



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA
E TERRITÓRIO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**PRODUÇÃO E POTENCIAL DO BIOGÁS GERADO DO BAGAÇO DE MALTE E
EFLUENTES DA INDÚSTRIA CERVEJEIRA**

LEONARDO PEREIRA LINS

Foz do Iguaçu-PR
2022

**PRODUÇÃO E POTENCIAL DO BIOGÁS GERADO DO BAGAÇO DE MALTE E
EFLUENTES DA INDÚSTRIA CERVEJEIRA**

LEONARDO PEREIRA LINS

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Energia e Sustentabilidade.

Orientadora: Profa Dra. Janine Padilha Botton
Coorientadora: Profa Dra. Andreia Cristina Furtado

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

L759p

Lins, Leonardo Pereira.

Produção e potencial do biogás gerado do bagaço de malte e efluentes da indústria cervejeira / Leonardo Pereira Lins. - Foz do Iguaçu, 2022.

64 fls.: il.

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Pós Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade.

Orientador: Janine Padilha Botton.

Coorientador: Andreia Cristina Furtado.

1. Biogás. 2. Cerveja. 3. Energia - Fontes alternativas. 4. Resíduos como combustível. I. Botton, Janine Padilha. II. Furtado, Andreia Cristina. III. Título.

CDU 620.952

PRODUÇÃO E POTENCIAL DO BIOGÁS GERADO DO BAGAÇO DE MALTE E EFLUENTES DA INDÚSTRIA CERVEJEIRA

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Energia e Sustentabilidade.

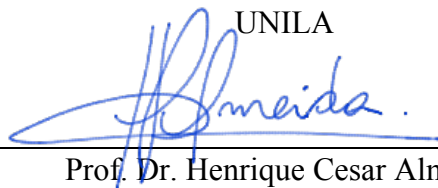
BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 JANINE PADILHA BOTTON
Data: 07/12/2022 11:52:25-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Orientadora: Profa. Dra. Janine Padilha Botton
UNILA

Documento assinado digitalmente
 ANDREIA CRISTINA FURTADO
Data: 07/12/2022 11:40:45-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

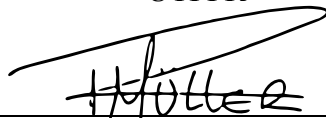
Coorientadora: Profa. Dra. Andreia Cristina Furtado
UNILA



Prof. Dr. Henrique Cesar Almeida
UNILA

Documento assinado digitalmente
 LAERCIO MANTOVANI FRARE
Data: 05/12/2022 14:40:39-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Laércio Mantovani Frare
UTFPR



Dr. Ricardo Müller
CIBiogás-ER

Foz do Iguaçu, 04 de novembro de 2022.

Ao meu filho Arthur e minha esposa Graciela,
pelo companheirismo e amor de sempre.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me guiar por todo os caminhos.

À minha esposa Graciela e ao meu filho Arthur, por estarem ao meu lado, pelo incentivo em todas as horas e por sempre acreditarem e mim. E ao meu outro filho que ainda está na barriga da mamãe, mas que já tenho um grande carinho e imenso amor por ele.

Aos meus pais, Aparecido e Maria pelo apoio, dedicação, ensinamentos, por tudo.

Às minhas orientadoras, Profa. Janine e Profa. Andreia, pelas orientações, ensinamentos e apoio durante a realização do doutorado.

Aos meus familiares pelo apoio de sempre.

Aos professores da Banca de Qualificação, Prof. Dr. Laércio Frare, Dr. Ricardo Müller e Profa. Marcela pelas importantes contribuições.

Aos diretores(a) do Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás, Sr. Rafael Gonzalez, Sr. Felipe Souza Marques e Sra. Michelli Fregnani e a Engenheira Ambiental Daiana Gotardo Martinez, pela contribuição dos dados obtidos neste trabalho.

Aos colegas e professores da 1ª Turma do Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade.

Obrigado.

RESUMO

A geração de resíduos tem acompanhado o aumento do consumo energético, independentemente do tipo de fontes de energia utilizada. Esses resíduos, principalmente os orgânicos, se não tratados adequadamente, podem causar problemas ambientais. Contudo, há um sistema de tratamento que possibilita tanto a redução da carga orgânica como o uso energético desses resíduos. Trata-se da digestão anaeróbia, que resulta na produção de dois produtos, o biogás e o digestato. O biogás é um gás que possui em sua composição o metano e o dióxido de carbono, além de traços de outros gases como sulfeto de hidrogênio e oxigênio e também umidade. Por conter metano, o biogás acaba tendo um potencial energético, sendo possível a geração de energia elétrica, térmica e biometano. Diante da possibilidade do aproveitamento energético de resíduos orgânicos, verificou-se a oportunidade do uso dos resíduos que são gerados no processo da fabricação das cervejas e que podem ser matérias-primas para produção de biogás, e, conseqüentemente, ter sua utilização para geração de energia, retornando-a para indústria, como forma de calor, eletricidade, combustível veicular ou na produção de insumos, como o dióxido de carbono, por exemplo. Desta forma, por meio do ensaio de potencial metanogênico bioquímico (PBM), que apresenta o potencial teórico para produção de biogás e metano de um determinado material, trabalhou-se com amostras de bagaço de malte e efluentes líquidos da cervejaria, além da mistura dessas duas amostras para avaliação do potencial energético. Dentre as amostras analisadas, a amostra de bagaço de malte (BM-C) demonstrou capacidade de produção aproximada de 141 m³ de biogás e 75 m³ de metano para cada tonelada de substrato. Tais resultados proporcionam potenciais energético de 340 kWh t⁻¹ de substrato para energia elétrica, 728 kWh t⁻¹ de substrato para energia térmica, 88 m³ t⁻¹ de substrato de biometano e 32 m³CO₂ t⁻¹ de substrato que podem ser recuperados pelo processo de purificação do biometano. Baseando-se nesses resultados, foi possível aplicá-los em uma unidade industrial real, que fabrica a cerveja e que, atualmente, não faz uso energético dos resíduos. Observou-se também que a aplicação do conceito de digestão anaeróbia e uso energético do biogás, auxilia no atendimento de várias questões sociais, ambientais e econômicas que estão descritas nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU). Por fim, podemos concluir que os resíduos que foram avaliados possuem potencial para produção de biogás e metano e que devem ser aproveitados energeticamente, assegurando uma energia mais sustentável, redução nos usos de fontes fósseis e auxiliando na descarbonização.

Palavras-chave: Bagaço de cevada; Biogás; Biometano; Cerveja; Potencial metanogênico bioquímico; Energias renováveis.

RESUMEN

La generación de residuos ha acompañado el aumento del consumo de energía, independientemente del tipo de fuentes de energía utilizadas. Estos residuos, principalmente orgánicos, si no se tratan adecuadamente, pueden causar problemas ambientales. No obstante, existe un sistema de tratamiento que permite tanto la reducción de la carga orgánica como el aprovechamiento energético de estos residuos. Esta es la digestión anaeróbica, que da como resultado la producción de dos productos, biogás y digestato. El biogás es un gas que tiene en su composición metano y dióxido de carbono, además de trazas de otros gases como sulfuro de hidrógeno y oxígeno, y también humedad. Debido a que contiene metano, el biogás termina teniendo un potencial energético, lo que permite generar energía eléctrica, térmica y biometano. Ante la posibilidad de utilizar residuos orgánicos como energía, se presentó la oportunidad de aprovechar los residuos que se generan en el proceso de elaboración de la cerveza y que pueden ser materia prima para la producción de biogás, y en consecuencia, tener su aprovechamiento para generar energía. energía, devolviéndola a la industria, como calor, electricidad, combustible para vehículos o en la producción de insumos, como el dióxido de carbono, por ejemplo. Así, a través de la prueba de potencial bioquímico metanogénico (PBM), que presenta el potencial teórico para la producción de biogás y metano a partir de un determinado material, se trabajó con muestras de bagazo de malta y efluentes líquidos de la cervecería, además de mezclar estas dos muestras. para la evaluación del potencial energético. Entre las muestras analizadas, la muestra de bagazo de malta (BM-C) presentó una capacidad de producción aproximada de 141 m^3 de biogás y 75 m^3 de metano por cada tonelada de sustrato. Tales resultados arrojan potenciales energéticos de 340 kWh t^{-1} de sustrato para energía eléctrica, 728 kWh t^{-1} de sustrato para energía térmica, $88 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ de sustrato de biometano y $32 \text{ m}^3 \text{CO}_2 \text{ t}^{-1}$ de sustrato que pueden ser recuperados por el proceso de purificación de biometano. Con base en estos resultados, fue posible aplicarlos en una unidad industrial real, que fabrica cerveza y que actualmente no utiliza energía de los residuos. También se observó que la aplicación del concepto de digestión anaeróbica y uso energético del biogás ayuda a cumplir con varios problemas sociales, ambientales y económicos que se describen en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas (ONU). Finalmente, podemos concluir que los residuos evaluados tienen potencial para producir biogás y metano y que deben ser aprovechados energéticamente, asegurando una energía más sostenible, reduciendo el uso de fuentes fósiles y contribuyendo a la descarbonización.

Palabras clave: Bagazo de cebada; Biogás; Biometano; Cerveza; Potencial metanogénico bioquímico; Energías renovables.

ABSTRACT

Waste generation has accompanied the increase in energy consumption, regardless of the type of energy sources used. These residues, mainly organic ones, if not properly treated, can cause environmental problems. However, there is a treatment system that enables both the reduction of the organic load and the energy use of these residues. This is anaerobic digestion, which results in the production of two products, biogas and digestate. Biogas is a gas that has methane and carbon dioxide in its composition, in addition to traces of other gases such as hydrogen sulfide and oxygen, and also humidity. Because it contains methane, biogas ends up having an energy potential, making it possible to generate electrical, thermal and biomethane energy. Faced with the possibility of using organic residues for energy, there was an opportunity to use the residues that are generated in the beer manufacturing process and that can be raw materials for the production of biogas, and, consequently, have their use to generate energy. energy, returning it to industry, as heat, electricity, vehicle fuel or in the production of inputs, such as carbon dioxide, for example. Thus, through the biochemical methanogenic potential (PBM) test, which presents the theoretical potential for the production of biogas and methane from a given material, we worked with samples of malt bagasse and liquid effluents from the brewery, in addition to mixing these two samples for evaluation of energy potential. Among the analyzed samples, the malt bagasse sample (MB-C) showed an approximate production capacity of 141 m³ of biogas and 75 m³ of methane for each ton of substrate. Such results provide energetic potentials of 340 kWh t⁻¹ of substrate for electrical energy, 728 kWh t⁻¹ of substrate for thermal energy, 88 m³ t⁻¹ of biomethane substrate and 32 m³ CO₂ t⁻¹ of substrate that can be recovered by the biomethane purification process. Based on these results, it was possible to apply them in a real industrial unit, which manufactures beer and which currently does not use energy from waste. It was also observed that the application of the concept of anaerobic digestion and energy use of biogas helps in meeting several social, environmental and economic issues that are described in the Sustainable Development Goals (SDGs) of the United Nations (UN). Finally, we can conclude that the residues that were evaluated have the potential to produce biogas and methane and that they should be harnessed energetically, ensuring more sustainable energy, reducing the use of fossil sources and helping to decarbonize.

Key words: Barley bagasse; Biogas; Biomethane; Beer; Biochemical methanogenic potential; renewable energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rotas metabólicas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.	18
Figura 2 – Critérios para escolha de biodigestores.	19
Figura 3 – Composição média do biogás de atividades agrosilvopastoris.	21
Figura 4 – Número de cervejarias registradas no Brasil no período de 1999 a 2020.	23
Figura 5 – Quantidade de cervejarias distribuídas pelos estados brasileiros.	24
Figura 6 – Porte das cervejarias no Brasil, com relação ao volume de cozimento.	25
Figura 7 – Etapas da produção de cerveja.	26
Figura 8 – Balanço de massa e energia: entradas e saídas na produção de 1 m ³ de cerveja.	27
Figura 9 – Fluxo genérico do processo de fabricação de cerveja com saída de resíduos.	28
Figura 10 – Estimativa de consumo de água e produção de resíduos, a partir de 1 L de cerveja produzida.	29
Figura 11 – (A) Imagem do malte para produção do mosto. (B) Bagaço de malte gerado durante a fervura do malte.	30
Figura 12 – Apresentação dos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.	32
Figura 13 – Regiões Oeste e Centro-Oriental (indicadas em vermelho) onde foram realizadas as coletas.	34
Figura 14 – Ilustração do processo de produção do mosto até a geração do bagaço de malte.	39
Figura 15 – Curvas de produção de biogás a partir das amostras 1, 2 e 3 de celulose microcristalina.	42
Figura 16 – Produção acumulada de biogás das amostras BM-A, BM-B, BM-C, BM-D e BM-E analisadas.	44
Figura 17 – Curva com base na porcentagem de produção de biogás das amostras de BM.	45
Figura 18 – Produção acumulada de biogás das amostras BM-C, EC e CO.	46
Figura 19 – Curva com base na porcentagem de produção de biogás das amostras de BM-C, EC e CO.	47
Figura 20 – Volume de biogás e metano produzido por tonelada de substrato/ biomassa para todas as amostras analisadas.	49
Figura 21 – Potencial de produção de energia elétrica, térmica e biometano com bagaço de malte no Brasil.	53
Figura 22 – Dados mensais da estimativa do potencial de produção de biogás com resíduo de Bagaço de Malte.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos e características de biodigestores.	20
Tabela 2 – Características físico-químicas das águas residuais de cervejaria.	31
Tabela 3 – Listagem contendo amostras coletadas e suas denominações.	35
Tabela 4 – Resultados de ST e SV para as amostras analisadas.	40
Tabela 5 – Composição média de cada amostra incubada.	41
Tabela 6 – Análise de variância – ANOVA fator único.	43
Tabela 7 – Resultados obtidos para o ensaio de PBM para as amostras analisadas.	43
Tabela 8 – Composição de metano e dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio e amônia durante o ensaio de PBM.	48
Tabela 9 – Volumes de biogás e metano produzidos por tonelada de amostras frescas de bagaço de malte.	50
Tabela 10 – Potencial de geração de energias pelos resíduos da cervejaria.	52
Tabela 11 – Comparação dos resultados do potencial energético com amostra de levedura e terra diatomácea.	53

LISTA DE ABREVIATURAS

%	Porcentagem
AGV	Ácidos graxos voláteis
BM	Bagaço de malte
C/N	Relação carbono nitrogênio
CervBrasil	Associação Brasileira da Indústria Cervejeira
CH ₄	Metano
CNTP	Condições normais de temperatura e pressão
Co	Codigestão
CO ₂	Dióxido de carbono
COV	Carga Orgânica Volumétrica
CSTR	Reator de mistura completa (do inglês <i>Continuous stirred tank reactor</i>)
D	Dia
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EC	Efluente de cervejaria
Ef	Eficiência da conversão do motor
FIEP	Federação das Indústrias do Paraná
G	Grama
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWh	Gigawatt-hora
H ₂	Hidrogênio
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio
hL	Hectolitro
Kg	Quilograma
kgSV	Quilograma por sólidos voláteis
kWh	Quilowatt-hora
L	Litro
LN	Litros normalizados
m ³	Metro cúbico
m ³ reator	Metro cúbico por reator

MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MF	Matéria Fresca
MJ	Mega Joules
MS	Matéria Seca
Nm ³	Normal metro cúbico
O ₂	Oxigênio
°C	Grau celsius
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OIE	Oferta Interna de energia
ONS	Operador Nacional do Sistema
ONU	Organização das Nações Unidas
ONUDI	Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial
PBM	Potencial Bioquímico de Metano
PCI	Poder calorífico inferior
pH	Potencial hidrogeniônico
PIB	Produto Interno Bruto
RFH	Resíduos de frutas e hortaliças
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
Senai	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SF	Sólidos Fixos
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
T	Tonelada
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
VB	Volume de biogás produzido

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE ABREVIATURAS	11
1. INTRODUÇÃO	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. DIGESTÃO ANAERÓBIA	18
2.1.1. Biodigestores	19
2.1.2. Biogás	21
2.2. INDÚSTRIA CERVEJEIRA	23
2.2.1. Porte das Cervejarias	25
2.2.2. Geração de Resíduos	26
2.2.3. Biogás nas Cervejarias	31
2.3. OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)	32
3. OBJETIVOS	33
3.1. GERAL	33
3.2. ESPECÍFICOS	33
4. METODOLOGIA	34
4.1. COLETA DE AMOSTRAS	34
4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	35
4.3. ENSAIO DE PBM	36
4.4. CÁLCULOS SOBRE USOS DOS BIOGÁS	36
4.4.1. Potencial de Geração de Energia Elétrica	36
4.4.2. Energia Térmica	37
4.4.3. Biometano	37
4.4.4. Recuperação de CO ₂	38
4.5. PERSPECTIVAS DO USO DO BIOGÁS EM UMA MICRO CERVEJARIA	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO E PBM	40
5.1.1. Composição do Biogás no Ensaio de PBM	47
5.2. VOLUME DE BIOGÁS POR AMOSTRA FRESCA	49
5.3. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS	51
5.3.1. Energia Elétrica, Térmica, Biometano e Recuperação de CO ₂	51

5.3.1.1.	<i>Potencial do bagaço de malte no Brasil</i>	53
5.4.	OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	54
5.5.	PERSPECTIVAS DO USO DO BIOGÁS EM UMA MICRO CERVEJARIA	56
6.	CONCLUSÕES	59
	REFERÊNCIAS	60

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de se ter fontes de energia menos poluentes é urgente, principalmente pelo notório aumento populacional das últimas décadas. Como consequência, além da crescente demanda energética, tem-se o elevado consumo de diversos produtos, principalmente alimentos. Em decorrência da demanda energética em crescimento, tem-se o aumento da geração de resíduos, efluentes e emissões que, sem uma destinação adequada, podem acarretar em impactos ambientais negativos.

Muitos desses resíduos se enquadram como orgânicos e, em função das suas características, composição, origem e disposição no meio ambiente, resultam em problemas ambientais quando descartados incorretamente. Entretanto, por meio do sistema de tratamento denominado de digestão anaeróbia (ausência de oxigênio) é possível fazer o aproveitamento energético desses resíduos. Como resultado desse tratamento tem-se dois produtos, o biogás e o digestato. O biogás é uma mistura gasosa composta por metano, dióxido de carbono, oxigênio, traços de sulfeto de hidrogênio, hidrogênio e umidade. Dependendo do tipo de emprego, pode ser utilizado para geração de energia mecânica, elétrica, térmica e, por meio da sua purificação tem-se o biometano e a possibilidade de recuperação de gases como o dióxido de carbono, que pode ser utilizado na própria indústria.

