



**FRANCIELLE MARIANE LOPES**

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS: PANORAMA MUNDIAL E  
BRASILEIRO**

**LAVRAS -MG**

**2022**

**FRANCIELLE MARIANE LOPES**

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS: PANORAMA MUNDIAL E BRASILEIRO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Profa. Dra. Cristiane Alves Pereira  
Orientadora

**LAVRAS - MG**

**2022**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me amparar nos momentos difíceis e me ajudar nessa caminhada para a realização do meu objetivo.

A minha família, em especial minha mãe, Mariza por sempre me apoiar em tudo e me fazer acreditar que esse sonho seria possível e sonhar junto comigo.

Ao meu namorado, Lucas, que esteve sempre por perto demonstrando todo apoio e paciência.

Aos meus amigos, pela amizade incondicional e pelo apoio e por todas as experiências trocadas.

A minha orientadora, prof. Cristiane Alves Pereira, por ter aceitado meu convite e cumprir tão bem seu papel com dedicação e sabedoria. E a banca examinadora por toda contribuição nessa pesquisa.

A todos os professores, que participaram da minha formação, os meus sinceros agradecimentos.

## **RESUMO**

No contexto atual, com o aumento dos problemas ambientais causados pelas mudanças climáticas resultante do uso de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, e também a volatilidade dos preços desses combustíveis, a crescente geração de resíduos em virtude das atividades humanas identificou-se uma necessidade de produção de energia de forma sustentável. Nesse cenário, uma alternativa atrativa é a produção de biogás a partir de resíduos, por meio da digestão anaeróbia, que além de biogás pode produzir biofertilizante. Para elaboração dessa pesquisa foi realizado um levantamento bibliográfico, com consultas na literatura, nas bases de dados e em sites especializados que contribuíssem com dados relevantes para o estudo. O biogás produzido pode ser utilizado como energia elétrica, térmica, mecânica e/ou convertido em biometano, por meio da purificação do gás. A pesquisa limitou-se a três fontes de resíduos, são eles advindos da agropecuária, agroindústria e saneamento. Destacou-se os principais modelos de biodigestores, o processo da digestão anaeróbia e as condições operacionais que influenciam na produção do biogás. Em uma análise do panorama mundial e brasileiro observou-se um avanço expressivo da produção de biogás, o que foi possível devido criação de políticas públicas de incentivos, no Brasil destacou-se o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) e do Probiogás. Dessa forma, a produção de biogás é vista como uma solução para o tratamento e aproveitamento dos resíduos, pode compor a matriz energética e o biometano pode substituir a utilização dos combustíveis fósseis.

**PALAVRAS CHAVES:** Biometano; Digestão Anaeróbia; Biodigestores.

## **ABSTRACT**

In the current context, with the increase of environmental problems caused by climate change resulting from the use of fossil fuels such as coal, oil, and natural gas, and also the volatility of the prices of these fuels, the growing generation of waste due to human activities, a need for sustainable energy production has been identified. In this scenario, an attractive alternative is the production of biogas from waste, through anaerobic digestion, which besides biogas can produce biofertilizer. To prepare this research, a bibliographical survey was carried out, with consultations in the literature, in databases and specialized sites that contributed with relevant data for the study. The biogas produced can be used as electrical, thermal, mechanical energy and/or converted into biomethane, by purifying the gas. The research was limited to three sources of waste, which come from agriculture, agribusiness, and sanitation. It was highlighted the main models of biodigesters, the process of anaerobic digestion and the operational conditions that influence the production of biogas. In an analysis of the world and Brazilian panorama it was observed an expressive advance in the production of biogas, which was possible due to the creation of public incentive policies, in Brazil it was highlighted the Incentive Program for Alternative Sources of Electric Energy (PROINFA) and the Probiogás. In this way, The production of biogas is seen as a solution for the treatment and use of waste, can compose the energy matrix and biomethane can replace the use of fossil fuels.

**KEYWORDS:** Biomethane; Anaerobic Digestion; Biodigesters.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de um sistema de purificação do biogás utilizando membranas.....	9
Figura 2 – Número de ocorrência de artigos científicos para o termo biogás na base de dados Scopus entre os anos de 1971 e 2021.....	10
Figura 3 – Modelo de biodigestor chinês.....	14
Figura 4 – Modelo de biodigestor indiano.....	15
Figura 5 – Modelo de biodigestor canadense.....	16
Figura 6 - Modelo de biodigestor CSTR.....	17
Figura 7 – Diagrama do processo de produção de biogás.....	18
Figura 8 - Hidrólise .....	19
Figura 9 – Acidogênese.....	19
Figura 10 -Acetogênese.....	20
Figura 11- Metanogênese.....	21

## **LISTA DE QUADROS E TABELAS**

Quadro 1 – Relação das etapas com as principais referências utilizadas.....	6
Quadro 2 – Fontes de substrato.....	13
Tabela 1 – Composição do biogás.....	7
Tabela 2 – Relação entre o número de plantas em operação e volume de biogás no ano de 2021, por origem de substrato.....	29
Tabela 3 – Relação do número de plantas de biogás com fins energéticos em operação no país em 2021.....	30

## LISTA DE SIGLAS

ABIOGÁS - Associação Brasileira de Biogás  
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica  
ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis  
CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior  
CIBIOGÁS - Centro Internacional de Energias Renováveis  
CNTL – Centro Nacional de Tecnologia Limpa  
COP - Conferência das Partes  
EMATER - Empresa Brasileira de Tecnologia e Extensão Rural  
EPE – Empresa de Pesquisa Energética  
EPI – Equipamentos de Proteção Individual  
ETE - Estação de Tratamento de Efluentes  
FiT - Feed –In- Tarif  
GEE – Gases de Efeito Estufa  
IPCA - Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo  
INDC – Intended Nationally Determined Contribution  
MME - Ministério de Minas e Energia  
PNE – Plano Nacional de Energia  
PROÁLCOOL - Programa Brasileiro de Álcool  
PROINFRA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas  
RSU - Resíduos de Sólidos Urbanos  
ST - Sólidos Totais  
SV- Sólidos Voláteis  
SFT – Sólidos fixos totais  
TRH – Tempo de retenção hidráulica

## LISTA DE SÍMBOLOS

CH<sub>4</sub> - Metano

CO<sub>2</sub> - Dióxido de carbono

H<sub>2</sub>S – Sulfeto de hidrogeniônico

NH<sub>3</sub> - Amônia

pH – Potencial hidrogeniônico

Kg – Quilograma

MWh- Mega Watt-hora

Nm<sup>3</sup> - Normal metro cúbico

GWh – Giga Watt-hora

g - Grama

# SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
2.1	Objetivo Geral.....	3
2.2	Objetivos Específicos.....	3
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>4</b>
3.1	Embasamento teórico.....	4
3.2	Etapas do levantamento bibliográfico.....	5
<b>4.</b>	<b>PRODUÇÃO DE BIOGÁS E SUA IMPORTÂNCIA .....</b>	<b>7</b>
4.1	Biometano.....	8
4.2	Dados bibliométricos da pesquisa sobre biogás .....	9
<b>5</b>	<b>RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS.....</b>	<b>11</b>
5.1	Resíduos sólidos industriais e produção de biogás .....	11
5.2	Gerenciamento de substrato.....	12
<b>6</b>	<b>BIODIGESTORES .....</b>	<b>13</b>
6.1	Modelo chinês.....	14
6.2	Modelo indiano.....	15
6.3	Modelo canadense.....	16
6.4	Modelo CSTR.....	16
6.5	Comparação entre os modelos de biodigestores .....	17
<b>7</b>	<b>DIGESTÃO ANAERÓBIA .....</b>	<b>18</b>
7.1	Hidrólise.....	18
7.2	Acidogênese.....	19
7.3	Acetogênese .....	19
7.4	Metanogênese .....	20

<b>7.5</b>	<b>Condições operacionais que influenciam a digestão anaeróbia</b> .....	<b>21</b>
7.5.1	Carga.....	21
7.5.2	pH .....	21
7.5.4	Tempo de retenção hidráulica (TRH) .....	22
<b>7.5.5</b>	<b>Concentração de sólidos voláteis</b> .....	<b>23</b>
<b>8</b>	<b>ASPECTOS AMBIENTAIS, POLÍTICOS E ECONÔMICOS</b> .....	<b>24</b>
<b>9</b>	<b>BIOGÁS: PANORAMA MUNDIAL</b> .....	<b>26</b>
9.1	Europa.....	26
9.2	China.....	27
9.3	Estados Unidos .....	27
<b>10</b>	<b>BIOGÁS: PANORAMA BRASILEIRO</b> .....	<b>28</b>
<b>11</b>	<b>MERCADO E POTENCIALIDADES</b> .....	<b>31</b>
<b>12</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>31</b>
<b>13</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>32</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>33</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Tendo em vista a crescente preocupação com o aumento dos problemas ambientais causados pelo predominante uso de combustíveis fósseis, das mudanças climáticas e também a volatilidade de preços enfrentados pelo mercado de energia, muito se tem pesquisado sobre alternativas de fontes de energias renováveis. Nessa circunstância, a produção de biogás por meio da decomposição de resíduos agroindustriais se torna um caminho interessante pois, o biogás é composto principalmente de metano e gás carbônico. Após um processo de combustão do metano é possível obter energia térmica que pode ser convertida em energia elétrica, o metano é convertido em CO<sub>2</sub> e água, diminuindo o impacto climático negativo e tornando lucrativa a atividade de processar resíduos, apresentando uma alternativa de geração de energia de crescimento exponencial.

São diversas as aplicações do biogás e do biometano, na geração de energia, calor ou cogeração, um processo que produz calor e energia elétrica com um só combustível. O biometano pode ser injetado em gasodutos e também para uso veicular. Países como Alemanha, Reino Unido e Suécia possuem legislação e tecnologias mais avançadas que no Brasil (MME, 2016).

A energia proveniente do biogás que especificamente, difere da energia eólica ou da energia solar, pelo fato de poder ser gerada de forma contínua, podendo ser estocado a baixos custos, seja na forma de matéria-prima, seja como gás comprimido. Também, devido à sua estabilidade, pode atuar como mecanismo regulador entre o uso das fontes eólica e fotovoltaica.

As principais fontes de produção de biogás em escala comercial no Brasil são: a parcela orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RSU); subprodutos da produção de açúcar e etanol de cana, como vinhaça e torta de filtro; e resíduos da pecuária suína. Em pequena escala são utilizados: resíduos da produção de alimentos em geral, amido de mandioca e suco de laranja; descarte de restaurantes; resíduos da pecuária bovina e avícola; e efluentes sanitários.

