

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOENERGIA

**“POTENCIAL PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA
DIGESTÃO ANAERÓBIA DE SUBSTRATO EXAURIDO DE
COGUMELO”**

Raoní Oliveira de Souza

Dissertação de Mestrado
submetida à Universidade Estadual de
Maringá como parte integrante dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Bioenergia.

Maringá, 2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOENERGIA

**POTENCIAL PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA
DIGESTÃO ANAERÓBIA DE SUBSTRATO EXAURIDO DE
COGUMELO**

Raoní Oliveira de Souza

Engenheiro Ambiental, UNOESTE, 2011.

Orientador: Prof. Dr. Nehemias Curvelo Pereira

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Tait Vareschini

Dissertação de Mestrado
submetida à Universidade Estadual de
Maringá como parte integrante dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Bioenergia.

Maringá, 2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOENERGIA

Esta é a versão final da dissertação de Mestrado apresentada por Raoni Oliveira de Souza perante a Comissão Julgadora do Curso de Mestrado em Bioenergia em 04 de novembro de 2021.

COMISSÃO JULGADORA

Prof. Dr. Nehemias Curvelo Pereira
Orientador/Presidente

Prof. Dr. Daniel Tait Vareschini
Coorientador

Prof. Dr. Laercio Mantovani Frare
Membro

Prof.^a Dr.^a Djeine C. Schiavon Maia
Membro

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a minha Mãe e Pai Silvia Regina (in memoriam) e Paulo Tadeu, Esposa e Filha Mayara e Catarina e Irmãos Caio e Maria Paula, com todo o meu amor, carinho e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, onde sempre busquei apoio espiritual e emocional nos momentos mais difíceis de minha vida, recebendo forças para persistir em meus objetivos, mesmo em momentos de fraqueza.

Agradeço a minha esposa Mayara que me incentivou a iniciar o mestrado e retomar minha profissão a qual já havia abandonado e que suportou a distância durante a gravidez e primeiros anos de minha filha Catarina, se mantendo forte mesmo sozinha. Essa jornada eu comecei graças a você.

Agradeço a minha filha Catarina, a força para persistir nesse sonho veio por você. Obrigado pelo apoio, amor, carinho e companheirismo.

Agradeço a minha mãe Silvia Regina (*in memoriam*) e meu pai Paulo Tadeu, que me educaram para que aqui eu chegasse e sempre me apoiaram em meus objetivos incondicionalmente, me dando suporte, incentivos, conselhos e tudo que eu precisei. Obrigado pelo apoio, amor e carinho.

Agradeço aos meus irmãos Caio e Maria Paula, que me apoiaram de várias formas durante minha vida e em especial esse período e com os quais sempre poderei contar. Obrigado pelo apoio, amor e carinho.

A minha sogra e sogro Jô e César, que deram suporte a minha família durante minha ausência e sempre torceram pelo meu sucesso. Obrigado pelo apoio, amor e carinho.

Aos meus orientadores Nehemias e Daniel, que aceitaram me orientar e o fizeram da forma mais respeitável e profissional possível, que eu nem poderia imaginar, sempre compreensivos e solícitos, eu não poderia pensar que teria tanta sorte em ter orientadores como vocês. Obrigado por tudo, sem vocês isso não seria possível.

Agradeço aos colegas que fiz durante essa jornada, aos amigos da UEL, Guilherme, Francino e Jozomar, e aos companheiros (as) de laboratório da UEM, todas e todos do LPS – Laboratório de Processos de Separação e LGCPA - Laboratório de Gestão, Controle e Preservação Ambiental foram importantes nessa jornada de alguma forma, em especial a Paula e Bruna que acabei criando uma grande parceria.

Agradeço ao órgão de fomento à pesquisa, CAPES, pelo apoio financeiro e à Universidade Estadual de Maringá por tornar possível a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que de forma direta ou indireta contribuiu para a conclusão desse trabalho.

“POTENCIAL PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE SUBSTRATO EXAURIDO DE COGUMELO”

Autor: Raoní Oliveira de Souza

Orientador: Prof. Dr. Nehemias Curvelo Pereira

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Tait Vareschini

RESUMO

Com o uso extensivo de combustíveis fósseis e seus impactos a biosfera, a ciência tem buscado fontes energéticas renováveis alternativas, dentre essas o biogás. O biogás é um biocombustível resultante dos processos de digestão anaeróbia que vem se destacando, devido, a capacidade de ser gerado a partir de uma variedade de substratos orgânicos. Analisando os descartes de resíduos provenientes do setor alimentício pode-se observar que o setor responsável pela produção de cogumelos comestíveis surge como uma potencial geradora de matéria orgânica residual, a qual é denominada substrato exaurido de cogumelo (SEC) e tem uma geração de cerca de 5 kg de resíduo por kg de cogumelo. A partir desta perspectiva, o presente trabalho objetivou avaliar o potencial de produção de biogás a partir da digestão do substrato exaurido de cogumelo como fonte de geração de energia alternativa para produtores regionais. Para análise do potencial fermentativo foram realizadas as caracterizações de composição das matérias primas, bem como os produtos da fermentação, biogás e digestato. A partir dos valores do teor de sólidos totais, fixos e voláteis (ST, STF e STV), nitrogênio e carbono (N e C), relação C/N e lignina, resultando em 94,32%, 15,74%, 84,26%, 1,02%, 38,46% e 37,71 33,00% respectivamente e por fim o Potencial Bioquímico de Metano (PBM) resultando em uma produção de 59 a 89 NLbiogas.kgSTV⁻¹ na 1º batelada e 216,37 a 248,75 NLbiogas.kgSTV⁻¹ na 2º batelada, a qual passou por uma compensação nutricional com adição de ureia como fonte de nitrogênio. Nas caracterizações foram obtidos valores similares aos encontrados na literatura, bem como nos testes PBM. Com isso, concluiu-se que o SEC apresenta baixa produção de biogás, devido suas características podendo ser utilizado como fonte de carbono e/ou codigerido com uma fonte de nitrogênio.

Palavras-chave: bioenergia, biomassa residual, fungos.

“POTENTIAL BIOGAS PRODUCTION FROM ANAEROBIC DIGESTION OF SPENT MUSHROOM SUBSTRATE”

Author: Raoní Oliveira de Souza

Supervisor Prof. Dr. Nehemias Curvelo Pereira

Co-supervisor: Prof. Dr. Daniel Tait Vareschini

ABSTRACT

With the extensive use of fossil fuels and their impacts on the biosphere, science has sought alternative renewable energy sources, including biogas. Biogas is a biofuel resulting from anaerobic digestion processes that stand out due to its ability to be generated from a variety of organic substrates. Analyzing the waste disposal from the food sector, it can be observed that the sector responsible for the production of edible mushrooms appears as a potential generator of residual organic matter, which is called spent mushroom substrate (SMS) and has a generation of about 5 kg of residue per kg of mushroom. From this perspective, the present work aimed to evaluate the potential production of biogas from the digestion of depleted mushroom substrate as a source of alternative energy generation for regional producers. To analyze the fermentation potential, the characterizations of the composition of the raw materials were carried out, as well as the fermentation products, biogas and digestate. From the values of total solids content, fixed and volatile (ST, STF and STV), nitrogen and carbon (N and C), C/N and lignin ratio, resulting in 94,32%, 15,74%, 84,26%, 1,02%, 38,46% and 37,71 33,00% respectively and finally the Biochemical Potential of Methane (PBM) resulting in a production of 59 to 89 NLbiogas.kgSV⁻¹ in the 1st batch and 216,37 to 248,75 NLbiogas.kgSV⁻¹ in the 2nd batch, which underwent nutritional compensation with the addition of urea as a nitrogen source. In the characterizations values similar to those found in the literature were obtained, as well as in the BMP tests. Thus, it was concluded that the SMS has low biogas production, due to its characteristics, it can be used as a carbon source and/or co-digested with a nitrogen source.

KEYWORDS: bioenergy, residual biomass, fungi.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Substrato durante Cultivo	14
Figura 2 - Fluxograma digestão anaeróbia.	21
Figura 3 - Distribuição das plantas de biogás com fim energético em operação no Brasil em 2019.	33
Figura 4 - Fluxograma experimental.	34
Figura 5 - Reator utilizado no preparo do inóculo.....	36
Figura 6 - Interior da estufa.	37
Figura 7 - Distribuição dos pontos de coleta vista superior.	37
Figura 8 - Distribuição dos pontos de coleta vista lateral.	38
Figura 9 - a) resíduos na sacola plástica. b) resíduos separados das sacolas plásticas... 38	
Figura 10 - Mistura dos resíduos para amostragem.....	38
Figura 11 - a) resíduo sendo seco em estufa. b) resíduo processado e selecionado.	39
Figura 12 - Aferição do volume diário de biogás produzido.....	42
Figura 13 - Cromatógrafo Thermo Fisher Scientific Spa, Modelo Série TRECE CG ULTRA.....	44
Figura 14 - Monitoramento ST, STV e STF inóculo.....	55
Figura 15 - Monitoramento AT inóculo	56
Figura 16 - Monitoramento relação AI/AP inóculo.....	56
Figura 17 - Monitoramento AOV inóculo	57
Figura 18 - Gráfico comparativo de redução ST, STV e STF 1° Batelada	59
Figura 19 – Gráfico comparativo remoção NTK e CT 1° Batelada	60
Figura 20 – Gráficos entrada e saída alcalinidade, AOV, AI/AP 1° Batelada	62
Figura 21 – Gráfico comparativo 1°e 2° batelada ST, STV e STF	65
Figura 22 - Gráfico comparativo 1°e 2° batelada CT, NTK.....	67
Figura 23 – Gráfico produção acumulada de biogás PBM.....	70
Figura 24 - Comparação teste PBM 1° e 2° batelada	72
Figura 25 – Gráfico de produção acumulada de biogás PBM 2° Batelada.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Energias renováveis no Brasil 2020.	5
Tabela 2 - Projeção de geração de energia elétrica no Brasil.	6
Tabela 3 - Tipos de energias renováveis no Brasil 2020.	7
Tabela 4 - Bioenergia no Brasil 2020.	8
Tabela 5 - Produção mundial de cogumelo.	12
Tabela 6 - Acréscimo na produção de biogás pós-cultivo.	15
Tabela 7 - Produção de biogás e metano a partir do SEC.	16
Tabela 8 – Requisitos ambientais ótimos das fases da digestão anaeróbia.	24
Tabela 9 - Classificação das faixas de temperatura da digestão anaeróbia.	25
Tabela 10 - Relação AI/AP e características do reator.	27
Tabela 11 - Composição típica do biogás.	30
Tabela 12 – Classificação, por porte, das plantas de biogás com fins energéticos em operação no Brasil em 2019.	32
Tabela 13 - Parâmetros de monitoramento do inóculo.	36
Tabela 14 - Parâmetros e normas técnicas recomendadas para caracterização.	40
Tabela 15 - Concentração STV 1° batelada PBM.	41
Tabela 16 - Concentração STV 2° batelada PBM.	41
Tabela 17 - Caracterização das matérias primas utilizadas no inóculo.	47
Tabela 18 - Caracterização do inóculo 1° batelada.	47
Tabela 19 - Caracterização do inóculo 2° batelada.	48
Tabela 20 - Caracterização do SEC.	49
Tabela 21 – Caracterização do inóculo nos dias de alimentação.	53
Tabela 22 – Caracterização ST, STV e STF 1° Batelada.	58
Tabela 23 - Caracterização NTK, CT 1° Batelada.	59
Tabela 24 – Caracterização pH, Alcalinidade, AI/AP e AOV 1° Batelada.	61
Tabela 25 – Caracterização ST, STV e STF 2° Batelada.	64
Tabela 26 – Caracterização NTK, CT 2° Batelada.	66
Tabela 27 – Caracterização pH, Alcalinidade, AI/AP e AOV 2° Batelada.	68
Tabela 28 - Resultados para PBM de biogás e CH ₄ e concentração de CH ₄ e CO ₂	69
Tabela 29 - PBM de biogás e CH ₄ e concentração de CH ₄ , CO ₂ e H ₂ S.	71
Tabela 30 - Biodegradabilidade do SEC.	73

ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AI – Alcalinidade Intermediária

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANP- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

ANPC – Associação Nacional dos Produtores de Cogumelo

AOV – Ácidos Orgânicos Voláteis

AP – Alcalinidade Parcial

AT – Alcalinidade Total

BMP – Biochemical Methane Potencial

°C – Graus Celsius

C - Carbono

C/N – Relação Carbono/Nitrogênio

CaCO₃ – Carbonato de Cálcio

CH₄ - Metano

Co - Cobalto

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

CO₃²⁻ - Carbonato

DEQ – Departamento de Engenharia Química

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

Fe - Ferro

GN – Gás Natural

GNV – Gás Natural Veicular

H₂ – Hidrogênio

H₂O – Água

H₂S – Ácido Sulfídrico

HCO₃⁻ - Bicarbonato

LGCPA – Laboratório de Gestão, Controle e Preservação Ambiental

LPS – Laboratório de Processos e Separação

MME – Ministério de Minas e Energia

Mo - Molibdênio

MW - Megawatt

N – Nitrogênio

NTK – Nitrogênio Total *Kjeldahl*

N₂ - Nitrogênio

NBR – Norma Técnica

NH₃ - Amônia

NH₄⁺ - Amônio

NH₄⁺N - Azoto

Ni - Níquel

OH- - Hidroxila

P - Fósforo

PBM – Potencial Bioquímico de Metano

PDE - Plano Decenal de Expansão de Energia

pH - Potencial Hidrogeniônico

PIE - Produtor Independente de Energia

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

S - Enxofre

Se - Selênio

SEC – Substrato Exaurido de Cogumelo

SIN – Sistema Integrado Nacional

SPE - Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético

SPG - Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Combustíveis Renováveis

TWh – Terawatt-hora

UEM – Universidade Estadual de Maringá

VDI – Verein Deutscher Ingenieure

W – Tungstênio

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Justificativa.....	2
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo Geral	3
2.2. Objetivos Específicos.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Energias Renováveis	4
3.2. Bioenergia e Biomassa	7
3.3. Cultivo de Cogumelos.....	10
3.3.1. Cultivo de cogumelos comestíveis um breve histórico	10
3.3.2. Comercialização e Produção no Brasil e no Mundo.....	11
3.4. Aproveitamento dos resíduos da produção de cogumelo para produção de biogás.....	13
3.4.1. Substrato exaurido de cogumelo (SEC).....	13
3.4.2. Ação fúngica sob o substrato	13
3.4.3. Produção de biogás a partir do SEC	15
3.5. Digestão Anaeróbia	20
3.5.1. Microbiologia da Digestão Anaeróbia.....	21
3.5.2. Parâmetros de Influência na Digestão Anaeróbia.....	24
3.6. Biogás.....	29
4. MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1. Local dos Experimentos	35
4.2. Obtenção e Preparo das Matérias Primas.....	35
4.2.1. Obtenção e Preparo do Inóculo.....	35
4.2.2. Obtenção e Preparo do SEC	37
4.3. Caracterização das Matérias Primas.....	39
4.4. Ensaio Potencial Bioquímico de Metano (PBM).....	40

4.4.3.	Cálculos PBM.....	43
4.5.	Caracterização do biogás.....	44
4.6.	Potencial teórico da produção de metano e biodegradabilidade do substrato.....	45
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1.	Caracterização das Matérias Primas.....	46
5.1.1.	Inóculo	46
5.1.2.	SEC	49
5.2.	Caracterização dos Reatores.....	52
5.2.1.	Monitoramento inóculo	52
5.2.2.	Análise inicial e final dos reatores 1º Batelada	58
5.2.3.	Análise inicial e final dos reatores 2º Batelada	63
5.3.	Teste do Potencial Bioquímico de Metano (PBM)	69
5.3.1.	1º Batelada.....	69
5.3.2.	2º Batelada.....	71
5.4.	Potencial teórico da produção de metano e biodegradabilidade do substrato.....	73
5.5.	Avaliação do potencial energético da propriedade rural fornecedora do SEC.....	74
	CONCLUSÃO.....	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78

1. INTRODUÇÃO

O uso extensivo de combustíveis não renováveis e seus impactos a biosfera têm gerado grande preocupação as lideranças mundiais, dentre os mais preocupantes estão o efeito estufa e impactos desencadeados por indústrias, automóveis, dentre outras atividades antropogênicas (BURKE; STEPHENS, 2018).