As indústrias geradoras de resíduos orgânicos possuem um grande potencial de produção de energia por meio do biogás. Inúmeras indústrias possuem em seus resíduos, matérias orgânicas e assim, podem sanar seus passivos ambientais por meio do aproveitamento energético. Segundo dados do Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás (CIBiogás-ER), por meio do documento Panorama do biogás no Brasil – 2021, no ano de 2021 havia 755 plantas de biogás em operação. Dessas, aproximadamente 11 % operam com resíduos provenientes apenas da indústria, com um volume anual produzido de 375 milhões Nm^3 de biogás o que representa 16 % do volume de biogás produzido no país.

Dentre as indústrias que podem aproveitar seu resíduo para produção de biogás, gerar sua energia e atender suas próprias demandas, tem-se a indústria cervejeira. Contudo, há barreiras no emprego energético do biogás neste tipo de indústria, seja ela pela tecnologia necessária ou pela falta de informação do aproveitamento dos resíduos para a produção de biogás.

Paralelamente é possível alinhar o uso da digestão anaeróbia e biogás aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), propostos na Agenda 2030, que possui diversos objetivos e metas integradas e indivisíveis que equilibram as três dimensões do desenvolvimento sustentável: a econômica, a social e a ambiental. Dentro dessa

temática, podem ser destacados alguns objetivos que são importantes e têm relação direta com esta pesquisa: o objetivo 7 – energia limpa e acessível; objetivo 9 – indústria, inovação e infraestrutura e objetivo 12 – consumo e produção responsáveis.

Portanto, uma forma de se obter mais energia é ir em busca de novas fontes ou formas de obtê-la. Com base nos interesses da indústria e de outros setores, e a fim de atender a esses objetivos, é possível fazer o aproveitamento de resíduos orgânicos gerados nos processos industriais e em outros setores, além de minimizar sua exposição no meio ambiente.

Diante disso, este trabalho tem por objetivo avaliar por meio do ensaio de Potencial Bioquímico de Metano (PBM) os volumes de biogás e metano produzidos a partir de resíduos que são gerados em cervejarias do Estado do Paraná, como bagaço de malte e efluentes. Com base nestes resultados, foi possível estimar a produção de energia elétrica, térmica, biometano e recuperação de CO₂ para os resíduos de bagaço e efluente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O consumo de alimentos tem crescimento acentuado a cada ano e em paralelo, a demanda por energia para sua produção também é grande. Consequentemente, em busca da redução no uso de fontes não renováveis, novas alternativas estão sendo pesquisadas e implementadas por meio de contribuições científicas ao desenvolvimento de novas tecnologias.

No Brasil, a oferta interna de energia (OIE) se compõe de fontes não renováveis, 51,6 %, e renováveis 48,4 %. Das fontes renováveis, 19,1 % são provenientes da biomassa da cana-de-açúcar, 12,6 % da hidráulica, 8,9 % lenha e carvão vegetal, e 7,7 % de outras fontes. Entre as demais fontes renováveis, destacam-se o biodiesel com 23,8 %, a eólica com 22,1 %, a solar com 4,2 % e o biogás com 1,4 %. Apesar da pequena participação na matriz energética, a utilização do biogás aumentou 15,7 % entre os anos de 2019 e 2020 (EPE, 2021).

Pode-se perceber que ocorre algo sequencial e instantâneo, pois o crescimento da demanda por energia e alimentos traz como consequência o aumento na geração de resíduos oriundos desse setor, dentre eles a biomassa ou matéria orgânica que pode ser animal ou vegetal. O processamento da biomassa pode gerar diversos ativos energéticos, como madeira para lenha, palhadas, bagaço, biodiesel e o biogás.

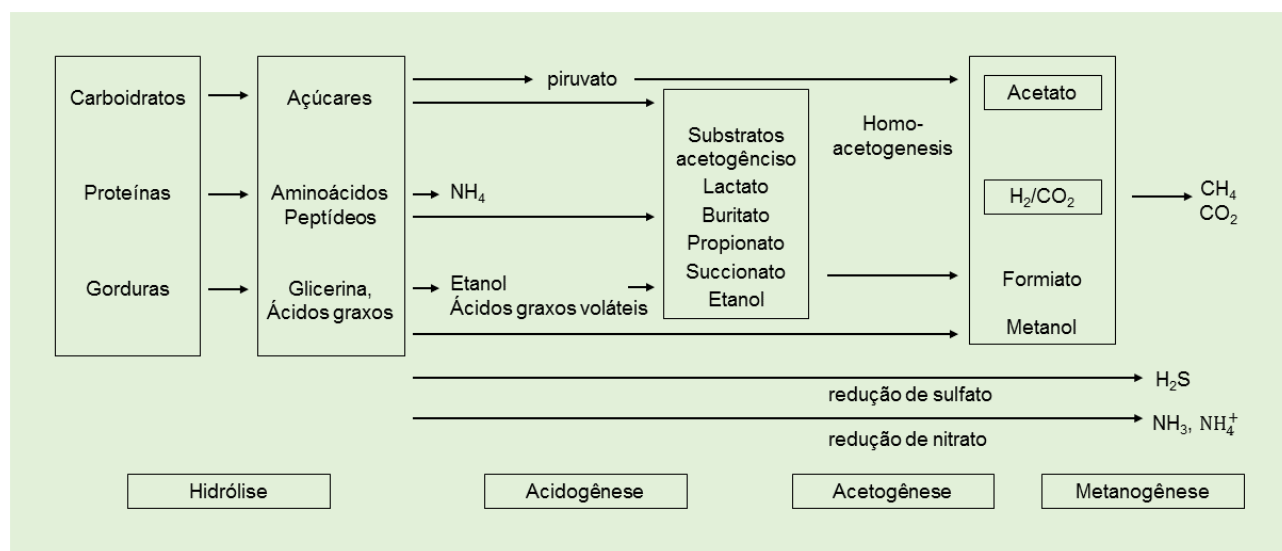
De acordo com um estudo realizado pela Federação das Indústrias do Paraná (FIEP) e Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI-PR), a disponibilidade de diferentes tipos de biomassa fornece condições favoráveis para o desenvolvimento de projetos de aproveitamento energético. As atividades produtivas, como: agricultura, pecuária, indústria e agroindústria, geram resíduos que podem ser submetidos a tratamento por processos biológicos que visam a redução de carga orgânica, como por exemplo, processos anaeróbios, que digerem a matéria orgânica sem a presença de oxigênio (SENAI, 2016).

Durante o processo de digestão anaeróbia, é produzido o biogás, o qual é uma fonte renovável de energia que se destaca por suas vantagens, como rendimento, disponibilidade e possibilidade de ser obtido pela digestão de diversos tipos de biomassa. Adicionalmente ocorre a redução da carga orgânica residual, o que é importante para sua disposição no meio ambiente, como por exemplo a aplicação do material como biofertilizante (dependendo de suas características físico-químicas) ou efluente tratado. O uso do biogás possibilita uma redução considerável de combustíveis fósseis, consequentemente a diminuição dos custos de energia, do descarte de resíduos e das altas emissões de gases de efeito estufa (GEE) (KHAN et al., 2017; PANJIČKO et al., 2017).

2.1. DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia é um processo metabólico complexo, delicadamente balanceado e que requer condições específicas. É dependente da atividade conjunta de vários microrganismos para a formação de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), como principais produtos. A produção do metano ocorre em ambientes onde oxigênio (O_2), nitrato e sulfato não estejam disponíveis. As etapas que envolvem o processo de degradação da matéria orgânica ocorrem sequencialmente, e dependem de no mínimo, três grupos fisiológicos de microrganismos: i) bactérias fermentativas (ou acidogênicas); ii) bactérias sintróficas (ou acetogênicas); e iii) microrganismos metanogênicos (CHERNICHARO, 2019; AMARAL, STEINMETZ, e KUNZ, 2019a). As etapas metabólicas e grupos microbianos estão representados na Figura 1.

Figura 1 – Rotas metabólicas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.



Fonte: Adaptado de Amaral, Steinmetz e Kunz, (2019a).

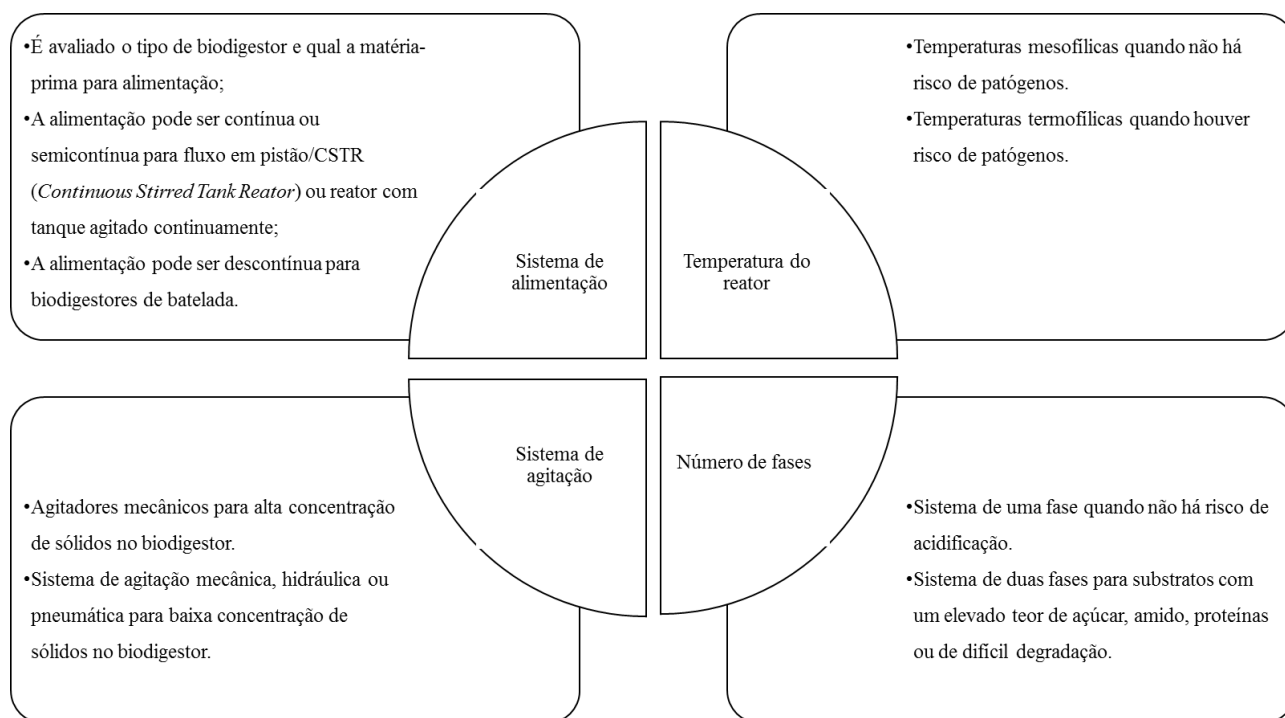
Observa-se que os grupos de microrganismos trabalham em conjunto, interativamente e são dependentes uns dos outros para a conversão da matéria orgânica em biogás. Caso haja a interrupção na operação de uma dessas fases, o biogás poderá não ser produzido ou haverá alterações significativas em sua qualidade.

O equipamento que atende as premissas para que a digestão anaeróbia ocorra é denominado de biodigestor ou reator anaeróbio.

2.1.1. Biodigestores

Há vários modelos de biodigestores no mercado. Desde aqueles que são escavados no solo e impermeabilizados, até modelos que são construídos em fibra de vidro e equipados com sistemas de aquecimento, agitação e monitoramento de parâmetros de operação. Pela diversidade de tipos, segundo Amaral, Steinmetz e Kunz, (2019b), é importante avaliar alguns detalhes para a escolha de um sistema de biodigestão. Esses critérios podem ser vistos na Figura 2.

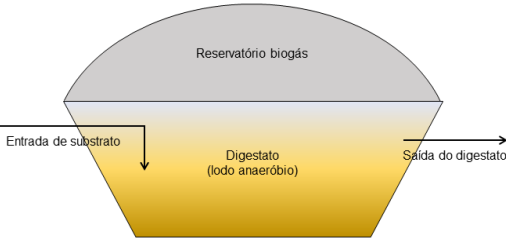
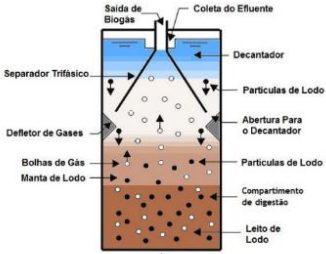
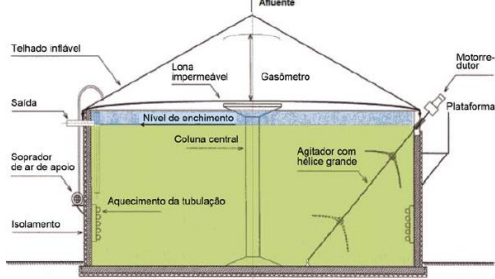
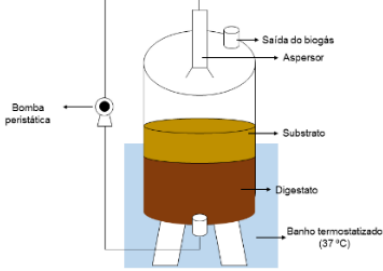
Figura 2 – Critérios para escolha de biodigestores.



Fonte: Adaptado de Amaral, Steinmetz e Kunz, (2019b).

A seleção do biodigestor é de extrema importância em um projeto de biodigestão. Cada modelo oferece condições para operação com um determinado tipo de substrato, tipo de alimentação, concentração de sólidos, agitação ou não, aquecimento ou não. A observância com antecedência desses critérios, implicam em investimentos precisos e uma produção de biogás com qualidade e quantidade necessárias para a demanda que se presumiu. Na Tabela 1 são apresentados alguns modelos de biodigestores com suas principais características.

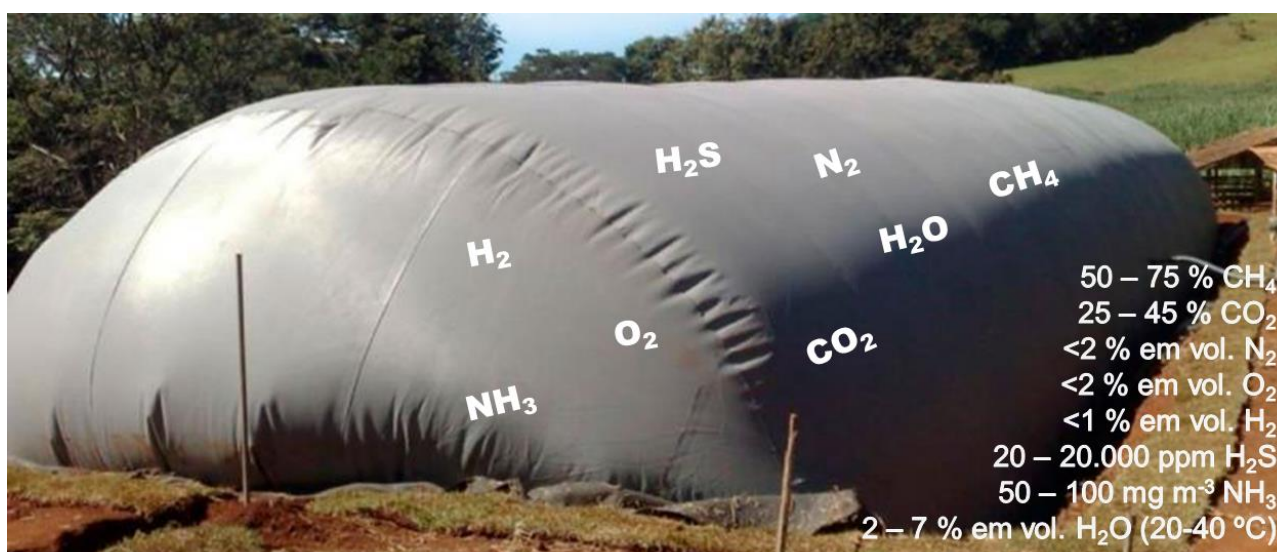
Tabela 1 – Modelos e características de biodigestores.

Tipo	Características	Modelo	Referência
Biodigestor de Lagoa Coberta (BLC)	- Biodigestor mais empregado no meio rural; - Tanque escavado no solo, impermeabilizado e coberto com geomembrana (PVC, PEAD); - Possui TRH elevado (30 dias); - Opera com baixa Carga Orgânica Volumétrica (COV) ($0,3$ a $0,5 \text{ kgSV m}^{-3} \text{ reator d}^{-1}$); - Necessidade de descarte de lodo.		Amaral, Steinmetz e Kunz, (2019c).
Biodigestor tipo UASB	- Biodigestor com entrada do substrato em fluxo ascendente, passando por uma manta de lodo até o topo do reator; - O perfil de sólidos no reator varia de muito denso até um lodo mais disperso e leve; - A estabilização da matéria orgânica ocorre em todas as zonas de reação, sendo a mistura do sistema promovida pelo fluxo do material introduzido.		Amaral, Steinmetz e Kunz, (2019c); Chernicharo, (2019).
Biodigestor CSTR	- Suporta elevadas COV (1 a $4 \text{ kgSVm}^{-3} \text{ d}^{-1}$); - Possui sistema de aquecimento e agitação; - TRH mínimo de 15 e 20 dias, podendo variar em função do substrato.		FNR, (2010); Chernicharo, (2019).
Biodigestor em fase sólida	- Permite a operação com substratos de baixa umidade (20 a 40 %) de sólidos; - Principais substratos: materiais lignocelulósicos como resíduos agrícolas (palha, esterco), resíduos domésticos e resíduos alimentares; - Tempo de digestão é entre 2 a 4 semanas.		André, Pauss e Ribeiro, (2018); Amaral, Steinmetz e Kunz, (2019c).

2.1.2. Biogás

O biogás é composto por uma mistura de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), e traços de sulfeto de hidrogênio (H_2S), oxigênio (O_2) e hidrogênio (H_2) (SIQUEIROS et al., 2019), e amônia (NH_3) e nitrogênio (N_2) (SILVA e MEZZARI, 2022). É obtido por meio da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos. Seu uso visa a redução de custos, gerando diversos impactos positivos, como ganhos econômicos, ambientais e sociais. Seu potencial energético pode ser avaliado pelo seu poder calorífico que está diretamente relacionado com o percentual de metano presente na composição do biogás (LINS et al., 2015). Seus componentes, bem como suas quantidades estão apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Composição média do biogás de atividades agrosilvopastoris.



Fonte: Adaptado de FNR, (2010); Recolast, (2021); Silva e Mezzari, (2022).

Contudo, a conversão da matéria orgânica em biogás depende de diversos fatores operacionais e do tipo de biomassa. Dentre esses, devem ser considerados a composição e as características do efluente ou biomassa residual, potencial hidrogeniônico (pH), temperatura, COV, e tempo de retenção hidráulica (TRH). Esses fatores afetam os microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica (ENITAN et al., 2015).

