



Mapeamento e identificação de janelas de oportunidades para o biogás no Brasil via análise *SWOT*

Milena Silva de Freitas

Monografia em Engenharia de Bioprocessos

Orientadores:

Profa. Suzana Borschiver, *D. Sc.*

Flávio da Silva Francisco, *D. Sc.*

Junho de 2022

MAPEAMENTO E IDENTIFICAÇÃO DE JANELAS DE OPORTUNIDADES PARA O BIOGÁS NO BRASIL VIA ANÁLISE SWOT

Milena Silva De Freitas

Monografia em Engenharia de Bioprocessos submetida ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenharia de Bioprocessos.

Aprovado por:

Tamar Roitman, *M. Sc.*

Estevão Freire, *D. Sc.*

Élcio Ribeiro Borges, *D. Sc.*

Orientado por:

Profa. Suzana Borschiver, *D. Sc.*

Flávio da Silva Francisco, *D. Sc.*

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Junho de 2022

CIP - Catalogação na Publicação

F886m Freitas, Milena
Mapeamento e identificação de janelas de oportunidades para o biogás no Brasil via análise SWOT / Milena Freitas. -- Rio de Janeiro, 2022. 113 f.

Orientador: Suzana Borschiver.
Coorientador: Flávio da Silva Francisco.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Bacharel em Engenharia de Bioprocessos, 2022.

1. biogás. 2. biogás no Brasil. 3. mapeamento. 4. oportunidades. 5. análise SWOT. I. Borschiver, Suzana, orient. II. da Silva Francisco, Flávio, coorient. III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, dirijo minha gratidão à Deus, que tem me sustentado e conduzido em todos os momentos, tornando possível a conclusão de mais esta etapa. *“Pois d’Ele, e por Ele, e para Ele são todas as coisas; glória, pois, a Ele eternamente. Amém”* (Romanos 11:36).

Aos meus pais, Ilma e Francisco, o meu agradecimento. Vocês são exemplos de garra. Eu sei que os dias não foram fáceis, mas vocês insistiram, acreditaram e incentivaram genuinamente seus filhos. Não poderia deixar de agradecer aos meus irmãos, João e Marcus, pela nossa parceria de vida. Todos vocês foram e são minha rede de apoio.

À minha cunhada, Ingrid, e meus sobrinhos, Calleb e Yasmin, por trazerem diariamente alegria e cor à vida.

Ao meu noivo, Lorhan, gostaria de expressar minha sincera gratidão por ser sinônimo de carinho, compreensão e paciência. Com certeza, teria sido muito mais difícil sem você. Obrigada por ter cruzado o meu caminho e por nele permanecer.

Aos meus amigos e companheiros de jornada: Daniela Campos, Daniel Cozendey, Isabella Bastos, João Vitor França e Luis Bordini. Obrigada por partilharem e serem suporte nos momentos de aflição e angústia, mas também por trazerem leveza, sorrisos e momentos de descontração.

Aos meus orientadores, Suzana Borschiver e Flávio da Silva Francisco, deixo meus agradecimentos e admiração, por toda dedicação e ensinamentos. Estendo esta gratidão ao Programa de Capacitação em Processos e Sistemas da Indústria de Petróleo e Biocombustíveis PRH/ANP 3.1 e aos docentes e funcionários da Escola de Química da UFRJ.

Por fim, à fluoxetina.

Resumo da monografia apresentada à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenharia de Bioprocessos.