O petróleo e outras fontes não renováveis como carvão mineral e gás natural representam 85,8% da matriz energética mundial e 53,9% da matriz brasileira (MME, 2020). Demonstrando a forte dependência mundial e nacional destas fontes energéticas e a necessidade eminente de desenvolver novas alternativas.

Desse modo, há uma crescente mundial em direção à transição para sistemas de energia renovável, como uma estratégia chave para enfrentar a crise climática, sendo firmados diversos esforços conjunto e acordos globais para redução de gases do efeito estufa como a Cúpula da Terra do Rio de 1992, Protocolo de Quioto, Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) ao Acordo de Paris (BURKE; STEPHENS, 2018; MELE; PAGLIALUNGA; SFORNA, 2020).

No Brasil, as energias renováveis representam um montante de 46,1% da matriz energética nacional, sendo considerado um valor expressivo se comparado a matriz energética mundial (EPE, 2020). O país apresenta essa característica, haja vista, sua disponibilidade de recursos naturais. Entretanto, mesmo havendo uma diversidade relativa de fontes de energias renováveis na matriz energética nacional, a que mais se destaca é a bioenergia representando mais de 65% de toda energia renovável produzida no país (EPE, 2020).

A bioenergia corresponde essencialmente a tecnologias que, direta ou indiretamente aproveitam a energia solar captada por meio da fotossíntese e armazenada como energia química nas biomassas (BONECHI et al., 2017; MCKENDRY, 2002).

A agroindústria é um dos setores mais importantes da economia nacional, gerando expressiva quantidade e biomassa residual, no processamento dos seus produtos para fins alimentícios (cana, milho, arroz, algodão, madeira, carnes) ou energéticos (etanol, biogás, biodiesel) (CONAB, 2020).

O biogás produzido no Brasil tem 464.806.340 Nm³/ano ou 26,13% do seu total originado da agropecuária e indústria, sendo gerada a partir de resíduos da produção animal ou da produção e processamento de produtos alimentícios (CIBIOGÁS, 2020).

Neste contexto, o substrato exaurido de cogumelo (SEC), resíduo gerado no cultivo de cogumelos comestíveis surge como alternativa promissora, pois, o cultivo de cogumelos é realizado tradicionalmente a partir da inoculação dos fungos em resíduos agroindustriais (palha de arroz, palha de trigo, bagaço de cana, entre outros), que ao final são descartados, promovendo uma grande geração desse resíduo, estimasse que para cada 1 kg de cogumelo, 5 kg de resíduo (CÓRDOBA et al., 2016). Atualmente este resíduo vem sendo utilizado como fertilizante, graças a uma possível melhora na estrutura do solo, fornecimento de nutrientes, entre outros benefícios (SHI et al., 2014). Porém, é possível ainda sua utilização na produção de biogás, pois, com a ação dos fungos o substrato utilizado torna mais disponíveis nutrientes que favorecem a digestão anaeróbia, agindo como um pré-tratamento biológico na matéria prima utilizada (BISARIA; VASUDEVAN; BISARIA, 1990).

Nesse sentido, o presente estudo propõe avaliar a digestão anaeróbia do substrato de cogumelo exaurido, verificando seu potencial de produção de biogás, como forma de contribuir com a sustentabilidade da agroindústria e fortalecimento da cultura do cogumelo.

1.1. Justificativa

Com a crescente demanda por combustíveis fósseis e impactos ambientais que a produção e consumo desenfreado vêm trazendo, surgiu a necessidade de buscar novos combustíveis e formas de produção destes. Assim, o aproveitamento das biomassas para fins energéticos se tornou inerente ao desenvolvimento social, econômico e ambiental. No Brasil o cultivo de cogumelos comestíveis apresenta potencial para atender tais requisitos, haja vista, que utiliza resíduos agroindustriais para produção e após o cultivo gera um resíduo com grande potencial energético e fertilizante, deste modo, o presente trabalho busca utilizar substrato pós-cultivo de cogumelo composto por resíduos agroindustriais para produção de energia através de processos anaeróbios em reatores.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar o potencial de produção de biogás a partir da digestão anaeróbia do substrato exaurido de cogumelo (SEC).

2.2. Objetivos Específicos

- Analisar as variáveis nutricionais e os parâmetros físico-químicos que podem interferir no processo de produção de biogás;
- Caracterizar o biogás produzido a partir da quantificação dos gases metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfídrico (H_2S) presentes no biogás;
- Analisar a eficiência da digestão anaeróbia como tratamento dos resíduos a partir dos balanços de massas nos reatores anaeróbios;
- Avaliar a influência de diferentes proporções de Substrato/Inóculo no Potencial Bioquímico de Metano.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Energias Renováveis

Existe grande consenso em relação às consequências do uso extensivo de combustíveis não renováveis e seus impactos a biosfera. Onde os mais preocupantes estão no aumento da temperatura global graças à intensificação do efeito estufa, que em um cenário de emissões mais baixas aumentará 0,3 a 1,7 °C, e 2,6 a 4,8 °C no cenário de emissões mais altas, desencadeando consequências como o aumento do nível do mar, alteração da precipitação e expansão dos desertos, bem como, impactos pontuais desencadeados por industriais, automóveis, dentre outras atividades antropogênicas (BURKE; STEPHENS, 2018; GUPTA; VERMA, 2018).

O petróleo e outras fontes não renováveis como carvão mineral e gás natural representam 85,8% da matriz energética mundial e 53,9% da matriz brasileira (MME, 2020). Demonstrando a forte dependência mundial e nacional destas fontes energéticas e a necessidade eminente de desenvolver novos processos e tecnologias para a redução da mesma.

Neste contexto, há uma tendência de transição para sistemas de energia renovável, como uma estratégia chave para enfrentar a crise climática (BURKE; STEPHENS, 2018). Para tanto, a questão das mudanças climáticas, fez com que a comunidade internacional “pensasse globalmente” na abordagem das questões ambientais. Realizando diversos esforços conjuntos e acordos globais que vêm desde a Cúpula da Terra do Rio de 1992, Protocolo de Quioto, Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) ao Acordo de Paris. Dando a mitigação das concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera atenção crescente tornando-a uma questão de primeira ordem na agenda internacional e para a tomada de decisões em sustentabilidade ambiental (MELE; PAGLIALUNGA; SFORNA, 2020).

As energias renováveis oferecem vantagens em relação as não renováveis, incluindo disponibilidade relativa de recursos, redução na emissão de gases do efeito estufa, diversidade de fontes energéticas, possível descentralização, democratização de recursos energéticos, entre outros (BURKE; STEPHENS, 2018). A concentração de dióxido de carbono aumentou de 280 partes por milhão antes de 1800, para 396 partes por milhão em 2013, o que alterou nosso “ciclo do carbono” que apresentava estabilidade e equilíbrio 200 anos atrás, esse aumento é atribuído, entre outras ações

antropogênicas a combustão de combustíveis fósseis, que adicionou dióxido de carbono à atmosfera mais rápido do que pode ser absorvido pela biosfera terrestre e pelos oceanos (GUPTA; VERMA, 2018).

No mundo as principais fontes renováveis são a energia eólica, solar hidráulica, geotérmica e bioenergia (MME, 2020). No Brasil, são utilizadas todas essas com exceção da geotérmica, com um montante de 46,1% da matriz energética nacional como demonstra a tabela 1, sendo considerado um valor expressivo se comparado a matriz energética mundial, apesar do potencial de crescimento.

Tabela 1 - Energias renováveis no Brasil 2020.

Fonte Energética	%
Biomassa da cana	18,00
Hidráulica	12,40
Lenha e Carvão vegetal	8,70
Lixívia	3,024
Biodiesel	1,652
Eólica	1,624
Outras Biomassas	0,385
Solar	0,196
Biogás	0,091
Gás Industrial de Carvão Vegetal	0,028
Total	46,1

Fonte: EPE (2020)

O Brasil apresenta essa característica, haja vista, sua disponibilidade de recursos naturais e políticas públicas de fomento a produção destas energias, como as resoluções referentes à injeção de energia a rede elétrica de distribuição, a incorporação de etanol e biodiesel a gasolina e diesel, a lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002 que cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), o RenovaBio, o Novo Arranjo de Pesquisa e Inovação (NAPI) Energias Renováveis – Biogás (iniciativa do Estado do Paraná), entre outras medidas.

Foi elaborado ainda o Plano Decenal de Energia (PDE, 2027) um documento informativo elaborado anualmente pela EPE sob as diretrizes e o apoio da equipe da Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético (SPE/MME) e da Secretaria

de Petróleo, Gás Natural e Combustíveis Renováveis (SPG/MME). O objetivo do plano é indicar, as perspectivas, sob a ótica do Governo da expansão do setor de energia no horizonte de dez anos, dentro de uma visão integrada para os diversos energéticos.

Segundo o relatório as projeções para 2027 são de uma produção de 889 TWh de energia elétrica, gerando um aumento de 265 TWh em relação a 2017 como demonstra a tabela 2.

Tabela 2 - Projeção de geração de energia elétrica no Brasil.

Geração Centralizada	2017		2022		2027	
	TWh	%	TWh	%	TWh	%
Hidráulica	404	65	523	69	539	60
Gás Natural	54	9	36	5	56	6
Carvão	15	2	11	1	13	1
Nuclear	16	3	15	2	26	3
Biomassa	25	4	31	4	38	4
Eólica	42	7	58	8	102	11
Solar	1	0	9	1	18	2
Outros	12	2	3	1	4	1
Subtotal	569	91	685	91	796	90
Geração Distribuída	2017		2022		2027	
	TWh	%	TWh	%	TWh	%
Biomassa	26	4	41	5	51	6
Solar	0	0	2	0	12	1
Hidráulica	3	1	5	1	7	1
Eólica	0	0	0	0	2	0
Não renováveis	26	4	18	2	21	2
Subtotal	55	9	67	9	93	10
Total	624	100	753	100	889	100

Fonte: PDE (2017)

Desse montante as projeções para o aumento nas fontes renováveis são de 225 TWh para geração centralizada e 43 TWh para descentralizada totalizando 268 TWh, ou seja, aproximadamente 47% e 148% respectivamente demonstrando a importância que a produção descentralizada representa.

O último relatório do EPE do ano de 2020 mostra as fontes de energias renováveis (para fins elétricos, térmicos e combustíveis) produzidas no Brasil como demonstra a Tabela 3.

Tabela 3 - Tipos de energias renováveis no Brasil 2020.

Fonte Energética	%
Bioenergia	69,30
Hidráulica	26,80
Eólica	3,50
Solar	0,40
Total	100

Fonte: EPE (2020)

Na tabela 3 é demonstrada não só a energia elétrica produzida, mas, a energia global que inclui combustíveis líquidos, sólidos e gasosos, bem como, energia térmica, entre outras. Na tabela 2 que representa a produção de energia elétrica a hidráulica se sobressai, no entanto, em se tratando de energia global a bioenergia se destaca, representando mais de 65% de toda energia renovável produzida no país.

3.2. Bioenergia e Biomassa

A bioenergia era a principal fonte energética antes do século XVIII, com utilização de lenha complementada com o uso de resíduos animais e agrícolas. Com as crescentes demandas da população houve um aumento do consumo de lenha, provocando escassez e elevação de custos além de problemas ambientais (CARIOCA, 1984).

No auge desta crise que a descoberta do carvão despontou como uma solução oportuna, que associada à descoberta do petróleo anos depois, colocou as energias não renováveis como protagonista na matriz energética mundial frente à bioenergia. No entanto, com as preocupações com o aquecimento global, sucessivas crises do petróleo, avanços tecnológicos entre outros fatores, a bioenergia foi trazida de volta como alternativa energética no fim do século XX (CARIOCA, 1984).

No continente sul-americano, o Brasil apresenta o maior potencial de produção de bioenergia, pelo fato de possuir ambientes ecológicos diversificados que propiciaram

o surgimento de florestas naturais de vários tipos, com inúmeras espécies vegetais. Além de grandes áreas agricultáveis, as quais podem ser aproveitadas para produção de culturas com fins energéticos (CARIOCA, 1984).

Desse modo, a bioenergia no Brasil é gerada a partir de várias fontes como demonstra a tabela 4 produzindo a partir dela energia elétrica, térmica e os biocombustíveis (sólidos, líquidos e gasosos).