Ao utilizar o biogás para fins energéticos, é importante considerar sua qualidade, pois dependendo de sua concentração e pureza, seu uso não é recomendado. De acordo com Silva e Mezzari, (2022), a presença de H_2S pode causar corrosão de tanques, tubulações metálicas e motores a combustão. Já o CO_2 pode interferir diretamente no potencial energético e a amônia (NH_3) apresenta propriedades corrosivas e tóxicas.

E ainda segundo Silva e Mezzari, (2022), o uso energético do biogás no Brasil vem sendo realizado há pelo menos 40 anos. Na última década tem sido utilizado como fonte de energia nacional, influenciado principalmente pelo incentivo do mercado de créditos de carbono, que busca a redução das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, o biogás pode ser convertido em energia elétrica, térmica e biometano que por sua vez pode ser utilizado para abastecimento veicular.

De acordo com dados do Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás (CIBiogás-ER), no ano de 2021 haviam no Brasil 755 plantas em operação, com uma produção de 2,3 bilhões m³ de biogás. Contudo, o volume que é aproveitado representa somente 0,44 % do potencial total do país, que é de 84,6 bilhões de metros cúbicos ao ano. O potencial total contempla setores como sucroenergético, proteína animal, produção agrícola e saneamento. Com relação ao aproveitamento energético do biogás, 87 % das plantas usam o biogás na geração de energia elétrica, 11 % no aproveitamento térmico e 2 % para biometano e energia mecânica (CIBIOGÁS, 2022).

A energia elétrica é produzida pelo biogás por meio da queima do gás em motores a combustão interna. De acordo com (FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE [FNR], 2010) os motores operam a uma rotação constante de forma que o gerador acoplado possa fornecer energia elétrica compatível com a frequência da rede. O aproveitamento térmico do biogás pode ser feito por meio da sua queima direta, gerando calor e vapor, substituindo assim o gás liquefeito de petróleo (GLP), lenha e/ou diesel.

Outra forma de uso do biogás, é como biometano. O biogás contém impurezas, como o H₂S, CO₂, e umidade por exemplo. Por conta disso, é possível aplicar processos de filtragem, purificação e refino que têm por objetivo remover ou reduzir as concentrações mínimas dessas impurezas, resultando assim no aumento do poder calorífico do gás melhorando sua eficiência. O biometano pode ser aplicado, tanto na geração de energia elétrica, como na substituição de combustíveis líquidos para uso veicular e para a comercialização para o consumidor industrial por meio de dutos dedicados ou veículos transportador de biometano comprimido ou liquefeito. Isto é possível pois no Brasil, está em vigência uma resolução da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) que estabelece especificações para o biometano, trata-se da Resolução nº 906/2022 que aplica-se ao Biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais destinado ao uso veicular (GNV) e às instalações residenciais e comerciais.

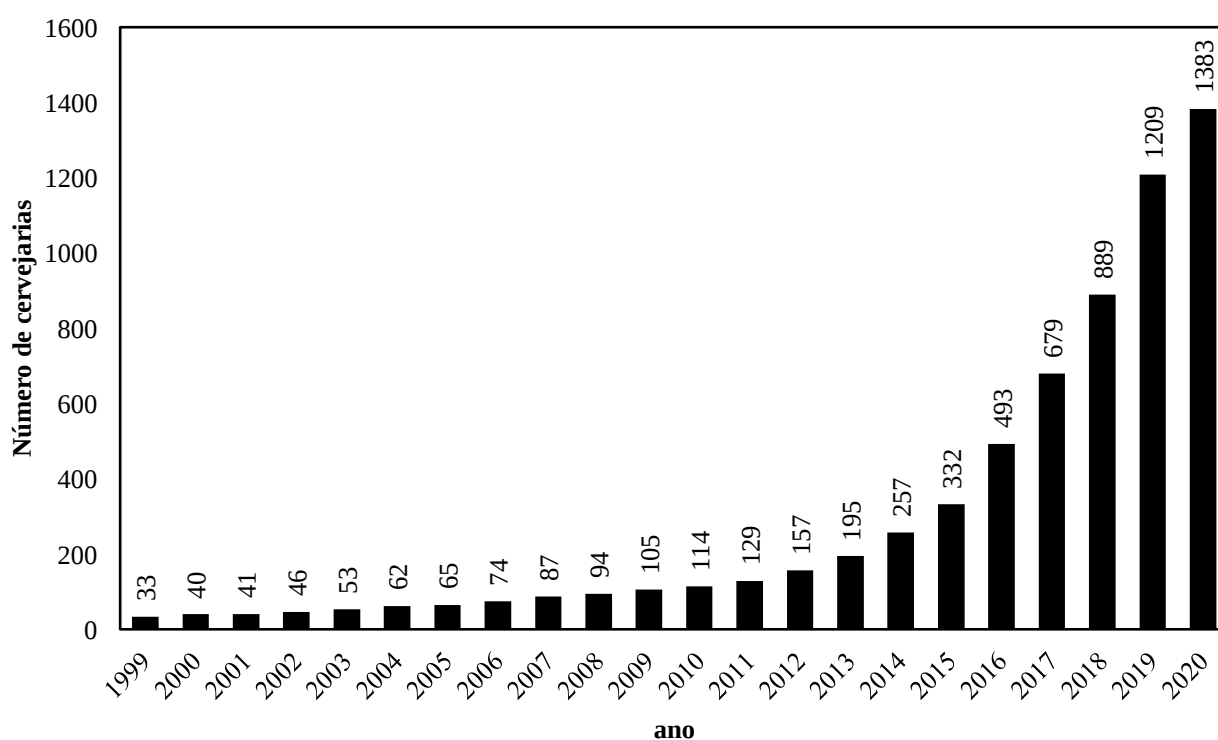
Durante o processo de obtenção do biometano, por meio de técnicas de separação é possível capturar e recuperar o CO₂, que pode ser utilizado em diversos setores industriais para diferentes fins. De acordo com Brasil (2015), há várias técnicas de purificação do biogás e separação do CO₂, como por exemplo a adsorção por variação de pressão (sigla em inglês, *PSA*) e tecnologias de membranas, onde o CO₂ puro pode ser obtido.

2.2. INDÚSTRIA CERVEJEIRA

Conforme dados da Associação Brasileira da Indústria Cervejeira (CervBrasil), o setor é um dos mais relevantes na economia brasileira, gerando empregos e desenvolvendo a cadeia que vai do agronegócio ao pequeno varejo, passando pelos mercados de embalagens, logística, maquinário e construção civil. O setor possui participação efetiva no Produto Interno Bruto (PIB) sendo responsável por 1,6 % e 14 % da indústria de transformação nacional (CERVBRASIL, 2021a). O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de cerveja, ficando atrás da China e Estados Unidos e o décimo sétimo em consumo *per capita*, sendo a primeira colocação ocupada pela República Tcheca com 143 litros por habitante por ano (CERVBRASIL, 2021b). A produção anual de cerveja no Brasil é de 14,1 bilhões de litros (CERVBRASIL, 2021a). No entanto, entre 320 a 380 milhões de litros de cerveja (2,5 a 2,7 % do volume total) foram fabricados por cervejarias artesanais independentes, ou seja, quase 3 % do mercado total (ABRACERVA, 2018).

Avaliando os dados gerados pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), onde são registrados todos os estabelecimentos que produzem cerveja (sem indicação de porte), desde micro a grandes cervejarias, elaborou-se a Figura 4, que apresenta o número de cervejarias registradas nos últimos 22 anos no país.

Figura 4 – Número de cervejarias registradas no Brasil no período de 1999 a 2020.

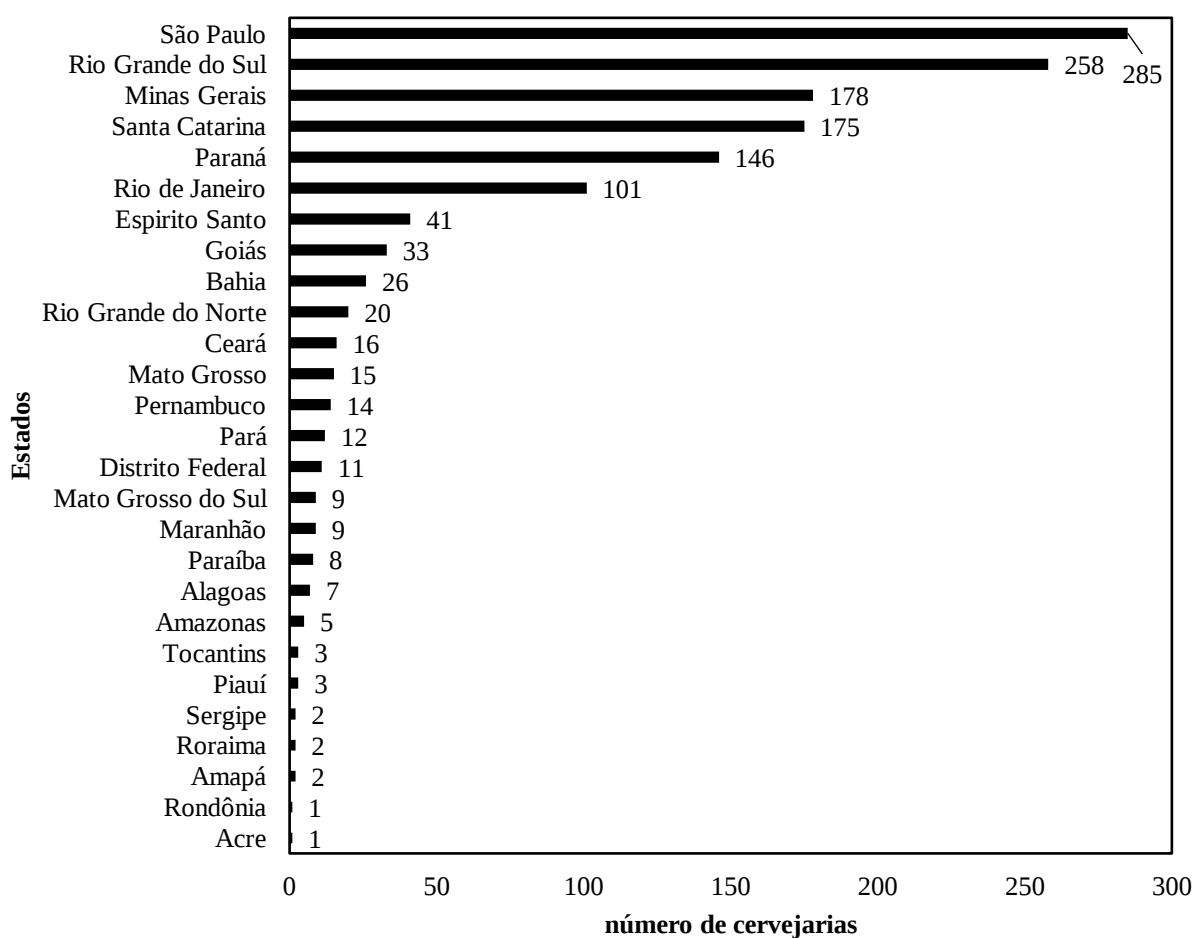


Fonte: Adaptado de MAPA, (2021).

De acordo com os dados apresentados, no período de 1999 a 2020, o número de cervejarias registradas no país aumentou de 33 para 1.383 unidades, uma variação percentual de 4.090 %. A fim de comparação, entres os anos de 2001 e 2010 o aumento foi de “somente” 178 %. Já entre 2011 e 2020 o aumento foi de 972 %. Por fim a variação do último ano (2020) em relação ao ano anterior (2019), onde foram criadas 174 novas cervejarias, foi de 14,4 %.

Com relação à distribuição geográfica das cervejarias, é possível constatar que há pelo menos uma indústria em cada unidade federativa. Na Figura 5, pode-se observar a quantidade de cervejarias instaladas em cada estado do país, dando destaque ao estado de São Paulo, que acumula o maior número de instalações.

Figura 5 – Quantidade de cervejarias distribuídas pelos estados brasileiros.



Fonte: Adaptado de Mapa, (2021).

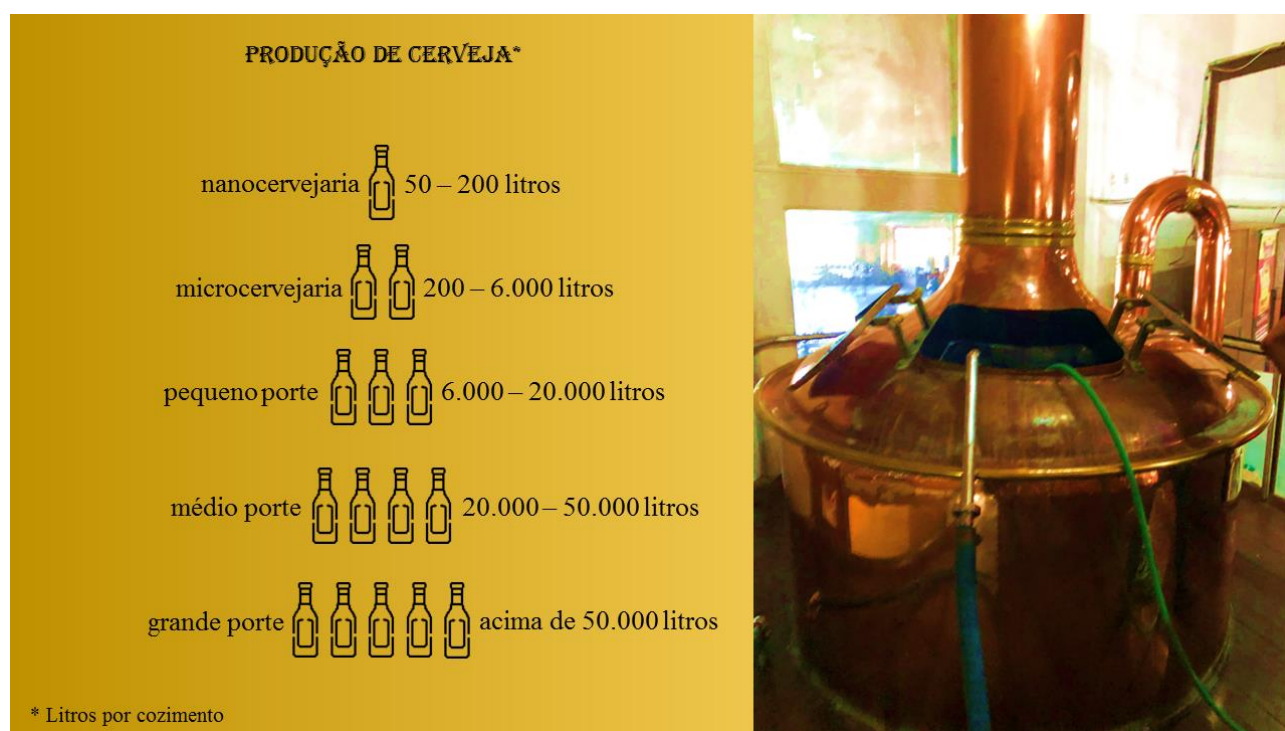
Observa-se na Figura 5, que há uma grande concentração de cervejarias nos estados das regiões Sul e Sudeste. A região que possui maior concentração de cervejarias é a Sudeste com

43,7 % seguida da região Sul com 41,9 %. Somente essas duas regiões contemplam 85,6 % das cervejarias do país, ou seja, são regiões que possuem uma produção de cerveja muito grande e consequentemente a geração de resíduos é alta. Seguindo com a análise, o Nordeste concentra 7,6 % das cervejarias, seguido da região Centro-Oeste com 5,1 % e Norte com 1,7 %.

2.2.1. Porte das Cervejarias

Embora o Brasil tenha grandes produtores de cerveja, o número de cervejarias que tem produção de cervejas especiais, artesanais e *gourmet* está em crescimento. Contudo, em razão dessa diferenciação no tipo e qualidade da cerveja, essas indústrias têm uma produção menor, mas constante, que visa atender uma parcela crescente de degustadores. Na Figura 6 é possível visualizar o porte das cervejarias no Brasil com relação ao volume de cozimento ou brassagem, ou seja, quanto maior for o volume por cozimento, maior o porte da indústria. A brasagem dura em média 90 minutos (MUXEL 2016).

Figura 6 – Porte das cervejarias no Brasil, com relação ao volume de cozimento.



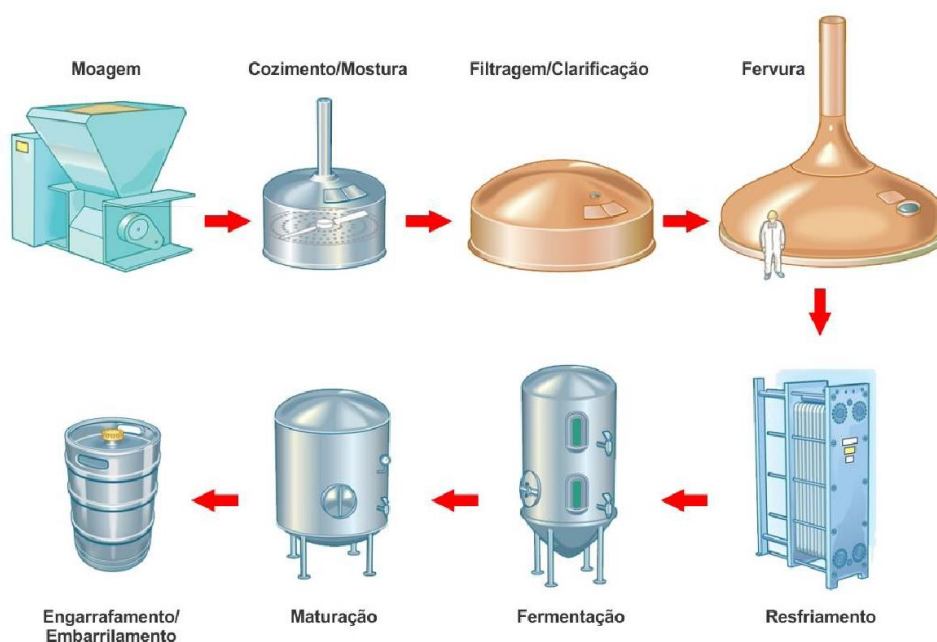
Fonte: Adaptado de ROSALIN e GALLO, (2021); próprio autor, (2022).

É possível verificar que há 5 tipos de portes para classificação de uma cervejaria, a nanocervejaria, a microcervejaria, e as indústrias de pequeno, médio e grande porte. E o tamanho da indústria impactará diretamente na geração de resíduos.

2.2.2. Geração de Resíduos

Apesar da grande quantidade de estabelecimentos espalhados no país, há uma problemática nestas indústrias, comum a muitas indústrias do setor alimentício. Trata-se do gerenciamento de água e efluentes, visto que o consumo e o descarte de água são pontos críticos, tanto na visão ambiental quanto econômica (FILLAUDEAU et al., 2006). Os resíduos podem ser gerados durante todo o processo industrial. Isto faz com que tanto os resíduos quanto as águas residuais tenham diferentes composições, dependendo da etapa do processamento. Na Figura 7, são apresentadas as etapas para produção da cerveja.