MAPEAMENTO E IDENTIFICAÇÃO DE JANELAS DE OPORTUNIDADES PARA O BIOGÁS NO BRASIL VIA ANÁLISE SWOT

Milena Silva de Freitas

Junho, 2022

Orientadores: Prof. Suzana Borschiver, *D. Sc.*

Flávio da Silva Francisco, *D. Sc.*

A busca por fontes de energia que tenham um menor impacto no meio ambiente têm se intensificado a cada ano devido a necessidade mundial de estabelecer um bom equilíbrio entre homem e natureza, além de garantir o progresso econômico e social. O biogás, combustível produzido através de resíduos orgânicos e com uma gama de aplicações energéticas, está em uma curva crescente de envolvimento na matriz energética brasileira. O presente projeto apresenta um mapa da atual situação do biogás como energético no Brasil, abordando tanto aspectos produtivos quanto o cenário político, e uma análise, com base na matriz *SWOT*, de como o biogás tem se posicionado dentro do mercado de bioenergia e biocombustíveis. O Brasil conta com 755 plantas em operação, responsáveis por toda a produção nacional de biogás, 44 em implantação e 12 em reformulação e há ações de incentivo, que norteiam e direcionam a geração do energético. Atualmente o país aproveita apenas 3% do enorme potencial de produção que detém e, de acordo com a análise *SWOT* o mercado de bioenergia e biocombustíveis nacional se mostra favorável a expansão do biogás, uma vez que os pontos, internos e externo, que estimulam a expansão do biogás, como por exemplo os Programas RenovaBio e Metano Zero, se destacam frente às barreiras que podem limitar a expansão, como o alto controle operacional necessário na produção e a competição pelo fornecimento de biomassas. A geração e utilização do biogás para fins energéticos traz ganhos econômicos, sociais e ambientais para o Brasil e crescimento do uso de biogás carece de ser mobilizado, para que esses benefícios sejam desfrutados por toda a sociedade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação da utilização de energias renováveis no Brasil e no Mundo no ano de 2021	17
Figura 2 - Aplicações de mercado do biogás.....	23
Figura 3 - Linha do tempo da descoberta e incorporação do biogás no mundo	26
Figura 4 - Primeiros passos do biogás no Brasil	27
Figura 5 - Funcionamento do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e Créditos de Carbono	28
Figura 6 - Linha do tempo do impulso do biogás no Brasil.....	31
Figura 7 - Etapas da produção de biogás.....	32
Figura 8 - Etapa de pré-tratamento que antecede a decomposição do substrato	38
Figura 9 - Processo de digestão anaeróbia. 1-Fase Fermentativa, 2-Fase Metanogênica.....	39
Figura 10 – Representação esquemática do biodigestor modelo indiano	43
Figura 11 - Representação esquemática do biodigestor modelo chinês	45
Figura 12 - Representação esquemática do biodigestor modelo lagoa coberta	46
Figura 13 - Representação esquemática de um tanque de agitação contínua – CSTR	48
Figura 14 - Esquema de funcionamento de um reator UASB.....	49
Figura 15 - Representação esquemática do biodigestor em fase sólida	50
Figura 16 – Tratamento e purificação do biogás conforme o uso final	52
Figura 17 - Processos tecnológicos mais comumente empregados na dessulfurização do biogás	54
Figura 18 - Diagrama de borboleta. 1. Caça e pesca; 2. Pode tomar como insumo tanto resíduos pós-colheita quanto pós-consumo	59
Figura 19 - Fluxograma simplificado do setor de biogás	60

Figura 20 - Matriz energética brasileira - 2021	62
Figura 21 - Participação do biogás em “outras renováveis”	62
Figura 22 - Evolução, entre o período de 2015 a 2021, da participação das energias renováveis e do biogás, em especial, na matriz energética brasileira.....	63
Figura 23 - Produção atual e potencial do biogás no Brasil. Nm ³ representa o volume medido em condições padrão (1 atm, 273 K e 0% de umidade relativa)	64
Figura 24 - Crescimento do setor de biogás nos últimos 5 anos	64
Figura 25 - Distribuição das plantas de biogás no Brasil em 2021 de acordo com o status operacional	65
Figura 26 - Distribuição do volume de biogás produzido no Brasil de acordo com o status operacional	66
Figura 27 - Municípios com esgotamento sanitário (%) por grandes regiões do Brasil	69
Figura 28 - Distribuição de plantas de acordo com a origem de substrato por grandes regiões do Brasil.....	70
Figura 29 - Distribuição das plantas de biogás em operação de acordo com a localização no território brasileiro	73
Figura 30 - Top 5 estados com maiores volumes de produção de biogás no Brasil.	74
Figura 31 - Organização da matriz SWOT.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais propriedades do biogás	22
Tabela 2 - Produção de biogás e biometano a partir de resíduos da agropecuária ..	34
Tabela 3 - Produção de biogás e biometano a partir de resíduos da agroindústria de transformação	36
Tabela 4 - Vantagens e Desvantagens do modelo indiano.....	44
Tabela 5 - Vantagens e desvantagens do modelo chinês	45
Tabela 6 - Vantagens e desvantagens do modelo canadense	47
Tabela 7 - Classificação do porte das plantas de acordo com o volume de biogás produzido.....	67
Tabela 8 - Plantas em operação no Brasil agrupadas de acordo com o porte.....	67
Tabela 9 - Agrupamento, a partir da fonte de substrato, das plantas de biogás em operação no Brasil	68
Tabela 10 - Agrupamento das plantas em operação de acordo com a aplicação energética.....	71
Tabela 11 - Ferramentas associadas ao projeto GEF Biogás Brasil.....	78
Tabela 12 - Políticas públicas de maior impacto à nível federal	80
Tabela 13 - Políticas públicas de maior impacto à nível estadual.....	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Perguntas guias para elaboração da matriz SWOT	86
Quadro 2 - Matriz SWOT	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC	Agricultura de Baixa Emissão de Carbono
Abegás	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado
ABiogás	Associação Brasileira de Biogás
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis
BEN	Balanço Energético Nacional
CIBiogás	Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás
<i>CSTR</i>	<i>Continuous Stirred Tank Reactor</i>
EC	Economia Circular
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETE	Estações de Tratamento de Esgoto
GEE	Gases do Efeito Estufa
<i>GEF</i>	<i>Global Environment Facility</i>
GN	Gás Natural
GNL	Gás Natural Liquefeito
ICT	Instituição de Ciência e Tecnologia
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MME	Ministério de Minas e Energia
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OIE	Oferta Interna de Energia
ONU	Organização das Nações Unidas