Tabela 4 - Bioenergia no Brasil 2020.

Fonte Energética	%
Biomassa da cana	18,00
Lenha e Carvão vegetal	8,70
Lixívia	3,024
Biodiesel	1,652
Outras Biomassas	0,385
Biogás	0,091
Gás Industrial de Carvão Vegetal	0,028
Total	31,88

Fonte: EPE (2020)

A bioenergia corresponde a tecnologias que, direta ou indiretamente, aproveitam a biomassa vegetal, que consiste em material vegetal encontrado na natureza de forma espontânea ou cultivada por seres humanos, derivado da reação entre CO₂, água e luz solar, através da fotossíntese, onde a fotossíntese converte a luz solar disponível em energia química que é armazenada nos tecidos vegetais das plantas (BONECHI et al., 2017; MCKENDRY, 2002).

Em geral, a biomassa pode ser também definida como qualquer coisa com uma matriz orgânica. Assim, o termo biomassa identifica uma grande variedade de materiais e matrizes heterogêneas (BONECHI et al., 2017).

Ela tem como composição química principalmente polissacarídeos ou lignina. Os polissacarídeos de alto peso molecular são os principais constituintes da biomassa: celulose e hemicelulose representam 60%-80% e, juntamente com a lignina e uma pequena quantidade de outras extrações constituem o componente estrutural da planta (BONECHI et al., 2017).

As características necessárias para a escolha do tipo de cultura para produção de biomassa podem ser classificadas quanto à disponibilidade de tecnologias para seu cultivo e colheita, relação produtividade/hectare, necessidade de nutrientes, resistência da cultura a pragas e seca, requisitos fertilizantes, além de características como solo, clima (MCKENDRY, 2002).

Diversas culturas vêm sendo propostas e estudadas para agricultura energética, as potenciais incluem, culturas arborizadas, gramíneas, plantas herbáceas (culturas perenes), amido, açúcar e oleaginosas (MCKENDRY, 2002).

Os tipos de biomassas são caracterizados de várias maneiras, entretanto, Mckendry (2002) as define em quatro tipos principais:

- Plantas lenhosas
- Plantas herbáceas/gramíneas
- Plantas aquáticas
- Resíduos

Cada tipo apresenta características próprias que irão definir qual melhor processo de conversão, com base principalmente no teor de umidade. O alto teor de umidade envolve processos de conversão “húmido/aquoso”, com reações biológicas, como fermentação, enquanto, baixo teor de umidade, passa por processos de gaseificação, pirólise ou combustão. A cana de açúcar, é um exemplo de biomassa que pode passar por esses processos, com a produção de etanol e biogás (fermentação), e produção de energia através da cogeração (combustão). No entanto, outros fatores devem ser observados, durante a escolha do processo de conversão, como teores de cinzas, alcalinidade, componentes traços, entre outros que podem afetar negativamente o processo de conversão do combustível (MCKENDRY, 2002; TYAGI et al., 2018).

Os custos e eficiência de conversão também são determinantes para viabilidade da biomassa como cultura energética, dessa forma, os resíduos apresentam grande potencial principalmente graças ao seu baixo custo, o tornando competitivo economicamente como matéria prima se comparado às matérias primas fósseis, os resíduos são ainda formados durante processos agroindustriais energéticos ou alimentícios, podendo agregar valor e reduzir custos as indústrias, tornando passivos em ativos econômicos (MCKENDRY, 2002).

Por fim é importante entender ainda, que cada tipo de conversão gerará um produto, com finalidade diferente, o etanol pode ser usado como combustível veicular,

enquanto, na cogeração o calor gera vapor que é utilizado para geração de energia elétrica, desse modo, o fim que o produto deve ser utilizado é também uma variável a ser analisada no momento de escolher a melhor cultura e modo de conversão da mesma, a diversidade de formas de energia é ainda a melhor alternativa. Nesse sentido algumas biomassas se apresentam promissoras, haja vista, a capacidade de gerar matérias primas, para vários processos de conversão, atuando como o petróleo, gerando diversos produtos (CHERUBINI, 2010; MCKENDRY, 2002).

A biomassa é um importante recurso energético para o planeta, se encontra em todos os continentes, e em abundância em países tropicais como o Brasil. Seu uso para produção de energia e produtos energéticos secundários (combustíveis sólidos, líquidos e gasosos) deve ser promovido, de forma a aproveitar todas as matérias primas produzidas durante o processo, tanto de setores energéticos como alimentícios, ou qualquer outro que gere biomassas capazes de serem convertidas em energia, aumentando a sustentabilidade (ambiental econômica e social) do planeta (BONECHI et al., 2017).

3.3. Cultivo de Cogumelos

Neste capítulo será relatado um breve histórico do cultivo de cogumelos comestíveis e discutido sobre a sua produção e comercialização.

3.3.1. Cultivo de cogumelos comestíveis um breve histórico

Estima-se que o primeiro cultivo de cogumelos tenha ocorrido na China por volta do século VI. A primeira espécie cultivada foi *Auricularia auricula*, aproximadamente no ano de 600, em seguida *Flamulina velutipes*, no ano 800 e a terceira espécie foi o *Lentinula edodes*, o Shitake, no ano de 900 (CARVALHO; SALES-CAMPOS; ANDRADE, 2010).

Na América do Norte os cultivos foram relatados após a guerra civil utilizando áreas úmidas e escuras. No Brasil, os povos indígenas não demonstravam apreço aos cogumelos, fungos na língua nativa dos índios eram carregados de aspectos negativos, com exceção dos Ianomâmis que têm uma lista de nomes para fungos não pejorativos, indicando inclusive o uso de cogumelos para fins medicinais e culinários (BEYER, 2003).

A primeira técnica que os chineses empregaram para produzir cogumelos consistia em encontrar os troncos de árvore caídos na floresta e colocá-los próximos aos troncos frutificados, que, por sua vez, eram expostos ao vento, para capturar os esporos (BEYER, 2003). No Ocidente, França, a produção de cogumelos era realizada em substrato com esterco de cavalos e resíduos úmidos. Acreditava-se que a “semente” dos cogumelos estava presente no esterco dos cavalos. A germinação dos esporos se dava em troncos de árvores, onde eram cobertos com esterco de cavalo e terra, e ali cresciam os cogumelos (HERRERA, 2001).

Com o avanço das técnicas de cultivo de cogumelo, os mesmos pararam de depender apenas das condições naturais para cultivo. Na década de 1930 o cultivo de sementes puras passou a ser adotado, o que representou grande avanço na melhoria do vigor e resistência a pragas e permitiu ainda a seleção progressiva de cogumelos com boas qualidades comerciais (URBEN, 2004).

No final da década de 1970, se popularizou o uso da serragem, do farelo de arroz e de trigo como substratos, bem como, o uso de sacos de plásticos como recipientes. Esta técnica, chamada de cultivo em serragem, resultou em grande aumento da produção contribuindo ainda na redução de impactos ambientais no cultivo de cogumelos (URBEN, 2004).

Por fim, na década de 1980, foi desenvolvida a técnica Jun-Cao que utiliza gramíneas como substrato para o crescimento e produção dos cogumelos. Inicialmente foram testadas espécies selecionadas, cultivando, colhendo e processando cada uma delas, entretanto, descobriu-se que biomassas residuais (palha de arroz, palha de trigo, bagaço de cana, entre outras) poderiam substituí-las, barateando, intensificando e proporcionando maior sustentabilidade a produção (URBEN, 2004).

3.3.2. Comercialização e Produção no Brasil e no Mundo

Bem como as técnicas de cultivo, a comercialização de cogumelos no mundo tem avançado, sendo a primeira produção comercial de cogumelos comestíveis registrada em 1780, realizada por um jardineiro francês em pedreiras subterrâneas de Paris, quando ainda se utilizavam das condições naturais para cultivo (BEYER, 2003).

Em 1894, foi construída no condado de Chester, na Pensilvânia, a primeira estrutura projetada especificamente para o cultivo de cogumelos, hoje conhecida como a capital mundial do cogumelo (BEYER, 2003). Atualmente o maior produtor e

consumidor de cogumelo no mundo é a China seguida de Itália e Estados Unidos. A China produziu 5.008.850 toneladas em 2013, com um consumo médio de 8kg por habitante.

A tabela 5 demonstra a produção dos dez países com maior produção de cogumelo no mundo no ano de 2013, que juntos totalizaram 7.142.807 ton. de produção.

Tabela 5 - Produção mundial de cogumelo.

País	Quantidade (ton.)
China	5.008.850
Itália	761.858
Estados Unidos	390.902
Holanda	304.000
Polônia	198.235
Espanha	148.000
França	115.669
Canadá	78.930
Reino Unido	69.300
Irlanda	67.063

Fonte: Adaptado de ANPC (2013).

No Brasil estima-se 12.000 toneladas de produção anual ‘*in natura*’ que se concentra em propriedades de agricultores familiares e pequenos agricultores. As espécies mais cultivadas e comercializadas no Brasil são *Agaricus bisporus* (Champignon de Paris), *Pleurotus spp* (Shimeji), *Lentinula edodes* (Shiitake) e *Agaricus blazei* (Cogumelo Medicinal), dessas o champignon de Paris se destaca, representando 66% da produção nacional. Os principais produtores estão nos Estados de São Paulo (Mogi das Cruzes, Pinhalzinho, Ibiúna, Sorocaba, Salto, Cabreúva, Jujutiba e Valinhos) e Paraná (Castro, Tijucas dos Sul e Curitiba) (ANPC, 2013).

A cultura do cogumelo como demonstrado é ainda incipiente no Brasil, desta forma, gerar mais alternativas de renda para pequenos produtores e produtores familiares, é de suma importância para o fortalecimento desta cadeia produtiva, além de trazer melhorias de qualidade de vida no campo, entre outros benefícios, como redução da evasão da população mais jovem para cidade, em busca de oportunidades. Com isso

a posterior aplicação dos resíduos na geração de energia renovável e de baixo custo, devido suas características favoráveis se torna uma alternativa promissora para a sustentabilidade de pequenos e médios produtores.

3.4. Aproveitamento dos resíduos da produção de cogumelo para produção de biogás

Neste capítulo será discutido o resíduo gerado durante a produção de cogumelos comestíveis, a ação dos fungos sob este resíduo e estudos que utilizaram este resíduo como matéria prima para produção de biogás.

3.4.1. Substrato exaurido de cogumelo (SEC)

O principal resíduo gerado durante a produção de cogumelos é conhecido como substrato exaurido de cogumelo (SEC) (PÉREZ-CHÁVEZ; MAYER; ALBERTÓ, 2019). Após a colheita do cogumelo o SEC deve ser descartado e substituído. Estima-se que cada 1 kg de cogumelo produz 5 kg de SEC, o que resultaria uma geração anual de 60.000 toneladas de SEC no Brasil (CÓRDOBA et al., 2016). Atualmente o descarte é feito no solo utilizando-o como fertilizante, pois desta forma auxilia melhorando a estrutura do solo, fornecendo nutrientes, bem como, alimento para animais, vermicompostagem, entre outros (SHI et al., 2014).

O SEC é geralmente composto de palha ou serragem, bagaços, gesso, sais minerais e altos níveis de proteínas, enzimas, carboidratos e lipídios, o que dá a este resíduo grande potencial como fonte de bioenergia (LUO et al., 2018).

3.4.2. Ação fúngica sob o substrato

Os fungos são cultivados dentro da biomassa (figura 1), onde secretam enzimas digestivas, ajudando na degradação do substrato, aumentando o tamanho dos poros com a penetração do micélio e quebrando as ligações entre polissacarídeos, lignina e celulose, atuando como pré-tratamento biológico.

Figura 1 - Substrato durante Cultivo

Fonte: Autor, (2021)

As enzimas são envolvidas na lignocelulose depois de excretadas pelos fungos, para digerir externamente a fonte de carbono e absorver nutrientes escassos, como nitrogênio e ferro. Deste modo, os fungos, transformam efetivamente resíduos lignocelulósicos em alimentos e digere o substrato liberando açúcares simples e compostos pequenos. Cada fungo age de forma mais ou menos efetiva no substrato, o *Pleurotus ostreatus* (shimeji-preto) é um dos que tem demonstrado maior efetividade na degradação dos compostos, podendo chegar a 41% lignina, 17% de celulose e 48% de hemicelulose, se comparado ao substrato não tratado (BISARIA; VASUDEVAN; BISARIA, 1990; PÉREZ-CHÁVEZ; MAYER; ALBERTÓ, 2019).

A degradação da lignina é uma característica importante do potencial fúngico para o pré-tratamento do SEC na produção de biocombustíveis, pois, a lignina é limitadora da digestão anaeróbia (KHAN; AHRING, 2019). Os materiais ricos em lignina e lignocelulose levam vários dias para degradação e podem ainda, não ser totalmente hidrolisados resultando em distúrbios no processo de digestão (ATELGE et al., 2020; PAUL; DUTTA, 2018). Além da lignina, o SEC pode enfrentar dificuldades, como uma alta relação carbono/nitrogênio (C/N), acima de 30 devido excesso de carbono, enquanto a faixa ideal está entre 20 a 30, isso pode inibir a produção de biogás devido à falta de nutrientes necessários aos microrganismos, bem como uma alta degradabilidade que pode impactar negativamente a estabilidade da produção de gás resultando em uma baixa produção de metano (LUO et al., 2018; XU et al., 2018).

As alternativas as dificuldades da digestão anaeróbia do SEC devido à falta de nutrientes que o mesmo possa apresentar, pode ser, a adição de nutrientes, ou de outros

resíduos que complementem os déficits do SEC, técnica denominada codigestão anaeróbia (LUO et al., 2018; YAO; DAVID; DAVARITOUCHAE, 2018).

Bisaria, Madan e Mukhopadhyay, (1983) e Bisaria, Vasudevan e Bisaria, (1990), realizaram um estudo onde compararam a produção de biogás antes e depois da ação fúngica de cogumelos comestíveis. Os resultados demonstraram um incremento na produção que alcançou aproximadamente 54%, em palha de arroz e 52% em bagaço de cana, o estudo demonstrou ainda, incremento na concentração de CH₄ presente no biogás, o que pode ser atribuído a um favorecimento da atividade metanogênica, responsável pela produção desse gás no processo de digestão anaeróbia. A seguir a tabela 6 demonstra os resultados obtidos neste trabalho:

Tabela 6 - Acréscimo na produção de biogás pós-cultivo.