Figura 7 – Etapas da produção de cerveja.



Fonte: Veronese, (2019).

A produção da cerveja engloba aspectos físico, químicos e bioquímicos (trituração, fervura, fermentação e maturação) e três separações sólido-líquido (separação do mosto, clarificação do mosto e clarificação da cerveja) (FILLAUDEAU, et al., 2006). Sua produção engloba algumas etapas, a obtenção do malte; preparo do mosto; fermentação; processamento da cerveja; e finalmente o envase.

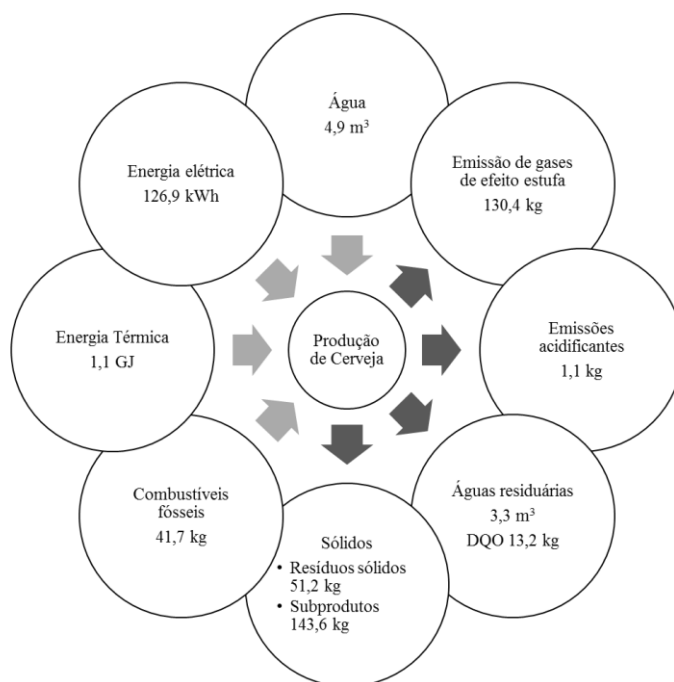
Na primeira etapa é feita a escolha, seleção, germinação e secagem do malte. Na segunda etapa já com o malte definido, é feito o preparo do mosto, onde é moído, macerado, separado e filtrado e finalizado com as etapas de clarificação e resfriamento. Nesta etapa tem-se como principal

resíduo o bagaço de malte. Na terceira etapa é feita a fermentação a qual é dividida em duas fases, a primeira trata-se da fermentação aeróbica e a segunda é anaeróbia, onde serão convertidos os açúcares em mosto, CO₂ e álcool. A quarta etapa, é o processamento da cerveja, onde são realizados os processos de maturação, filtração e carbonatação. Na última etapa é feito o envase do produto. Neste processo há várias outras etapas, como lavagem de garrafas, o próprio envase, pasteurização e expedição (SANTOS, 2005).

Segundo Simate et al., (2011), o processo de fabricação da cerveja consome grandes volumes de água, o que resulta na geração de elevadas quantidades de efluentes, além de resíduos sólidos que são descartados. Estes devem ser tratados e/ou destinados adequadamente, conforme preconiza a legislação ambiental vigente. Uma forma de minimizar os impactos ambientais resultantes do descarte inadequado desses resíduos consiste no tratamento da água residual da cervejaria que pode ser combinado com a produção de metano ou hidrogênio (ARANTES et al., 2017), ou a destinação das frações sólidas à locais exclusivos para tratar classes específicas.

Na Figura 8 é apresentado o balanço de massa e energia do processo de produção da cerveja, com entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) de materiais e energia para produção da cerveja.

Figura 8 – Balanço de massa e energia: entradas e saídas na produção de 1 m³ de cerveja.

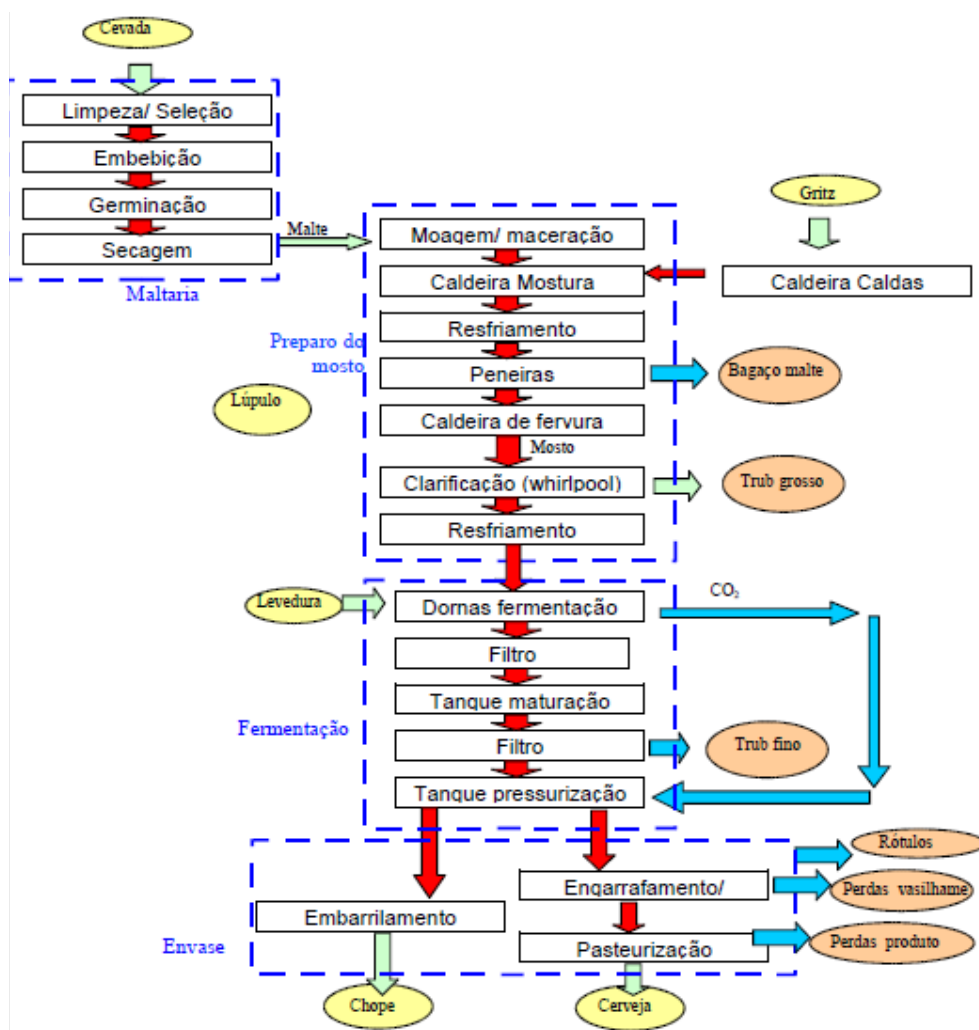


Fonte: Adaptado de Olajire, (2020).

Além da água, para a produção da cerveja são necessárias energias elétrica e térmica. A produção da bebida é acompanhada de geração de resíduos e subprodutos sólidos, águas residuais e emissões atmosféricas. Assim como o consumo de água, a produção de resíduos sólidos e líquidos

ocorre nas várias etapas do processo de produção da cerveja, conforme pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Fluxo genérico do processo de fabricação de cerveja com saída de resíduos.



Fonte: Santos e Ribeiro, (2005).

Observa-se que várias são as saídas durante o processo de fabricação da cerveja, onde se tem a geração do bagaço de malte, *trub* grosso originário do whirlpool – primeira filtração que possui em sua composição gordura vegetal e proteínas coaguladas, *trub* fino, da segunda filtração, composto também por gordura vegetal, terra diatomácea e frações de levedo (SANTOS e RIBEIRO, 2005), além de outros resíduos como rótulos e vasilhames.

Já na Figura 10 são apresentados os valores a respeito da quantidade necessária de água e geração de efluentes no processo.

Figura 10 – Estimativa de consumo de água e produção de resíduos, a partir de 1 L de cerveja produzida.



Fonte: Adaptado de Simate et al., (2011); Olajire, (2020).

A indústria cervejeira gera entre 3 e 10 L de efluentes por litro de cerveja produzida. Esse efluente contém açúcares, amido solúvel, etanol, ácidos graxos voláteis e sólidos totais em suspensão (CHEN et al., 2016). Além de conter subprodutos com alto potencial energético, como resíduos da fermentação e grãos gastos. Os grãos gastos ou bagaço de malte (BM), são uma mistura de casca de grãos de cevada, pericarpo e fragmentos de endosperma, resultantes do processo de esmagamento; e o fermento morto da fermentação é a levedura morta ou levedura excedente oriundo da etapa de fermentação (OLIVEIRA, ALVES, e COSTA, 2018).

Os resíduos sólidos são compostos pelo BM, que é um dos principais resíduos orgânicos gerados na fabricação da cerveja, além da levedura e a terra diatomácea. O bagaço de malte é gerado no início da fabricação da cerveja, na etapa de obtenção do mosto (cozimento/mostura), pela fervura do malte moído. É constituído principalmente por cascas da cevada malteada. Na Figura 11 pode ser visto à direita (A) o malte que será processado e à esquerda (B) o bagaço de malte que foi gerado durante a produção do mosto.

Figura 11 – (A) Imagem do malte para produção do mosto. (B) Bagaço de malte gerado durante a fervura do malte.



Fonte: próprio autor, (2022).

São produzidos 20 kg a cada 1 hectolitro (hL) de cerveja fabricada (KAVALOPOULOS et al., 2021), representando cerca de 85 % do total de resíduos gerados na indústria cervejeira (MUSSATTO, DRAGONE e ROBERTO, 2006). Os resíduos, de modo geral, são compostos por aproximadamente 20 % de proteínas, 70 % de fibras e possui uma relação C/N inferior a 25, ou seja, passíveis de digestão anaeróbia (AKUNNA, 2015). Em razão das suas excelentes características nutricionais são usados na fabricação de ração animal.

Outro resíduo consiste nas leveduras, que são geradas na etapa de fermentação. A massa de levedura tende a se multiplicar entre 3 e 5 vezes no reator (BRIGGS et al., 2004), gerando cerca de 1,5 a 3 % do volume total de cerveja produzida (OLAJIRE, 2020). Parte desta levedura é reaproveitada em uma nova batelada, e outra fração é vendida ou doada para a indústria alimentícia ou produtores rurais, respectivamente. A terra diatomácea é usada como elemento auxiliar no processo de clarificação da cerveja (SANTOS e RIBEIRO, 2005).

Contudo, há outras etapas na produção da cerveja que geram volumes maiores de efluentes, porém com cargas orgânicas menores, como é o caso da lavagem de garrafas. Os efluentes da fermentação e filtragem são maiores em concentrações de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), mas com volumes baixos de produção, cerca de 3 % do volume total, mas 97 % de DBO (SIMATE et al., 2011). Na Tabela 2, são apresentados alguns parâmetros analisados das águas

residuais de cervejaria, coletadas em uma indústria cervejeira.

Tabela 2 – Características físico-químicas das águas residuais de cervejaria.

Parâmetro	Valores*
pH	3-12
Temperatura (°C)	18-40
DQO	2000-6000
DBO	1200-3600
Relação DQO (Demanda Química de Oxigênio):DBO	1,666
AGV	1000-2500
Fosfato (PO_4^{3-})	10-50
Nitrogênio Total Kjeldahl	25-80
Sólidos Totais (ST)	5100-8750
Sólidos Totais em suspensão	2901-3000
Sólidos Totais dissolvidos	2020-5940

Fonte: Adaptado de Rao et al., (2007).

*Todos os parâmetros exceto pH e temperatura são em mg L^{-1} .

2.2.3. Biogás nas Cervejarias

Estudos com o uso do BM foram realizados para avaliar o potencial de produção de biogás. Testes em faixas mesofílicas e termofílicas resultaram em uma produção considerável de biogás, 184 e 163 $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$, respectivamente, com 1.500 kg de resíduos (SIQUEIROS et al., 2019). Com relação ao rendimento de metano, que foi obtido por meio do ensaio realizado em laboratório pelo método ASTM E1196-92 (*Test Method for Determining the Anaerobic Biodegradation Potential of Organic Chemicals*, em inglês), o valor alcançado foi de 0,312 $\text{m}^3 \text{CH}_4$, ou seja, neste experimento os autores chegaram a um resultado onde cerca de 90 % da DQO deste efluente foi convertida em metano. Outro ponto importante observado pelos autores, foi que as amostras não indicaram efeitos inibitórios significativos na geração de metano (KO, TOWNSEND, KIM, 2012). Destaca-se aqui, que os trabalhos avaliados foram realizados em outros países, e por isso, em função do clima, região, costumes, das características dos tipos de cerveja e sua matéria-prima, as quais podem ser diferentes das encontradas no Brasil. Por isso, é importante avaliar a produção de biogás com os resíduos gerados nas indústrias nacionais.

Segundo dados do Senai, (2016), além do resíduo úmido cervejeiro (RUC), que é resultante da etapa inicial de preparo do mosto cervejeiro, outros resíduos podem ser utilizados para produção de biogás, como: restos de malte (bagaço), lúpulo e levedura. O potencial estimado para a produção de biogás a partir desses resíduos, no Estado do Paraná em 2014 foi de 5,790 bilhões de metros cúbicos, já no Brasil sua produção foi estimada em 267 bilhões de metros cúbicos.

Entretanto, não há só ganhos energéticos com uso da digestão anaeróbia e o biogás.

Com sua implementação é possível atender aos objetivos e metas estabelecidos na Agenda 2030 que visa o crescimento econômico e futuro sustentável, estabelecido pela Organização das Nações Unidas.

2.3. OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) fazem parte de uma agenda global da Organização das Nações Unidas (ONU) que possui objetivos e ações específicas para cada área do desenvolvimento humano. Seu principal apelo está associado à erradicação da pobreza, proteção do meio ambiente e o clima, além de garantir que as pessoas, em qualquer lugar do mundo, possam desfrutar de paz e prosperidade. Na Figura 12 são apresentados todos os 17 ODS da agenda global.

Figura 12 – Apresentação dos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.



Fonte: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>

Diante disso, e avaliando a importância da digestão anaeróbia e das aplicações energéticas do biogás, é possível associar o uso do biogás como ferramenta de ação para tratar e implantar alguns ODS, como por exemplos os objetivos 6, 7, 12 e 13.

3. OBJETIVOS

3.1. GERAL

Avaliar a produção de biogás e metano por meio do ensaio de Potencial Bioquímico de Metano (PBM) do resíduo de bagaço de malte e efluente líquido, gerados no processo de fabricação de cerveja, demonstrando a possibilidade de cogeração, além da sua importância econômica e social.

3.2. ESPECÍFICOS

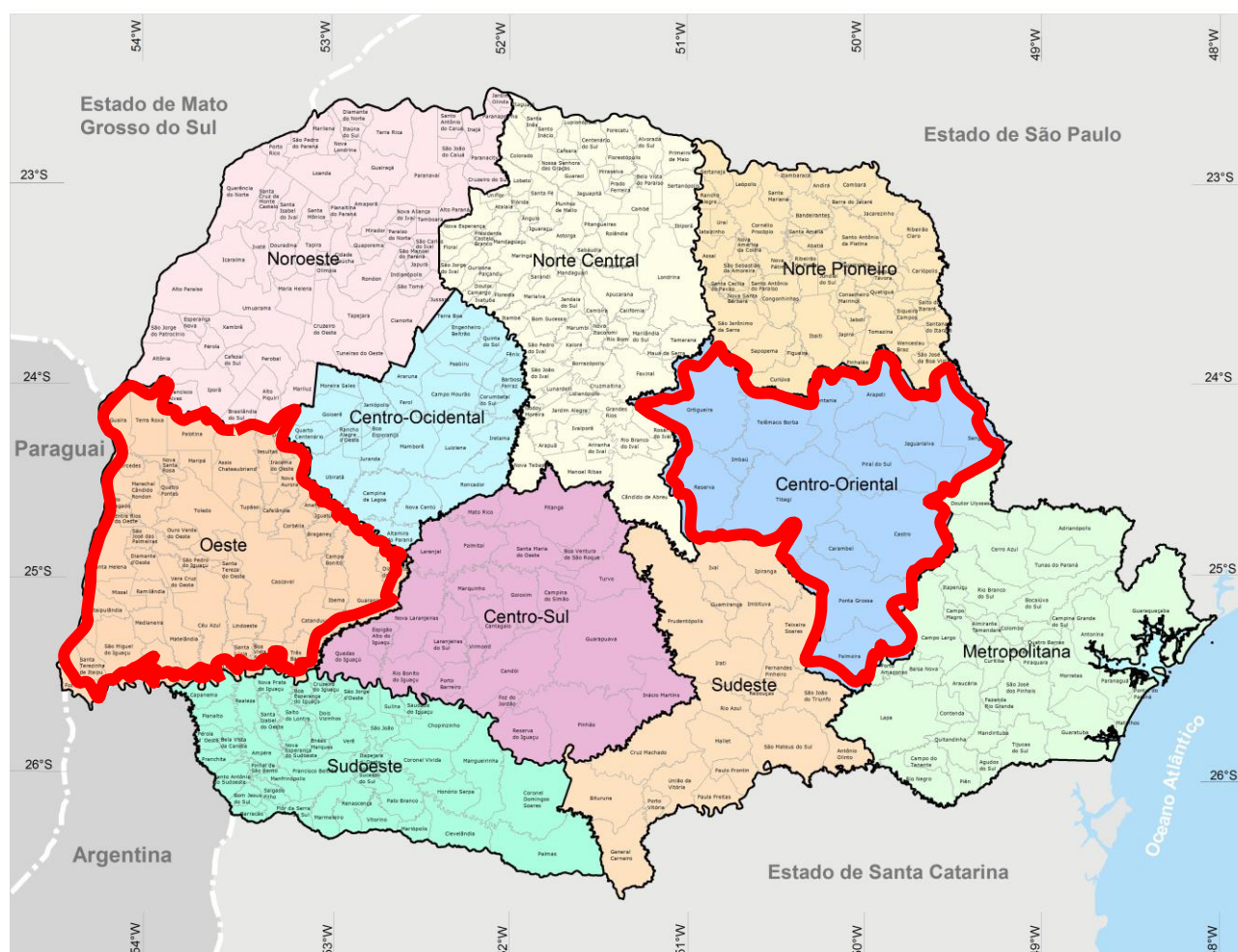
- Definir o potencial energético do biogás gerado pelo aproveitamento do resíduo de bagaço de malte e efluente líquido;
- Avaliar o potencial de recuperação de CO₂ durante a obtenção de biometano do resíduo de bagaço de malte e efluente líquido;
- Avaliar o uso da digestão anaeróbia e seus produtos no que tange os Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS);
- Avaliar por meio do cruzamento dos dados obtidos neste trabalho com uma cervejaria em operação, o potencial de aproveitamento energético do biogás.