P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PIB	Produto Interno Bruto
PME	Programa de Mobilização Energética
PNBB	Plano Nacional de Biogás e Biometano
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
PROBIOGÁS	Programa Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de biogás no Brasil
Proinfa	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia
ProNAF	Programa Nacional de Agricultura Familiar
PTI	Parque Tecnológico Itaipu
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
<i>UASB</i>	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.1.1. Energia e sociedade	14
1.1.2. Fontes de energia e problemática das fontes fósseis	15
1.1.3. Transição energética e biogás	16
1.2. MOTIVAÇÃO	19
1.3. OBJETIVO	19
1.3.1. Objetivo geral	19
1.3.2. Objetivos específicos	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1. BIOGÁS X GÁS NATURAL.....	21
2.2. APLICAÇÕES E VANTAGENS	22
2.3. BREVE CONTEXTO HISTÓRICO	24
2.3.1. Descoberta e incorporação do biogás no mundo	24
2.3.2. História do biogás no Brasil	26
2.4. CADEIA PRODUTIVA	31
2.4.1. Matérias-primas	32
2.4.1.1. Resíduos da agropecuária	34
2.4.1.2. Resíduos da agroindústria de transformação.....	34
2.4.1.3. Saneamento.....	36
2.4.2. Pré-tratamento	37
2.4.3. Digestão anaeróbica	38
2.4.4. Biodigestores	41
2.4.4.1. Modelo Indiano.....	42
2.4.4.2. Modelo chinês	44

2.4.4.3.	Modelo canadense ou lagoa coberta	45
2.4.4.4.	Tanque de agitação contínua.....	47
2.4.4.5.	Biodigestor tipo UASB.....	48
2.4.4.6.	Biodigestor em fase sólida	50
2.4.5.	Tratamento e purificação do biogás	51
2.4.5.1.	Remoção de vapor d'água	52
2.4.5.2.	Dessulfurização.....	53
2.4.5.3.	Remoção de CO ₂	55
2.5.	FATORES QUE INFLUENCIAM NA PRODUÇÃO.....	56
2.5.1.	Impermeabilização do sistema	56
2.5.2.	Temperatura	56
2.5.3.	pH.....	56
2.5.4.	Razão entre carbono e nitrogênio.....	57
2.5.5.	Carga orgânica.....	57
3.	BIOGÁS: ECONOMIA E SUSTENTABILIDADE	58
4.	PANORAMA GERAL DO BIOGÁS NO BRASIL	61
4.1.	BIOGÁS NA MATRIZ ENERGÉTICA	61
4.2.	CENÁRIO PRODUTIVO.....	63
4.3.	PLANTAS DE BIOGÁS	65
4.3.1.	Plantas em operação.....	66
4.3.1.1.	Porte	66
4.3.1.2.	Origem do substrato.....	67
4.3.1.3.	Aplicação energética.....	71
4.3.1.4.	Localização	72
5.	AÇÕES DE INCENTIVO À PRODUÇÃO E APROVEITAMENTO	75
5.1.	AÇÕES DE PESQUISA, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO	75
5.1.1.	CIBiogás	75

5.1.2.	ABiogás	76
5.1.3.	Ministério de Minas e Energia	77
5.1.4.	Projeto GEF biogás Brasil	77
5.1.5.	Rede BiogásFert	79
5.1.6.	PROBIOGÁS	79
5.2.	POLÍTICAS PÚBLICAS	79
5.3.	PROGRAMAS DE FINANCIAMENTO	81
5.3.1.	Programa ABC (Agricultura de Baixo Carbono)	81
5.3.2.	Programa Nacional para Agricultura Familiar (ProNAF)	81
5.3.3.	Plano Safra	82
5.3.4.	Fundo Clima	82
5.3.5.	Leilões da ANEEL	82
6.	ANÁLISE SWOT	84
6.1.	METODOLOGIA	85
6.2.	FORÇAS (S)	87
6.3.	FRAQUEZAS (W)	90
6.4.	OPORTUNIDADES (O)	91
6.5.	AMEAÇAS (T)	96
6.6.	MATRIZ SWOT	97
7.	CONCLUSÃO	101
8.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	103
	REFERÊNCIAS	104

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

1.1.1. Energia e sociedade

O uso de energia é vital para a maioria das atividades humanas, principalmente na sociedade moderna (SILVA, *et al.*, 2021). A energia elétrica é a que se faz mais evidente, e é fácil observar os benefícios que traz para a sociedade em geral – iluminação sistematizada, aparelhos eletrônicos (computadores, televisões, rádios, etc.), máquinas industriais, etc. Entretanto, não é só a energia elétrica que é consumida pela sociedade, a energia gerada pelos combustíveis, por exemplo, é imprescindível para garantir o transporte, seja a lazer, trabalho ou outra finalidade, através de meios coletivos e/ou individuais. Enfim, o dia a dia da sociedade está cercado pelo consumo de energia e isso talvez faça com que algumas pessoas achem natural todas essas comodidades proporcionadas pelo seu uso. No entanto, a questão passa a ser mais complexa à medida que se nota os fatores ambientais envolvidos no processo de geração de energia até que ela chegue ao consumidor (SIMABUKULO, *et al.*, 2021).

As fontes de energia encontradas na natureza, em sua forma bruta, são chamadas de “energia primária”, que são obtidas da natureza e são convertidas em “energia final”. Em uma hidrelétrica, por exemplo, a energia cinética do movimento das águas (energia primária) é transformada em energia elétrica (energia final), que é a energia útil, a qual a sociedade demanda.