Agro resíduo	Prod. de biogás (L.kgST⁻¹)	Concentração de metano (%)	Incremento na prod. de biogás (%)
Palha de arroz	65 ^a – 100 ^b	55 ^a – 60 ^b	54
Bagaço de Cana-de-açúcar	56 ^a – 85 ^b	54 ^a – 58 ^b	52
Palha de Sorgo	61,4 ^a – 81,3 ^b	—	32,4
Palha de Milho	61,3 ^a – 82 ^b	—	33,7
Palha de Trigo	72,3 ^a – 97,3 ^b	—	34,7

^a – pré-cultivo

^b – pós-cultivo

Fonte: Adaptado de BISARIA; VASUDEVAN; BISARIA (1990) e BISARIA; MADAN; MUKHOPADHYAY (1983)

3.4.3. Produção de biogás a partir do SEC

A produção de biogás a partir do SEC pode variar de acordo com o tipo de fungo produtor do cogumelo, substrato utilizado para produção, entre outras variáveis.

A seguir na tabela 7 estão artigos científicos indexados em revistas internacionais, que trazem resultados obtidos por 27 pesquisas para produção de biogás a partir do SEC.

O levantamento desmonstrou variações na produção de biogás e metano significativas, que chegaram a produções 7 vezes maiores para o biogás e 25 vezes maiores para o metano quando os resultados foram comparados, reafirmando a particularidade que cada substrato pode ter, devido as diferentes características que possui e os diferentes fatores que é submetido.

Seis autores aplicaram a codigestão com outros resíduos, com esta medida gerou-se incremento na produção de biogás devido as melhoras no balanço de nutrientes necessarios a digestão, essa alternativa costuma ser recorrente na digestão de outros residuos, principalmente pra melhoria da relação C/N, bem como, melhoria na capacidade tamponamento, diluição de compostos inibidores, entre outros beneficios que esta medida pode trazer (ESPOSITO et al., 2012; LUO et al., 2018).

Temu et al. (2016) aplicaram diversos pré-tratamentos ao SEC, o que também pode ser uma alternativa para gerar incremento na produção de biogás, os tratamento testados foram alcalinos, ácidos e hidrotérmicos com os melhores resultados obtidos no tratamento alcalino, graças a ruptura da estrutura da lignina e uma quebra das ligações entre a lignina e outros polímeros. Tornando nutrientes mais acessíveis aos microorganismo responsáveis pela digestão.

As matérias-primas do SEC também variaram demonstrando os diversos materiais que podem ser utilizados para produção de cogumelo e posterior aproveitamento do biogás.

Tabela 7 - Produção de biogás e metano a partir do SEC

Substrato	Biogás	Metano	Referência Bibliográfica
SEC (Palha de trigo)	291,76 L.kgST ⁻¹	198,61 L.kgST ⁻¹	(MULLER; TROSCH,1986)
SEC (Palha de arroz)	148 L.kgST ⁻¹	NE**	(MEHTA et al., 1990)
SEC (Folhas de castanheiro e feno)	NE**	NE**	(MACKUL'AK et al., 2012)
SEC (Palha de trigo)	270 L.kgST ⁻¹	NE**	(TUYEN et al., 2012)
SEC (Palha de milho)	205 L.kgST ⁻¹	28,6 L.kgST ⁻¹	(TUYEN et al., 2012)
SEC (Palha de arroz)	255 L.kgST ⁻¹	40.9 L.kgST ⁻¹	(TUYEN et al., 2012)

SEC (Folhas de palmeira de óleo)	200 L.kgST ⁻¹	29,0 L.kgST ⁻¹	(TUYEN et al., 2012)
SEC (Bagaço da cana-de-açúcar)	230 L.kgST ⁻¹	33,3 L.kgST ⁻¹	(TUYEN et al., 2012)
SEC (Palha de trigo)	245 L.kgST ⁻¹	NE**	(TUYEN et al., 2012)
SEC (Grãos de milho)	235 L.kgST ⁻¹	33,7 L.kgST ⁻¹	(TUYEN et al., 2012)
SEC (Palha de arroz)	285 L.kgST ⁻¹	42,9 L.kgST ⁻¹	(TUYEN et al., 2012)
SEC (Folha de palmeira de óleo)	180 L.kgST ⁻¹	25,9 L.kgST ⁻¹	(TUYEN et al., 2012)
SEC (Bagaço de Cana-de-açúcar)	140 L.kgST ⁻¹	20,3 L.kgST ⁻¹	(TUYEN et al., 2012)
SEC (Palha de trigo)	135 L.kgST ⁻¹	NE**	(TUYEN et al., 2012)
SEC (Palha de trigo)	402,01 L.kgST ⁻¹	NE**	(COLAVOLPE et al., 2012)
SEC (Palha de Arroz)	340 L.kgST ⁻¹	NE**	(NGUYEN; FRICKE, 2012)
SEC (palha de trigo, turfa, cal, esterco frango e de cavalo)	NE**	67 L.kgSTV ⁻¹	(FENG et al., 2013)
SEC (serragem, farinha de milho e farelo de trigo)	NE**	194 L.kgSTV ⁻¹	(FENG et al., 2013)
SEC (Serragem, farelo de milho e farelo de trigo)	NE**	279 L.kgSTV ⁻¹	(FENG et al., 2013)
SEC (Palha de trigo)	195 L.kgST ⁻¹	NE**	(TUYEN et al., 2013)
SEC (Sabugo de Milho)	195 L.kgST ⁻¹	32,9 L.kgST ⁻¹	(TUYEN et al., 2013)
SEC (Palha de arroz)	260 L.kgST ⁻¹	39,2 L.kgST ⁻¹	(TUYEN et al., 2013)
SEC (Folha de palmeira)	170 L.kgST ⁻¹	27,21 L.kgST ⁻¹	(TUYEN et al., 2013)

de óleo)			
SEC			
(Bagaço de Cana-de-açúcar)	110 L.kgST ⁻¹	18,3 L.kgST ⁻¹	(TUYEN et al., 2013)
SEC			
(Paragrass)	NE**	311 L.kgSTV ⁻¹	(NUCHDANG et al., 2015)
SEC			
(Palha de trigo)	NE**	254 L.kgST ⁻¹	(VAISMARA et al., 2015)
SEC e			
Palha de milho	215 L.kgSTV ⁻¹	98,51 L.kgSTV ⁻¹	(ZHU et al., 2015)
SEC			
(Lascas de madeira)	NE**	160 L.kgSTV ⁻¹	(LIN et al., 2015)
SEC e			
Óleo de Palma	NE**	517 L.KgSTV ⁻¹	(TEMU et al., 2016)
Residual			
SEC			
(Agropyron elongarum)	398,0 L.kgSTV ₁ ⁻¹	169,24 L.kgSTV ⁻¹	(LALAK et al., 2016)
SEC			
(Serragem de Populus)	201,2 L.kgSTV ₁ ⁻¹	112,9 L.kgSTV ⁻¹	(CORDOBA et al., 2016)
SEC			
(Biomassa de madeira de Shorea)	99,95 L.kgST ⁻¹	NE**	(AMIRTA et al., 2016)
SEC			
(Palha de arroz)	367 L.kgSTV ⁻¹	263 L.kg.STV ⁻¹	(MUSTAFA et al., 2016)
SEC			
(Palha de arroz)	353 L.kgSTV ⁻¹	258 L.kgSTV ⁻¹	(MUSTAFA et al., 2017)
SEC			
(Serragem, palha, farelo de trigo, farelo de milho, açúcar, gesso)	328.6 L.kgSTV ₁ ⁻¹	177,69 L.KgSTV ⁻¹	(XIAO et al., 2018)
SEC			
(farelo de arroz, farelo de milho, farelo, cal e resíduo de beterraba)	583,42 L.kg ST ₁ ⁻¹	249,69 L.kgST ⁻¹	(LUO et al., 2018)
SEC			
(bagaço, serragem, farelo, palha de milho, farinha de milho, casca de caroço de algodão e	485,17 L.kgST ⁻¹	204 ,10 L.kgST ⁻¹	(LUO et al., 2018)

feijão) SEC (casca de algodão, sabugo de milho, farelo, farelo de milho e cal) e Esterco Bovino	717,38 L.kgST ⁻¹	286,52 L.kgST ⁻¹	(LUO et al., 2018)
SEC (Palha de milho)	NE**	360,49 L.kgSTV ⁻¹	(WYMAN et al., 2018)
SEC (Grãos de milho)	NE**	300,65 L.kgSTV ⁻¹	(WYMAN et al., 2018)
SEC (Palha de Arroz) e Papel Residual	NE**	250 L.kgSTV ⁻¹	(SETHUMADHAVAN; ARUL, 2018)
SEC (Palha de trigo)	361 L.kgSTV ⁻¹	NE**	(ALBORNOZ et al., 2018)
SEC	310,7 L.kgSTV ⁻¹	195,13 L.kgSTV ⁻¹	(IKEDA et al., 2019)
SEC (Palha de Arroz)	NE**	133,0 L.Kg STV ⁻¹	(HUANG et al., 2019)
SEC (Sabuco de milho, Casco de caroço de algodão, farelo de milho e farelo de trigo) e Esterco Bovino	349,56 L.kgST ⁻¹	157,78 L.KgST ⁻¹	(ZOU et al., 2020)
SEC e Esterco	NE**	457,18 L.kgST ⁻¹	(DUO et al., 2020)
SEC	NE**	75,24 L.kgST ⁻¹	(JIYING et al., 2020)

** NE – Não especificado

Fonte: Adaptado de Pérez; Mayer; Albertó, 2019.

A eficiência dos fungos como pré-tratamento, depende de alguns fatores, como características bioquímicas dos substratos, tipo de fungo utilizado e tempo de ação fúngica (TUYEN et al., 2012). O fungo selecionado pode ainda, apresentar afinidade para degradação de lignina e não celulose ou mesmo o inverso, além de que os compostos excretados pelos fungos podem ter efeitos inibitórios no processo de digestão anaeróbia (PÉREZ-CHÁVEZ; MAYER; ALBERTÓ, 2019; TUYEN et al., 2012).

Os fungos que demonstraram segundo Pérez-Chávez; Mayer; Albertó, (2019), os melhores resultados como pré-tratamento foram os *Lentinula edodes* (Shiitake) e

Pleurotus ostreatus (shimeji), uns dos mais produzidos no Brasil, que não utiliza ainda este resíduo para produção de biogás.

Após a digestão o material digerido, ainda pode ser reciclado, utilizando-o como fertilizante ou co-substrato no próprio cultivo dos cogumelos comestíveis, criando desse modo, um ciclo virtuoso, de produção de grãos, alimentos, bioenergia e fertilizantes naturais agregando valor econômico e tornando a agroindústria autossustentável com poucas perdas, e eficiência de aproveitamento dos materiais disponíveis (PÉREZ-CHÁVEZ; MAYER; ALBERTÓ, 2019)

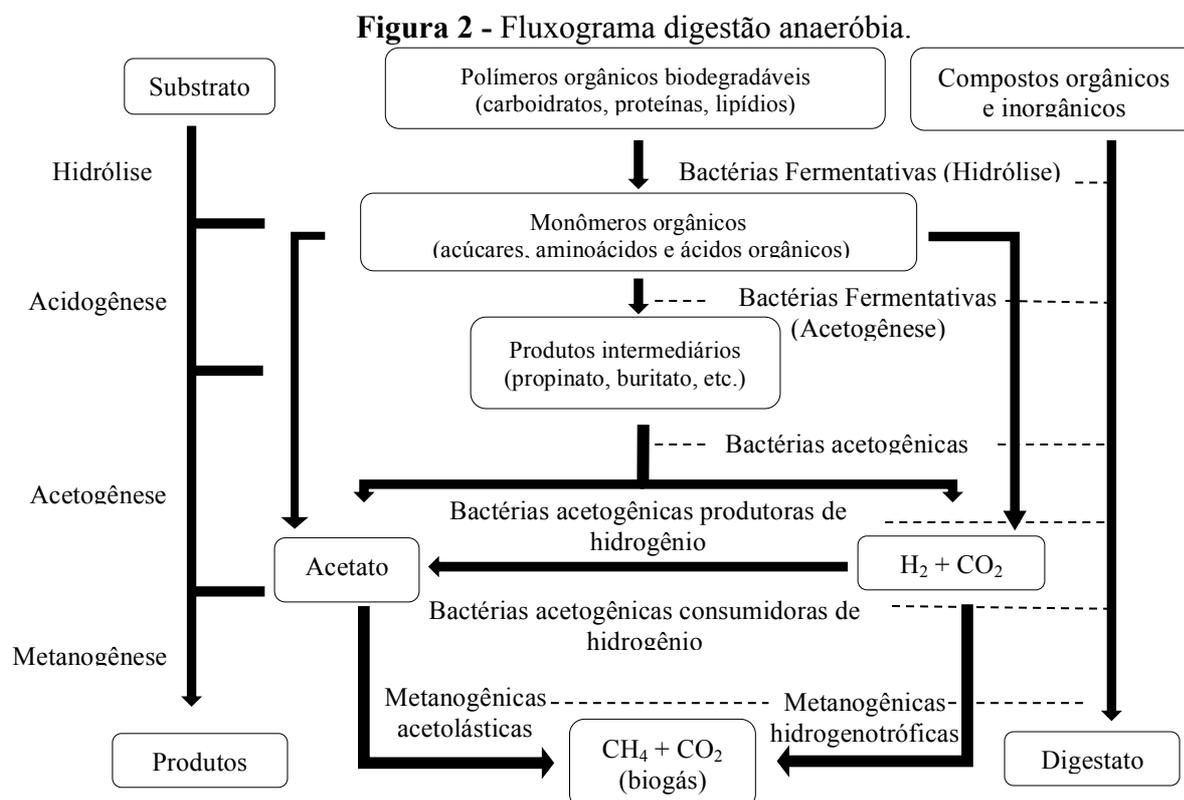
3.5. Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbica consiste em um processo bioquímico realizado pela ação em sintrofia de diversos grupos de microrganismos, responsáveis pela transformação de material orgânico complexo, como carboidratos, proteínas e lipídios em moléculas de menor peso, como açúcares, aminoácidos e ácidos graxos voláteis que são solúveis em água (NEVES et al., 2004; CHERNICHARO, 2007). Como resultado da ação microbiana são gerados dois produtos principais ao final do processo, o biogás, composto geralmente em maiores proporções de metano (CH₄) e o digestato, material digerido com propriedades fertilizantes, que se encontra comumente no estado líquido (CÁRDENAS CLEVES et al., 2016; OWEN et al., 1979).