4. METODOLOGIA

4.1. COLETA DE AMOSTRAS

Foram coletadas amostras de dois tipos de resíduos que são gerados no processo de produção da cerveja, o bagaço de malte (BM) e o efluente de cervejaria (EC). As coletas ocorreram em cinco diferentes indústrias, de diferentes portes, denominadas de A, B, C, D e E, localizadas nas cidades de Foz do Iguaçu (região Oeste) e Ponta Grossa (Centro-Oriental), ambas no estado do Paraná, conforme observado na Figura 13. Sendo que as amostras de BM foram coletadas nas cinco indústrias, e a amostra de EC foi coletada somente na indústria C.

Figura 13 – Regiões Oeste e Centro-Oriental (indicadas em vermelho) onde foram realizadas as coletas.



Dados: (1) os limites das regiões geográficas coincidem com os limites das mesorregiões do IBGE, exceto no caso das regiões Sudoeste e Centro-Sul, para as quais se aplica a Lei Estadual nº 15.825/08, que inclui na Região Sudoeste os municípios de Palmas, Clevelândia, Honório Serpa, Coronel Domingos Soares e Mangueirinha.

Fonte: IPARDES, (2021).

4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras devidamente acondicionadas foram trazidas e processadas no Laboratório de Biogás do CIBiogás-ER. O ensaio para caracterização dos resíduos (sólidos totais, fixos e voláteis) foi executado pelo método gravimétrico, conforme o método 2540 descrito no *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (APHA, 2017), e o PBM quantificado segundo a norma alemã VDI 4630 (2016).

Ao todo foram coletadas seis amostras. Na Tabela 3 é apresentada a relação das amostras coletadas em cada indústria, bem como o estado físico do resíduo e a denominação atribuída a cada uma. Com a finalidade de avaliar o efeito da mistura de resíduos no potencial de produção de biogás, foi preparado uma mistura entre os resíduos BM e EC da indústria C, denominada de codigestão. Essa mistura poderá, em casos de baixa produção de resíduos, principalmente nas pequenas indústrias, potencializar seu aproveitamento energético através da codigestão (digestão anaeróbia da mistura de dois ou mais substratos), uma vez que, torna-se um desafio para as pequenas cervejarias produzir um volume considerável de resíduos para viabilizar a implantação de projetos de aproveitamento de biogás. Nesse sentido, a codigestão passa ser uma solução para o melhor aproveitamento energético dos resíduos.

Tabela 3 – Listagem contendo amostras coletadas e suas denominações.

Indústria	Amostra coletada	Estado (semi-sólido, líquido)	Denominação
A	BM	Semi-sólido	BM-A
B	BM	Semi-sólido	BM-B
C	BM	Semi-sólido	BM-C
D	BM	Semi-sólido	BM-D
E	BM	Semi-sólido	BM-E
C	EC	Líquido	EC
C	Co=BM+EC*	Semi-sólido	CO

Dados: BM = bagaço de malte; EC = Efluente de cervejaria; Co = Codigestão; *amostra processada em laboratório.
Fonte: Próprio autor, (2022).

Com os resultados obtidos foi possível determinar o volume de biogás e metano por tonelada de substrato em base úmida, além de estimar teoricamente o potencial de energia elétrica, térmica, biometano e recuperação de CO₂ para cada amostra analisada.

4.3. ENSAIO DE PBM

Para o ensaio de PBM, as amostras foram submetidas a um sistema de biodigestão de bancada. As amostras, o inóculo e a celulose microcristalina, foram incubadas em frascos digestores de vidro (250 mL), acoplados a tubos graduados de 500 mL, denominados eudiômetros. As amostras foram incubadas com o inóculo produzido no próprio laboratório. Para avaliar se houve atividade microbiana, o inóculo foi incubado também em triplicata. As massas das amostras foram determinadas com base nos SV, na proporção de 1:3 (substrato:inóculo). O padrão positivo utilizado foi a celulose microcristalina da marca Sigma-Aldrich® e o padrão negativo, o inóculo puro. Os ensaios foram realizados em triplicata, no regime de batelada e com temperatura controlada na faixa de $37,0 \pm 2,0$ °C.

O volume de biogás produzido durante o período de fermentação foi mensurado na escala graduada dos eudiômetros, normalizado em Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP). A composição do biogás foi medida com o analisador multigás, modelo GA5000 Landtec/geotech, que possibilitou a determinação de concentrações de metano e dióxido de carbono na faixa de 0 a 100 % (mol/mol), monóxido de carbono na faixa de 0 a 2.000 ppm ($\mu\text{mol/mol}$), oxigênio na faixa de 0 a 25 % (mol/mol), gás sulfídrico na faixa de 0 a 5.000 ppm ($\mu\text{mol/mol}$) e amônia na faixa de 0 a 1.000 ppm ($\mu\text{mol/mol}$).

4.4. CÁLCULOS SOBRE USOS DOS BIOGÁS

O biogás pode ser empregado para geração de energia elétrica, térmica e também na produção de biometano e recuperação de outros gases, como o CO₂. Conhecer a quantidade e/ou potencial de energético que uma amostra de um determinado resíduo/substrato pode produzir, antes de se investir recursos financeiros e/ou implantar um sistema de biodigestão em escala real é de extrema importância para o desenvolvimento de novos projetos e aplicação sustentável de recursos.

4.4.1. Potencial de Geração de Energia Elétrica

O potencial de geração de energia elétrica foi determinado a partir da multiplicação do volume de metano produzido pelo seu poder calorífico inferior (PCI), e levando-se em conta a eficiência do motor na conversão de biogás em energia elétrica, conforme a equação 1.

$$\text{Energia elétrica} = VB \times \text{PCI} \times \%CH_4 \times E_{fe} \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

Energia elétrica = potencial de energia elétrica gerada (kWh t^{-1}).

VB = Volume de biogás produzido ($\text{m}^3 \text{t}^{-1}$).

Poder Calorífico Inferior – PCI (metano) = $9,268 \text{ kWh m}^3$ (dados: $33,365 \text{ MJ m}^3$ e $1 \text{ MJ} = 0,2278 \text{ kWh}$) (ABNT/NBR 15213, Tabela 5, 2008).

% CH_4 = porcentagem de metano presente na amostra.

Efe = Eficiência de conversão do motor, utilizando 42 % (FNR, 2010).

4.4.2. Energia Térmica

Para obtenção do potencial de geração de energia térmica utilizou-se a equação 2. Esta consiste na multiplicação do volume de biogás produzido, pelo PCI, pela porcentagem de metano presente na amostra e pelo valor da eficiência de queimadores na conversão de biogás em energia térmica.

$$\text{Energia térmica} = \text{VB} \times \text{PCI} \times \% \text{CH}_4 \times \text{Eft} \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

Energia térmica = potencial de energia térmica gerada (kWh t^{-1}).

VB = Volume de biogás produzido ($\text{m}^3 \text{t}^{-1}$).

Poder Calorífico Inferior – PCI (metano) = $9,268 \text{ kWh m}^3$ (dados: $33,365 \text{ MJ m}^3$ e $1 \text{ MJ} = 0,2278 \text{ kWh}$) (ABNT/NBR 15213, Tabela 5, 2008).

% CH_4 = porcentagem de metano presente na amostra.

Eft = Eficiência da caldeira a gás, 90 % (Brasil, 2015).

4.4.3. Biometano

Para obtenção do potencial de geração de biometano utilizou-se a equação 3. Os valores foram obtidos a partir da multiplicação do volume de biogás produzido, pela porcentagem de metano presente na amostra, dividido pela concentração mínima exigida pela norma vigente da ANP.

$$\text{Biometano} = \text{VB} \times \% \text{CH}_4 / \% \text{CH}_4 \text{ANP} \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

Biometano = potencial de geração de biometano ($\text{m}^3 \text{t}^{-1}$).

VB = Volume de biogás produzido ($\text{m}^3 \text{t}^{-1}$).

% CH₄ = porcentagem de metano presente na amostra.

% CH₄ ANP = 90 % - Concentração CH₄ mínima exigida pela Resolução nº 906/2022 ANP (ANP, 2022).

4.4.4. Recuperação de CO₂

Para a determinação do potencial de recuperação de CO₂, obtido durante a purificação do biogás para obtenção do biometano, utilizou-se a equação 4. Sendo que foi considerado para fins de estimativa, a remoção total de CO₂.

$$\text{Recuperação de CO}_2 = \text{Biometano} \times \% \text{CO}_2 \quad \text{‘} \quad \text{(equação 4)}$$

Onde:

Recuperação de CO₂ = potencial de recuperação de CO₂ do biometano ($\text{m}_3 \text{t}^{-1}$)

Biometano = potencial de geração de biometano ($\text{m}^3 \text{t}^{-1}$).

% CO₂ = porcentagem de dióxido de carbono presente no biogás.

4.5. PERSPECTIVAS DO USO DO BIOGÁS EM UMA MICRO CERVEJARIA

A fim de cruzar os dados obtidos neste trabalho com dados reais de geração de resíduos, foi visitada uma microcervejaria na cidade de Foz do Iguaçu-PR, conforme visto na Figura 13. Nesta indústria foram levantados os dados de produção de cerveja, insumos, e geração de resíduos. Com base nessas informações foi possível criar um cenário para o aproveitamento dos resíduos para produção de biogás.

A indústria atua no segmento de fabricação de cerveja viva (chope, não pasteurizado) e cervejas pasteurizadas, produzindo 5 tipos de produtos: chope pilsen, chope weiss (trigo), chope lager, chope escuro e chope vinho. Trata-se de uma micro cervejaria, com produção de 25 mil L por mês da bebida chopp pilsen.

Para o processo de fabricação das bebidas dessa indústria são utilizados em média 3,75 toneladas de malte de cevada, além de água e de outros produtos. A indústria adota que com 15 kg de malte de cevada é possível produzir 100 L de chopp. Atualmente na indústria, os resíduos de

BM são destinados para alimentação animal, onde a empresa doa para terceiros. A indústria informou que o volume de BM gerado é o dobro do utilizado, ou seja, neste caso, são gerados mensalmente cerca de 30 kg a cada 1 hL de cerveja produzida.

Para o processo de fabricação das bebidas, o malte chega em sacas de 25 kg e são moídos para um melhor processamento. Após, são encaminhados para o cozimento, onde há a formação do mosto. Depois desse processo o mosto é filtrado e se tem o BM como resíduo. Durante os processos de fabricação da cerveja são utilizados equipamentos elétricos e uma caldeira a vapor. Essa caldeira é alimentada por óleo diesel, sendo seu consumo de 2.000 mil L por mês. A Figura 14 ilustra como é o processo para obtenção do BM. Importante salientar que foi informado pela empresa somente a quantidade de geração de BM. Outros resíduos não foram considerados nas estimativas a seguir.

Figura 14 – Ilustração do processo de produção do mosto até a geração do bagaço de malte.



Fonte: Próprio autor, (2022).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO E PBM

Para realização do ensaio do PBM, primeiramente foi realizada a caracterização das amostras, por meio dos ensaios de determinação de ST, SV e SF. Após, as amostras foram incubadas para o ensaio de PBM.

As amostras de BM apresentaram diferentes concentrações de sólidos totais (17 a 24 %), conforme pode ser visto na Tabela 4. Esta variação pode estar relacionada com as características de cada malte, com o processo de obtenção do malte e preparo do mosto, tendo em vista que o malte é encaminhado para várias etapas até ser processado. Como um dos objetivos deste trabalho é apresentar o potencial energético dos resíduos, diferentes teores de ST irão favorecer a avaliação de processos para a implantação de projetos de biogás, em função das características dos resíduos que são gerados por cada uma delas.

Tabela 4 – Resultados de ST e SV para as amostras analisadas.

Amostra	% ST	% SV ¹
BM-A	17,2	95,23
BM-B	21,76	96,86
BM-C	22,95	97,88
BM-D	23,32	96,7
BM-E	24,37	95,72
EC	4,66	90,88
CO	13,07	96,37

Dados: ¹base seca.

Com relação aos resultados de ST, observa-se que exceto a amostra EC, todas as outras possuem características sólidas, inclusive a amostra CO que se trata de uma codigestão. Entre as amostras de BM houve uma variação de 41,7 % na concentração de ST, ou seja, o valor ficou entre 17,2 e 24,37 %, sendo que esses valores ficaram próximos aos encontrados por Panjičko et al., (2017), 21,1 %, Oliveira, Alves, e Costa, (2018) que foi de 21,9 % e 20-25 % (FNR, 2010) e abaixo do valor apresentado por Endler, (2021) que foi igual a 24,71 %.

Para a concentração de SV os valores obtidos apresentaram concentrações superiores a 95 % SV. Panjičko et al., (2017) encontraram valores superiores a 96,0 % para a amostra de BM, por sua vez Kavalopoulos et al., (2021) identificaram uma composição de 93,11 %. Para fins de comparação dos resultados de ST e SV, foram escolhidos outros tipos de biomassa/substratos, que possuem características parecidas, resíduos de frutas e hortaliças (RFH) e cama de frango (5º e 6º lotes de produção de aves), os resultados foram de 9,5 % ST e 92,0 % SV (EDWIGES et al., 2018); e 78,0 e 80,9 % ST e 71,0 e 68,4 % SV (DE BONA et al., 2017; CIBIOGÁS, 2020), respectivamente. Destaca-se que quanto maior a concentração de SV contido na amostra para a alimentação diária do biodigestor, maior será sua capacidade de produção de biogás (OLIVEIRA e HIGARASHI, 2006), portanto, os resultados obtidos neste trabalho, demonstram o potencial dos resíduos para a digestão anaeróbia e conversão em biogás.

Os ST das amostras EC e CO foram diferentes das outras amostras em função de suas características líquida e semi-sólida (em razão codigestão utilizar a diluição do BM com a amostra de EC), respectivamente. Em ambas as amostras, a concentração de SV também foi superior a 90,0 %, o que demonstra seu elevado potencial para a conversão de SV em biogás.

Os dados referentes à composição das amostras (em massa) que foram incubadas, inclusive as amostras padrão (inóculo e celulose) são apresentados na Tabela 5. Como as amostras foram incubadas em triplicata, ou seja, em três eudiômetros, os resultados apresentados representam a média junto com o desvio-padrão de cada conjunto. Observa-se que há diferenças nas massas medidas para cada amostra. As massas foram determinadas com base nos SV.

Tabela 5 – Composição média de cada amostra incubada.

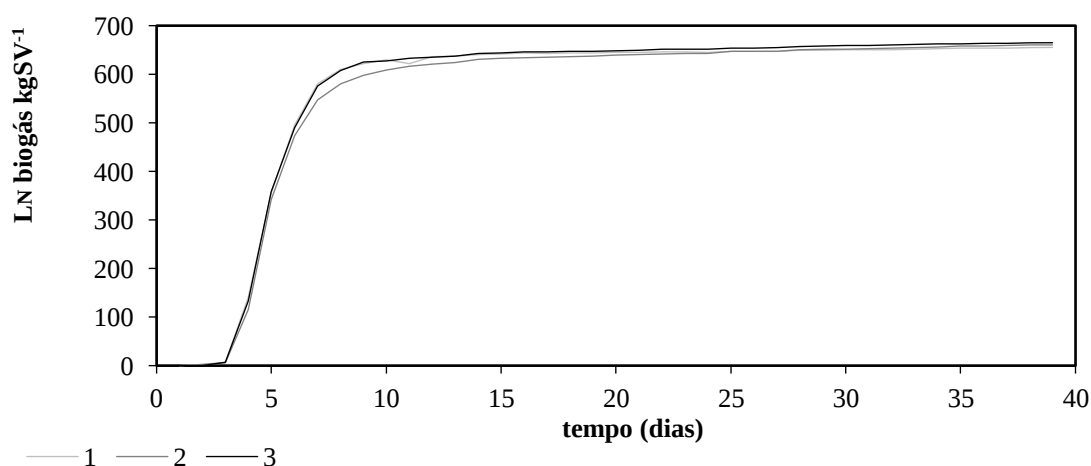
Amostra	Massa (g)	
	Inóculo	Amostra
Inóculo	204,0±2,8	-
Celulose microcristalina	205,8±2,7	1,7±0,0
BM-A	205,9±3,2	10,5±0,3
BM-B	200,3±0,8	8,3±0,3
BM-C	204,4±4,4	8,3±0,1
BM-D	204,4±3,1	7,7±0,1
BM-E	209,5±8,3	7,9±0,1
EC	204,5±3,2	41,2±0,6
		11,9±0,3*
CO	203,9±2,6	12,5±0,8**
		24,4±0,9***

Dados: *valor médio da massa de bagaço de malte; **valor médio da massa do efluente de cervejaria; *** valor médio total da massa utilizada na codigestão.

Fonte: Próprio autor, (2022).

Além das amostras dos resíduos e inóculo puro, uma amostra de celulose microcristalina também foi incubada em triplicata. O objetivo de se incubar essa amostra é assegurar que a atividade biológica do inóculo utilizado é adequada. A celulose possui elevado teor de SV, sua fermentação não ocorre rapidamente, além de ser completamente degradável, ou seja, com essa amostra é possível estimar a capacidade de conversão da substância em biogás pelo inóculo. O potencial de produção esperada de biogás da celulose microcristalina é de 740 a 750 LN kgSV⁻¹, contudo o resultado deve ser de no mínimo 80 % desse valor, ou seja, 592 LN kgSV⁻¹, conforme é previsto na norma VDI 4630 (VDI, 2016; LINS, 2017). Na Figura 15 é apresentado o gráfico com as curvas de produção das amostras de celulose microcristalina, que foi realizada em triplicata.

Figura 15 – Curvas de produção de biogás a partir das amostras 1, 2 e 3 de celulose microcristalina.



Fonte: Próprio autor, (2022).

Observa-se que a curva de produção se manteve normal, atingindo o volume mínimo de 600 LN biogás kgSV⁻¹, superior aos 592 kgSV⁻¹ necessários. Este resultado está de acordo com os obtidos por Lins, (2017) e confirma a capacidade de ação do inóculo na degradação da matéria orgânica.

Com relação aos resultados do ensaio de PBM, antes de apresentar os resultados, foi necessário avaliar estatisticamente se as médias apresentadas das amostras BM-A à BM-E podem ser iguais ou pelo menos uma ser diferente, com isso os resultados para o parâmetro biogás foram submetidos ao teste ANOVA de fator único. O resultado pode ser visto na Tabela 6. Não foram submetidos ao teste as amostras CE e CO pois possuem características e composição diferentes.

Tabela 6 – Análise de variância – ANOVA fator único.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	13076,40	4,00	3269,10	3,98	0,03	3,48
Dentro dos grupos	8204,00	10,00	820,40			
Total	21280,40	14,00				

Legenda: SQ = Soma quadrática; GL = Número de graus de liberdade; MQ = média quadrática; F valor de F calculado; valor-P = valor prova.

Nível de significância de 5%.