O desenvolvimento de técnicas que possibilitaram a extração de energia da natureza determinou de forma capital o destino dos países no mundo moderno. Àqueles capazes de desenvolvê-las e explorá-las foram os pioneiros no processo de industrialização, enquanto àqueles que não investiram no setor tornaram-se defasados em relação aos demais, prejudicando toda a vida social. Existe, sem dúvidas, uma relação entre o uso de energia e desenvolvimento econômico-social, que vêm sendo discutida por cientistas (SIMABUKULO, *et al.*, 2021).

No entanto, a dinâmica desse relacionamento entre energia e desenvolvimento resulta em forte pressão sobre o meio ambiente (SANTOS, 2018). O próprio processo de geração de energia impacta, em maior ou menor grau, o ambiente, pois, uma vez que ocorre a extração de recursos naturais, há o risco de esgotamento de recursos, prejuízo a fauna e flora, produção de resíduos, etc. (EPE, 2021). A busca por fontes de energia que impactem menos o meio ambiente torna-se imprescindível, de modo a manter o progresso e estabelecer um bom equilíbrio entre homem e natureza.

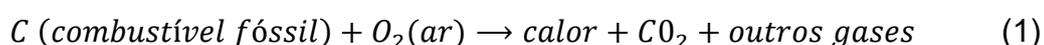
1.1.2. Fontes de energia e problemática das fontes fósseis

A fontes de energia podem ser classificadas em não renováveis e renováveis. As chamadas fontes não renováveis compreendem as fontes fósseis de energia, como petróleo, carvão mineral e outros, obtidas através do acúmulo de matéria orgânica, dos seres que pereceram ao longo dos anos, no subsolo terrestre. São assim denominadas porque necessitam de um horizonte de tempo geológico para serem repostas (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

As fontes de energia ditas renováveis são aquelas que são repostas imediatamente pela natureza, como, por exemplo, os potenciais hidráulicos (quedas d'água), eólicos (vento), a própria radiação solar e as biomassas. O biogás, objeto do presente estudo, enquadra-se nas fontes renováveis de energia, tendo como fonte primária a biomassa, principalmente resíduos orgânicos.

As fontes fósseis (não renováveis) são as mais utilizadas, dando um maior enfoque para o petróleo. A grande dependência dessas fontes tem acarretado preocupação mundial acerca dos gases tóxicos liberados na atmosfera, sendo os “gases do efeito estufa” (GEE) os mais preocupantes, destacando-se o dióxido de carbono (CO₂) (FREITAS & DATHEIN, 2013).

A utilização dos combustíveis fósseis se dá pela sua queima/combustão, que pode ser esquematicamente traduzida pela Equação (1), considerando a queima/combustão completa:



O CO₂ é um constituinte natural da atmosfera terrestre (há cerca de 0,04% de dióxido de carbono no ar atmosférico). Além disso, ele também é produzido pela atividade metabólica de vários seres vivos, incluindo o ser humano, e é absorvido pelos seres fotossintéticos. Esses e demais processos químicos, físicos, biológicos e geológicos, que envolvem a transferência de CO₂ entre os diferentes reservatórios naturais formam, em conjunto, um processo cíclico natural designado por “ciclo do carbono” (OLIVEIRA, *et al.*, 2020).

O aumento das emissões antropogênicas de CO₂, principalmente pela queima de combustíveis fósseis, perturbou o balanço de massa do ciclo acumulando anualmente cerca de 17 bilhões de toneladas de CO₂ na atmosfera. Esse acúmulo ocorre porque os mecanismos naturais não têm capacidade de reverter o ganho progressivo de CO₂ na atmosfera, uma vez que as emissões de origem antropogênica têm um ritmo de acumulação muito mais acelerado do que os processos naturais de sumidouros (OLIVERIA, *et al.*, 2020).

Esse cenário de modificação da composição da atmosfera terrestre, que se evidencia nos fenômenos de alterações climáticas, desperta em parte da sociedade uma preocupação e uma procura crescente por fontes energéticas alternativas, que possam reduzir o nível de emissão de CO₂, com o intuito de “descarbonizar”, que contextualizado na temática da energia, significa eliminar as fontes de energia fóssil, substituindo-as por fontes menos intensivas em carbono ou renováveis (OLIVEIRA, *et al.*, 2020).

1.1.3. Transição energética e biogás

Diante de toda a problemática das fontes fósseis, o conceito de transição energética vem sendo amplamente disseminado e segundo o relatório do Plano Nacional de Energia (PNE) 2050, a transição energética:

consiste em um processo de transformações em direção a uma economia de baixo carbono e menor pegada ambiental. Nesse contexto, há estímulos ao uso mais eficiente dos recursos energéticos e à redução da participação de combustíveis mais intensivos em emissões de carbono na matriz energética primária mundial em favor de fontes de baixo carbono (sobretudo renováveis) (PNE 2050, p.34).

Devido a esses estímulos, o uso das fontes renováveis cresce a cada ano e estas ocupam cada vez mais espaço na matriz energética mundial, representando em 2021, 14,1% das fontes de energia. O Brasil apresenta uma vantagem competitiva em relação a outros países, devido ao seu grande potencial de geração de energia renovável de diversas fontes, e até o final de 2021, 44,8% da matriz energética brasileira era composta de energia renovável, sendo a matriz energética mais renovável do mundo industrial (EPE, 2022). A Figura 1 compara a utilização de fontes renováveis e não renováveis no Brasil e no mundo para o ano de 2021.