A princípio todos os compostos orgânicos podem ser degradados pela via anaeróbia, sendo que o processo se mostra mais eficiente e econômico quando os dejetos são facilmente biodegradáveis (CHERNICHARO, 2007). Dessa forma, o emprego do processo anaeróbio vem sendo aplicado há várias décadas, com uma crescente a partir das sucessivas crises de abastecimento de petróleo, aumento na demanda energética mundial e preocupações ambientais, para o tratamento de resíduos agroindustriais e urbanos (KHANAL et al., 2008; RAJESHWARI et al., 2000). Sendo assim, o mesmo será detalhado nos próximos itens, discutindo o funcionamento microbiológico do sistema e fatores que podem influenciar o processo.

3.5.1. Microbiologia da Digestão Anaeróbia

Os grupos de microrganismos responsáveis pela conversão do material orgânico durante a digestão anaeróbia atuam em quatro etapas principais sendo elas hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese representadas na figura 2 e descritas abaixo:



Fonte: Adaptado de CÁRDENAS CLEVES et al. (2016); CHERNICHARO (2007) e KUNZ; STEINMETZ; AMARAL (2019)

Hidrólise: A hidrólise é a primeira etapa do processo de digestão anaeróbia, responsável pela transformação de materiais particulados complexos, ou seja, compostos de alta massa molecular como os lipídios, polissacarídeos e proteínas em substâncias orgânicas mais simples (monômeros) e solúveis, tornando-as disponíveis para as bactérias fermentativas (ANGELIDAKI et al., 2009). Esse processo ocorre de forma lenta, pela ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias hidrolíticas e sofre a influência de diversos fatores que podem afetar o grau e a taxa em que o substrato é hidrolisado (CHERNICHARO, 2007):

- Temperatura operacional do reator;
- Tempo de residência do substrato no reator;
- Composição do substrato;
- Tamanho das partículas;
- pH do meio;
- Concentração de NH_4^+ -N;
- Concentração de produtos da hidrólise.

Esta etapa apresenta grande importância na velocidade global da digestão, pois, quanto maior a complexidade da matéria-prima maior o tempo da hidrólise. Materiais como carboidratos levam poucas horas para degradação, alguns dias para proteínas e lipídios e vários dias para lignina e lignocelulose, que podem ainda, não serem totalmente hidrolisadas se o substrato apresentar alto teor dos mesmos (ATELGE et al., 2020).

Acidogênese: nesta etapa os produtos da hidrólise (monômeros simplificados, açúcares, aminoácidos e ácidos graxos) são consumidos por diferentes bactérias fermentativas anaeróbias e facultativas e transformados em ácidos orgânicos de cadeia curta (ex: ácidos butírico, propiônico e acético), álcoois, óxidos de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, hidrogênio e dióxido de carbono (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019). Ela é realizada por um grande e diverso grupo de bactérias, dentre elas os gêneros mais comuns são: *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus*, *Butyribacterium*, *Propinibacterium*, *Eubacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Pesedomonas*, *Desulfobacter Micrococcus*, *Bacillus* e *Escherichia* (CHERNICHARO, 2007). Os produtos formados na acidogênese podem ser afetados pela concentração de íons de hidrogênio, alterando os tipos de produtos da fermentação, pois, quanto maior a pressão parcial do hidrogênio, menos compostos reduzidos, como acetato, são formados (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

Acetogênese: A terceira etapa da digestão anaeróbia é considerada crítica ao processo, sendo conduzida por bactérias sintróficas acetogênicas, que são responsáveis pela oxidação de compostos orgânicos intermediários como buritato e propinato, em substrato para fase metanogênica, elas são assim denominadas devido à relação de

sintrofia que mantem com as arqueas metanogênicas e as bactérias homoacetogênicas (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019). Nesta etapa durante o consumo dos compostos orgânicos intermediários, há formação de ácido fórmico e acético, com a simultânea produção de hidrogênio e dióxido de carbono (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008). A alta produção de hidrogênio pode resultar na redução do pH do meio, desse modo, é essencial que haja sintrofia entre os microrganismos onde as bactérias homoacetogênicas consomem hidrogênio e gás carbônico para produção de acetato, bem como as Arqueas metanogênicas hidrogenotróficas conforme tratado no item seguinte. O consumo de hidrogênio é essencial para manter o equilíbrio do processo, pois, uma redução de pH pode alterar as condições favoráveis a digestão no reator (CHERNICHARO, 2007; KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

Metanogênese: Esta é a etapa final da conversão anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono, ela ocorre em condições estritamente anaeróbias (CHERNICHARO, 2007). O processo ocorre através da ação das arqueas metanogênicas. Esse grupo é dividido de acordo com suas vias metabólicas sendo elas as acetoclástica e hidrogenotróficas. As arqueas metanogênicas acetoclásticas (ex. *Methanosarcina*) convertem acetato a metano e as arqueas metanogênicas hidrogênótólicas (ex. *Methanobacterium* e *Methanospirillum*) convertem hidrogênio e dióxido de carbono a metano (KUMAR; SAMADDER, 2020). As arqueas metanogênicas acetogênicas representam a conversão de 70% do metano, enquanto as hidrogênótólicas 27 - 30% do metano (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008). No entanto, as hidrogênótólicas desempenham papel fundamental no equilíbrio do processo consumindo o H_2 e reduzindo a pressão de H_2 , tornando as reações efetivadas pelas bactérias acetogênicas possíveis (CHERNICHARO, 2007).

As diferentes fases da digestão anaeróbia funcionam dentro de uma faixa ideal de requisitos ambientais comuns, no entanto, necessitam de diferentes requisitos ambientais para acontecerem de forma otimizada como demonstra a tabela 8:

Tabela 8 – Requisitos ambientais ótimos das fases da digestão anaeróbia.

Parâmetros	Hidrólise/Acidogênese	Metanogênese
Temperatura	25-35°C	Mesofílica: 32-42°C Termofílica: 50-58°C
pH	5,2-6,3	6,7-7,5
Relação C/N	10-45	20-30
Relação C:N:P:S	500:15:5:3	600:15:5:3
Elementos Traço	-	Fe, Cu, Zn, Co, Ni, Mo e Se

Fonte: Adaptado de DEUBLEIN; STEINHAUSER, (2008) e KAINTHOLA; KALAMDHAD; GOUD, (2019)

3.5.2. Parâmetros de Influência na Digestão Anaeróbia

Considerando que o processo de digestão anaeróbia ocorre a partir de processos bioquímicos e microbiológicos, fatores e condições influenciam a digestão de diversas formas. Neste sentido, os parâmetros, temperatura, agitação, tamanho das partículas, pH, ácidos orgânicos voláteis, alcalinidade, amônio e amônia, nutrientes, substrato e inóculo, serão discutidos abaixo.

- **Temperatura**

A temperatura é uma importante variável na digestão anaeróbia, haja vista, que afeta o equilíbrio termodinâmico das reações bioquímicas, estabilidade, taxa de crescimento microbiano, diversidade de microrganismos, biodisponibilidade de metais e rendimento de metano (PANIGRAHI; DUBEY, 2019).

Os digestores anaeróbios são usualmente operados em faixas de temperatura mesófila (20°C - 40°C) e termófila (50°C – 65°C). Em condições mesofílicas a operação apresenta vantagens devido a exigências de energia reduzidas e menor sensibilidade a cargas de choque ou substâncias tóxicas, como amônio e ácidos de cadeia longa (CÁRDENAS CLEVES et al., 2016). Enquanto, em condições termofílicas há, uma solubilidade crescente dos compostos orgânicos, taxas de reação química e

biológica aprimoradas e uma taxa de mortalidade crescente de patógenos (APPELS et al., 2008). Entretanto, a faixa termófila traz também efeitos negativos, como aumento da fração de amônia livre, e ácidos voláteis que desempenha um papel inibidor para os microrganismos (PANIGRAHI; DUBEY, 2019). Além de, uma maior necessidade de energia, sobrenadante de menor qualidade com grandes quantidades de sólidos dissolvidos, maior potencial de odor e uma estabilidade do processo muito menor, o que torna o controle muito sensível para a faixa termofílica em comparação com a mesofílica (FILER; DING; CHANG, 2019).

Existem três classificações de faixas de temperatura para digestão anaeróbia como demonstra a tabela 9 e recomenda-se que independente da temperatura, a mesma se mantenha estável, uma vez que flutuações bruscas e/ou frequentes afetam negativamente as bactérias responsáveis pela digestão anaeróbia (APPELS et al., 2008).

Tabela 9 - Classificação das faixas de temperatura da digestão anaeróbia.

Classificação	Temperatura °C
Psicrófila	5-15
Mesófila	20-40
Termófila	50-65

Fonte: Adaptado de PANIGRAHI; DUBEY, (2019)

- **Agitação**

Uma mistura ideal no digester anaeróbio é essencial para um bom desempenho do processo, ela oferece homogeneidade ao processo mantendo o contanto entre os microrganismo e o substrato, uniformidade de temperatura, além de impedir a formação de camadas superficiais de espuma e a deposição de lodo no fundo do tanque (KARIYAMA; ZHAI; WU, 2018). No entanto, a mistura deve respeitar dois importantes parâmetros, intensidade e duração, pois, pode haver efeitos negativos caso não se respeite alguns limites, por exemplo, uma mistura excessiva pode aumentar a taxa de hidrólise e fermentação (SINGH, 2019).

- **Tamanho das Partículas**

O tamanho pode ser um parâmetro muito importante na taxa de produção de biogás, e produção final de biogás a partir de um determinado substrato (ANGELIDAKI et al., 2009). Pois, com a redução de tamanho de partículas se tem o aumento da superfície específica disponível para o ação microbiana e com isso, uma melhora o processo biológico, outros efeitos foram relatados, como melhoria da produção para substratos com alto teor de fibras e baixa degradabilidade e uma digestão mais rápida (ANGELIDAKI et al., 2009; MATA-ALVAREZ; MACÉ; LLABRÉS, 2000). Desse modo, recomenda-se que o tamanho das partículas permaneçam ≤ 10 mm (RAPOSO et al., 2011)

- **pH, Ácidos Orgânicos Voláteis e Alcalinidade**

O pH exerce uma importante influência no processo de digestão anaeróbia, pois afeta a solubilização de materiais e reações enzimáticas dos microrganismos, além de ser um importante indicativo de um meio sem distúrbios e favorável aos microrganismos (SIDDIQUE; WAHID, 2018). Por exemplo, a queda do pH, favorece a formação de ácido acético e butírico, enquanto, o aumento do valor do pH favorece a formação de ácido acético e propiônico (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

O pH é usualmente mantido entre os limites das arqueas metanogênicas que se mantem entre 6,5 e 7,2, para evitar a predominância das bactérias formadoras de ácidos orgânicos voláteis que podem atuar em uma faixa mais ampla entre pH 4,0 e 8,5 (PANIGRAHI; DUBEY, 2019; RAJESHWARI et al., 2000).

A formação e acúmulo de ácidos orgânicos voláteis tende a reduzir o pH e pode ser um agente inibidor da metanogênese, que em contrapartida produz alcalinidade, na forma de dióxido de carbono, amônia e bicarbonato, tamponando o sistema, ou seja, evitando alterações bruscas de pH (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019; TUROVSKIY; MATHAI, 2006).

O acúmulo de ácidos orgânicos voláteis é uma das grandes problemáticas da digestão anaeróbia, desse modo, algumas soluções como, a adição de microrganismos metanogênicos acetoclásticos, digestão de dois estágios, redução da carga orgânica, adição de sais para a conversão de CO₂ em bicarbonato ou pela adição direta de bicarbonato, adição de reagentes alcalinos (ex: hidróxido de sódio) e adição de materiais nitrogenados (proteína e ureia) podem ser necessárias (AQUINO; CHERNICHARO,

2005; JIANG et al., 2019; KUMAR; SAMADDER, 2020; PANIGRAHI; DUBEY, 2019). Do mesmo modo, monitorar o sistema em relação ao acúmulo de ácidos orgânicos voláteis é de suma importância, uma forma indireta de fazê-lo é pela alcalinidade total (AT), intermediária (AI) e parcial (AP) que consistem, na soma da concentração hidroxila (OH^-), carbonato (CO_3^{2-}) e bicarbonato (HCO_3^-), nos valores equivalentes à alcalinidade por bicarbonato e nos valores equivalentes a alcalinidade vinda dos ácidos voláteis, respectivamente (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

Uma alcalinidade total na faixa de 2000 a 3500 mg/L como CaCO_3 pode manter o pH do meio anaeróbio estável (FILER; DING; CHANG, 2019). Enquanto a relação AI/AP deve variar entre 0,3-0,4 como demonstra a tabela 10.

Tabela 10 - Relação AI/AP e características do reator.

Relação AI/AP	Características do reator
>0,4	Reator em sobrecarga
0,3 – 0,4	Faixa ótima
< 0,3	Reator em subcarga

Fonte: KUNZ; STEINMETZ; AMARAL (2019)

Outra razão que pode ser monitorada é a de ácidos orgânicos voláteis e alcalinidade total (AOV/AT) que demonstra estabilidade no processo, quando o valor está em 0,3, enquanto valores maiores sugerem uma perturbação do processo de estabilidade (CECCHI et al., 2003).

- **Amônio (NH_4^+) e Amônia (NH_3)**

A presença de bicarbonato de amônia, resultado da degradação de materiais ricos em proteínas ou ureia (nitrogenados de forma geral), é comumente benéfico ao processo, pois, o nitrogênio é uma fonte essencial para o crescimento de microrganismo em especial os metanogênicos, além disso, a amônia, como base, neutraliza os ácidos orgânicos produzidos pelas bactérias fermentativas e assim, ajuda a manter condições neutras de pH, essenciais para o crescimento celular (JIANG et al., 2019).

