. Bagaço de Cevada na Alimentação Animal. **Revista Nutritime**, v. 6, p. 973-979, 2009.

VITANZA, R.; CORTESI, A.; GALLO, V.; COLUSSI, I.; M. E. DE ARANA-SARABIA, M. E. de. Biovalorization of brewery waste by applying anaerobic digestion. **Chemical and Biochemical Engineering Quarterly**, n. 3; v. 30, p. 351–357, 2016.

YANG L. XU F. GE X. LI Y. Challenges and strategies for solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. **Renew Sustain Energy**, v. 44, p. 824- 834, 2015

WANG, J. YIN, D. SHEN, N. LI. Anaerobic digestion of food waste for volatile fatty acids (VFAs) production with different types of inoculum: effect of pH. **Bioresour Technol**, v. 161, p. 395-401, 2014

WANG, J.; QU, J.; LI, J.A; HE, W.; ZHOU, X.; LIU, J.; FENG, Y. Cascade degradation of Organic Matters in Brewery Wastewater Using a Continuous Stirred Microbial Electrochemical Reactor and Analysis of Microbial Communities. **Scientific Reports**, v. 6, p. 1-14, 2016.

ZHANG, J.; ZANG, L. Enhancement of biohydrogen production from brewers' spent grain by calcined-red mud pretreatment. **Bioresource Technology**, v. 209, p. 73-79, 2017.

ZUPANČIČ, G. D; ŠKRJANEC I.; LOGAR, R. M. Anaerobic co-digestion of excess brewery yeast in a granular biomass reactor to enhance the production of biomethane. **Bioresour Technol**, n. 124, p. 328–337, 2012.