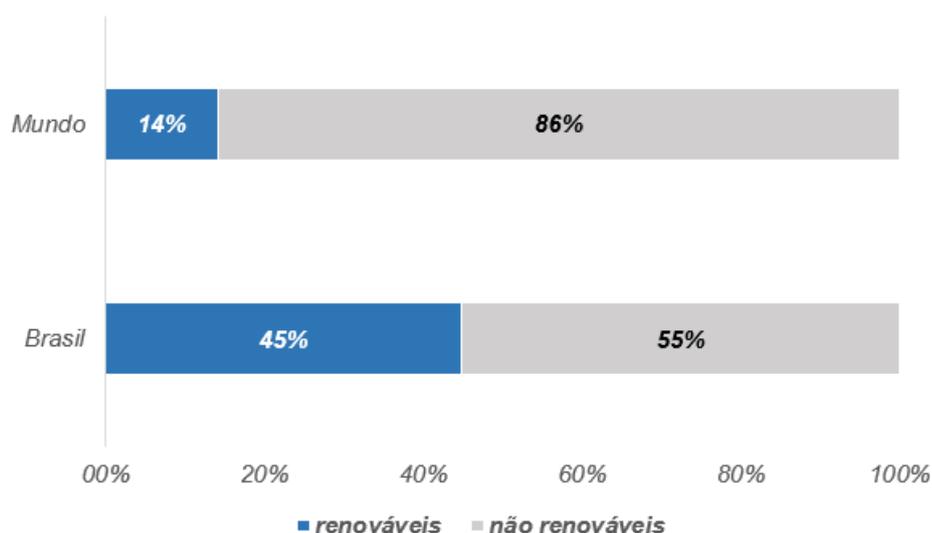


Figura 1 - Comparação da utilização de energias renováveis no Brasil e no Mundo no ano de 2021

Fonte: EPE, 2022

Atualmente, as fontes renováveis que se destacam no Brasil são: biomassa da cana, hidráulica, lenha e carvão vegetal. O biogás ainda não é tão representativo na matriz brasileira (0,12% em 2021). Até 2021, eram produzidos apenas 3% de todo o gigantesco potencial do país (ABILOGÁS, 2022), porém, desde 2017 a quantidade de plantas de biogás em vigor vem apresentando um crescimento significativo, tanto que a produção do biogás para uso energético mais que dobrou desde então (CIBILOGÁS, 2022).

O biogás é uma mistura gasosa composta, majoritariamente, por CO₂ e metano (CH₄), com pequenas quantidades de ácido sulfídrico (H₂S) e amônia (NH₃), além de estar saturado com vapor d'água; e é produzido através da decomposição anaeróbica de materiais orgânicos (PARSAEE, 2019; BHATT; TAO, 2020), característica essa

que torna possível a utilização de resíduos orgânicos de diversos setores como matéria-prima para sua produção.

Do ponto de vista ambiental, o uso do biogás é extremamente benéfico, pois além de apresentar baixa emissão de carbono, ele também mitiga a emissão de metano, que seria liberado na atmosfera caso os resíduos que constituem suas fontes de matéria-prima não fossem aproveitados; e sobre a ótica das mudanças climáticas, o CH₄ é 21 vezes mais impactante que o CO₂ (ABIOGÁS, 2021). Desse modo, o biogás é o energético disponível que tem a menor pegada de carbono (ABIOGÁS, 2017), e, portanto, “é imbatível no contexto de transição energética”, como afirmado pelo presidente da ABiogás, Alessandro Gardemann (ABIOGÁS, 2022).

O biogás é um combustível flexível, podendo ser aplicado como biocombustível (biometano), injetado na rede de gás natural e utilizado para geração de calor e energia elétrica (MORAIS, 2021). Além desses usos energéticos, ele tem potencial de atuar na qualidade de matéria-prima para a geração de bioprodutos, como por exemplo o biometanol, o ácido acético e polímeros biodegradáveis. O resíduo (sólido ou efluente) da produção de biogás pode ainda ser usado como biofertilizante (CARDOSO, 2017).

Além do mais, o biogás tem previsibilidade de preço, ou seja, seu preço é definido localmente e, como consequência, seu valor não depende da cotação do dólar ou dos preços do mercado internacional. Esta é uma vantagem singular, principalmente neste momento em que a economia brasileira se encontra em processo de recuperação devido à crise causada pela pandemia da Covid-19 (ABIOGÁS, 2022).

O aparecimento de políticas públicas, decretos e leis que incentivam a geração e aproveitamento do biogás foi significativo a partir de 2011. Estas ações de incentivo serão abordadas com mais detalhes nas Seções seguintes; porém a sanção do Programa Metano Zero, em maio de 2022, programa este que incentiva a produção do biogás para ser utilizado como biocombustível, demonstra o interesse atual do Brasil em estimular o crescimento da produção nacional de biogás.