No entanto, a presença de altas concentrações de amônia e amônio desempenha um papel inibidor no processo, pois, pode passar livremente através da membrana dos microrganismos e se difundir na célula, levando ao desequilíbrio de prótons e à

deficiência de potássio. Dessa forma, concentrações de amônia inferiores a 200 mg/L podem ser benéfica a digestão e acima desse valor podem se tornar inibitórias e até tóxicas aos microrganismos em especial os metanogênicos, bem como, o amônio que tem um limite de concentração na ordem de 3000 mg/L (MCCARTY, 1964).

- **Nutrientes**

As características nutricionais da matéria-prima utilizada na digestão anaeróbia interferem de forma direta nos resultados do processo (NGES; BJO, 2012). As quantidades e disponibilidade de macro e micronutrientes presentes trazem efeitos, benéficos, inibitórios e até tóxicos, pois, a fermentação anaeróbica e o crescimento microbiano dependem da disponibilidade e/ou suprimento ideal de nutrientes (DEMIREL; SCHERER, 2011).

Os principais macronutrientes, constituintes da biomassa para digestão anaeróbia são carbono (C), nitrogênio (N), fósforo (P) e enxofre (S), eles desempenham um papel necessário, no crescimento celular, na estrutura da comunidade microbiana, como agentes tampão e produção de biogás, enquanto, os micronutrientes (por exemplo, Fe, Ni, Mo, Co, W e Se) são cofatores cruciais em diversas reações enzimáticas envolvidas na bioquímica da formação de metano (ROMERO-GÜIZA et al., 2016; XU et al., 2018). No processo de digestão, as proporções entre os nutrientes são cruciais, especialmente a relação C/N, que está relatada nas proporções 20:1 e 30:1 (XU et al., 2018). Dessa forma, vários métodos como, a adição de ureia, mistura de vários resíduos (codigestão), entre outros têm sido explorados como meio de ajustar a relação C/N no sistema e melhorar a produção de biogás (ESPOSITO et al., 2012; YAO; DAVID; DAVARITOUCHAE, 2018; ZHANG; LOH; ZHANG, 2019).

- **Pré-tratamento do Substrato**

Os substratos disponíveis para a digestão anaeróbia têm propriedades variadas e digestibilidade diferente, o emprego do pré-tratamento apropriado específico para substratos é importante para aumentar a digestibilidade e a produção de biogás (RAJ et al., 2017). Os materiais ricos em lignina e lignocelulose levam vários dias para degradação e podem ainda, não ser totalmente hidrolisados se tornando o material mais problemático para digestão anaeróbia, no entanto, pode ser um substrato com potencial

após o pré-tratamento adequado para a produção de biogás (ATELGE et al., 2020; PAUL; DUTTA, 2018).

Os pré-tratamentos podem ser classificados em químico, físico e biológico:

Químico: O pré-tratamento químico é definido como a destruição dos compostos orgânicos por meio de fortes ácidos, alcalinizantes ou oxidantes. A digestão anaeróbia geralmente requer um ajuste do pH, aumentando a alcalinidade, portanto, o tratamento com álcalis acaba sendo o método preferido de pré-tratamento químico (JAIN et al., 2015)

Físico: O pré-tratamento físico consiste em uma técnica para alterar a estrutura da biomassa por meios mecânicos (ex: moagem, extrusão, tratamento de irradiação, tratamento ultrassônico), térmicos (ex: explosão de vapor), termal (com água quente) entre outros (YU et al., 2019). Ele favorece a quebra da parede celular e da camada superficial de cera da biomassa e aumenta a área de contato entre o substrato e os microrganismos anaeróbicos, o que ajuda a digestão e rendimento de metano (AHMAD et al., 2018).

Biológico: O pré tratamento biológico consiste na aplicação de fungos, enzimas, entre outros na biomassa. Ele pode reduzir o tempo de fermentação anaeróbica, melhorar a digestibilidade da matéria orgânica e a taxa de produção de gás, além de mostrar um pré-tratamento menos oneroso (JAIN et al., 2015; YU et al., 2019). Em materiais ricos em lignina os microrganismos atuam na sua degradação em substância simples e fácil de digerir para bactérias anaeróbicas (KHAN; AHRING, 2019). A chave desta técnica é buscar espécies de microrganismos com forte capacidade de degradação da lignina e determinar a condição de fermentação apropriada (PÉREZ-CHÁVEZ; MAYER; ALBERTÓ, 2019). Várias espécies de fungos podem ser usadas no pré-tratamento da biomassa para digestão anaeróbica, com destaque para os de podridão branca e marrom e eles podem aumentar o rendimento de metano em 5–15% em relação a biomassa sem tratamento (KHAN; AHRING, 2019; YU et al., 2019).

3.6. Biogás

O biogás é uma composição de diferentes gases, majoritariamente composto por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de menores frações de água (H_2O), amônia (NH_3), hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2), monóxido de carbono (CO) e sulfeto de hidrogênio (H_2S). A seguir a tabela 11 demonstra as proporções de cada gás presente no biogás:

Tabela 11 - Composição típica do biogás.

Componentes	Símbolo	Concentração (Vol/%)
Metano	CH_4	50-75
Dióxido de Carbono	CO_2	25-40
Água	H_2O	Variável
Sulfeto de Hidrogênio	H_2S	0,1 a 0,5
Nitrogênio	N_2	0,5 a 2,5
Oxigênio	O_2	0,1 a 1
Hidrogênio	H_2	1 a 3
Amônia	NH_3	0,1 a 0,5
Monóxido de Carbono	CO	0 a 0,1

Fonte: CIBIOGÁS (2018)

O grande interesse no biogás é devido sua grande concentração de metano, gás com alto poder calorífico, que pode substituir carvão, petróleo e o gás natural, além de contribuir para redução de emissões de gases do efeito estufa e transformar passivos ambientais em ativos econômicos (NEVZOROVA; KUTCHEROV, 2019).

O aproveitamento energético do biogás no Brasil é regulamentado conforme o uso que será dado a ele. No caso da utilização para a geração de energia elétrica, devem ser observadas as definições e obrigações estabelecidas na Lei nº 9.074/1995, que define o marco regulatório do setor elétrico e estabelece as formas de comercialização de energia elétrica no Sistema Integrado Nacional (SIN). A lei em questão também estabeleceu a figura do Produtor Independente de Energia (PIE), tornando possível uma empresa privada produzir e comercializar energia elétrica, bem como a figura do Autoprodutor, que é um titular de concessão, permissão ou autorização para produzir energia elétrica para seu uso exclusivo, podendo, mediante autorização da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), comercializar seus excedentes de energia. Além

desse, a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 possibilita ainda que as centrais geradoras com potência instalada menor ou igual a 100kW (microgeração distribuída) ou com potência instalada superior a 100kW e menor ou igual a 1MW (minigeração distribuída) injetem a energia gerada à distribuidora local, para compensação no seu consumo de energia elétrica, podendo ainda compensar o consumo de outra unidade consumidora de mesma titularidade da unidade em que os créditos foram gerados, nesses casos não é possível a venda da energia excedente.

Caso a utilização do biogás seja para a injeção na rede de GN ou utilização/comercialização como GNV, devem ser observadas as regulamentações estabelecidas pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e pela ANP. As Resoluções ANP nº 08/15 e 685/17 definem as especificações e o controle de qualidade do biometano para biogás, sendo a ANP nº 08/15 para biogás produzido a partir de resíduos agroindustriais e a 685/17 de aterros e ETEs, as regras de uso, veta a comercialização de biometano que não atenda às especificações definidas, autoriza a injeção na rede de GN o biometano e define as normas técnicas aplicáveis. Já a Resolução ANP nº 23/12 estabelece as regras envolvidas no uso dos biocombustíveis não especificados, sendo o biogás considerado nesta norma, definindo que, para um consumo mensal experimental ou específico superior a 10.000Nm³/mês, deverá ser obtida autorização prévia da ANP, bem como definem as condições de aceitação do biometano como biocombustível veicular. A ANP define, ainda, as condições para comercialização do GNV, as quais são estabelecidas pela resolução nº 41/13 e portaria nº 32/01.

No Brasil a produção de biogás é ainda incipiente, e por um longo período (1970-2010) foi negligenciada, quando em 2010 passou a ser utilizado na geração energética despertando interesse na agroindústria, empresas e cidades (FREITAS et al., 2019). As plantas se concentram no sul e sudeste do país, são utilizadas na maior parte para geração de energia elétrica e têm aproximadamente 84% de toda a eletricidade produzida de instalações urbanas de resíduos sólidos (CIBIOGÁS, 2020).

Em 2019 o Brasil contabilizou 548 plantas de biogás, sendo que destas 521 encontram-se em operação para fins energéticos no Brasil, produzindo um total de 1,3 bilhões de metros cúbicos ano, representando 95% das plantas identificadas (CIBIOGÁS, 2020).

Deste total em operação 78% são classificadas como de pequeno porte, ou seja, produzem até 1.000.000 Nm³ de biogás por ano, porém, essas plantas representam

apenas 9% do volume total de biogás produzido. O maior volume de biogás se concentra nas plantas de grande porte alcançando 77%, mesmo sendo a categoria com menor número de plantas, representando apenas 6% do total brasileiro (CIBIOGÁS, 2020).

A tabela 12 demonstra a classificação das plantas de biogás no Brasil em relação ao porte das mesmas (pequeno, médio e grande porte):

Tabela 12 – Classificação, por porte, das plantas de biogás com fins energéticos em operação no Brasil em 2019.

Porte das plantas	Quantidade de plantas		Volume de biogás (Nm³/ano)	
<i>Pequeno porte</i>	408	78%	125.788.989	9%
< 500.000 Nm ³ /ano - Porte 1	337	65%	77.625.748	6%
500.001 a 1.000.000 Nm ³ /ano - Porte 2	71	13%	48.163.241	3%
<i>Médio porte</i>	83	16%	189.729.266	14%
1.000.001 a 3.500.000 Nm ³ /ano - Porte 3	64	12%	111.901.212	8%
3.500.001 a 5.000.000 Nm ³ /ano - Porte 4	19	4%	77.828.055	6%
<i>Grande porte</i>	30	6%	1.029.980.415	77%
5.000.001 a 30.000.000 Nm ³ /ano - Porte 5	19	4%	258.126.196	19%
30.000.001 a 125.000.000 Nm ³ /ano - Porte 6	10	2%	640.454.218	48%
> 125.000.001 Nm ³ /ano - Porte 7	1	0,2%	131.400.000	10%
Total	521		1.345.498.670	

Fonte: CIBIOGÁS, (2020)

Em relação a localização das plantas de biogás em operação em 2019, observou-se que Minas Gerais se destaca com 196 plantas, o que equivale a 38% do total de unidades em operação. O estado do Paraná ocupa o segundo lugar com 110 plantas (21%) (CIBIOGÁS, 2020). A Figura 3 expressa o mapa de distribuição das plantas de biogás do Brasil em 2019.

Figura 3 - Distribuição das plantas de biogás com fim energético em operação no Brasil em 2019.



Fonte: CIBIOGÁS, (2020)

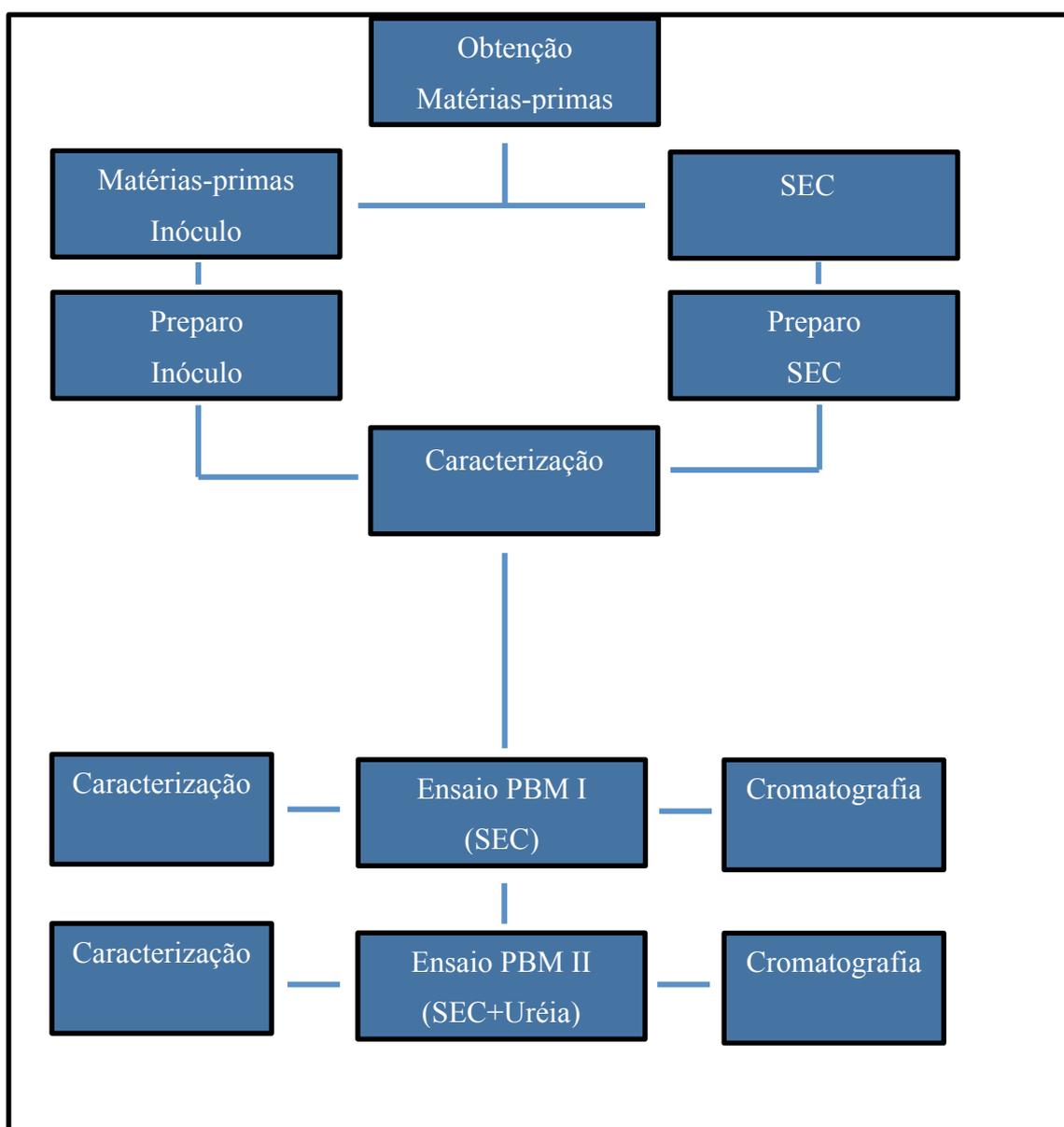
O estado de São Paulo ocupa a terceira posição em número de plantas em operação no Brasil, no entanto, o estado lidera com a maior produção de biogás concentrando 35,3% do volume total produzido e na sequência o Rio de Janeiro com 14,6% (CIBIOGÁS, 2020).