A transformação de resíduos em biogás, para utilização como fonte energética, pode se realizar em aterros sanitários, usinas de recuperação energética ou biodigestores.

A destinação adequada pode beneficiar a produção de biogás, como fonte de energia. Apesar da lei prever que a disposição desses resíduos em aterros é ambientalmente adequada, não deve ser considerado, pois produz efeitos danosos ao meio ambiente, por exemplo, o chorume pode poluir os lençóis freáticos. A Associação Brasileira de Biogás e Biometano (ABIOGÁS) apresenta estudos indicando que o biogás tem um enorme potencial para compor a matriz energética brasileira sustentável. O potencial teórico total brasileiro é de 80 milhões de metros cúbicos por dia ( $m^3/dia$ ), o equivalente a 24% da demanda de energia elétrica ou 44% da demanda de óleo diesel. O maior potencial de geração está no setor sucroenergético, que corresponde a 70% deste total. (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, ABIOGÁS, 2018).

## **2.OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Realizar uma revisão teórica da produção do biogás a partir de resíduos em um panorama mundial e brasileiro.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Identificar as características dos processos da geração de biogás com base na análise do conhecimento científico.
- Apresentar os tipos de biodigestores utilizados para a geração de biogás por meio de resíduos num processo de digestão anaeróbia.
- Abordar o panorama mundial e brasileiro do biogás e sua utilização.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Embasamento teórico

A metodologia utilizada para apresentar a proposta central desta pesquisa, uma revisão teórica qualitativa. Com isso, a partir desta revisão buscou-se responder às seguintes perguntas:

- a) O que é o biogás, como é produzido e sua importância?
- b) A partir de quais materiais o biogás pode ser produzido?
- c) Quais são os aspectos ambientais, políticos e econômicos?
- d) Qual é o panorama atual considerando o contexto mundial, nacional e o mercado?

Gil (2022) afirma que a abordagem qualitativa é fundamentalmente interpretativa, ou seja, é o pesquisador que faz a interpretação dos dados e com isso esse tipo de pesquisa oferece visões mais amplas ao invés de microanálises, narrativas e interativas mais abrangentes. E tudo isso, segundo o autor, faz com que fique melhor o estudo qualitativo e as estratégias escolhidas nessa pesquisa terão uma influência marcante nos procedimentos:

A investigação qualitativa emprega diferentes alegações de conhecimento, estratégias de investigação e métodos de coleta de dados e análise de dados. Embora o processo seja similar, os procedimentos qualitativos se baseiam em dados de texto e imagem, tem passos únicos na análise de dados e usam estratégias diversas de investigação (GIL, 2022, p. 175).

Foram adotadas técnicas de revisões sistemáticas de literatura, para assegurar que estudos recentes e relevantes sobre o tema da pesquisa fossem capturados. Foram estabelecidos critérios de inclusão e exclusão de artigos e, acima de tudo, uma análise criteriosa da qualidade da literatura selecionada (SAMPAIO; MANCINI, 2007).

Foi realizado um levantamento bibliográfico, utilizando o portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), a base de dados SCOPUS, ambos possuem um acervo com artigos nacionais e internacionais. Após a leitura de todos os títulos e resumos, os que não possuíam correlação com o tema abordado foram

excluídos e os selecionados foram lidos integralmente com o intuito de comprovar a associação com o tema em questão. Além dos artigos, buscou-se informações na literatura, em sites oficiais que contribuíssem com a pesquisa nos assuntos de aspectos regulatórios, legislações e normas.

### 3.2 Etapas do levantamento bibliográfico

O levantamento bibliográfico foi realizado em 4 etapas:

- Etapa 1: pesquisa baseada em conhecimento científico que identifica características e a importância do biogás e biometano.

**Palavras-chave:** Biogás, produção de biogás e biocombustíveis.

- Etapa 2: caracterizar a digestão anaeróbia, processo pelo qual o biogás é produzido, condições operacionais, classificar os resíduos agroindustriais e os diferentes tipos de biodigestores.

**Palavras-chave:** Digestão anaeróbia, resíduos agroindustriais biodigestores e condições operacionais.

- Etapa 3: descrever os aspectos políticos, econômicos ambientais, e uma breve visão do panorama mundial.

**Palavras-chave:** Produção de biogás na Europa, Biogás aspecto ambiental. Nessa etapa além do conhecimento científico, buscou-se sites oficiais de normas, legislações e políticas disponíveis no para a geração do biogás. Dentre eles: Agência Nacional de Energia Elétrica, Empresa de Pesquisa Energética, Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica.

- Etapa 4: apresentar um panorama brasileiro do biogás.

**Palavras-chave:** Biogás cenário brasileiro, resíduos agroindústrias.

Para melhor organização das etapas, foi feita uma avaliação com as principais referências utilizadas, são listadas no Quadro 1:

Quadro 1 - Relação das etapas com as principais referências utilizadas

<b>Etapas</b>	<b>Principais referências</b>
<b>1</b>	Goldemberg (2008); Bley Jr. (2015); Miyawaki (2014); FEAM (2015).
<b>2</b>	Karlsson et al. (2014); ABREN (2020); Matias (2022); Cana (2022); Filho (1981).
<b>3</b>	ANEEL (2017); EPE (2016);Schalchli et al., (2016); IEA (2020); Gu et al., (2016)
<b>4</b>	Abiogás (2021); Cibiogás (2021).

Fonte: Autora (2022)

Além das pesquisas nos sites oficiais dos programas, foi utilizado o BiogasMap, um painel dinâmico de plantas de biogás e biometano no Brasil. Essa ferramenta foi criada pelo Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBIOGÁS) com parceria de fornecedores, produtores, pesquisadores da cadeia do biogás. Com isso, foi possível fazer um mapeamento do número de plantas de biogás e biometano no Brasil com relação a fontes disponíveis e o volume gerado (Nm<sup>3</sup>/ano) e também foi apresentada uma relação do número de plantas com fins energéticos no ano de 2021.

#### 4. PRODUÇÃO DE BIOGÁS E SUA IMPORTÂNCIA

Por volta de 1600, uma substância gasosa inflamável foi identificada em regiões pantanosas, depois de muitos anos de estudo, no ano de 1776, Alexandre Volta descobriu a presença de metano ( $\text{CH}_4$ ) no gás dos pântanos. A primeira fermentação anaeróbia foi realizada em 1883 por Ulysse Gayon.

Países como a China e a Índia foram os primeiros a produzir biogás para ser utilizado como fonte de energia, a matéria-prima era proveniente de restos de alimentos e dejetos em geral, o biogás produzido era destinado para iluminação e para o cozimento de alimentos. Já na América Latina, o biogás surgiu por volta dos anos de 1970, segundo a Rede de Biodigestores para América Latina e Caribe (Redbiolac).

O biogás é constituído por uma mistura gasosa, composta principalmente de metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), contendo pequenas quantidades de outros gases, como amônia ( $\text{NH}_3$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), representa uma importante fonte alternativa de geração de energia, pois diminui a quantidade de resíduos, de efluentes e gases de efeito estufa (GOLDEMBERG; COELHO; PECORA, 2008).

Tabela 1 – Composição do biogás

Compostos	Volume de gás (%)
Metano ( $\text{CH}_4$ )	50 - 70
Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ )	25 - 50
Hidrogênio ( $\text{H}_2$ )	0 - 1
Nitrogênio ( $\text{N}_2$ )	0 - 7
Ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{S}$ )	0 - 3
Amônia ( $\text{NH}_3$ )	0 - 1
Oxigênio ( $\text{O}_2$ )	0 - 2

Fonte: CETESB, 2022

É um biocombustível resultante da degradação da matéria orgânica na ausência de oxigênio. Essa degradação anaeróbia faz parte do ciclo do carbono, no qual a matéria orgânica é atacada pela ação digestiva das bactérias metanogênicas (BLEY JR., 2015). Seu poder calorífico pode variar de 5000 a 7000 Kcal/m<sup>3</sup>, quando comparado ao da gasolina 9600 Kcal/m<sup>3</sup> e do diesel 10200 Kcal/m<sup>3</sup>, não apontam tanta diferença.

A primeira fermentação anaeróbia foi realizada em 1883 por Ulysse Gayon. Países como a China e a Índia foram os primeiros a produzir biogás para ser utilizado como fonte

de energia, a matéria-prima era proveniente de restos de alimentos e dejetos em geral, o biogás produzido era destinado para iluminação e para o cozimento de alimentos. Já na América Latina, o biogás surgiu por volta dos anos de 1970, segundo a Rede de Biodigestores para América Latina e Caribe (Redbiolac). Além do biogás gerado no biodigestor, o biofertilizante é um outro subproduto obtido a partir da digestão anaeróbia (KARLSSON et al., 2014). Os nutrientes minerais disponíveis na matéria orgânica (substrato) são concentrados no produto final digerido. O biofertilizante pode ser utilizado nas próprias plantações, corrigindo as deficiências nutricionais do solo contribuindo com a capacidade de produção ou comercializado.

#### **4.1 Biometano**

O biometano, é um combustível gasoso derivado do biogás, com elevado teor de metano (mínimo 90%), possui características semelhantes ao gás natural, é resultante da etapa de purificação do biogás. A purificação do biogás tem como objetivo o aumento do poder calorífico do gás que eleva de 5000 a 7000 Kcal/m<sup>3</sup> para 9200 Kcal/m<sup>3</sup>, quando comparado ao poder calorífico do gás natural 9400 Kcal/m<sup>3</sup>, nota-se uma mínima diferença. Esse processo além de garantir a qualidade do gás evita danos aos equipamentos. O enfoque da purificação é isolar o CH<sub>4</sub> do restante dos componentes presentes, com isso, através do isolamento do mesmo, são reduzidas as emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera, e com esse processo aumenta seu potencial energético. Após a separação de CO<sub>2</sub> do biogás, é necessário fazer uma limpeza do biogás. Essa limpeza se deve pela existência de diversos tipos de resíduos e impurezas deixadas pelo CO<sub>2</sub> (SALAZAR, 2014). Essa etapa é fundamental para que se possa utilizar o biometano em veículos.

Logo, segundo Miyawaki (2014), a presença de impurezas é um indicador de poluição do biometano, prejudicando no processo de combustão e diminuindo, concomitantemente, a eficiência do biocombustível. O processo mais comum de purificação do biogás é por meio de membranas (Figura 1), devido à sua segurança e simplicidade de operação é realizado em temperatura ambiente (25°C) e em baixas pressões (5,5 bar), consiste em um processo de aplicação de membranas, as quais são construídas por fibras poliméricas, o biogás é injetado em uma tubulação, devido a alta permeabilidade as fibras facilitam a passagem de CO<sub>2</sub> e dos outros componentes e o CH<sub>4</sub> flui livremente.