1.2. MOTIVAÇÃO

A Organização das Nações Unidas (ONU), entidade da qual o Brasil faz parte, desenvolveu em Assembleia Geral, no ano de 2015, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que integram 17 metas a serem atingidas em âmbito global, até 2030 (EMBRAPA, 2022). O estudo presente é motivado pelas metas 7 e 13, que, respectivamente, se destinam a “assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos” e “tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos”.

Para mais, os fatores que motivaram o estudo do biogás frente aos demais energéticos renováveis foram sua grande variedade de aplicações energéticas (energia elétrica, calor, biocombustível e injeção na rede de gás natural), a sua crescente participação na matriz energética brasileira, as possibilidades pouco exploradas de geração de biogás na matriz energética nacional (como o aproveitamento de aterros, resíduos orgânicos, estações de tratamento de água, etc.) e os benefícios proporcionados por sua utilização (redução da emissão de CO₂, CH₄ e geração de subproduto ecologicamente benéfico).

Diante desta gama de vantagens do biogás, a necessidade de identificar no cenário atual, as fraquezas e ameaças que possam estar impedindo a expansão da produção de biogás no mercado brasileiro, bem como identificar as forças e oportunidades que auxiliariam em um aumento do potencial de produção nacional de biogás, também foi temática motivadora do projeto.

1.3. OBJETIVO

1.3.1. Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a atual situação do biogás como insumo energético no Brasil, desde aspectos referentes à produção e utilização até o cenário de políticas públicas vigentes. Além de mapear e identificar janelas de oportunidades para o uso do biogás no Brasil, através da análise *SWOT*, no contexto do mercado de bioenergia e biocombustíveis

1.3.2. Objetivos específicos

- Traçar um panorama geral do biogás no Brasil, debatendo pontos como: participação na matriz energética, cenário produtivo, potencial de produção, plantas em operação e como estas se distribuem em relação ao porte, substrato, aplicação e localização no território brasileiro;
- expor ações vigentes de incentivo à produção e utilização do biogás, tanto no ambiente de pesquisa, desenvolvimento e inovação, quanto no cenário de políticas públicas e financiamentos;
- construir a matriz *SWOT* relativa à geração e utilização do biogás para fins energéticos;
- avaliar como o setor de biogás tem se posicionado dentro do mercado de bioenergia e biocombustíveis e a viabilidade da expansão do biogás no Brasil.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. BIOGÁS X GÁS NATURAL

A digestão anaeróbia de materiais orgânicos, processo que ocorre na ausência de oxigênio por um consórcio microbiano de bactérias e arqueas, produz uma mistura gasosa composta, majoritariamente, por metano (CH_4) - 60 a 85% do volume -, dióxido de carbono (CO_2), além da presença, em menor quantidade, de hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), oxigênio (O_2) e água (H_2O) (PARSAEE, 2019; BHATT; TAO, 2020).

Esse gás bruto, quando obtido através da decomposição anaeróbia de matéria orgânica fóssil, ou seja, resto de animais e plantas mortos acumulados por milhões de anos no fundo de lagos e mares, denomina-se gás natural. O gás natural (GN) é encontrado na natureza em rochas porosas, na forma de bolsões de gás, e é considerado um “*combustível de transição*”, pois apesar de ser de origem fóssil é uma fonte mais limpa que as demais derivadas do petróleo, por apresentar menor intensividade em carbono (CIBIOGÁS, 2021).

Em alternativa, obtém-se o *biogás* quando a matéria orgânica decomposta é oriunda de biomassas dedicadas (milho, beterraba, soja, grãos de cereais, etc.) ou de resíduos e/ou efluentes orgânicos, seja de atividade industrial, humana, agropecuária e agroindustrial. A principal característica do biogás é a sua formação a partir da circulação de material orgânico na superfície terrestre, tratando-se de uma fonte de energia renovável, e sendo considerado um biocombustível.

A geração de biogás pode dar-se espontaneamente na natureza, vide lixões, ou através de um processo “*artificial*”, por assim dizer, no qual a digestão do material orgânico ocorre em reatores químico-biológicos, chamados de Biodigestores Anaeróbicos, com controle de temperatura, umidade, acidez e ausência de oxigênio, obedecendo as condições favoráveis para ação dos micro-organismos (ROYA *et al.*, 2011).

A porcentagem de cada gás presente no biogás pode sofrer variações dependendo da matéria a ser digerida e do tipo de biodigestor a ser utilizado (ROYA *et al.*, 2011). Por isso, as suas propriedades também podem variar um pouco, mas

permanecem dentro de uma faixa, como mostra a Tabela 1. Além disso, o tratamento e a purificação do biogás, gera o denominado biometano, que contém níveis de metano entre 94-99% (SILVA; MEZZARI, 2022).

Tabela 1 - Principais propriedades do biogás

Parâmetro	Faixa	Unidade
Poder Calorífico	4000 - 5000	kcal/m ³
Densidade	1,19 - 1,21	kg/m ³
Temperatura de Ignição	650 - 750	°C
Limite de Explosividade	4,4 - 16,5	%v/v

Fonte: Adaptado de Pobleto, 2019

2.2. APLICAÇÕES E VANTAGENS

O biogás é um combustível flexível, podendo ser usado para geração de energia elétrica, térmica e mecânica. Sua combustão direta em fornos, caldeiras ou em câmaras de turbina a gás gera calor para diversos processos e/ou eletricidade. Já quando aplicado em motores de combustão interna ele é convertido em energia mecânica ou elétrica (MORAIS, 2021).