Por fim, o Brasil apresentou no período de 2018 - 2019 um aumento de 36% no volume de biogás produzido e 31% na quantidade de plantas em operação com aplicação energética do biogás, apresentando ainda grande potencial inexplorado, bem como as condições técnicas e econômicas para produção de biogás (CIBIOGÁS, 2020). O crescimento do setor do biogás vem demonstrando que é possível estimular o desenvolvimento tecnológico e o setor industrial especializado em biodigestores, motores, conversores, unidades de controle e outros equipamentos. O que deve gerar aumento de emprego e renda, além de, perspectivas ambientais promissoras para diversos setores produtores de resíduos antes visto como passivos ambientais (FREITAS et al., 2019).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritas as operações e procedimentos utilizados no desenvolvimento e condução da pesquisa. O fluxograma experimental está representado na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma experimental.



Fonte: Autor, (2021)

4.1. Local dos Experimentos

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Processos de Separação (LPS) e Laboratório de Gestão, Controle e Preservação Ambiental (LGCPA) do Departamento de Engenharia Química, DEQ da Universidade Estadual de Maringá - UEM.

4.2. Obtenção e Preparo das Matérias Primas

A obtenção e preparo das matérias primas foi dividida em duas etapas, obtenção e preparo do inóculo e obtenção e preparo do SEC.

4.2.1. Obtenção e Preparo do Inóculo

As matérias primas utilizadas no inóculo foram cedidas por empresas e um produtor rural da região de Maringá. O lodo anaeróbio foi cedido por uma indústria de biogás, o esterco suíno por um produtor rural e a água residual de frigorífico por um frigorífico da região de Maringá. As coletas aconteceram em um biodigestor em funcionamento e lagoas de tratamento, após a coleta as matérias-primas foram armazenadas a 4 °C até uso (VDI, 2006).

O preparo do inóculo aconteceu em laboratório, onde passou por duas etapas, a ativação em substrato bovino e suíno e aclimação com a adição de SCE. Para obtenção dos volumes de cada efluente e do lodo anaeróbio para ativação do inóculo, foram utilizados os parâmetros definidos pela norma VDI 4630, sendo eles:

- 1,5% de STV de lodo anaeróbio;
- Concentração de STV no lodo anaeróbio $\geq 50\%$;
- Concentração de ST $\leq 10\%$;
- Relação $STV_{\text{substrato}}/STV_{\text{lodo anaerobio}} \leq 0,5$.

Desse modo, com os resultados da caracterização das matérias primas do inóculo a ativação e aclimação do mesmo seguiram como descrito abaixo:

Ativação do Inóculo: em um reator de 18000 mL (Figura 5), foi inserido 3000 mL lodo anaeróbio, 4100 mL de esterco bovino e 5500 mL de esterco suíno, o reator foi vedado e uma corrente de gás nitrogênio foi circulada no mesmo para garantia de anaerobiose do reator. O reator foi mantido em banho-maria a temperatura de 37°C (Figura 5) e monitorado conforme os parâmetros físico-químicos listados na tabela 13.

Figura 5 - Reator utilizado no preparo do inóculo.



Fonte: Autor, (2021).

Tabela 13 - Parâmetros de monitoramento do inóculo.

Parâmetros
pH
Sólidos Totais (ST)
Sólidos Totais Fixos (STF)
Sólidos Totais Voláteis (STV)
Carbono Total (CT)
Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)
Nitrogênio Amoniacal Total (NAT)
Alcalinidade Total (AT)
Relação AI/AP
Ácidos Orgânicos Voláteis (AVO)

Fonte: Autor, (2021)

Aclimação do Inóculo: após a estabilidade da produção de biogás no reator, iniciou-se a aclimação do inóculo. A aclimação se deu com a alimentação do reator com o SEC, sendo adicionado mensalmente ao mesmo uma relação $STV_{substrato}/STV_{lodo\ anaerobio} \leq 0,25$. Sendo, a partir da 4ª alimentação, adicionado ureia ao SEC como fonte de nitrogênio, mantendo o substrato com relação C/N de 26.

4.2.2. Obtenção e Preparo do SEC

O SEC foi cedido por um produtor rural com propriedade localizada no município de Presidente Prudente – SP, a propriedade conta com duas estufas com condições controladas e 160 m² cada, produzem três diferentes espécies e tem uma produção de aproximadamente 1,5 t/mês, perfazendo uma geração de resíduo de 7,5 t/mês.

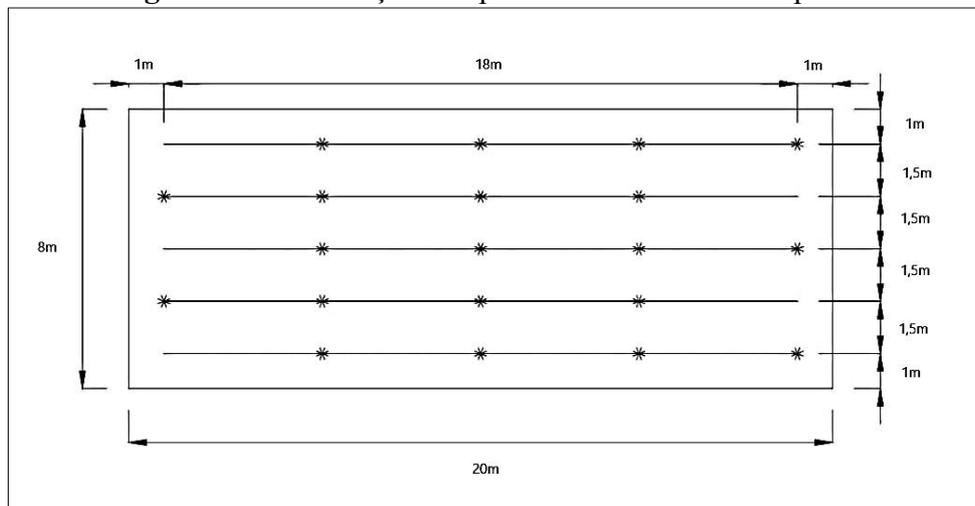
Figura 6 - Interior da estufa.



Fonte: Autor, (2021).

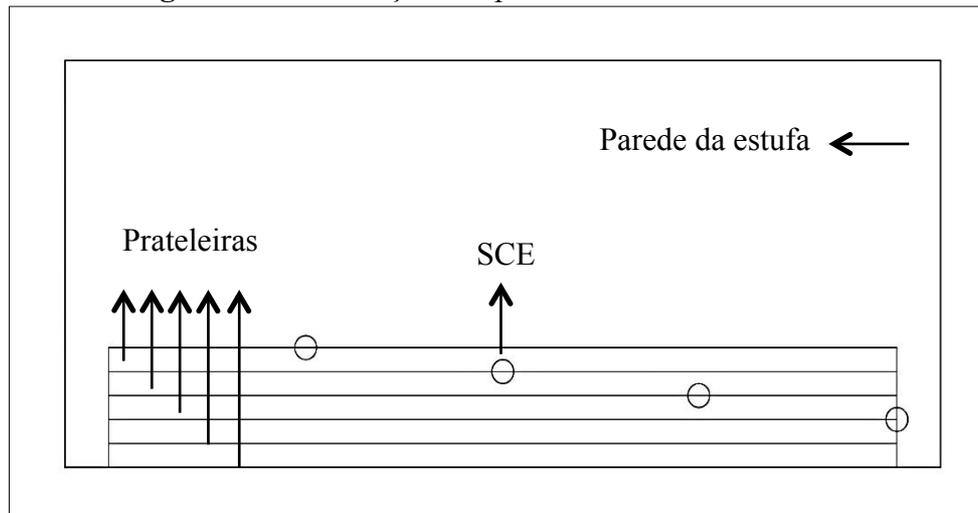
A coleta das amostras foi realizada segundo o método de amostragem transecto (MEDEIROS, 2004). Foram determinados 20 pontos de amostragem distribuídos na estufa conforme demonstram as Figuras 7 e 8, depois de feita a coleta o SEC foi separado dos sacos (Figura 9a, 9b) e homogeneizados (Figura 10). Os pontos coletados foram todos onde eram produzidos cogumelos do tipo shimeji.

Figura 7 - Distribuição dos pontos de coleta vista superior.



Fonte: Autor, (2021).

Figura 8 - Distribuição dos pontos de coleta vista lateral.



Fonte: Autor, (2021).

Figura 9 - a) resíduos na sacola plástica. b) resíduos separados das sacolas plásticas.



(a)

(b)

Fonte: Autor, (2021).

Figura 10 - Mistura dos resíduos para amostragem



Fonte: Autor, (2021).

Após a amostragem o SEC foi submetido a um pré-tratamento, onde o material foi seco em estufa a 60 °C, durante 72 h (Figura 11a), cortado em processador e passado por uma peneira, onde foram selecionadas as partículas com tamanho inferior a 10mm (Figura 11b) (FERRARO et al., 2018).

Figura 11 - a) resíduo sendo seco em estufa. b) resíduo processado e selecionado.



(a)

(b)

Fonte: Autor, (2021).

4.3. Caracterização das Matérias Primas

A caracterização das amostras de SEC e inóculo foram realizadas conforme os métodos do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005), artigos e NBR conforme a tabela 14, bem como, os testes de PBM.

Tabela 14 - Parâmetros e normas técnicas recomendadas para caracterização.

Parâmetros	Método Analítico
pH	Potenciométrico (4500-H/ APHA 2012)
Sólidos Totais (ST)	Gravimétrico (NBR 10664:1989)
Sólidos Totais Fixos (STF)	Gravimétrico (NBR 10664:1989)
Sólidos Totais Voláteis (STV)	Gravimétrico (NBR 10664:1989)
Carbono Total (CT)	Gravimétrico (CARMO; SILVA, 2012)
Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)	Kjeldahl (NBR 13796 :1997)
Nitrogênio Amoniacal Total (NAT)	Potenciométrico (4500-D/ APHA, 2012)
Proteínas	Kjeldahl (NBR 13796 :1997)
Lipídios	Soxhlet (CECCHI, 1999)
Carboidratos	Centesimal (FAO, 2002).
Lignina	Brometo de Acetila (MOREIRA-VILAR et al., 2014)
Alcalinidade Total, Parcial e Intermediária	Titulação Potenciométrica (2320-B/ APHA 2012)
Ácidos Orgânicos Voláteis (AVO)	Titulação Potenciométrica (DILALLO; ALBERTSON, 1961)

Fonte: Autor, (2021)

4.4. Ensaio Potencial Bioquímico de Metano (PBM)

O ensaio de biodegradabilidade do SEC foi desenvolvido a partir de adaptações do teste *Biochemical Methane Potencial (BMP)*.

4.4.1. Planejamento Experimental PBM

Os testes foram montados em duas bateladas sendo a primeira com o SEC e a segunda com o SEC + Ureia, foram utilizadas três e quatro diferentes concentrações na relação STVsubstrato/STVinóculo nas respectivas bateladas como demonstra a tabela 15 e 16, os testes foram realizados em três e quatro repetições respectivamente.

Tabela 15 - Concentração STV 1° batelada PBM.

STV _{sub.:} :STV _{inóc.}	SCE (gSTV)	Inóculo (gSTV)
1:1	1,40	1,40
1:2	0,70	1,40
1:4	0,35	1,40
BRANCO	0,00	1,40

Fonte: Autor, (2021)

Tabela 16 - Concentração STV 2° batelada PBM.

STV _{sub.:} :STV _{inóc.}	SCE (gSTV)	Celulose (gSTV)	Inóculo (gSTV)
1:1	2,91	0,00	2,91
1:2	1,46	0,00	2,91
1:4	0,73	0,00	2,91
1:6	0,49	0,00	2,91
Padrão	0,00	1,46	2,91
BRANCO	0,00	0,00	2,91

Fonte: Autor, (2021)

As diferentes concentrações foram escolhidas para avaliar o comportamento da digestão e produção de biogás e biometano com cargas de substratos acima do recomendado pela norma VDI, 2006 e cargas de substrato abaixo da relação S/I 0,5, enquanto a adição de ureia foi para avaliar a influência da composição nutricional no processo e produção do biogás e biometano e, por fim, o padrão de celulose microcristalina na segunda batelada foi utilizado para verificar a viabilidade do inóculo (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008; VDI, 2006; XU et al., 2018). Não foi utilizado o padrão de celulose microcristalina na primeira batelada, devido, a falta de disponibilidade do material.

4.4.2. Montagem e Monitoramento do PBM

Os reatores anaeróbios foram realizados em escala de bancada e consistiram em frascos de vidro tipo antibiótico de 250 mL, selados com septo de borracha e lacrados com anel de alumínio, utilizando alicate de pressão (*cramper*) (CHERNICHARO, 2007; CÁRDENAS-CLEVES et al., 2016).

Foram utilizados volumes de 175 mL de solução (SEC + inóculo) em cada biodigestor. Uma corrente de gás nitrogênio foi circulada em cada reator, por cerca de 5 minutos, tendo como finalidade a garantia de anaerobiose do meio. A concentração de inóculo foi mantida a mesma em todos os reatores e os tratamentos permaneceram incubados em banho-maria até que a produção de biogás fosse <1% da produção acumulada (ANGELIDAKI, 2009; CHERNICHARO, 2007; CÁRDENAS-CLEVES et al., 2016, VDI, 2006).

Para a obtenção do volume de biogás gerado, foram monitoradas as seguintes variáveis:

a) Volume coletado com seringa de cada reator, onde com o auxílio de um aparelho de leitura de pressão eletrônico (manômetro), foi coletado o biogás produzido até que o aparelho chegasse à pressão zero (Figura 12);

Figura 12 - Aferição do volume diário de biogás produzido.



Fonte: Autor, (2021)

- b) temperatura do banho 37 °C;
 c) pressão atmosférica local, obtida no site do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (www.inmet.gov.br).