Figura 1- Esquema de um sistema de purificação do biogás utilizando membranas.



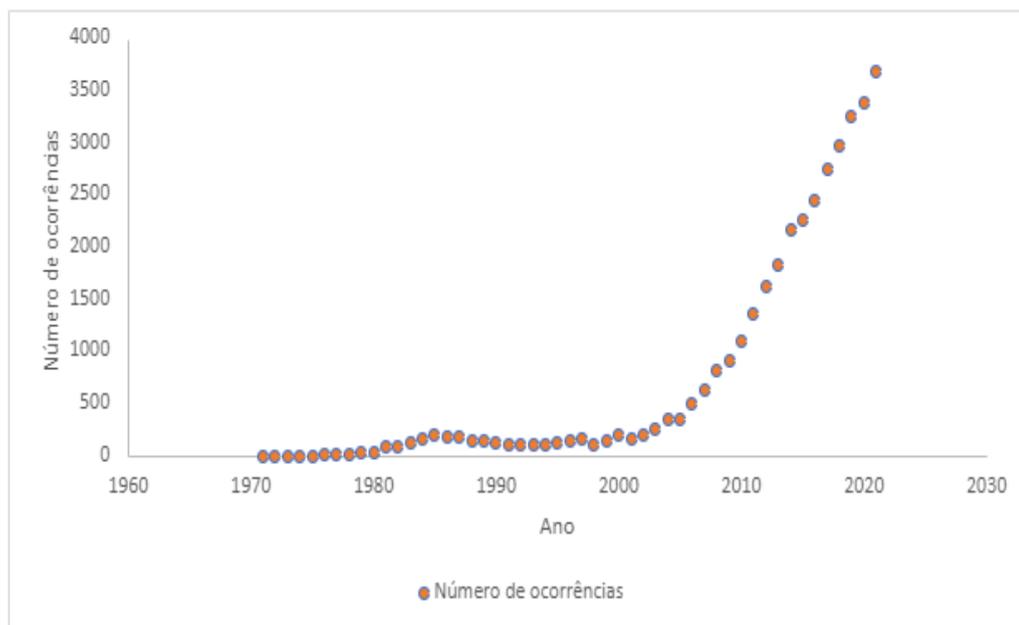
Fonte: <http://www.apsleyfarms.co.uk/gas-to-grid> .Acesso em 16 set 2022.

A tecnologia de purificação criogênica tem sido extensivamente estudada, mas raramente é comercializada porque é economicamente viável se separada de grandes quantidades de biogás. O método de lavagem com água é o menos complexo e requer menos infraestrutura. A tecnologia de absorção é amplamente utilizada em todo o mundo por ser também um sistema simples e de fácil operação, enquanto a tecnologia de purificação biológica vem se desenvolvendo e despontando como uma alternativa de menor custo (MIYAWAKI,2014). A indústria automobilística exige produtos de alta qualidade, livres de impurezas que são indicadores de contaminação e que apresentam alto valor energético. O biometano produzido a partir de produtos e resíduos pecuários, agrícolas e agroindustriais deve ser tratado de maneira análoga ao gás natural veicular (GNV), inclusive em termos de valoração econômica e usos, desde que atenda às especificações técnicas da ANP nº 08/2015.

#### 4.2 Dados bibliométricos da pesquisa sobre biogás

Uma busca na base de dados Scopus, inserindo a palavra-chave biogás no intervalo de 1971, primeira ocorrência e 2021, mostrou um total de 35991 mil artigos científicos, conforme apresentado na Figura 2:

Figura 2 - Número de ocorrência de artigos científicos para o termo biogás na base de dados Scopus entre os anos de 1971 e 2021.



Fonte: Autora (2022)

Em análise dos dados, nota-se que as publicações apresentam crescimento no decorrer dos anos, o que evidencia um aumento no fomento de pesquisas desenvolvidas e interesse no estudo do biogás e biocombustíveis.

## 5 RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS

A gestão de resíduos sólidos estabelece a articulação, planejamento e implantação de um processo de gestão para realizar o processo de forma a tomar medidas preventivas para eliminá- los ou minimizá-los, passando pelo tratamento até chegar à disposição final, ou seja, aterro sanitário, opção não muito desejada. A Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010, em seus artigos 3º, inciso VII e 9º, determina observar a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, na gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010). Nessa perspectiva, a indústria deve priorizar os resíduos sólidos não produtivos primeiro e, uma vez gerados, devem ser devidamente separados e descartados (NEGREIROS,2019).

Para um manuseio seguro, é necessário conhecer os perigos do material. Portanto, de acordo com a norma ISO 14001 do Centro Nacional de Tecnologia Limpa (CNTL), é necessário garantir que todas as pessoas que trabalham e manuseiam materiais que possam ter impacto no meio ambiente receba treinamento adequado.

O treinamento necessário, segundo Silva (2022), conscientiza os operadores sobre as características e riscos de cada resíduo, desde a primeira exposição ao resíduo até o acondicionamento, armazenamento e transporte. Os operadores devem utilizar adequadamente os equipamentos de proteção individual (EPI) necessários para cada atividade; e estar sempre atentos ao contato ou contaminação com resíduos, tanto pessoais quanto ambientais, sendo necessários procedimentos de emergência.

### 5.1 Resíduos sólidos industriais e produção de biogás

Os resíduos sólidos industriais possuem diversas características devido ao processo de fabricação a partir do qual são produzidos e, como tal, são divididos em diversas categorias. O conhecimento sobre as matérias-primas ou seus processos industriais ajuda a caracterizar os resíduos (SILVA,2022).

O processo de produção é natural, resíduos da agricultura e da indústria podem ser utilizados como matéria-prima para o biogás. Da agropecuária são utilizados os dejetos da produção animal do beneficiamento agroindustrial, dos resíduos do processamento, palha, bagaço, torta de filtro e vinhaça, resíduos da mandioca e resíduos urbanos. Para a produção

de biogás no Brasil, destaca-se a vinhaça e a torta de filtro, advindas do setor sucroalcooleiro. A vinhaça é líquida, sua composição baseia-se em água, matéria orgânica e minerais, apresenta um alto teor de potássio podendo ser usado como fertilizante na produção de cana-de-açúcar, é operada somente na sua safra. Já a torta de filtro, resíduo sólido proveniente da purificação do caldo de cana é de fácil armazenamento e é utilizado para produção de biogás o ano todo.

A conversão dos resíduos agroindustriais em matérias-primas de maior valor agregado é substancial para a produção de bioprodutos oferecendo uma alternativa de diversificação de produtos para agricultores e para a agroindústria (SCHALCHLI et al., 2016).

## **5.2 Gerenciamento de substrato**

O substrato pode ser classificado como qualquer matéria orgânica passível de ser transformada em energia elétrica, térmica, mecânica e/ou biocombustível. As fontes de biomassa podem ser de resíduos agrícolas, pecuários, florestais e também de rejeitos urbanos e industriais, o potencial energético varia de acordo com a matéria-prima e da tecnologia de processamento utilizada (ANEEL, 2008). Por exemplo, o poder calorífico do bagaço de cana é de 4309,50 Kcal/ m<sup>3</sup>. Nas produções industriais as matérias-primas passam por um ou mais processos de transformação com diversos objetivos. Já os seus resíduos orgânicos se submetidos a processos de biodigestão podem gerar dois produtos: um líquido, chamado de digestato, efluente do processo, e outro gasoso, o biogás, que ao ser purificado também pode produzir biometano (GALINKIN et al., 2009).

A princípio a matéria orgânica que irá sofrer a digestão anaeróbia, dentro do biodigestor, passa por um tratamento. Este tratamento inicia-se com a separação dos resíduos, dentro de uma caixa de carga e realiza a decantação, os componentes mais densos se depositam no fundo pela ação da gravidade. O processo tem como finalidade eliminar contaminantes sólidos, como plásticos ou vidros e ao mesmo tempo tornar o resíduo orgânico mais suscetível a degradação, de modo que, os resíduos sólidos ficam no fundo da caixa e apenas a parte líquida irá para o biodigestor (MOHSENI, 2012).

Os substratos para a produção de biogás são divididos em 3 categorias de acordo com sua fonte, no Quadro 2 são listados os tipos de substratos de acordo com suas fontes:

Quadro 2 – Fontes de substrato

Fonte	Descrição	Substrato
<b>Agropecuária</b>	Engloba atividades de criação animal (Aves, bovinos, caprinos, suínos, entre outros).	Esterco animal, efluente proveniente do manejo de dejetos (urina, fezes, água de lavagem), restos de ração, carcaça de animais mortos não abatidos.
<b>Indústria (Agroindústrias)</b>	Envolve abatedouros e frigoríficos, usinas de açúcar e etanol, fecularias e amidonarias, cervejarias, indústrias de óleo vegetal, gelatina, entre outras.	Efluente industrial e demais resíduos orgânicos provenientes do processo industrial.
<b>Saneamento</b>	Contempla os aterros sanitários, usinas de tratamento de resíduos orgânicos e as ETE.	RSU, restos alimentares (restaurantes, supermercados), esgoto sanitário.

Fonte: CIBIOGÁS, 2021.

## 6 BIODIGESTORES

Biodigestores consistem em equipamentos herméticos e impermeáveis dentro dos quais se deposita material orgânico para fermentar sem a presença de oxigênio, por um determinado tempo de hidráulico, no qual ocorre um processo bioquímico denominada digestão anaeróbia, que resulta na formação de produtos gasosos, principalmente metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e uma fase líquida, o biofertilizante (MAGALHÃES, 1986).

A escolha do equipamento a ser utilizado na usina depende do substrato disponível, da qualidade do substrato, como por exemplo, teor de matéria seca, estrutura, origem. Esses fatores determinam qual a tecnologia será empregada no projeto. São diversos tipos e modelos de biodigestores, cada qual com as suas características de operação com suas vantagens e desvantagens.