Sendo assim, o biogás pode ser empregado nos mais variados setores: industrial, comercial, residencial, agropecuário, além de poder ser injetado nas redes de gás natural e ser utilizado como combustível veicular no setor automotivo (biometano). A Figura 2 mostra essa versatilidade de aproveitamento do biogás.

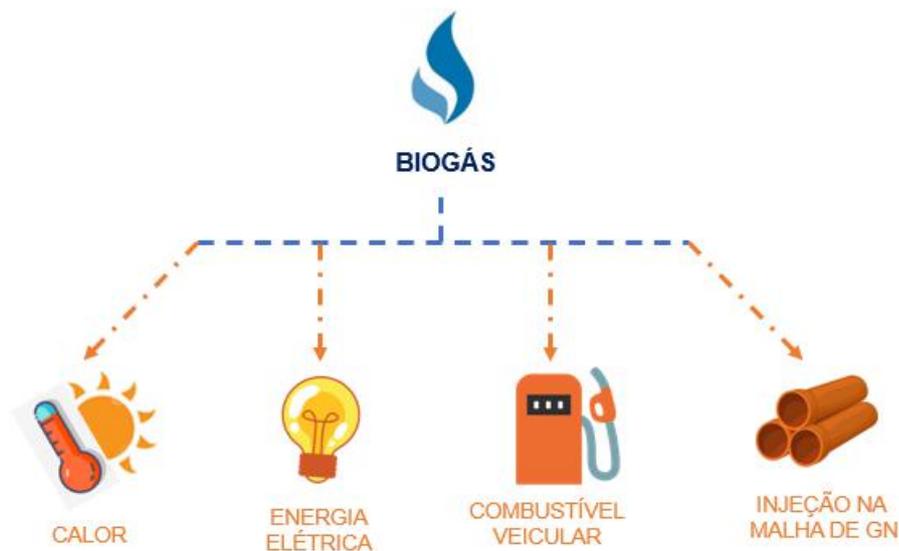


Figura 2 - Aplicações de mercado do biogás

Fonte: Elaboração própria

Vale salientar que, dependendo do uso, é preciso submeter o biogás à uma etapa de tratamento/purificação para retirar elementos que possam prejudicar a própria aplicação e/ou equipamentos. Estes aspectos serão abordados com mais detalhes na Seção 2.4.5.

Além das aplicações energéticas, o biogás tem potencial de atuar na qualidade de matéria-prima para a geração de bioprodutos, como por exemplo o biometanol, o ácido acético e polímeros biodegradáveis, mas esta tecnologia até então encontra-se em fases de estudo e consolidação. Para mais, a produção de biogás pode gerar como subproduto o biofertilizante (CARDOSO, 2017).

Graças a essa variedade de usos energéticos, o biogás pode ser considerado uma fonte estratégica de energia, em razão de (MORAIS, 2021; ABIOGÁS, 2021):

- contribuir diretamente para a redução da dependência dos combustíveis fósseis ao substituir o gás natural, diesel, GLP, entre outros;
- contribuir amplamente para a geração distribuída em grande e pequena escala de energia elétrica;
- tratar-se de uma energia armazenável, que pode ser utilizada conforme a demanda, e;
- tratar-se de uma energia renovável não intermitente.

Além desses quesitos, o biogás apresenta uma abundância de vantagens, em diversos âmbitos, frente às demais formas de obtenção de energia.

O biogás auxilia fortemente na redução das emissões dos GEE, ao promover a interiorização do metano, principal componente do biogás, responsável por seu poder combustível e GEE que, sobre a ótica das mudanças climáticas, é 21 vezes mais impactante que o CO₂ (ABILOGÁS, 2021). Em razão desse fator, e da reutilização de resíduos orgânicos para sua produção, o uso do biogás é amplamente defendido, do ponto de vista ambiental.

Do ponto de vista sanitário, a utilização do biogás pode ajudar ou até mesmo sanar os problemas de saúde pública causados pelos dejetos humanos e animais repletos de micro-organismos parasitas, uma vez que esses podem ser coletados e usados em biodigestores para obtenção de biogás (ROYA, 2011).

Além de tudo, nos processos de digestão anaeróbica são gerados dois produtos indissociáveis: o biogás e o digestato. É conhecido como digestato, o efluente e/ou resíduo sólido do processo de digestão anaeróbica, que é rico em diversos nutrientes, como nitrogênio, fósforo e potássio. O digestato pode ser empregado como biofertilizante, dependendo das características do solo em que será aplicado e da quantidade e composição de nutrientes, que deve obedecer aos limites definidos pela legislação ambiental para aplicação agrônômica no solo e em determinadas culturas. O biofertilizante auxilia na fertilização do solo e adubação de plantas e é uma alternativa barata para produtores rurais (FLORES, 2014). À vista disso, a ideia de valorização de resíduos é intrínseca à produção de biogás, do início ao fim.