Fonte: Próprio autor, (2022).

Para que as médias entre os tratamentos, ou seja, as amostras BM-A, BM-B, BM-C, BM-D e MB-E possam ser consideradas iguais, o valor-P deve ser maior que 0,05 (valor-P > 0,05), para que as médias sejam consideradas diferentes, valor-P menor que 0,05 (valor-P < 0,05). Observa-se na tabela, que o valor encontrado foi 0,03, com isso, conclui-se que as médias entre as amostras analisadas não são iguais, e pelo menos uma é diferente.

Diante disso, na Tabela 7, são apresentados os resultados dos ensaios de PBM em volume normalizado por quilograma de sólidos voláteis (kgSV⁻¹) tanto para biogás, quanto para metano.

Tabela 7 – Resultados obtidos para o ensaio de PBM para as amostras analisadas.

Amostra	Produção de biogás (LN kgSV ⁻¹)	Produção de metano (LN kgSV ⁻¹)	Metano (%)
BM-A	663±9	382±5	58
BM-B	587±22	341±21	58
BM-C	629±17	337±16	54
BM-D	605±41	353±21	58
BM-E	584±39	336±22	57
EC	1.066±13	609±20	57
CO	682±10	415±5	61

Fonte: Próprio autor, (2022).

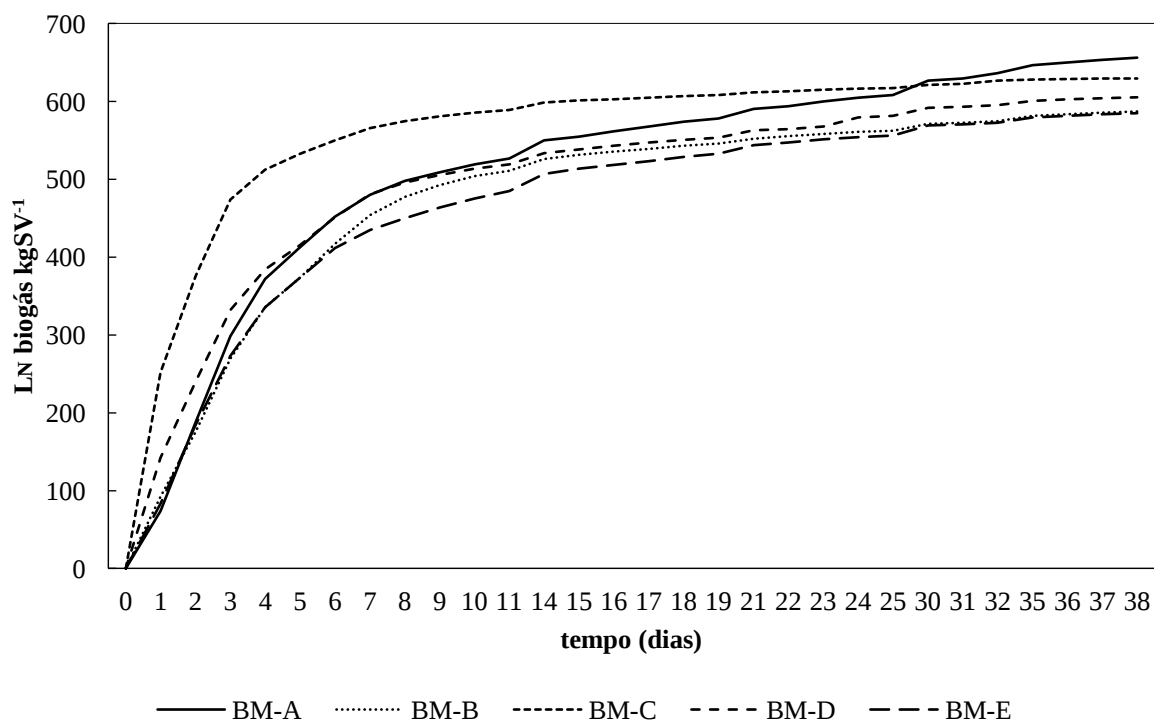
De acordo com a Tabela 7 a variação do volume de biogás produzido entre as amostras analisadas foi de 83 %, considerando o volume da amostra EC. Dentre as amostras de BM, incluindo a amostra submetida à codigestão (amostra CO), essa variação cai para aproximadamente 17 %. Panjičko et al., (2017); Čater et al., (2015); Bochmann, Drosch e Fuchs, (2015) e Endler (2021), encontraram valores inferiores para BM em relação aos obtidos neste trabalho, sendo 392 L kgSV⁻¹

com 61 % de CH_4 a 491 L kgSV^{-1} com 51 % de CH_4 ; 271 L kgSV^{-1} ; 387 L kgSV^{-1} ; e $488,27 \text{ LN kgSV}^{-1}$ de biogás e $265,12 \text{ LN kgSV}^{-1}$ de CH_4 , respectivamente. A fim de comparação, o volume de biogás produzido por uma amostra de dejetos bovinos, que é constituído por material fibroso, é de 297 LN kgSV^{-1} com composição de 58 % de metano (LINS et al., 2019).

Para a produção de metano, em todas as amostras a composição foi superior a 55 %. Isto é considerado satisfatório, tendo em vista que o metano é o gás que possui potencial energético e se enquadra dentro da concentração ideal, conforme discutido no item 2.1.2.

Os ensaios de PBM tiveram duração de 38 dias. O critério utilizado para encerrar o ensaio é o registro do volume de biogás produzido diariamente ser igual ou inferior a 1 % do volume total de biogás acumulado. A duração do ensaio mostra que esse foi o período necessário para que as amostras atingissem seu potencial de produção de biogás e degradação total da amostra. Na Figura 16 são apresentadas as curvas de produção para as amostras de BM analisadas, exceto para as amostras EC e CO, que serão tratadas em seguida.

Figura 16 – Produção acumulada de biogás das amostras BM-A, BM-B, BM-C, BM-D e BM-E analisadas.



Fonte: Próprio autor, (2022).

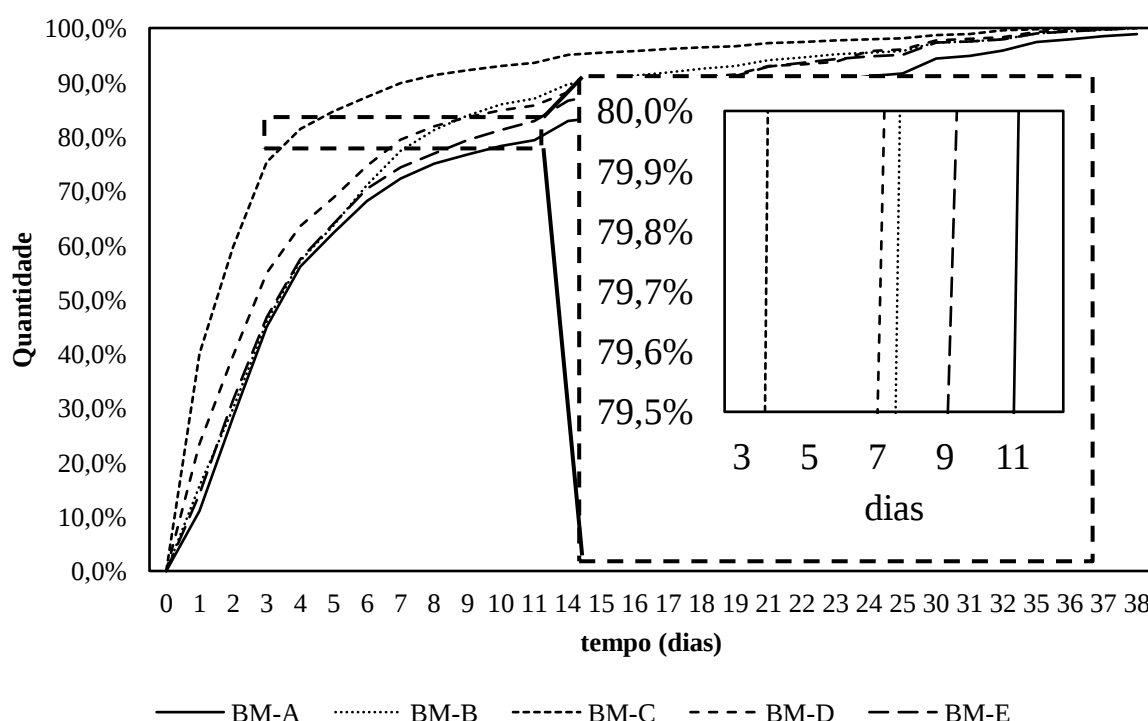
Os resultados apresentados mostram que até o 8º dia de ensaio, houve uma produção maior de biogás, seguindo até o 25º dia com uma produção mais linear, e após o 25º dia o volume estabilizou até 38º dia quando foi encerrado o ensaio, em razão da produção de biogás ser inferior a

1 % do acumulado. Vale ressaltar que as amostras apresentaram comportamento parecidos, com exceção da amostra BM-C que produziu um maior volume de biogás do que as demais.

Não foi observado relação entre o volume de biogás produzido e a quantidade de ST. A maior produção de biogás foi verificada para a amostra BM-A, seguida das amostras BM-C, BM-D, BM-B e BM-E, enquanto a concentração de ST da amostra BM-A até a BM-E é crescente, iniciando em 17,2 até 24,2 % ST, indicando que esta não influenciou a produção do gás.

Um outro ponto que se destaca é apresentado na Figura 17, com indicação do dia em que a amostra atingiu o volume de no mínimo 80 % da produção total de biogás. Conforme visto, o dia foi diferente para cada amostra analisada. A amostra BM-C atingiu no terceiro dia de ensaio, para as amostras BM-D e BM-B foi entre o sexto e oitavo dia, a amostra BM-E no nono dia e a amostra BM-A no décimo primeiro dia.

Figura 17 – Curva com base na porcentagem de produção de biogás das amostras de BM.



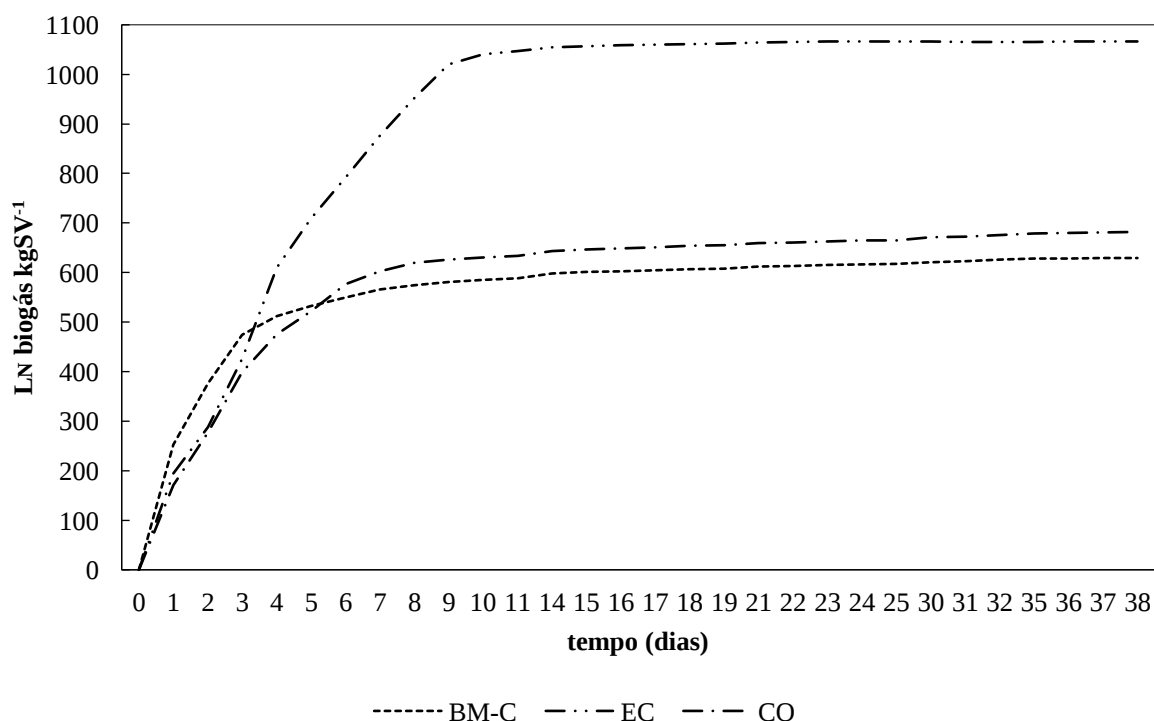
Fonte: Próprio autor, (2022).

Esta informação nos mostra qual a taxa de biodegradabilidade ou biodegradação das amostras. Quanto maior for essa taxa mais rápido será a degradação e assim a estabilidade da amostra, o que pode influenciar na elaboração de projetos e TRH de reatores. Oliveira, Alves e Costa, (2018) estudaram o BM e encontraram a taxa de biodegradação semelhante com a amostra BM-C. Porém, no mesmo estudo, os autores obtiveram 80 % do volume de metano em apenas 2 dias

utilizando amostras de trub, que é caracterizado como fermento morto ou fermento excedente, e são gerados nas etapas de clarificação do mosto e fermentação.

Na Figura 18, são apresentadas as curvas de produção de biogás das amostras analisadas, amostra BM-C, amostra EC e a amostra CO. Os ensaios também tiveram duração de 38 dias e percebe-se uma diferença entre os resultados obtidos.

Figura 18 – Produção acumulada de biogás das amostras BM-C, EC e CO.



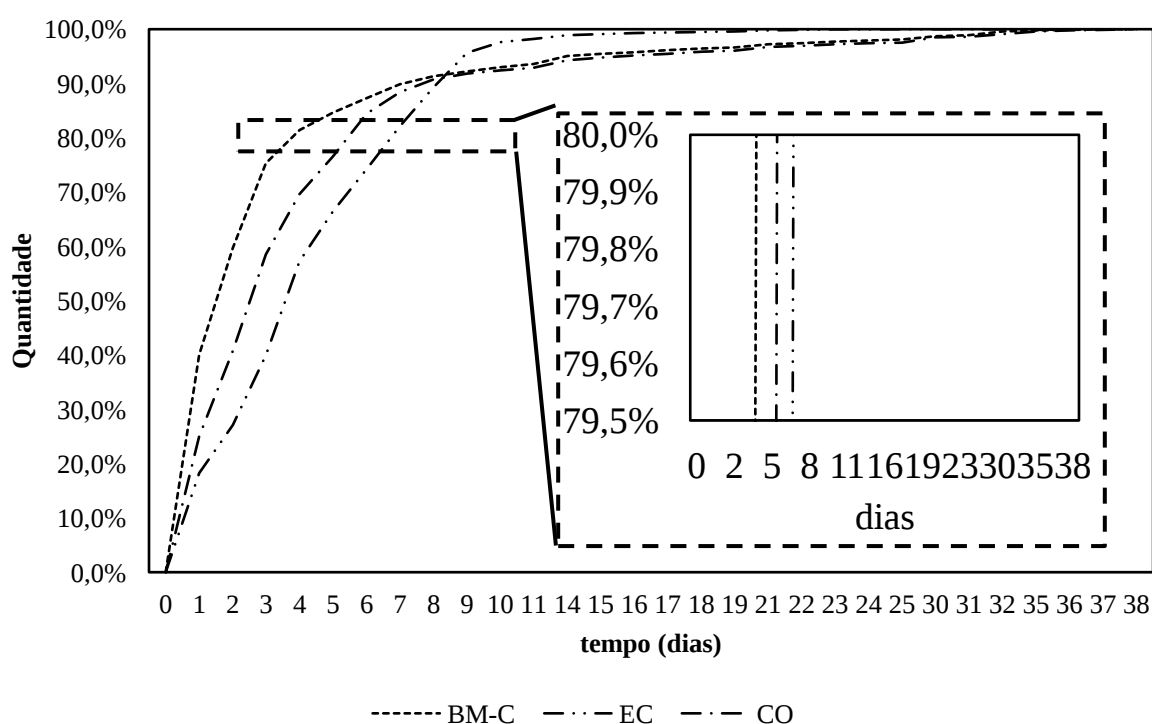
Fonte: Próprio autor, (2022).

Observa-se na figura que houve uma rápida degradação das amostras analisadas, principalmente a amostra EC que é a de efluente de cervejaria, onde aparentemente apresenta uma taxa elevada de conversão em biogás da matéria orgânica. Essa rápida degradação do EC pode estar relacionada com sua característica estrutural diferente do restante das amostras de BM que são constituídas por uma estrutura lignocelulósica, contendo cerca de 17 % de celulose, 28 % de polissacarídeos não celulósicos e 28 % de lignina (MUSSATO, DRAGONE E ROBERTO, 2006). Destaca-se a codigestão (amostra CO) que apresentou volume de biogás, 682 LN kgSV⁻¹, maior do que a amostra BM-C - 629 LN kgSV⁻¹ que é a de BM. Este resultado indica, principalmente para as indústrias que possuem um volume de produção de resíduos menores em relação às indústrias grandes, a possibilidade de realizar o aproveitamento energético por meio da codigestão de resíduos. Oliveira, Alves e Costa (2018), obtiveram resultados significativos com a codigestão, porém utilizando bagaço

de malte com o excedente de levedura (provindo da etapa de fermentação), cerca de 411 L kg⁻¹ de substrato.

Na Figura 19 são apresentados os dias em que as amostras atingiram o volume mínimo de 80 % da produção total de biogás. Esse dado é importante a fim de avaliar a degradabilidade das amostras. Quanto maior for a taxa de degradação maior será a degradabilidade da amostra. A amostra BM-C atingiu no mínimo 80 % do volume no terceiro dia de ensaios, a amostra CO no quinto e a amostra EC no sétimo dia.

Figura 19 – Curva com base na porcentagem de produção de biogás das amostras de BM-C, EC e CO.



Fonte: Próprio autor, (2022).

5.1.1. Composição do Biogás no Ensaio de PBM

Conforme as características e composição do substrato que se está introduzindo no biodigestor/reator anaeróbico, podem ocorrer inibições nas rotas metabólicas (Figura 1) e consequentemente afetar tanto a digestão do substrato como também a produção e qualidade do biogás. O biogás é composto por diversos gases, com a composição majoritária associada ao CH₄ que, em virtude do seu elevado poder calorífico, pode ser utilizado na geração de diversos hubs energéticos, como a energia elétrica, térmica e biometano. Contudo, há outros gases que dependendo de sua concentração podem afetar a composição do biogás e inibir o processo de produção de gás e metano,

resultando assim em um biogás pobre em CH_4 . A composição do biogás está diretamente associada ao tipo de substrato e/ou biomassa residual, conforme destacado por Lins, (2015).

De acordo com Amaral, Steinmetz e Kunz, (2019a), várias podem ser as causas de inibição, temos por exemplo: a concentração de hidrogênio deve ser balanceada, pois os microrganismos metanogênicos necessitam de hidrogênio para produção de metano. Os compostos de enxofre podem causar problemas para o processo anaeróbio, pois causam precipitação de nutrientes que são necessários para o processo em níveis traço, como o ferro, níquel, cobre e molibdênio. E a amônia livre é tóxica às arqueas metanogênicas, pois facilmente se difunde através da membrana celular dos microrganismos.