Alguns dos fatores que interferem na velocidade das reações segundo Pires (2021):

- Temperatura: um aumento na temperatura leva a um aumento na velocidade das reações químicas, sejam endotérmicas ou exotérmicas, pois isso permite que o complexo ativado alcance mais rapidamente;
- Concentração: um aumento na concentração de reagentes acelerará a reação, pois haverá mais partículas reagentes por unidade de volume, aumentando a probabilidade de colisões efetivas entre elas;
- Pressão: este fator afeta apenas os sistemas de gás. O aumento da pressão também

aumenta a velocidade da reação porque faz com que as partículas reagentes entrem mais em contato;

- Superfície de contato: quanto maior a superfície de contato, mais rápida será a reação, pois conforme mencionado nos dois itens anteriores, a reação depende do contato entre as substâncias reagentes;

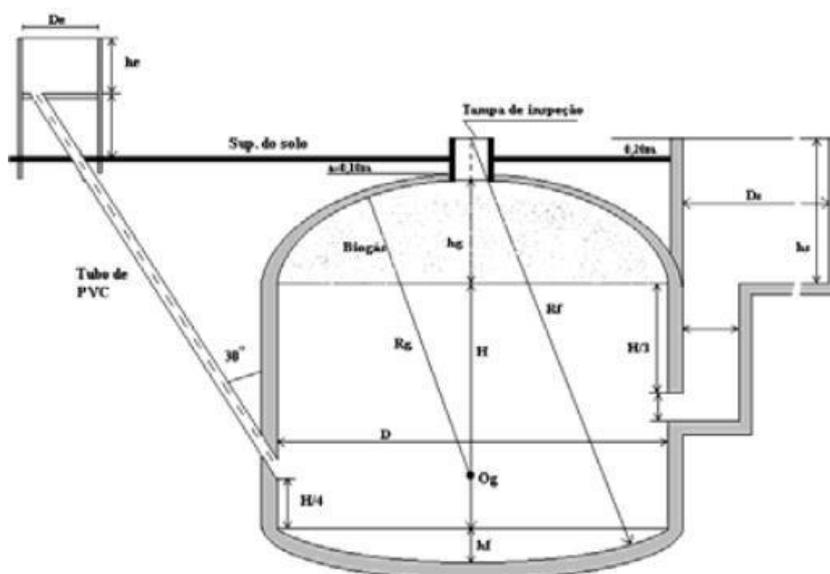
Abaixo serão descritos os modelos chinês, indiano, canadense e o CSTR.

### 6.1 Modelo chinês

Os biodigestores mais difundidos correspondem aos criados por chineses e indianos. Estes dois modelos basicamente são compostos por duas partes, a primeira por um tanque para abrigar e conduzir a digestão da biomassa, e o segundo, por um gasômetro (campânula) para armazenar o gás (MARTELLI, 2011).

O modelo chinês construído exclusivamente de alvenaria, não sendo necessário o uso de um gasômetro em chapa de aço, com isso apresenta redução de custos, mas é necessário que a estrutura esteja bem vedada e impermeabilizada para que não ocorra vazamento do biogás.

Figura 3 – Modelo de biodigestor Chinês



Fonte: Deganutti et al., 2002.

Onde os parâmetros são definidos:

**D** - Diâmetro do corpo cilíndrico;

**H** - Altura do corpo cilíndrico;

**H<sub>g</sub>** - Altura da calota do gasômetro;

**h<sub>f</sub>** - Altura da calota do fundo;

**O<sub>f</sub>** - Centro da calota esférica do fundo;

**O<sub>g</sub>** - Centro da calota esférica do gasômetro;

**h<sub>e</sub>** - Altura da caixa de entrada;

**D<sub>e</sub>** - Diâmetro da caixa de entrada;

**h<sub>s</sub>** - Altura da caixa de saída;

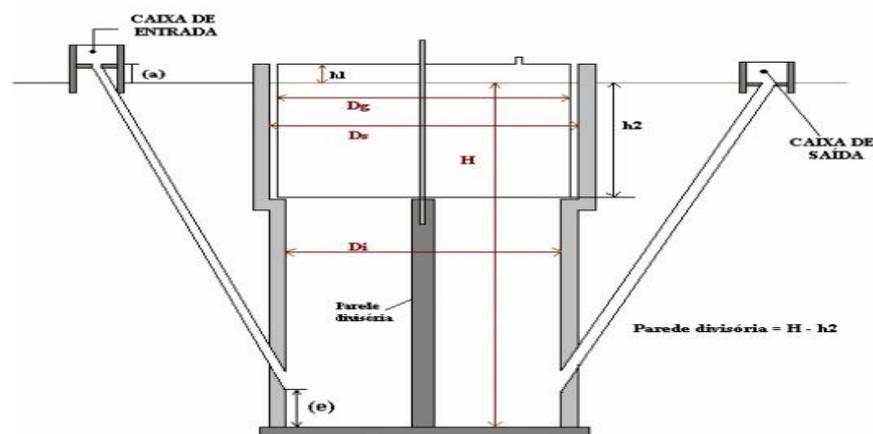
**D<sub>s</sub>** - Diâmetro da caixa de saída;

**A** - Afundamento do gasômetro;

## 6.2 Modelo indiano

O modelo indiano (Figura 4) possui duas câmaras longitudinais que permitem a circulação do material em fermentação no seu interior. Este modelo também é considerado um biodigestor de pressão constante, ou seja, o volume de gás produzido não é consumido de imediato, o gasômetro desloca-se verticalmente, aumentando o volume e, portanto, mantendo a pressão no interior constante (DEGANUTTI et al., 2022). Apresenta vantagem por ser construído enterrado no solo, esse fator favorece o processo de fermentação que ocorre em seu interior, sofrendo pouca variação de temperatura.

Figura 4: Modelo de Biodigestor Indiano.



Fonte: Deganutti et al., 2002.

Onde:

**H** – Altura do nível do substrato;

**Di** - Diâmetro interno do biodigestor;

**Dg** - Diâmetro do gasômetro;

**Ds** - Diâmetro interno da parede superior

**h1** – Altura reservatório do biogás

**h2** - Altura útil do gasômetro.

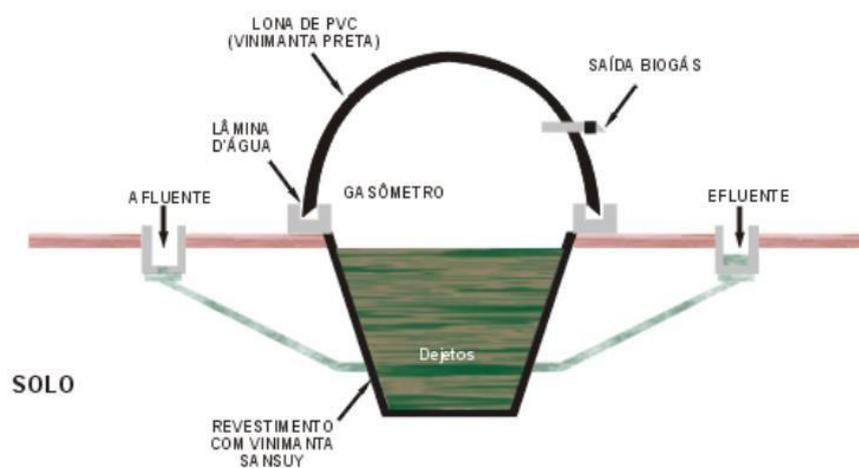
**a** - Altura da caixa de entrada.

**e** - Altura de entrada do cano com afluente.

### 6.3 Modelo canadense

Os modelos canadenses possuem uma câmara de digestão unida a um gasômetro (manta de PVC) e são de largura e dimensões maiores que a profundidade, recebendo assim, maiores incidências de raios solares, favorecendo a degradação da matéria orgânica e o processo de geração do biogás (BONFANTE, 2010; MARTELLI, 2011).

Figura 5 – Modelo de biodigestor canadense



Fonte: Deganutti et al, 2002.

### 6.4 Modelo CSTR

O modelo CSTR (Continuous-flow Stirred Tank Reactor), foi fabricado para comportar cargas volumétrica maiores, é muito utilizado no setor industrial e apresenta uma tecnologia de alta eficiência para digestão anaeróbia. Seu sistema de agitação mantém a homogeneização. Esse modelo é mais difundido nas biorrefinarias, nele parâmetros como a temperatura, pH e nível de biomassa são controlados. É operado em um fluxo semi- contínuo,

possui um diâmetro maior do que sua altura, o sistema de aquecimento é por tubos fixados no interior das paredes.

Uma planta com reator CSTR é composta pelas seguintes unidades operacionais: unidade de carregamento e alimentação do reator, tanque principal, gasômetro, unidade Combined Heat and Power (CHP), onde ocorre o aproveitamento energético do gás e armazenamento do biofertilizante.

Figura 6 -Modelo de biodigestor CSTR



Fonte: <https://www.portaldobiogas.com/>. Acesso em 15 set. 2022.

### 6.5 Comparação entre os modelos de biodigestores

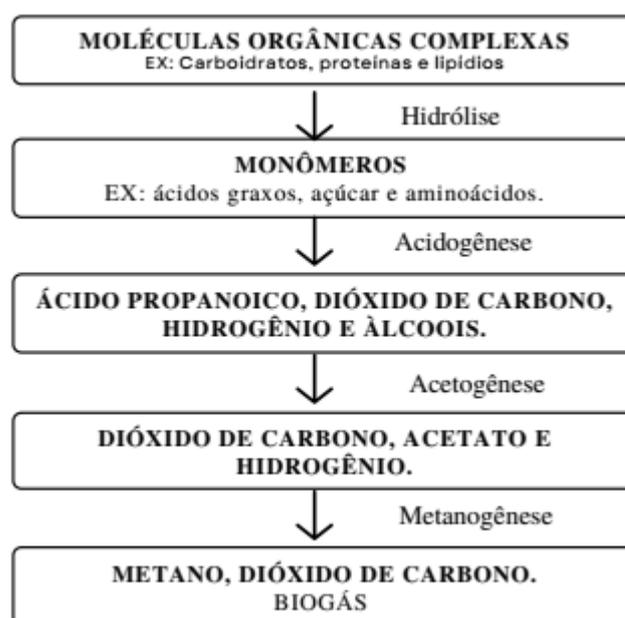
Os biodigestores apresentam características distintas das quais tem suas vantagens e desvantagens.

O modelo chinês possui um baixo custo em relação aos outros, pois é todo feito de alvenaria e não é necessário a utilização de um gasômetro de metal como no indiano. Mas possuiu a limitação do sistema caixa de carga e o digestor serem tubos e estarem sujeitos a intupimentos. O modelo canadense por possuir o gasômetro de policloreto de vinila (PVC), é de fácil higienização, mas assim como no indiano tem o custo do gasômetro. O modelo CSTR apresenta vantagem sobre os demais, por ser um biodigestor com um alta tecnologia, seu sistema de agitação garante que toda biomassa seja homogeneizada e seus parâmetros de operação podem ser controlados.