4.4.3. Cálculos PBM

Os cálculos para determinação da produção de biogás acumulada e potencial bioquímico de metano dos reatores são apresentados nas equações 1 a 3, conforme VDI 4630.

$$V_0^{tr} = V \cdot \frac{(p-p_w) \cdot T_0}{p_0 \cdot T} \quad (1)$$

Sendo:

V_0^{tr} = volume gás seco CNTP (mL);

V = volume (mL);

p = pressão atmosférica Maringá (atm);

p_w = pressão de vapor da água (atm);

p_0 = pressão atmosférica normal (atm);

T_0 = temperatura normal (273,15 K);

T = temperatura experimental (310,15 K);

$$P_{vap} = 10^{8,1962 - \frac{1730,63}{T_{gas} - 39,724}} \quad (2)$$

Sendo:

P_{vap} = Pressão de vapor da água (mbar)

T_{gas} = Temperatura do gás (K)

$$PBM = \frac{N_{vCH_4} - N_{VCH_4 \text{ branco}}}{m_{residuo \text{ adic}}} \quad (3)$$

Sendo:

$PBM = \text{rendimento de metano (L}_{\text{metano}} \cdot \text{kg}_{\text{STV}}^{-1})$

$N_{\text{VCH}_4} = \text{volume de metano (L)}$

$N_{\text{VCH}_4\text{branco}} = \text{volume de metano do inóculo (L)}$

$m_{\text{residuoadic}} = \text{massa de resíduo adicionada (kg}_{\text{STV}})$

4.5. Caracterização do biogás

A caracterização do biogás produzido foi realizada por meio da coleta do biogás nos reatores, utilizando uma seringa inserida no septo acoplado no reator e inserindo no cromatógrafo Marca Thermo Fisher Scientific Spa, Modelo Serie TRECE CG ULTRA (figura 13) equipado com um detector de condutividade térmica (TCD) em série com um detector por fotometria de chama (FPD), acoplado a um dispositivo de injeção com alça de amostragem de 1 mL. A coluna utilizada foi a HP – Plot U (30m x 50mm x 0,20 μm), que opera em modo isotérmico a 40°C, utilizando o gás hélio como gás de arraste, com vazão de 10mL.min⁻¹, injeção: 1 mL, modo splitless, 100°C, tempo de análise 6 min. Foram determinadas concentração de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e ácido sulfídrico (H₂S). Os dados foram analisados no *software ChromQuest V.5.0*.

Figura 13 - Cromatógrafo Thermo Fisher Scientific Spa, Modelo Série TRECE CG ULTRA.



Fonte: Autor, (2021)

4.6. Potencial teórico da produção de metano e biodegradabilidade do substrato

O potencial teórico da produção de metano (PBMT) foi calculado conforme metodologia proposta por Triolo et al. (2011) e utilizada para avaliar a biodegradabilidade do resíduo. A estimativa do potencial teórico considerou as fórmulas empíricas para cada componente orgânico presente no substrato: proteína ($C_5H_7O_2N$), lipídeos ($C_{57}H_{104}O_6$), lignina ($C_{10}H_{13}O_3$) e carboidratos ($C_{10}H_{13}O_3$), conforme Eq. 4 e foi expresso em $mLNCH_4 gSV^{-1}$:

$$PBM_T = [496. \%PTN + 1014. \%LP + 727. \%LG + 415; \%CHO].0,01 \quad (4)$$

Sendo:

PTN = Proteínas

LP = Lipídios

LG = Lignina

CHO = Carboidratos

A biodegradabilidade foi avaliada conforme a equação 5, proposta por Safar et al., 2019.

$$BD (\%) = \frac{PBM}{PBM_T} \cdot 100 \quad (5)$$

Sendo:

PBM = Potencial Bioquímico de Metano ($L_{\text{metano}} \cdot \text{kgSTV}^{-1}$)

PBM_T = Potencial Bioquímico de Metano Teórico ($L_{\text{metano}} \cdot \text{kgSTV}^{-1}$)

BD = Biodegradabilidade

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente trabalho teve os resultados e discussões dividido em cinco etapas, sendo elas caracterização das matérias primas, caracterização dos reatores, teste do potencial bioquímico de metano (PBM), potencial teórico da produção de metano, biodegradabilidade do substrato e avaliação do potencial energético da propriedade rural fornecedora do SEC.

5.1. Caracterização das Matérias-Primas

Neste item estão demonstrados e discutidos os resultados da caracterização do inóculo e SEC.

5.1.1. Inóculo

Com a produção do inóculo se dividindo em duas etapas, obtenção das matérias primas e preparo do inóculo os resultados se deram da seguinte forma, matérias primas inóculo e inóculo, como segue abaixo:

- **Matérias Primas Inóculo**

Na tabela 17 são apresentados os valores obtidos a partir da caracterização das matérias primas utilizadas para produção do inóculo.

Tabela 17 - Caracterização das matérias primas utilizadas no inóculo.

Parâmetros	Lodo Anaeróbio	Substrato Suíno	Substrato Bovino
pH	7,6 ± 0,01	6,36 ± 0,05	7,31 ± 0,15
ST (g.L ⁻¹)	121,21 ± 2,12	8,35 ± 0,07	1,8 ± 0,04
STV (g.L ⁻¹)	62,81 ± 1,19	5,46 ± 0,09	1,06 ± 0,13
STF (g.L ⁻¹)	58,41 ± 1,00	2,89 ± 0,01	0,74 ± 0,09
NTK (%)	3,46 ± 0,06	15,02 ± 0,19	17,60 ± 0,92
CT (%)	23,62 ± 0,11	29,72 ± 0,21	26,72 ± 1,71
Relação C/N	6,83	1,98	1,51
Alcalinidade (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	-	2960,54 ± 20,71	1077,96 ± 12,90

Fonte: Autor, (2021)

Os valores de STV foram utilizados na determinação dos volumes de cada amostra a ser inserida no reator, respeitando a concentração de 1,5% de STV de lodo anaeróbio. Desse modo, para 18000 mL de solução (substratos + lodo anaeróbio) foram necessários 189 gSTV de lodo, gerando um total de 3000 mL do mesmo, os volumes de substrato suíno e bovino foram respectivamente 5500 mL e 4500 mL (VDI, 2006).

A relação $STV_{\text{substrato}}/STV_{\text{lodo anaeróbio}}$ deve ser $\leq 0,5$, para prevenir a inibição do processo fermentativo em batelada. Desse modo, a relação de 0,18 se mostrou satisfatória. Por fim, para que não houvessem problemas de transferência de massa os ST não deveriam exceder 10%, este parâmetro foi mantido então a 3,31% se mantendo dentro do recomendado (RAPOSO et al., 2011; VDI, 2006).

- **Inóculo**

Nas tabelas 18 e 19 são apresentados os valores obtidos a partir da caracterização do inóculo retirado para o teste PBM na primeira e segunda bateladas, respectivamente. Os resultados do monitoramento do inóculo estão no item 5.2.1.

Tabela 18 - Caracterização do inóculo 1º batelada.

Parâmetros	Inóculo
pH	7,79 ± 0,06
ST (g.L ⁻¹)	14,66 ± 0,45
STV (g.L ⁻¹)	8,22 ± 0,15
STF (g.L ⁻¹)	7,84 ± 0,20
NTK (%)	8,72 ± 0,46
CT (%)	26,90 ± 0,90
Relação C/N	3,08
AI/AP	0,74
Alcalinidade (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	3265,0 ± 41,98
AOV (mg.L ⁻¹)	1580,65 ± 36,35

Fonte: Autor, (2021)

O valor obtido para STV foi condizente com as exigências da norma VDI 4630, com concentração $\geq 50\%$, bem como, baixo teor de ST, faixa de pH próximo a neutralidade e alcalinidade dentro do recomendado para obtenção de um adequado poder de tamponamento (FILER; DING; CHANG, 2019; PANIGRAHI; DUBEY, 2019; RAJESHWARI et al., 2000; VDI, 2006). No entanto, as condições de AI/AP, ácidos orgânicos voláteis e concentração de STV não conseguiram atender as condições ideais indicadas pela literatura, devido ao pouco tempo de alimentação do inóculo, de aproximadamente um mês e baixa concentração de nitrogênio do SEC, que foi utilizado na alimentação do reator do inóculo (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008; FILER; DING; CHANG, 2019; STEINMETZ et al., 2016).

Tabela 19 - Caracterização do inóculo 2° batelada.

Parâmetros	Inóculo
-------------------	----------------

pH	7,40 ± 0,03
ST (g.L ⁻¹)	32,42 ± 0,19
STV (g.L ⁻¹)	17,13 ± 0,29
STF (g.L ⁻¹)	15,29 ± 0,20
NTK (g.L ⁻¹)	0,54 ± 0,05
NAT (g.L ⁻¹)	165,88 ± 6,94
CT (g.L ⁻¹)	7,75 ± 0,10
Relação C/N	14,32
Alcalinidade (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	1371,76 ± 6,08
AI/AP	0,25
AOV (mg.L ⁻¹)	157,57 ± 11,25

Fonte: Autor, (2021)

Os valores obtidos para todos o parâmetros exceto alcalinidade foram alcançados conforme o recomendação pela norma VDI, 2006. Para correção da baixa alcalinidade a adição de resíduos com alto potencial de tamponamento pode ser adotado, haja vista, que somente a adição de uma fonte de nitrogênio como a ureia não foi suficiente (ESPOSITO et al., 2012).

5.1.2. SEC

Os resultados obtidos durante a caracterização do SEC estão demonstrados na tabela 20.

Tabela 20 - Caracterização do SEC.

Parâmetros	Resultados
ST* (%)	21,89 ± 0,21
ST (%)	93,71 ± 0,33
STV (%)	85,84 ± 3,99
STF (%)	14,16 ± 0,99
NTK (%)	1,02 ± 0,05
CT (%)	38,46 ± 1,85
Relação C/N	37,71
Lipídios (%)	4,29 ± 0,34
Carboidratos (%)	59,08 ± 0,34
Proteínas (%)	6,33 ± 0,29
Lignina (%)	30,30 ± 1,77

*sem pré-tratamento

Fonte: Autor, (2021)

O conteúdo de ST do SEC alcançou 93,71%, o alto teor de ST pode ser explicado devido ao pré-tratamento de secagem e trituração do SEC para homogeneização do material, Luo et al., (2018) e Zhu et al., (2015) que aplicaram pré-tratamentos similares demonstram resultados que variaram entre 91% e 96%. Para os STVs obteve-se um conteúdo de 85,84% em relação aos ST, indicando um rico conteúdo de matéria orgânica, o que pode favorecer a digestão anaeróbia, Luo et al., (2018), Córdoba et al., (2016) e Zhu et al., (2015) demonstraram ainda, resultados próximos que variaram de 80% a 88% de conteúdo de STV (CHERNICHARO, 2007; BISARIA; MADAN; MUKHOPADHYAY, 1983). O teor de STF foi de 14,16%, valor que é coincidente com resultados anteriores obtidos por Mehta e Gupta, (1990); Shi et al., (2014), este valor sofre um acréscimo se comparado com os substratos antes da ação dos fungos produtores de cogumelo, o que pode ocorrer devido a um aumento do conteúdo mineral, resultado das mudanças sofridas pelos substratos durante a degradação enzimática enquanto os fungos estão em fase de desenvolvimento vegetativo (COLAVOLPE et al., 2012). O maior teor de minerais é favorável à produção de biogás, uma vez que o crescimento celular e aumento na concentração de bactérias metanogênicas necessitam de macro e micronutrientes (DEMIREL; SCHERER, 2011; ROMERO-GÜIZA et al., 2016; XU et al., 2018).

Os teores totais de carbono e nitrogênio total foram de 38,46% e 1,02% respectivamente. Portanto, a relação C/N foi de 37,71. Esses valores são compatíveis com a literatura, que apresenta valores que variam de 38% a 50% para carbono total e 1,0% a 1,84% para nitrogênio total, bem como, a relação C/N variando entre 22 e 50 (LUO et al., 2018; ZHU et al., 2015). O nitrogênio é um importante nutriente para o crescimento dos microrganismos, uma vez que em condições anaeróbias, o nitrogênio, nas formas de nitrito e nitrato, não se encontra disponível, haja vista, que este é reduzido a gás nitrogênio e liberado na atmosfera. Dessa forma, a amônia e porção de nitrogênio orgânico, liberado durante a degradação são as principais fontes de nitrogênio utilizadas pelos microrganismos (JIANG et al., 2019; XU et al., 2018; CHERNICHARO, 2007).

A relação C/N é determinante para o coeficiente de produção celular, 66 é considerada uma relação para um baixo coeficiente e 26 uma relação de alto coeficiente (CHERNICHARO, 2007). Deublein; Steinhäuser, (2008) e Xu et al., (2018) afirmam que uma relação ideal C/N para fase metanogênica está entre 20-30 e para hidrólise/acidogênese está entre 10-45, neste sentido, com o resultado em 37,88 é possível afirmar que o SEC apresenta uma relação C/N que deve ser melhorada, pois, pode favorecer a acidogênese gerando excesso de ácidos orgânicos voláteis no reator, que tende a reduzir o pH e pode ser um agente inibidor da metanogênese (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019; TUROVSKIY; MATHAI, 2006). A adição de materiais nitrogenados (proteína e ureia) podem ser nesse caso, uma solução para manter um boa relação C/N e evitar processos inibitórios no sistema (JIANG et al., 2019).

A lignina apresentou teor de 30,3%, a literatura demonstra podem variar entre 17-32% o teor de lignina para bagaço de cana-de-açúcar, componente principal do SEC utilizado neste trabalho (ARNI, 2018; NIJU; SWATHIKA, 2019). O alto teor de lignina tem efeitos significativos na digestibilidade de palhas, afetando principalmente a hidrólise, podendo ainda reduzir a velocidade global da digestão, a produção de biogás e causar distúrbios no processo (ATELGE et al., 2020; TUYEN et al., 2012).

5.2. Caracterização dos Reatores

Neste item serão demonstrados e discutidos os resultados da caracterização do monitoramento do inóculo e análises de entrada e saída dos reatores na 1º e 2º batelada:

5.2.1. Monitoramento inóculo

A tabela 21 apresenta os valores obtidos a partir da caracterização do reator durante monitoramento do inóculo.