Assim, é necessário que haja um acompanhamento frequente da qualidade do biogás, não somente para saber como está a concentração de metano, mas também para se ter um entendimento melhor do que pode estar ocorrendo no processo de digestão anaeróbia, e assim tomar decisões afim de melhorar o sistema.

O ensaio de PBM nos apresenta como resultado principal a quantidade de metano que uma determinada amostra pode produzir. Contudo, é comum utilizar equipamentos (analisadores de gases) que medem também outros gases durante o ensaio. Por isso, na Tabela 8 são apresentadas as concentrações dos gases CH_4 , CO_2 , H_2S e NH_3 que foram medidos durante os ensaios.

Tabela 8 – Composição de metano e dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio e amônia durante o ensaio de PBM.

Amostras	% CH_4	% CO_2	ppm H_2S	ppm NH_3
BM-A	52±0,1	37±0,7	122±7,3	60±6
BM-B	50±0,9	34±0,4	92±15	66±11
BM-C	57±0,9	35±0,4	162±26	64±6
BM-D	55±2,8	36±2,2	123±10	68±3
BM-E	50±0,2	36±0,5	104±5	63±3
EC	56±0,4	35±0,7	224±13	93±8
CO	63±0,4	33±0,3	323±5	76±2

Fonte: Próprio autor, (2022).

Observa-se que a concentração de metano, que é o que realmente importa no biogás, está acima de 50 % para todas as amostras avaliadas. Isso quer dizer que, com essa concentração é possível ter o aproveitamento energético do biogás gerado. Além disso, quanto mais CH_4 estiver presente no biogás, melhor será o rendimento do processo e sua aplicação.

Dentre os principais contaminantes que afetam o potencial energético do biogás, destacam-se principalmente o H_2S e NH_3 . O H_2S pode apresentar concentrações que variam de 100 a 10.000 ppm e em casos extremos até 30.000 ppm. Sua presença causa corrosão nos tanques de

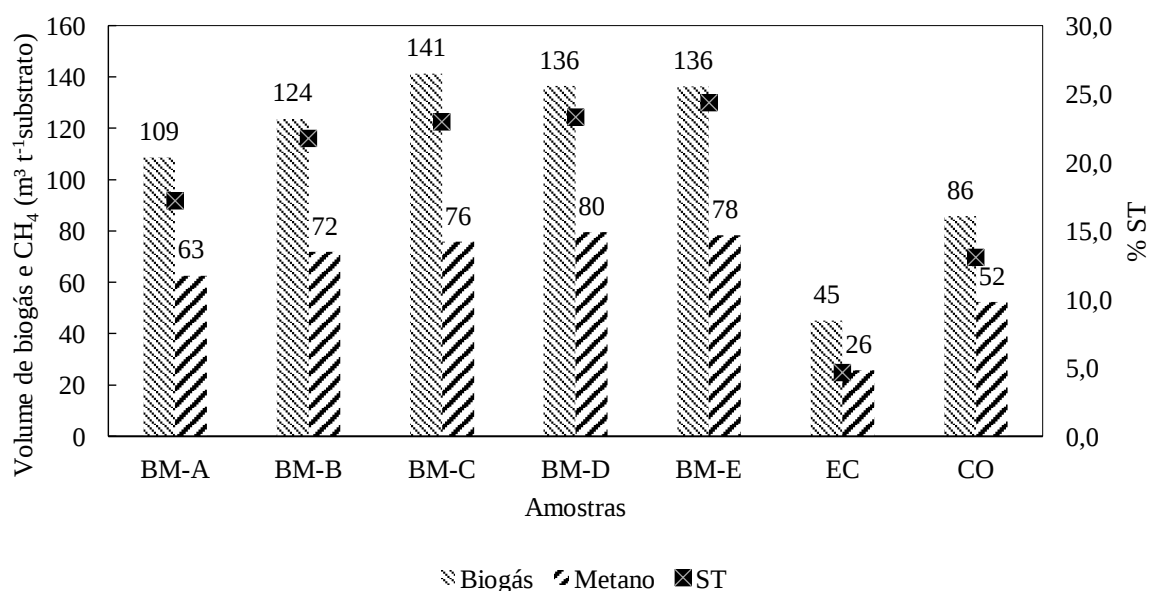
armazenamento, tubulações metálicas e motores de combustão. A NH_3 também é outro contaminante bastante comum, com propriedades corrosivas e tóxicas. Sua concentração pode variar entre 50 e 100 ppm. Quando da combustão incompleta em motores, pode ocorrer a liberação de óxidos de nitrogênio (NO_x) contribuindo assim com a formação de chuva ácida (SILVA e MEZZARI, 2022). No caso dos resultados apresentados acima, as concentrações podem ser consideradas baixas o que não resulta em problemas na aplicação do biogás.

5.2. VOLUME DE BIOGÁS POR AMOSTRA FRESCA

O PBM permite identificar qual o volume máximo de biogás e, consequentemente metano que uma determinada amostra pode produzir. Contudo, deve-se atentar para a maneira de como é feita a interpretação dos resultados dos ensaios, uma vez que a uma leitura errada pode trazer prejuízos durante a implantação do projeto. Os volumes produzidos de biogás em função da massa fresca de amostra se diferenciam do volume de gás por kgSV^{-1} . Isto se dá em razão da quantidade de ST e SV que a amostra possui, contribuindo diretamente com seu potencial energético.

Na Figura 20 são apresentados os volumes de biogás e metano produzidos pelas amostras de BM (A, B, C, D e E), pela amostra de EC e codigestão (F e G, respectivamente), e as concentrações de ST para comparação com o volume obtido. A variação no volume produzido dentre as amostras analisadas foi de 213 % para biogás e 209 % para metano.

Figura 20 – Volume de biogás e metano produzido por tonelada de substrato/ biomassa para todas as amostras analisadas.



Dentre as amostras de BM analisadas, a que mais produziu biogás foi a amostra BM-C, seguida das amostras BM-D, BM-E, BM-B e BM-A. A que produziu maior volume de metano foi a amostra BM-D, seguida da BM-E, BM-C, BM-B e BM-A. Por conta disso, a amostra BM-D foi a que apresentou o maior rendimento na conversão de metano com 59 %. Na Tabela 9 são apresentados valores encontrados por diversos autores que podem ser comparados com os dados deste trabalho.

Tabela 9 – Volumes de biogás e metano produzidos por tonelada de amostras frescas de bagaço de malte.

Valor obtido	Unidade	Referência
105-130	Nm ³ biogás t ⁻¹ substrato	STMELF, (2021)
62-112	Nm ³ metano t ⁻¹ substrato	STMELF, (2021)
379	m ³ biogás t ⁻¹ BM	Kavalapoulos et al., (2020)
60-100	m ³ t ⁻¹ úmida 20 % ST	Akunna, (2015)
62	Nm ³ CH ₄ t ⁻¹ MF	FNR, (2010)

Dados: MF = matéria fresca.

Fonte: Próprio autor, (2022).

Observa-se, comparando os resultados obtidos com os ensaios e a Tabela 9, que os valores deste trabalho foram superiores aos encontrados por FNR, (2010) e Akunna (2015), próximo ao estabelecido por STMELF, (2021), e bem inferior ao obtido por Kavalapoulos et al., (2021) que encontraram um volume de biogás 210 % superior (379 m³ t⁻¹). Essa diferença encontrada pelos pesquisadores no volume de biogás produzido em cada experimento pode estar associada à composição do BM que é diferente em cada país (KAVALOPOULOS et al., 2020), e por conta da moagem do malte que também pode influenciar na concentração de ST.

Vale destacar também a possibilidade de comparação com outros resíduos que são gerados no processo de fabricação da cerveja, como a levedura e a terra diatomácea, que não foram contempladas nesta pesquisa pois seus resultados foram trabalhados na publicação Nota Técnica – Biogás no Setor Cervejeiro, publicado pela Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (ONUDI), a produção de biogás e metano para as amostras de levedura e terra diatomácea, alcançou, respectivamente 148,5 e 94,7 m³ t⁻¹ e 46,9 e 29,6 m³ t⁻¹ (ONUDI, 2022). Esses resultados demonstram que ambos os resíduos, possuem potencial para serem aproveitados energeticamente.

Entre as amostras CE e CO, a que mais produziu biogás e metano foi a amostra CO com cerca de 60 % de CH₄, sendo até superior à BM-D, que obteve 59 % de CH₄, contudo com um valor mais baixo para produção de biogás. Uma indicação dessa diferença entre as amostras de CE e CO pode estar relacionado à adição do BM, onde temos mais material orgânico para digestão. Esse resultado demonstra que embora não haja vantagem na codigestão quando se pensa em grandes

volumes de resíduos, ela não pode ser descartada, pois pode ser uma opção pelas micro e pequenas cervejarias, onde o volume de produção de resíduos é menor.

5.3. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS

5.3.1. Energia Elétrica, Térmica, Biometano e Recuperação de CO₂

O biogás pode ser aproveitado para geração de diversos tipos de energia, como a elétrica, térmica e produção de biometano (que por sua vez pode ser utilizado como combustível veicular ou até mesmo para produção de energia elétrica). Durante sua purificação para produção de biometano, é possível a recuperação de alguns gases como por exemplo o CO₂. São poucas as fontes de energia que possuem esta gama de possibilidades, que consiste na geração de todo tipo de energia e aproveitamento energético, com o consumo que vai desde a indústria até as residências.

Destacando aqui a possibilidade de geração de energia elétrica, o biogás seria mais uma opção para diversificar a matriz energética brasileira, diminuição da dependência de fontes fósseis, e atuando como fonte para minimizar o aumento do valor da energia elétrica em tempos de crise hídrica. Considerando, primeiro, a dependência da energia elétrica gerada em hidrelétricas, e segundo, os resultados de modelos matemáticos, estudos hídricos, redução no índice pluviométrico, e escassez hídrica, conforme aponta o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (ONS, 2021) o governo federal tem lançado ações que visam a redução e economia de forma voluntária do consumo de energia elétrica, a fim de evitar um novo apagão no país. O biogás atende a esses preceitos, produzindo uma energia renovável e constante e em contrapartida transformando um passivo ambiental em ativo energético.

Já com a geração de energia térmica, hoje em muitas regiões do país há escassez de material lenhoso, e por conta disso, o biogás surge como forma de auxiliar na substituição desse importante material, essencial para a indústria. O uso do biogás ao invés da lenha é tão efetivo que o percentual de economia do combustível lenha com o aproveitamento do biogás em uma indústria de fecularia chega até 95 %, ou seja, onde o consumo diário de lenha era de 90 kg, após a implementação do biogás o consumo caiu para 4,5 % (GUIMARÃES, et al., 2017).

E ainda temos o biometano, que é o resultado da purificação do biogás. O biometano trata-se de um gás mais nobre, que possui um poder calorífico maior do que o biogás, em função da remoção de impurezas, umidade e o CO₂. Com o biometano é possível agregar ou substituir os combustíveis líquidos, como a gasolina e o diesel. Possui as mesmas características do gás natural, como poder calorífico, e regulamentação pela ANP para padronização e qualidade.

E a fim de demonstrar o potencial do biogás na geração de energia, na Tabela 10 são apresentados os valores teóricos obtidos para geração de energia elétrica e térmica, bem como a produção do biometano e recuperação de CO₂ por tonelada de amostra fresca, resultantes das equações 1, 2, 3 e 4, respectivamente, em conjunto com os dados dos resíduos analisados neste trabalho.

Tabela 10 – Potencial de geração de energias pelos resíduos da cervejaria.

Amostra	Eletricidade (kWh t⁻¹)	Térmica (kWh t⁻¹)	Biometano (m³ t⁻¹)	Recuperação CO₂ (m³ t⁻¹)
BM-A	248	531	70	25
BM-B	285	611	80	27
BM-C	340	728	84	30
BM-D	320	686	88	32
BM-E	309	662	87	31
EC	109	233	29	10
CO	219	468	58	19

Dados: t = tonelada de amostra fresca.

Fonte: Próprio autor, (2022); Flaticom.com (2021).

Observa-se que a amostra que apresentou o maior potencial na geração de energia elétrica e térmica foi a amostra BM-C, com 340 e 728 kWh t⁻¹, respectivamente. Para biometano e recuperação de CO₂, a amostra BM-D foi a que mais produziu e recuperou, com 82 m³ t⁻¹ e 32 m³ t⁻¹, respectivamente. Os valores de energia elétrica obtidos neste trabalho foram superiores ao encontrado por FNR, (2010), que foi de 231 kWh_{el} t⁻¹ MF. Para as amostras CE e CO a produção de energia elétrica, térmica, biometano e recuperação de CO₂ não ficaram tão próximas aos dados obtidos pelo BM. Porém, ressalta-se que pode ser um caminho para suprir a demanda de energia de muitas cervejarias que possuem a geração de resíduos limitadas ao seu tamanho. Contudo, a fim de se ter um potencial maior dos resíduos gerados na fabricação da cerveja, foi possível utilizar os resultados apresentados no final do item 5.2 com relação à levedura e terra diatomácea, e utilizando as equações 1, 2, 3 e 4, comparar os resultados com os dados na Tabela 10. Essa comparação é feita utilizando as amostras BM-C e BM-D que apresentaram os maiores resultados para energia elétrica, térmica, biometano e recuperação de CO₂ dentre as amostras analisadas, e são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Comparação dos resultados do potencial energético com amostra de levedura e terra diatomácea.

Amostra	Eletrici- dade (kWh t⁻¹)	Térmica (kWh t⁻¹)	Biome- tano (m³ t⁻¹)	Recuperação CO₂ (m³ t⁻¹)	Referência
BM-C	340	728	84	30	Tabela 10
BM-D	320	686	88	32	Tabela 10
Levedura	369	790	105	38	Adaptado de Onudi, (2022)
Terra diatomácea	115	247	33	12	Adaptado de Onudi, (2022)

Fonte: próprio autor, (2022).

Observa-se que o potencial energético do resíduo levedura é maior do que o BM e terra diatomácea, tendo este um potencial também inferior ao BM. Ou seja, podemos observar que o potencial energético provindo da digestão anaeróbia de resíduos gerados na fabricação da cerveja, aumenta. Há uma diversidade de substratos que tornam atrativos o uso dos resíduos para geração de biogás e consequentemente seu aproveitamento energético.

5.3.1.1. Potencial do bagaço de malte no Brasil

O biogás pode ser empregado em diversas operações na indústria cervejeira, como em caldeiras na substituição de óleo diesel e lenha, na geração de eletricidade, em substituição ao óleo diesel pelo biometano, inclusive para redução da demanda de energia elétrica da concessionária. Um outro dado interessante que se pode obter com esses resultados é o potencial do aproveitamento energético do bagaço de malte, que é produzido no Brasil. Utilizando os dados de volume produzido de cerveja e de bagaço de malte, conforme itens 2.2 (14,1 bilhões L) e 2.2.2 (20 kg hL⁻¹), tem-se o seguinte dado: a geração de BM é de 2,82 milhões de toneladas, ou seja, o potencial do Brasil em geração de energia elétrica, térmica, biometano e recuperação de CO₂, pode ser visto na Figura 21.

Figura 21 – Potencial de produção de energia elétrica, térmica e biometano com bagaço de malte no Brasil.

Legenda: Com base nos resultados: (1) amostra BM-C; (2) amostra BM-D.

Fonte: Próprio autor, (2022); Flaticon.com (2021).

Outro dado que é possível explorar é o aproveitamento do CO₂. De acordo com o visualizado na Figura 21, a recuperação de CO₂ com base na produção de BM é de 89×10^6 m³. O consumo de CO₂ na produção de cerveja no Brasil segundo Briggs et al., (2004) e Santos e Ribeiro, (2005) é entre 1,3 e 2,0 kgCO₂ para cada hectolitro de cerveja produzido. Utilizando como média o valor de 1,7 kgCO₂ hL⁻¹, e a produção de cerveja de 14,1 bilhões L, tem-se que foi necessário para a produção de cerveja no Brasil, um montante de 232.650 toneladas de CO₂. Transformando o potencial de CO₂ de metros cúbicos para quilogramas, onde foi considerado a densidade do CO₂ de 1 m³ = 1.836 kg, consta que sua equivalência é de 164.477 toneladas. Ou seja, se o CO₂ usado na fabricação da cerveja, fosse oriundo do processo de purificação do biogás, a produção representaria cerca de 71 % do volume necessário de CO₂. E ainda, com um preço médio do CO₂ liquefeito para uso industrial de R\$ 4,40 kgCO₂ (BRASIL, 2015), o custo evitado pela recuperação de CO₂ seria de R\$ 723 milhões de reais.

Da mesma forma, é possível fazer a equivalência energética de diesel para biometano, (na ótica da substituição veicular) que é de 0,87 L diesel m⁻³ biometano, atingindo um volume de 216.997.923 milhões L. Ao valorar esse volume de diesel, observou-se o preço médio do litro de óleo diesel e do óleo diesel S10, no estado do Paraná, onde o custo médio é de, respectivamente, (R\$ 6,751 e R\$ 6,912)¹ com isso o potencial de biometano representa um custo evitado de R\$ 1,464 e R\$ 1,499 bilhões de reais em óleo diesel.

De forma geral, esses resultados mostram o potencial energético que a indústria cervejeira possui, e como pode-se reduzir os impactos ambientais que são gerados pela indústria, aumentando sua oferta e reduzindo custos com a energia interna e recuperação energética.

Outro ganho que se tem com o uso da digestão anaeróbia para tratamento de resíduos e o biogás como fonte energética, é que eles servem de ferramenta de implantação dos objetivos e metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

5.4. OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Como já descrito no item 2.3 os ODS são uma agenda global da ONU que possuem objetivos e ações específicas para cada área do desenvolvimento humano e sustentável.

¹ Valor médio obtido pelo cálculo dos valores médios de municípios do estado do Paraná. Período consultado: 12/06/2022 à 18/06/2022 para ambos combustíveis: óleo diesel e óleo diesel S10, no sítio: https://preco.anp.gov.br/include/Resumo_Por_Estado_Municipio.asp

Quando se discute o uso energético do biogás, além da sua aplicação na geração de energia elétrica, térmica e produção de biometano, é possível verificar que há também sua inserção no desenvolvimento socioeconômico e ambiental de uma localidade/região.

Ao considerar a digestão anaeróbia e o biogás para, de alguma forma atender os ODS, é possível elencar alguns objetivos que podem facilmente ser destacados, como por exemplo saneamento básico, energia limpa e acessível, cidades e comunidades sustentáveis, consumo e produção responsáveis e até ações contra mudanças globais do clima. Ou seja, a implantação de projetos que contemplam o tratamento de resíduos orgânicos por meio da digestão anaeróbia e aproveitamento energético do biogás, podem melhorar significativamente uma comunidade e/ou região, tanto nos aspectos ambientais como sociais e econômicos.