## 7 DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia é um processo fermentativo na ausência de oxigênio com quatro etapas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Outras reações também ocorrem como a sulfetogênese, uma reação indesejada porque apresenta aspectos negativos para a biodigestão, pois a conversão dos ácidos orgânicos voláteis e aromáticos, hidrogênio, metanol, etanol, açúcares, aminoácidos e vários compostos fenólicos em sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) apresenta características de toxicidade, são corrosivos e possuem mau odor. A Figura 7 apresenta o diagrama das etapas:

Figura 7: Diagrama do processo de produção de biogás

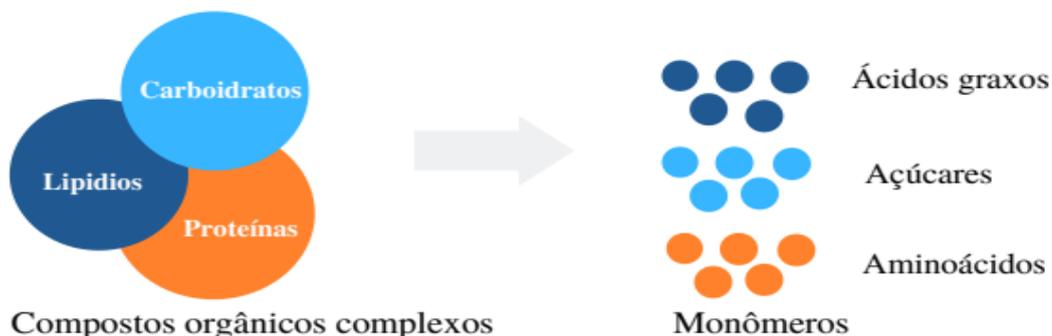


Fonte: Adaptado BITTON, 2005.

### 7.1 Hidrólise

A hidrólise é a primeira etapa do processo de digestão anaeróbia, nela ocorre a decomposição de compostos orgânicos complexos em pequenas moléculas, os carboidratos são convertidos em açúcares, as proteínas são degradadas por meio de peptídios que formam aminoácidos e os lipídios convertem-se em ácidos graxos, ilustrados na Figura 8. Compostos mais simples e solúveis para que os microrganismos consigam metabolizar.

Figura 8 - Ilustração da hidrólise

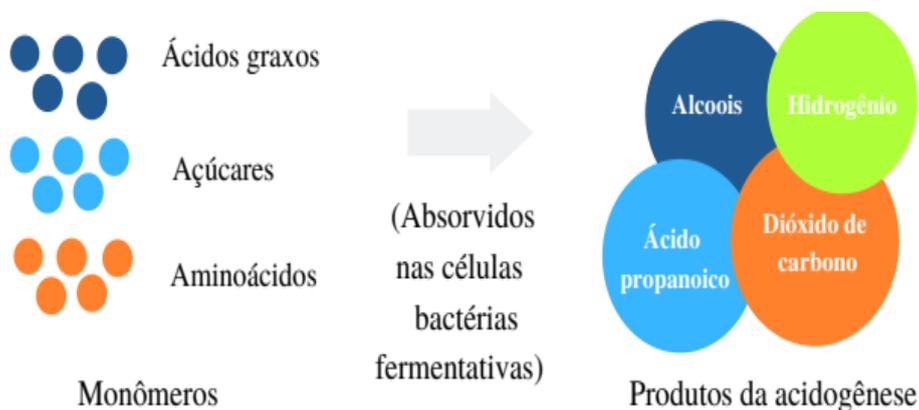


Fonte: Autora (2022)

## 7.2 Acidogênese

Na acidogênese, os monômeros formados na hidrólise são absorvidos nas células das bactérias fermentativas e os produtos dessa etapa são o ácido propanoico, álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono. É realizada por diversas bactérias, em destaque tem-se as bactérias dos grupos *Clostridium*, *Bacteroides*.

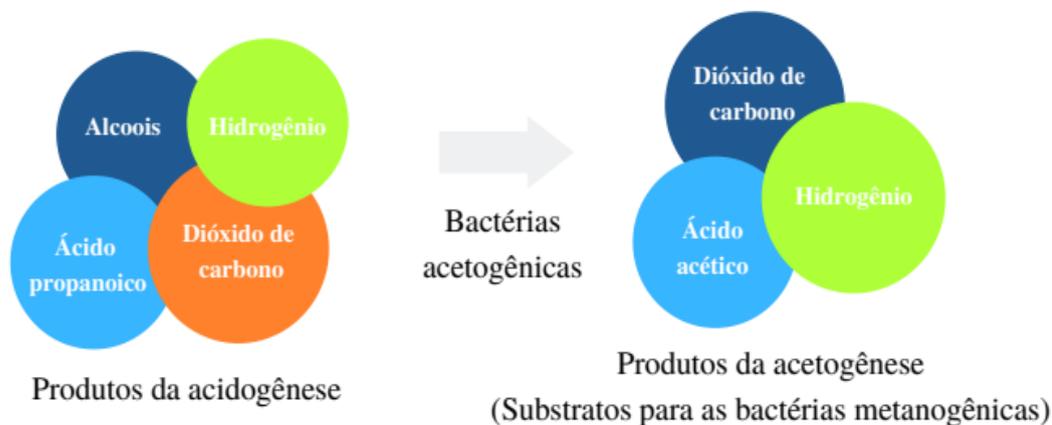
Figura 9 – Ilustração da acidogênese



## 7.3 Acetogênese

A acetogênese, é uma etapa importante entre a acidogênese e a metanogênese. Nessa fase, as bactérias acetogênicas, as quais são as formadoras de hidrogênio (*Syntrophobacter* e *Syntrophomonas*) convertem os produtos da acidogênese em ácido etanoico, hidrogênio e dióxido de carbono, que serão substratos para as bactérias *Arqueas* metanogênicas.

Figura 10 – Ilustração da acetogênese



Fonte: Autora (2022)

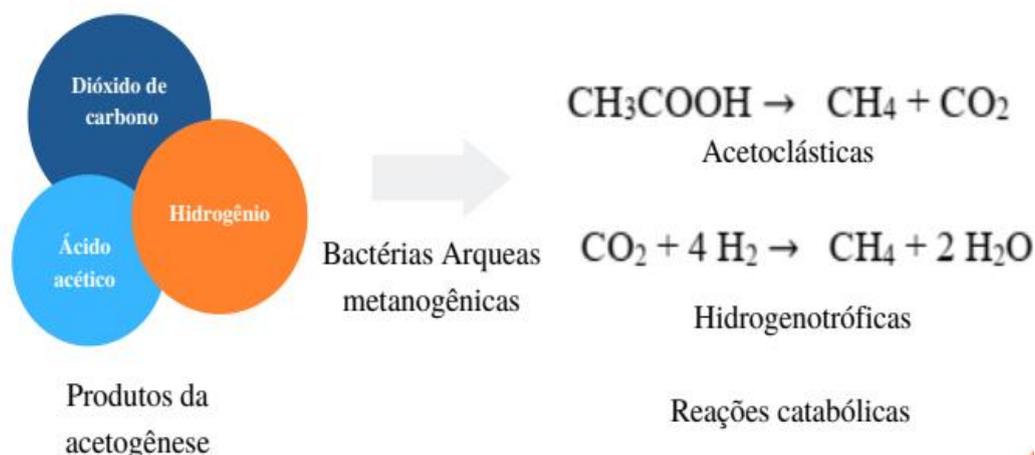
#### 7.4 Metanogênese

A última etapa é a metanogênese, fase desenvolvida pelas bactérias Arqueas metanogênicas, basicamente através de duas reações catabólicas (Figura 11). Na Equação 1, convertem ácido acético em metano e dióxido de carbono caracterizando a metanogênese acetoclástica. Na equação 2, ocorre a metanogênese hidrogenotrófica, as bactérias convertem o hidrogênio e o dióxido de carbono em metano e a água (ABREN, 2020).



O papel da metanogênese no ciclo de carbono da Terra é crítico porque eles fornecem uma maneira de o carbono não se acumular em sedimentos anaeróbios e retornar à atmosfera como dióxido de carbono ou metano. Seus metabolismos retiram energia da matéria orgânica para sustentar seu crescimento e manutenção, e liberam parte de sua energia da matéria orgânica através do metano (MATIAS,2022).

Figura 11 – Ilustração da metanogênese



Fonte: Autora (2022)

## 7.5 Condições operacionais que influenciam a digestão anaeróbia

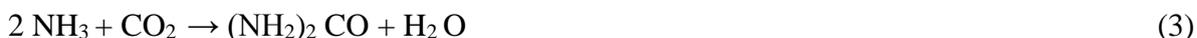
### 7.5.1 Carga

Indica a quantidade de material novo agregado no processo por unidade de tempo, a carga orgânica deve ser adaptada à microflora que está ativa (KARLSSON et al., 2014). O processo inicia-se geralmente com uma carga relativamente baixa de matéria orgânica no biodigestor, a qual aumenta gradativamente conforme ocorre crescimento dos microrganismos. Em algumas situações pode demorar meses para obter a carga orgânica desejada, devido ao crescimento lento dos microrganismos anaeróbios. Quando no início do processo há poucos microrganismos e adiciona-se uma carga orgânica os microrganismos presentes não são suficientes para degradar o material, o que resulta na formação de ácidos graxos, que não são bem vindos no processo, tornando-se instável a geração de biogás, porque diminui o pH e desequilibra a cadeia de degradação. A carga deve ser aumentada gradualmente, analisando o comportamento dos microrganismos, com o objetivo de manter o pH neutro para a produção de metano.

### 7.5.2 pH

O rendimento de biogás é maior em pH neutros. A fim de manter um pH neutro e estável é necessário que a alcalinidade do meio, ou seja a capacidade de tamponamento de uma solução, seja relativamente elevada e constante. Os substratos ricos em nitrogênio

contendo alto teor de proteínas e aminoácidos aumentam a alcalinidade. Eles liberam amônia ( $\text{NH}_3$ ) que reage dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), dissolvido para formar bicarbonato de amônio  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  e água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) (Equação 3), evitando quedas bruscas de pH.



### 7.5.3 Temperatura

Nos processos biológicos de transformação e degradação cada microrganismo envolvido no processo tem sua própria faixa de temperatura. Os microrganismos envolvidos, na degradação da matéria orgânica se dividem em três tipos, são eles:

- Psicofílicos: para uma melhor eficiência a temperatura ótima é abaixo de  $25^\circ\text{C}$ , reduzida produção de gás, não sendo recomendada para operação em escala comercial.
- Mesofílicos: operam numa faixa de temperatura entre  $25^\circ\text{C}$  e  $40^\circ\text{C}$ , caso a temperatura de fermentação esteja abaixo da ideal, há a produção de ácidos graxos e álcoois pelos microrganismos que não foram perturbados pelas variações de temperatura, fazendo com que não haja formação de metano, resultando em decréscimo do pH e interrupção do processo (KARLSSON et al., 2014).
- Termofílicos: atuam entre  $50^\circ\text{C}$  e  $60^\circ\text{C}$ , comumente utilizada em processos que há necessidade de remoção de substâncias nocivas, como é o caso de tratamento de águas residuárias.

### 7.5.4 Tempo de retenção hidráulica (TRH)

É o tempo que a mistura leva para ser totalmente digerida, isto é, o tempo entre a entrada e a saída da mistura no digestor. Esse tempo varia em função do tipo de biomassa, granulometria da biomassa, temperatura no interior do biodigestor, pH da biomassa, etc., mas, de modo geral, encontra-se na faixa de 4 a 60 dias, em biodigestores rurais, em certos digestores industriais, em poucas horas (FILHO, 1981). É definido pela relação entre o volume do biodigestor e a vazão de alimentação (Equação 4).

$$\text{TRH} = \frac{V}{Q} \quad (4)$$

Onde:

THR: tempo de retenção hidráulica ( $\text{h}^{-1}$ )

V: volume do biodigestor ( $\text{m}^3$ )

Q: vazão de alimentação ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

### 7.5.5 Concentração de sólidos voláteis

É importante saber o teor de sólidos totais (ST) e de sólidos voláteis (SV) contidos no substrato, a fim de fornecer a carga orgânica ideal para o processo de biogás. Os sólidos voláteis serão fermentados para produzir o biogás. Quanto maior for a concentração de sólidos da biomassa, maior será a produção de gás, dentro de certos limites, pois dependerá da eficiência do sistema digestor. De acordo com Apha (2005), para determinar os sólidos totais é realizada a secagem de uma amostra do substrato em uma estufa na temperatura de  $103^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , a quantidade de ST é determinado pela diferença entre a massa da amostra antes e depois da secagem (Equação 5):

$$\text{ST} = \text{massa}_{\text{amostra úmida}} - \text{massa}_{\text{amostra seca}} \quad (5)$$

Onde:

ST: sólidos totais

Os sólidos voláteis para serem determinados é necessário realizar um tratamento térmico para a remoção da fase volátil, processo denominado calcinação, realizado em forno mufla na temperatura de  $550^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ . Após a calcinação, resta a fração de sólidos fixos totais. Os sólidos voláteis são calculados pela diferença entre a massa de sólidos totais e a massa de matéria inorgânica (Equação 6) (APHA, 2005).

$$\text{SV} = \text{ST} - \text{SFT} \quad (6)$$

onde:

ST: sólidos totais

SFT: sólidos fixos totais

## 8 ASPECTOS AMBIENTAIS, POLÍTICOS E ECONÔMICOS

Na 21<sup>o</sup> COP, Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima que ocorreu no final de 2015, em Paris, os países se reuniram para formalizar um acordo sobre o clima com objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE). De acordo com suas possibilidades cada nação, apresentou seu comprometimento com a redução de emissões, conhecidas como *Intended Nationally Determined Contribution (INDC)*.

O INDC brasileiro proposto no Acordo de Paris definiu uma meta de transição a longo prazo para sistemas energéticos baseados em energias renováveis e na descarbonização da economia global, alcançando 45% de renováveis até 2030, incluindo outras fontes de energia que não hidroelétricas, que representavam no ano de 2017, 80,8% da produção de eletricidade do país (ANEEL, 2017).

A produção e consumo de energia desempenham um papel central no mundo, por isso a escolha da matriz energética é de fundamental importância. O Brasil produz a maior parte de sua eletricidade a partir de grandes projetos hidrelétricos, dos quais, embora considerados recursos renováveis, resultam em impactos socioambientais. Além disso, com as mudanças climáticas, ocorre uma alteração no regime de chuvas o que coloca em risco a segurança dos volumes das barragens para manutenção desse sistema.

A conscientização sobre questões ambientais, como poluição do ar, esgotamento de recursos naturais, o desmatamento e a perda de biodiversidade levam a sociedade a perceberem a necessidade de criação de alternativas para gerar energia de forma sustentável. Neste cenário energético, as fontes não convencionais como biogás, conquistam mais espaço na matriz energética brasileira, tendo a necessidade de completar o desenvolvimento tecnológico brasileiro, em termos de geração e uso das energias renováveis, adequando-os para a geração em escala efetiva, segura e competitiva (BLEY JR., 2015).

A Organização das Nações Unidas Para a Alimentação e a Agricultura, estima que a produção mundial de resíduos agroindustriais atinja 1,3 bilhão de toneladas por ano, sendo que, um terço dos alimentos potencialmente destinados ao consumo humano são desperdiçados, seja como resíduos, oriundos do processamento, ou como perca na cadeia produtiva (FAO, 2013). Como resultado, uma grande quantidade de resíduos é descartada, no entanto, o aproveitamento dos mesmos promovem a minimização do impacto ambiental do descarte inadequado dessas substâncias no meio ambiente. Os resíduos podem ser matérias-primas de produtos com possível valor agregado.

Além de abordar preocupações sobre recursos fósseis limitados, questões ambientais e sustentabilidade, bem como as preferências dos consumidores por produtos naturais, biodegradáveis e ecologicamente corretos. Pesquisas e projetos estão em andamento em diversos países do mundo, incluindo o Brasil, demonstrando que a digestão de resíduos sólidos em geral, pode atender simultaneamente às necessidades de gestão de resíduos e emissões de gases de efeito estufa (GEE's).

No Brasil, a produção de energia é responsável por apenas 37% das emissões de CO<sub>2</sub> equivalente, cerca de metade do percentual dos países desenvolvidos. Já a atividade agropecuária brasileira é responsável pelos outros 37%. Tal fato decorre da elevada participação das fontes hídricas e derivados da cana-de-açúcar, respectivamente 11,5% e 15,7%, na matriz energética brasileira. Dessa forma, o desafio do Brasil é elevar a alta proporção de fontes renováveis para fazer frente à maior demanda que ocorrerá com o crescimento econômico (EPE, 2016).

Em agosto de 2014, a EPE publicou a Nota Técnica 13/2014, Demanda de Energia-2050. Trata-se do segundo documento de uma série de cinco que compõem Plano Nacional de Energia de 2050 (PNE,2050) que detalhou importantes questões acerca de como o biogás e o biometano se inserem na matriz energética nacional a médio e longo prazos.

Os aspectos econômicos da obtenção de biogás e das suas aplicações energéticas, permite classificá-lo como produto com poder energético intrínseco de alto valor econômico e cuja cadeia de suprimentos abrange a indústria, comércio e serviços, com alto impacto no desenvolvimento econômico local. A atividade promove a geração de empregos e rendas, aumento da competitividade da indústria com oportunidades de descarbonização a baixos custos.

Identifica-se também que o mercado econômico do biogás se desenvolve em nível macro, estimulando a indústria de processos e insumos. É, portanto, de interesse nacional e internacional, pois gera oportunidades para o desenvolvimento industrial em todas as suas fases, das inovações permanentes até a produção industrial, diminuindo a dependência de importação de combustíveis.

Por fim, analisando o mercado econômico do biogás novas motivações políticas e sociais podem ser desenvolvidas, muito mais amplo do que tratar o biogás como subproduto único. Além disso, os setores do agronegócio e agroindústria, enxergam na produção do biogás uma nova perspectiva de gestão de resíduos, encontrando uma solução para o desenvolvimento sustentável e para produção de energia. Assim, geram receitas que cobrem as despesas de investimento e manutenção.

As políticas públicas são o conjunto de ações, metas, e planos, que os governos nacionais, estaduais ou municipais traçam para atingir o bem-estar da sociedade e o interesse público (CALDAS, 2008). A Política Nacional Energética prevê como um de seus objetivos, artigo 1º, nos incisos:

VIII: utilizar fontes alternativas de energia, mediante o aproveitamento econômico dos insumos disponíveis e das tecnologias aplicáveis.

XIV: incentivar a geração de energia elétrica a partir da biomassa e de subprodutos da produção de biocombustíveis, em razão de seu caráter limpo, renovável e complementar à fonte hidráulica (BRASIL, 1997).

Em um cenário mais atual, foi sancionada em 8 de abril de 2021 a Nova Lei do Gás, Lei nº14.134, uma iniciativa do Governo Federal, com intuito de abranger um mercado de gás natural competitivo que contribua com o desenvolvimento econômico do país (PNBB,2022).

## **9 BIOGÁS: PANORAMA MUNDIAL**

Em meados dos anos 1990, a União Europeia começou a reconhecer o impacto potencial da gestão dos resíduos sólidos nas alterações climáticas, estabelecendo metas para o aproveitamento de resíduos advindos dos aterros sanitários, o que impulsionou a criação de usinas de geração de energia elétrica a partir dos resíduos (INGLATERRA, 2014). O desenvolvimento de tecnologias para a obtenção de biogás tem sido desigual em todo mundo, pois é dependente da disponibilidade de matérias-primas, de políticas que estimulem sua produção e utilização e também de infraestrutura. Cada parte do mundo tem um escopo relevante para produzir biogás e/ou biometano, e a disponibilidade de matérias-primas sustentáveis para essa finalidade deverá crescer 40% ao longo dos anos até 2040. A Europa, a China e os Estados unidos respondem por 90% da produção global (IEA,2020).

### **9.1 Europa**

A Europa é hoje o maior produtor de biogás. Com destaque para a Alemanha, a primeira legislação para promover energia renovável foi criada em 1991, logo após a reunificação. Os resíduos agroindustriais foram a principal escolha de matéria-prima que sustentou o crescimento da indústria de biogás da Alemanha, mas recentemente a política incentivou o uso de resíduos agropecuários e captura de metano de aterros sanitários (IEA,2020). Na década de 1990 o número de plantas para a produção de biogás cresceu de

cem para mil, ainda que algumas fossem de pequeno porte, com uma capacidade inferior a 70 MW.