O uso da digestão anaeróbia e o aproveitamento do biogás, contemplam os seguintes ODS:

- **ODS 6 - Água potável e saneamento:** Este objetivo está relacionado com o manejo sustentável da água e saneamento para todos. A digestão anaeróbia está totalmente inserida neste contexto, pois seu uso garante que as águas residuárias sejam tratadas antes de serem destinadas a corpos hídricos, reduzindo sua carga orgânica e garantido um saneamento adequado à população;
- **ODS 7 – Energia limpa e acessível:** Garantir acesso à energia barata, confiável, sustentável e renovável para todos. O biogás que é gerado durante o processo de digestão do material, é uma fonte renovável e que pode ser incorporada à matriz energética, podendo gerar energia elétrica, térmica e biometano, melhorando assim, consequentemente a eficiência energética;
- **ODS 11 – Cidades e comunidades sustentáveis:** Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis. A implantação de projetos de sistemas anaeróbios pode ser feita tanto nas áreas urbanas como também em áreas rurais, resultando à essas áreas ou comunidades, ambientes sustentáveis;
- **ODS 12 – Consumo e produção responsáveis:** Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis. Neste tópico destacam-se o alcance do manejo ambientalmente saudável dos resíduos e sua redução na geração, por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso. A digestão anaeróbia fica em evidência, pois promove a redução dos resíduos que são descartados na atmosfera, e o biogás como fonte energética, é passível de substituir fontes não renováveis. Seu aproveitamento na geração de energia elétrica e térmica, além da sua conversão em biometano, para abastecimento veicular, garantem o atendimento aos itens desse objetivo de desenvolvimento sustentável;

- **ODS 13 – Ação Contra a mudança global do clima:** Tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos. A aplicação de sistemas anaeróbios e o uso do biogás bruto ou purificado, são importantes ferramentas para a redução de emissões de CO₂eq (CO₂ equivalente), pois auxiliam na redução da emissão do gás metano, ou pela sua captura e/ou pelo seu uso

De forma geral, a produção de biogás aliada ao aproveitamento de resíduos orgânicos, a sua não disposição no meio ambiente e a possibilidade de produzir e alcançar energia e renda para a população, fazem parte dos objetivos a serem alcançados, conforme Figura 12.

5.5. PERSPECTIVAS DO USO DO BIOGÁS EM UMA MICRO CERVEJARIA

A fim de se relacionar os dados obtidos neste trabalho com informações reais da indústria, buscou-se uma cervejaria para uma projeção de implantação de um projeto de digestão anaeróbia para produção e aplicação do biogás.

Diante dessas informações e relacionando-as com os dados de potencial de produção de biogás de amostra fresca do BM (amostra BM-C – que apresentou maior produção de biogás e BM-D – que apresentou maior produção de metano em relação ao biogás), conforme apresentado na Tabela 7 do item 5.1, foi possível agrupar as informações obtidas (Figura 22). O potencial de produção mensal de biogás da indústria, é de 1.023 m³ de biogás e 597 m³ de metano. Nota-se que segundo Kavalopulos et al., (2021) a cada 1 hL de cerveja produzidos são gerados cerca de 20 kg de BM. Contudo, para a estimativa do aproveitamento de biogás para a micro cervejaria estudada, será utilizada o valor de referência que a própria indústria forneceu, que é de 30 kgBM hL⁻¹.

Figura 22 – Dados mensais da estimativa do potencial de produção de biogás com resíduo de Bagaço de Malte.



Fonte: Próprio autor, (2022).

É possível observar na Figura 22 os resultados estimados da aplicação da digestão anaeróbia para tratamento do resíduo de bagaço de malte e consequentemente seu potencial na geração de ativos energéticos além de atendimento nos ODS da ONU.

Com relação ao que atualmente ocorre na empresa a respeito do BM, a empresa doa todo resíduo produzido. Contudo, é uma prática de outras cervejarias realizar a venda do resíduo, principalmente para produtores bovinos que utilizam o material como ração animal. Tendo como base o valor de R\$ 300,00 por tonelada², caso a empresa vendesse o produto, teria uma receita de R\$ 2.250,00 por mês. Entretanto, ao aproveitar o potencial energético do bagaço de malte a indústria têm vários cenários para aplicação e ganhos com biogás por mês, como na energia elétrica, gerando 2,5 MWh equivalente a R\$ 2.358,11, foi considerado uma tarifa de R\$ 0,92584 para o Grupo B Classe B3 – Comercial, Subclasse: demais classes, estabelecido pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL). Há também a energia térmica com a geração de 5.459 kWh ou 4.694.435 kcal (considerando queima direta) e com biometano produzindo 663 m³ com equivalência de 577 L de óleo diesel e aproximadamente R\$ 3.931,93.

Outro importante dado é o potencial de recuperação de CO₂ que a indústria pode fazer, com base nos dados apresentados no item 5.3.1.1, a indústria necessita de 425 kgCO₂ por mês,

² Fonte: <https://www.mfrural.com.br/detalhe/321634/bagaco-de-cevada-alimento-para-gado-leiteiro-gado-de-corte-ovinos-e-caprinos>.

porém, a recuperação mensal de CO₂ por meio da purificação de biometano é de 437 toneladas para o biogás do BM, seu consumo equivale a 0,10 %, da capacidade de produção. Utilizando o valor de R\$ 4,40 kgCO₂ (BRASIL, 2015), o CO₂ recuperado equivale à R\$ 1,9 milhões.

Há necessidade de se avaliar também o tipo de reator necessário para digestão do resíduo. Considerando as características físico-químicas do BM (quantidade de ST, principalmente) seria necessário o uso de um reator do tipo CSTR, conforme descrito na Tabela 1, o qual possibilita o recebimento de substratos com uma carga orgânica maior do que para outros tipos de reatores. Com esse tipo de reator, é possível controlar a temperatura interna e agitação, parâmetros importantes para o bom funcionamento e produção de biogás. Contudo, as análises referentes ao volume e custos de implantação não foram levantados neste trabalho.

Finalmente, cruzando os dados obtidos neste trabalho com os dados de produção e geração de resíduos da microcervejaria, foi possível estimar seu potencial energético. Vale frisar que como os dados obtidos no laboratório são dados teóricos e obtidos em condições controladas, quando aplicados em escala real, podem sofrer alterações, em função do controle da temperatura, agitação, condições climáticas, tipos de reatores, regime de alimentação. Porém são importantes pois nos mostram possíveis cenários para aplicação energética dos resíduos.

6. CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios de PBM do principal resíduo gerado durante a fabricação da cerveja, BM, indicaram potencial de produção de biogás satisfatório, sendo que a amostra BM-C teve efetivamente melhores resultados no aproveitamento do potencial elétrico e térmico, já a amostra BM-D teve melhores resultados para o potencial de biometano e recuperação de CO₂.

Os resultados dos ensaios de PBM com amostra de efluente de cervejaria em codigestão com BM, indicaram que a possibilidade de aproveitamento desses resíduos por parte de micro e pequenas indústrias, onde a geração de cada tipo de resíduo é menor.

A partir dos resultados de todos os ensaios foi possível avaliar o potencial energético na produção de energia elétrica, térmica e biometano, além da recuperação de CO₂ e como a digestão anaeróbia e o biogás podem ser utilizados como ferramentas para implementação de objetivos e metas no âmbito do Programa Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis da ONU.

Foi possível aplicar os resultados teóricos obtidos neste trabalho em uma escala real de produção de cerveja (indústria), apresentado os resultados e possibilidade de ganhos com o resíduo que atualmente não é aproveitado.

Por fim, os resultados apresentados neste trabalho podem vir a servir de parâmetros para que outros agentes, pesquisadores e profissionais, possam avaliar o potencial energético de indústrias de produção de cerveja específicas e assim criar cenários para atender as demandas de energia, tão necessária para o desenvolvimento industrial. E a principal conclusão que se tem é que o bagaço de malte deveria ser tratado, não como resíduo e sim como um ativo para produção de energia, onde resolveria problemas na destinação final do resíduo e também na substituição de fontes não renováveis de combustíveis.

REFERÊNCIAS

- ABRACERVA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERVEJA ARTESANAL. **Mercado da cerveja 2018**. Disponível em: < <https://drive.google.com/file/d/1wMemIL9c8qubr5JITIMvJn3-mn6IyB-9/view>>. Acesso em set. 2021.
- AKUNNA, J. C. Anaerobic treatment of brewery wastes. **Brewing Microbiology**, 407–424, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-331-7.00019-8>>. Acesso em 22 jul. 2019.
- AMARAL, A. C. do., STEINMETZ, R. L. R., KUNZ, A. O processo de biodigestão. In: KUNZ, A., STEINMETZ, R. L. R., AMARAL, A. C. do. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. 1a ed. Concórdia: Sbera: Embrapa, 2019a, 13-26.
- AMARAL, A. C. do., STEINMETZ, R. L. R., KUNZ, A. Parâmetros de importância ao processo de digestão anaeróbia. In: KUNZ, A., STEINMETZ, R. L. R., AMARAL, A. C. do. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. 1a ed. Concórdia: Sbera: Embrapa, 2019b, 27-40.
- AMARAL, A. C. do., STEINMETZ, R. L. R., KUNZ, A. Os biodigestores. In: KUNZ, A., STEINMETZ, R. L. R., AMARAL, A. C. do. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. 1a ed. Concórdia: Sbera: Embrapa, 2019c, 41-68.
- ANDRE, L., PAUSS, A., RIBEIRO, T. Solid anaerobic digestion: State-of-art, scientific and technological hurdles. **Bioresource Technology**. 247, 1027-1037, 2018.
- ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP nº 906 de 18 de novembro de 2022**. Disponível em: < <https://portal.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-anp-n-906-de-18-de-novembro-de-2022-445749990>>. Acesso em 15 ago. 2021.
- APHA (1999). Standard Methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 23th Ed. Washington.
- ARANTES, M. K., ALVES, H. J., SEQUINEL, R., SILVA, E. A. Treatment of brewery wastewater and its use for biological production of methane and hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, 42, 26243–26256, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.206>>. Acesso em 10 jul. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15213: **Cálculo de propriedades físico-químicas a partir da composição**. Rio de Janeiro. 2008.
- BOCHMANN, G., DROSG, B., FUCHS, W. Anaerobic digestion of thermal pretreated brewers's spent grains. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, 34, 1092-1096, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/ep.12110>>. Acesso em 22 ago. 2021.
- BRASIL. Secretária Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**. 1ª ed. Brasília: Ministério das Cidades, 2015.

BRIGGS, D. E. et al., *Brewing: Science and practice*. Boca Raton, FL: Woodhead Publishing Limited, 2004.

ČATER, M. FANEDL, L., MALOVRH, S., LOGAR, R. M. Biogás production from brewery spent grain enhanced by bioaugmentation with hydrolytic anaerobic bacteria. **Bioresource Technology**, 186, 261-269, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.029>>. Acesso em 20 ago. 2021.

CERVBRASIL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CERVEJA. **Dados do setor cervejeiro nacional**. Disponível em: <http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/dados-do-setor/>. Acesso em set. 2021a.

CERVBRASIL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CERVEJA. **Curiosidades**. Disponível em: <http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/curiosidades/>. Acesso em set. 2021b.

CHEN, H. et al., Brewery wastewater treatment using an anaerobic membrane bioreactor. **Energy Conversion and Management**, 105, 321-311, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.bej.2015.10.006>>. Acesso em jul. 2021.

CHERNICHARO, C. A. de L., **Reatores anaeróbios**. 2 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2019.

CIBIOGÁS – CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS - BIOGÁS. **Nota Técnica: N° 001/2020 – Produção de biogás a partir de resíduos da avicultura de corte**. Foz do Iguaçu, janeiro de 2020.

CIBIOGÁS – CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS – Biogás. **Panorama do Biogás no Brasil 2021**. CIBiogás (BRASIL) Relatório Técnico nº 001/2022. Foz do Iguaçu: 2022.

DE BONA, et al., Cama de frango como substrato para a produção de biogás após diferentes períodos de estocagem. In: V Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais, 2017, Foz do Iguaçu-PR, 451-455.

EDWIGES, T. et al., Influence of chemical composition on biochemical methane potential of fruit and vegetable waste. **Waste Management**, 71, 618-625, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.030>>. Acesso em: 20 ago. 2021.

ENDLER, I. A. **Avaliação da produção de biogás a partir de resíduo sólido orgânico da indústria cervejeira**. Monografia. (Engenharia Química) – Universidade do Vale do Taquari – Univates. Lajeado, p. 56. 2021.

ENITAN, A. M., ADEYEMO, J., SWALAHA, F. M. et al., Anaerobic digestion model to enhance treatment of brewery wastewater for biogas production using UASB reactor. **Environ Model Assess**, 20, 673–685, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10666-015-9457-3>>. Acesso em jul. 2021.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **BEN 2021 – Relatório Síntese – Ano base 2020**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>. Acesso em 01 ago. 2021.

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

FNR - FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. **Guia prático do biogás: geração e utilização**. 5a ed. Gülzow: FNR, 2010.

GUIMARÃES, C. E. et al., Avaliação do desempenho ambiental do aproveitamento do biogás em feculárias de mandioca no estado do Paraná. **Desenvolvimento em questão**, n. 39, 171-202, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.21527/2237-6453.2017.39.171-202>>. Acesso em 13 de set. 2022.

IPARDES – Instituto Paranaense de Desenvolvimento econômico e social. **Regiões Geográficas (Lei Estadual 15.825/08) – Paraná**. Disponível em: <http://www.ipardes.pr.gov.br/sites/ipardes/arquivos_restritos/files/documento/2019-09/Regi%C3%B5es%20Geogr%C3%A1ficas%20%28Lei%20Estadual%2015.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2021.

KAVALOPOULOS, M. et al., Sustainable valorisation pathways mitigating environmental pollution from brewers' spent grains. **Environmental Pollution**, 270, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116069>>. Acesso em ago. 2021.

KHAN, I. U., OTHMAN, M. H. D., HASHIM, H., MATSUURA, T., ISMAIL, A. F., REZAEI-DASHTARZHANDI, M., AZELEE, I. W. Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilisation and storage. **Energy Conversion and Management**, 150, 277-294, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.035>>. Acesso em ago. 2021.

KO, J. H., TOWNSEND, T. G., KIM, H. Evaluation of the potential methane yield of industrial wastewaters used in bioreactor landfills. **J. Mater Cycles Waste Manag**, 14, 162-168, 2012.

LINS, L. P.; MITO, J. Y. L.; FERNANDES, D. M. **Composição Média do biogás de diferentes tipos de biomassa**. 2015. Disponível em: <http://www.sbera.org.br/4sigera/files/4.28_JessicaYukiLimaMito.pdf>. Acesso em 11 jul. 2021.

LINS, L. P. **Produção de biogás a partir de resíduos de bovinocultura leiteira por meio da codigestão com macrófitas da espécie Salvinia**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais – UTFPR). Medianeira, 2017.

LINS, et al., Produção de biogás a partir de resíduos de bovinocultura leiteira por meio da codigestão com macrófitas da espécie Salvinia. In: AGUILERA, J. G., ZUFFO, A. M. (org.). **A dinâmica produtiva da Agricultura Sustentável**. 1ª ed. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019. 89-97.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Anuário da cerveja – 2020**. Brasília, 2021.

MUSSATTO, S. I.; DRAGONE, G.; ROBERTO, I. C. Brewers' spent grain: Generation, characteristics and potential applications. **Journal of Cereal Science**, 43, 1–14, 2006.

MUXEL, A. **Fundamentos de fabricação de cerveja – dia de brassagem**. Semana Nacional de Ciência e Tecnologia. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). 2016. Disponível em: <https://amuxel.paginas.ufsc.br/files/2017/03/Brassagem_SNCT_alunos.pdf>. Acesso em 10 de out. 2022.

OLAJIRE, A. A. The brewing industry and environmental challenges. **Journal of Cleaner Production**, 256, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.003>>. Acesso em jul. 2020.

OLIVEIRA, J. V., ALVES, M. M., COSTA, J. C. Biochemical methane potential of brewery by-products. **Clean Technologies and Environmental Policy**, 20, 435-440, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10098-017-1482-2>>. Acesso em jul. 2020.

OLIVEIRA, P. A. V. DE O.; HIGARASHI, M. M. **Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos**. 1a ed. Concórdia, 2006.

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. NT-ONS DGL 0093/2021: Avaliação das condições de atendimento eletroenergético do sistema interligado nacional – Estudo prospectivo agosto a novembro de 2021. Rio de Janeiro: 2021. Disponível em: <http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/NT-ONS%20DGL%200093-2021%20-%20Estudo%20Prospectivo%20Agosto-Novembro_VF%20%281%29.pdf>. Acesso em 28 ago. 2021.

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

PANJIČKO, M., ZUPANČIČA, G. D., FANEDL, L., LOGAR, R. M., TIŠMA, M., ZELIĆ, B. Bio-gas 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**, 166, 519-529, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.197>>. Acesso em ago. 2021.

RAO, A. G., et al., pH regulation of alkaline wastewater with carbon dioxide: a case study of treatment of brewery wastewater in UASB reactor coupled with absorber. **Bioresource Technology**, 98, 2131–2136, 2007.

ROSALIN, J. P., GALLO, F. As características da circulação e distribuição das cervejas especiais no Brasil: usos do território e solidariedades. **Espaço & Geografia**, vol. 24, n. 2, p. 26-49. 2021.

RECOLAST Ambiental. **Biodigestor dejetos**. Disponível em: <<https://www.recolast.com.br/biodigestor-dejetos>>. Acesso em 18 ago. 2021.

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

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. **Oportunidades da cadeia produtiva de biogás para o Estado do Paraná**. Curitiba, 2016.

SILVA, M. L. B. da., MEZZARI, M. P. Tratamento e purificação de biogás. In: KUNZ, A., STEINMETZ, R. L. R., AMARAL, A. C. do. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. 2a ed. Concórdia: Sbera: Embrapa, 2022, 69-93.

SIMATE, G. S. et al., The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art. **Desalination**, 273, 235–247, 2011.

SIQUEIROS, E., et al., Energy recovery from brewery waste: experimental and modelling perspectives. **Energy Procedia**, 161, p. 24-31, 2019.

STMELF - Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.

Biogasausbeuten verschiedener Substrate. Disponível em:

<https://www.lfl.bayern.de/iba/energie/049711/?sel_list=26%2Cb&anker0=substratanker#substratanker>. Acesso em 23 ago. 2021

VDI – VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. Vergärung organischer stoffe – substratcharakterisierung, probenahme – stoffdatenaerhebung, gärversuche. German. 2016.

VERONEZE, M. L., **Avaliação da produção de biogás a partir de água residuária de cervejaria.** Dissertação (Programa de Pós-Graduação de Engenharia em Energia na Agricultura). Cascavel, 2019.