No ano de 2000, entrou em vigor a Lei de Energia Renovável (*Erneuerbare Energien Gesetz*), aperfeiçoada em 2004 e 2009. A lei garantiu tarifa FiT (*Feed –In- Tarif*) para eletricidade renovável, bem como um fator redutor para essa mesma tarifa, entre 1% a.a. e 1,5% a.a., de modo a refletir a incorporação de melhorias tecnológicas, além de um “bônus de biomassa” para a geração de eletricidade a partir de fontes derivadas de biomassa. A Alemanha é o país líder em capacidade de geração elétrica por biogás, com uma capacidade de 7.459,0 MW (IRENA 2021).

Outros países como Dinamarca, França, Itália e Holanda têm promovido ativamente a produção de biogás.

## **9.2 China**

Na China, as políticas de estado têm apoiado a instalação de biodigestores domésticos em áreas rurais, alimentados por resíduos agroindústrias, com o objetivo de aumentar o acesso à energia e combustíveis limpos para cozinhar alimentos nas residências; esses biodigestores correspondem cerca de 70% da capacidade instalada de biogás no país. Diferentes programas foram anunciados para apoiar a instalação de usinas de cogeração de maior escala. O biogás baseado em projetos de engenharia na agricultura mostra um crescimento acentuado (GU et al., 2016). Além disso, a Comissão Nacional de Desenvolvimento e Reforma da China emitiu um documento de orientação no final de 2019 especificamente sobre a industrialização do biogás e a atualização para o biometano, apoiando também o uso do biometano no setor de transporte (IEA,2020). A capacidade de produção de energia elétrica por biogás no país é de 903,30 MW, ocupando o quinto lugar no ranking de países que geram energia elétrica por meio do combustível (IRENA, 2021).

## **9.3 Estados Unidos**

A produção de biogás é oriunda da coleta de gás de aterro e hoje responde por quase 90% de sua produção. Há também um interesse crescente na produção de biogás a partir de resíduos agrícolas, uma vez que os mercados domésticos de gado são responsáveis por quase um terço das emissões de metano nos Estados Unidos. O país também lidera globalmente o uso de biometano no setor de transporte, como resultado do apoio estadual e federal. Até agora, o biometano tem sido produzido principalmente a partir de aterros sanitários, mas algumas operações de digestores agrícolas estão começando a participar. O país aparece em segundo lugar no ranking dos países com maior geração de energia elétrica

por biogás, com 2.291,00 MW (IRENA,2021).

## **10 BIOGÁS: PANORAMA BRASILEIRO**

No Brasil, a produção de biogás iniciou com a crise do petróleo na década de 1970, o preço da energia subiu e surgiu a necessidade de aproveitar o biogás produzido, diante disso começou a realizar mais pesquisas, com a finalidade de otimizar o processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica.

Nesse cenário de crise, o Brasil era completamente dependente, pois a maioria do óleo bruto consumido no país era advindo do exterior. Portanto, foi necessário estabelecer estratégias para contornar a crise, buscando outras fontes de energia, em substituição do petróleo externo. Descobriu-se petróleo na Bacia de Campos, no estado do Rio de Janeiro, que começou a ser explorada em 1976.

Logo após foi implantado o Proálcool, um programa que estimulou a produção de álcool como combustível para diminuir a dependência de combustíveis do exterior, o programa abriu caminho para os biocombustíveis de forma geral. Essas medidas visavam ao atendimento das necessidades do atual mercado interno, externo e da política de combustíveis automotivos (KARLSSON et al., 2014). A produção de biogás surgiu como uma alternativa interessante para contribuir com a crise energética, visto que o Brasil é um grande gerador de biomassa.

Em 1977, surgiu o Projeto de Difusão do Biogás da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER), executado no Estado de São Paulo e no Distrito Federal; porém o projeto não atingiu os objetivos propostos. Além disso, o sistema político não favoreceu a implantação dos biorreatores e o sucesso da utilização do biogás, pois o modelo de governo vigente definia os investimentos de acordo com os acontecimentos da crise. Por isso, na década de 1980, os programas que buscavam fontes alternativas de energia, entre elas o biogás, foram desativados.

Nos anos 1990, a implantação dos biodigestores foi motivada pela conversão da biomassa e também pelo aspecto ambiental, para a geração de energia que suprisse a matriz energética como medida de segurança caso houvesse alta nos preços do petróleo.

Atualmente, o biogás é uma das fontes de energia renovável que mais cresce no Brasil e no mundo, é uma forma de gestão eficiente e inteligente dos resíduos. Sendo utilizado em geração de energia térmica, mecânica e elétrica e quando purificado é convertido em biometano utilizado como combustível em veículos, reduzindo assim o

impacto ambiental causado pelos combustíveis fósseis.

No Brasil, considerando a frota de veículos movidos a gás natural, o uso do biometano como combustível se torna uma alternativa atraente, pois aproximadamente 16,7 milhões de veículos a gás natural existentes no mundo inteiro em 2012, aproximadamente 1,74 milhões estão no maior país da América do Sul, isso corresponde a um percentual de 11,2%. Segundo dados da ABIOGÁS, o potencial teórico de produção de biogás brasileiro é de 84,6 bilhões de normal metros cúbicos por ano (Nm<sup>3</sup>/ano), o que seria suficiente para suprir 40% da demanda interna de energia elétrica e 70% do consumo de diesel.

A produção de biogás é economicamente viável, pois a grande maioria das máquinas e equipamentos para a construção e implementação dos biodigestores são produzidas no país, desse modo é previsível o cálculo dos custos, seus preços são corrigidos pelo IPCA, portanto não sofrem a variação do câmbio.

Em 2021, setor agropecuário foi responsável por 80% das plantas de biogás em operação no país. Os setores industrial e de saneamento contribuíram em 11% e 9%, respectivamente. Em volume de biogás, o setor de saneamento apresentou 73,9% do total produzido, seguido pela indústria (16%) e agropecuária (9,7%) (CIBIOGÁS, 2021).

Na Tabela 2, são listadas a relação ente número de plantas em operação e volume de biogás produzido no ano de 2021, considerando escalas de produção de grande, médio e pequeno porte:

Tabela 2 - Relação entre o número de plantas em operação e volume de biogás no ano de 2021, por origem de substrato:

Fonte	Número de plantas	Volume de biogás (Nm <sup>3</sup> /ano)
Agropecuária	606	240,63 milhões
Indústria/Agroindústria	84	367,68 milhões
RSU <sup>1</sup>	65	1,74 bilhões

<sup>1</sup>RSU - Resíduos de sólidos urbanos

Fonte: CIBIOGÁS, 2021.

Observa-se que o número de plantas que utilizam resíduos da indústria/agroindústria, apesar de ser menor que o número de plantas que usam os resíduos da agropecuária, o volume de biogás produzido é maior.

No Brasil, as principais aplicações para o biogás são para fins energéticos, sendo elas geração de energia elétrica, térmica, energia mecânica e/ou biometano para uso veicular ou em substituição do gás natural. O mapeamento das usinas é baseado nesses principais tipos. Na Tabela 3, são listados o número de plantas de biogás com fins energéticos em operação no país em 2021.

Tabela 3 - Relação do número de plantas de biogás com fins energéticos em operação no país em 2021.

Aplicação energética	Número de plantas	Volume de biogás (Nm <sup>3</sup> /ano)
Energia elétrica	656	1,67 bilhões
Energia térmica	83	150,71 milhões
Energia mecânica	6	7,53 milhões
Biometano	10	522,17 milhões

Fonte: CIBIOGÁS, 2021.

O volume de biogás é maior para a geração de energia elétrica. Identifica-se, que apesar do número de plantas destinada para a produção de biometano ser baixo, o volume de biogás destinado para a produção é bastante expressivo, compondo aproximadamente 22% da aplicação energética.

No setor de combustíveis, a ANP é responsável por permitir a produção e comercialização de biometano além de elaborar as Resoluções das especificações que garantem a qualidade dos biocombustíveis. A Resolução ANP n° 08/2015 foi publicada em 2015, nela continha a primeira especificação de qualidade, ajustou variáveis para a produção de biometano procedente de resíduos orgânicos e resíduos da agropecuária para serem comercializados em todo território nacional para uso veicular e instalações industriais. Em 2017, a Resolução n° 685/2017 regulamentou a utilização do biocombustível produzido a partir de RSU e as ETE's. Essas normas propiciaram a comercialização do biometano e seu crescimento no mercado.

## 11 MERCADO E POTENCIALIDADES

O uso de combustíveis renováveis ganhou enorme impulso a partir da elaboração do RenovaBio, programa sob responsabilidade do Ministério de Minas e Energia (MME), que tem em seu núcleo operacional a participação do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, da ANP e da EPE. Estas instituições buscam conjuntamente as diversas posições dos agentes públicos e privados quanto ao tema dos combustíveis renováveis.

O biogás e o biometano são considerados importantes ativos nas empresas de diferentes ramos, eles promovem a substituição da utilização de combustíveis fósseis em seus serviços de logística e melhoria na gestão de resíduos da produção, o que possibilita a redução da pegada de carbono do processo produtivo e agrega valor ambiental.

O setor sucroalcooleiro apresenta as condições mais adequadas para a utilização de biomassa para a produção do biogás no Brasil. Segundo a Unica, União de Cana-de-Açúcar e Bioenergia na safra de 2021/2022 a produção foi de aproximadamente de 576 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. A EPE estima que o setor sucroalcooleiro seja capaz de produzir resíduos para aumentar a produção de biogás para 8,4 bilhões Nm<sup>3</sup>/ano em 2026 (EPE, 2021).

## 12 CONCLUSÃO

Portanto, devido ao aumento das intempéries climáticas em decorrência das atividades humanas, a crescente geração de resíduos, a volatilidade dos preços dos combustíveis fósseis, cresce a busca por alternativas de combustíveis renováveis, bem como alternativas para tratamentos dos resíduos orgânicos. Essa revisão bibliográfica guiou um estudo sobre a produção do biogás a partir da digestão anaeróbia de substratos orgânicos.

Para uma melhor eficiência na produção de biogás é importante conhecer a fonte de substrato, a escolha da biomassa influencia diretamente na qualidade e na quantidade de biogás produzido. Além disso, o tipo de biodigestor deve ser levado em conta no processo, assim como as condições operacionais são importantes. A biomassa fermentada, gera duas correntes, uma líquida, rica em material orgânico, denominado digestato é utilizado como biofertilizante e uma fase gasosa, o biogás propriamente dito. A purificação do biogás resulta em biometano, um combustível gasoso com características semelhantes ao gás natural.

O aspecto ambiental mais relevante da produção de biogás é o tratamento e o aproveitamento de resíduos para geração de energia e pode compor a matriz energética. Além de sancionar a problemática ambiental, a produção de biogás contribui

economicamente, aumenta a competitividade das indústrias nacionais, pois o biogás gerado pode ser utilizado nas indústrias de diferentes setores, e em conjunto com políticas públicas possibilitando desenvolvimento sustentável.

Em panorama mundial, a Europa, a China e os Estados Unidos respondem por uma porcentagem considerável da produção mundial, o que só é possível com políticas bem consolidadas. No Brasil, o biogás é uma das fontes para a geração de energia que mais cresce, as fontes de substrato são advindas da agropecuária, agroindústria, que se destacam os resíduos do setor sucroalcooleiro, vinhaça e a torta de filtro, e os resíduos provenientes do saneamento. As principais aplicações são na geração de energia elétrica, térmica, mecânica e/ou biometano.

A importância do biogás reflete no crescente número de artigos científicos publicados, conforme apresentado. Assim, uma vez estabelecida uma política de incentivo que favoreça a sua inclusão, contribuindo não só para redução os GEE definido pelo Acordo de Paris, mas também para a diversificação da matriz energética de fontes sustentáveis.

### **13 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Com as informações levantadas nesse estudo, oportunidades foram identificadas para o desenvolvimento de novos trabalhos, sendo elas:

- Avaliação das vantagens econômicas da produção do biogás e um estudo de payback de investimento em uma usina de biogás.
- Avaliação do ciclo de vida para a produção de gás natural veicular e biometano, caracterizando as rotas para obtenção dos gases.
- Um estudo de modelo de negócios para uma biorrefinaria.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA,; AWWA; WEF – Water Environmental Federation; AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association (APHA):** Washington, DC, USA, 2005.

ABIOGÁS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS. **Ministério do meio ambiente,2018.** Disponível em: < <https://abiogas.org.br/>>. Acesso em: 15 de jul.2022.

ABREN - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS. **Plano Institucional**, 2020. Disponível em: <[www.abren.org.br](http://www.abren.org.br)> . Acesso em: 10 jul. 2022.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3 ed. – Brasília: ANEEL, 2008.

ANDA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA A DIFUSÃO DE ADUBOS. **Principais indicadores do setor de fertilizantes**. 2016. Disponível em: < <http://anda.org.br/>>. Acesso em: 2 jun. 2022.

BEZERRA, Paulo Ricardo Cosme. **Gestão ambiental dos processos produtivos: um estudo do gerenciamento dos resíduos sólidos nas indústrias gráficas**. *Brazilian Journal of Development*, v. 4, n. 5, p. 2211-2225, 2018.

BIOGASMAP. Disponível em: <<https://mapbiogas.cibiogas.org/>>. Acesso em: 4 jun. 2022.

BITTON, G. *Wastewater microbiology*. Ed. Wiley-Liss, 2005, New York, NY.

BLEY JR., C. **Biogás: a energia invisível**. 2º ed. – São Paulo: CIBiogás; Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, 2015.

BONFANTE, 2010; T. M. Análise da viabilidade econômica de projetos que visam à instalação de biodigestores para o tratamento de resíduos da suinocultura sob as óticas do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e da geração de energia. 2010. 175 f. Dissertação (Mestrado) – **Programa de Pós-Graduação em Administração de Organizações da Faculdade de Economia**, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo. Ribeirão Preto, 2010.

BUDZIANOWSKI, W. M.; BRODACKA, M. **Biomethane storage: Evaluation of technologies, end uses, business models, and sustainability**. *Energy Conversion and Management*.

BRASIL. Lei n. 9.478, de 6 de agosto de 1997- **Publicação original**. Disponível em: < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9478.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9478.htm)>. Acesso em: 04 jun. 2022.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010 -**Publicação original**.Disponível em:

<<http://www.planalto.gov.br/>>. Acesso em 04 jun.2022.

BLEY JR., C. **Biogás: a energia invisível**. 2º ed. – São Paulo: CIBiogás; Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, 2015.

CANA, Luciana. **Vinhaça e torta de filtro vão virar eletricidade e biometano para bastecer veículos**. 2022. Disponível em <<http://www.canaonline.com.br/conteudo/vinhaca-e-torta-de-filtro-va-virar-eletricidade-e-biometano-para-bastecer-veiculos.html>.:> Acesso em: 22 ago. 2022

CALDAS, Ricardo Wahrendorff (coord.). **Políticas Públicas: conceitos e práticas**. Belo Horizonte: Sebrae/MG, Série Políticas Públicas, vol. 7, 2008.

CIBIOGAS – **Centro Internacional De Energias Renováveis**. Disponível em: <<https://cibiogas.org> > . Acesso em: 30 jun. 2022.

CETESB. **Biogás, Definição**. Publicado em 20 mar. 2020 Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/biogas>> . Acesso em: 16 set. 2022.

DA ROCHA JR, Weimar Freire et al. O ambiente institucional e políticas públicas para o biogás proveniente da suinocultura. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 9, n. 16, 2013.

DEGANUTTI, Roberto et al. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002.

EPE – EMPRESA D PESQUISA ENERGÉTICA. **O Compromisso do Brasil no Combate às Mudanças Climáticas: Produção e Uso de Energia, 2016**. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 4 de jul.2022.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE - FEAM. **Guia técnico ambiental de biogás na agroindústria. Belo Horizonte**. Fundação Estadual do Meio Ambiente, Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais, Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável (GIZ), 2015.

FILHO, J. A. C. **Biogás, independência energética do Pantanal Matogrossense**. Circular técnica nº. 9. Corumbá, EMBRAPA, 53 p., 1981.

GALINKIN, M. et al. **Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais**. 2ª ed. rev. - Foz do Iguaçu/Brasília: Itaipu Binacional, 65 Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, TechnoPolitik Editora, 2009.

GASPAR, R. M. B. L. **Utilização de Biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo** - Pr. 2003. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 2003.

GIL, A. C. **Como elaborar Projeto de Pesquisa**. São Paulo, SP: Atlas, 2022.

GOLDEMBERG, José; COELHO, Suani Teixeira; PECORA, Vanessa. **Perspectivas da utilização de biogás como fonte de energia**. In: BARROS FILHO, Omar L. de; BOJUNGA, Sylvia (orgs.). *Potência Brasil: gás natural, energia limpa para um futuro sustentável*, 2008, p. 135-136.

GU, L. et al. Where is the future of China's biogas? **Review, forecast, and policy implications**. *Petroleum Science*, v. 13, p. 604-624, 2016.

INGLATERRA. **Department for Enviromental, Food & Rural Aff airs. Energy from waste: a guide to debate**. Disponível em: <  
[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/284612/pb14130-energy-waste-201402.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/284612/pb14130-energy-waste-201402.pdf)>. Acesso em: 15 jun. 2022;

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth**, IEA, Paris, 2020 Disponível: <  
<https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>> Acesso em: 13 de jul.2022.

INSTITUTO ACENDE BRASIL. **Mudanças Climáticas e o Setor Elétrico Brasileiro**, 2012.

IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable capacity statistics 2021**. March 2021. ISBN : 978-92-9260-342-7. Abu Dhabi, 2021. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2021/March/Renewable-Capacity-Statistics-2021>.

KARLSSON, T.; KONRAD, O.; LUMI, M.; SCHMEIER, N. P.; MARDER, M.; CASARIL, C.A.; KOCK, F. F.; PEDROSO, A.G. **Manual Básico de Biogás**. 1 ed. Lajeado: Ed. da Univates, 2014. 69 p.

MAGALHÃES, Agenor P. T. **Biogás: um projeto de saneamento urbano**. São Paulo: Nobel, 1986, 120p.

MARTELLI, L. F. A. **Avaliação quantitativa e qualitativa da matéria orgânica de solo sob a aplicação de efluente de esgoto tratado em biodigestor anaeróbico**. 2011. 119 f. Dissertação (Mestrado Química) - Instituto de Química de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

MATIAS, Kervyson Cavalcante. **Produção de Biogás a partir de resíduos orgânicos visando aplicação em aquecimento e cocção de alimentos em substituição ao gás natural**. 2022. 38f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Petróleo) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

MIYAWAKI, B. **Purificação de biogás através de cultivo de microalgas em resíduos**

**agroindustriais**. 2014. 137 F. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) -Setor de Tecnologia. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim Mensal dos Combustíveis Renováveis**. ed. 96. fev. 2016. Disponível em:Acesso em: 4 jul. 2022.

MOHSENI, Farzad et al. **Biogas from renewable electricity** – Increasing a climate neutral fuel supply. *Applied Energy*, v. 90, n. 1, p. 11-16, 2012.

NETO, José Osório do Nascimento. **Políticas Públicas e Regulação Socioambiental**. Curitiba: Editora Íthala, 2017;

NEGREIROS, Rosângela Vidal et al. Gerenciamento de resíduos sólidos de saúde em hospital universitário do Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 1, p. 239-251, 2019.

OLIVEIRA, P. A. V.; Higarashi, M. M. **Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2006,42p.

PIRES, Diogo Ricardo Gaspar; SÁ, Luciana Passos. A experimentação no ensino de cinética química: buscando indícios da aprendizagem significativa. **Scientia Naturalis**, v. 3, n. 2, 2021.

PNBB – PROGRAMA NACIONAL DE BIOGÁS E BIOMETANO. **Plano Nacional de biogás e biometano** p .16. Disponível em: < <https://abiogas.org.br/>>. Acesso em: 30 jul. de 2022.

PNBB – PROGRAMA NACIONAL DE BIOGÁS E BIOMETANO. **Plano Nacional de biogás e biometano** p .27. Disponível em: < <https://abiogas.org.br/>>. Acesso em: 30 jul. de 2022.

SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M. C. Estudos de Revisão Sistemática: Um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, v. 11, n. 1, p. 83-89, 2009 SILVA, Ivan Alves. **Gerenciamento dos resíduos sólidos de serviços de saúde**. 2022.

SCHALCHLI, H. et al. **Production of ligninolytic enzymes and some diffusible antifungal compounds by white-rot fungi using potato solid wastes as the sole nutrient source**. *International Journal of Laboratory Hematology*, v. 38, n. 1, p. 42–49, 2016.

SILVA, Ivan Alves. **Gerenciamento dos resíduos sólidos de serviços de saúde**. 2022.

TAVARES, J. P. Z. Viabilidade da produção de biogás gerado no tratamento de resíduos alimentícios, indústria, biodiesel e sucroalcooleira. **Trabalho de conclusão de curso** (Tecnologia em Biocombustíveis) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Câmpus Matão, Matão – SP.