2.3. BREVE CONTEXTO HISTÓRICO

2.3.1. Descoberta e incorporação do biogás no mundo

A história do biogás tem seu início em meados de 1600, quando o cientista Thomas Shirley identificou a existência de uma substância inflamável, até então desconhecida, em regiões pantanosas no Reino Unido (CIBILOGÁS, 2020). A presença

dessa substância, juntamente com o odor peculiar gerado nesses pontos, foi a força motriz para estudos e posterior descoberta da decomposição de matéria orgânica.

A composição química da substância gasosa só foi constatada por volta de 1700, um século após sua descoberta, e o gás inflamável foi então denominado de metano.

Foi Louis Pasteur, no início de 1800, que vislumbrou pela primeira vez a possibilidade de produção e utilização deste gás como combustível para sistemas de aquecimento e iluminação urbana. Ele e seu aluno, Ulysse Gayon, produziram biogás através da fermentação anaeróbia de esterco e água à 35 °C, obtendo 100 litros de gás por metro cúbico de matéria orgânica fermentada (CIBIOGÁS, 2020).

Anos depois, por volta de 1857, foi construída, na Índia, a primeira instalação destinada a produção e utilização de biogás em grande escala, que tinha por objetivo suprir as demandas energéticas de um hospital para portadores de hanseníase de Bombaim. Ainda nessa época, na cidade de Exter, na Inglaterra, o biogás foi utilizado para iluminação pública (CIBIOGÁS, 2020).

Mesmo diante dessas iniciativas, com o passar dos anos, o biogás foi posto em segundo plano, apenas como um complemento as fontes energéticas tradicionais de petróleo e carvão, que na época eram tidas como inesgotáveis.

Entretanto, a história do biogás continua em meados de 1940, durante a 2ª Guerra Mundial (1939 – 1945), quando italianos e alemães enfrentaram uma crise energética. A grande escassez e dificuldade de acesso a fontes fósseis de combustível reacenderam o interesse pela utilização de biogás e este foi usado como alternativa tanto para cozimento e aquecimento de casas quanto para alimentação de motores de combustão interna (CIBIOGÁS, 2020).

Todavia, após o término do conflito, o remanescente emprego deste combustível ficou localizado geograficamente apenas na China e Índia, tendo seu uso direcionado para iluminação e atividades domésticas. Estes acontecimentos, que marcaram a descoberta e incorporação do biogás no mundo, estão explicitados na Figura 3.

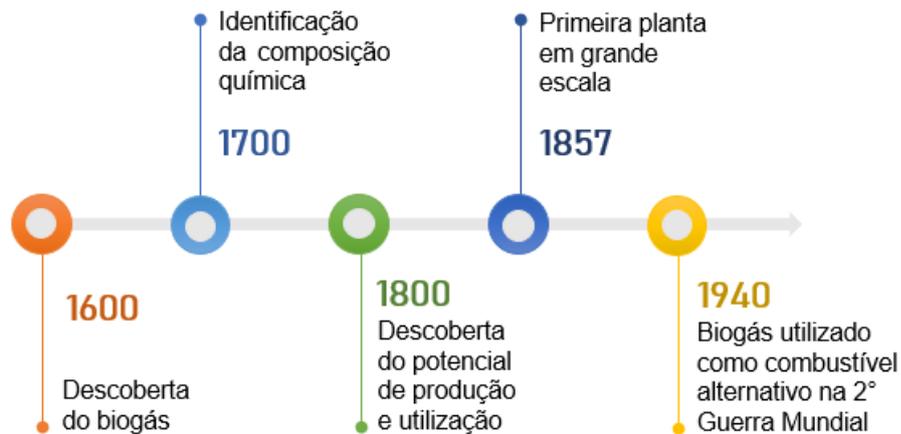


Figura 3 - Linha do tempo da descoberta e incorporação do biogás no mundo

Fonte: Elaboração própria

2.3.2. História do biogás no Brasil

Em 1979, guerras e revoluções aconteciam no Irã, que era o maior produtor e exportador de petróleo do mundo. Esses conflitos comprometeram as exportações do país e como consequência, o preço do barril de petróleo alcançou valores elevadíssimos, batendo recorde mundial e instalando no mundo uma crise, conhecida como crise petrolífera de 1979 (IPEA, 2022).

O Brasil foi diretamente afetado por esse choque, pois, à época, importava cerca de 80% do petróleo que consumia. À vista disso, o país buscou incrementar o uso de energias alternativas e o biogás foi considerado uma fonte viável para reduzir a dependência dos derivados de petróleo (MILANEZ *et al.*, 2021). Assim, impulsionada pela crise petrolífera de 1979, se inicia a trajetória do biogás no Brasil.

O primeiro biodigestor instalado no Brasil foi construído, ainda em 1979, na Granja do Torto, residência mantida pela Presidência da República com características de casa de veraneio, em Brasília. Esse projeto situado na sede do governo expôs a possibilidade de instalação de uma unidade produtora de biogás utilizando materiais simples e de baixo custo em áreas rurais, além de estimular o desenvolvimento do Programa de Mobilização Energética (PME), no início da década de 80 (1982) (CIBIOGÁS, 2020).

O Decreto nº 87.079 aprovando as diretrizes do PME foi assinado, em abril de 1982, pelo presidente João Figueiredo. O objetivo principal do programa é “Racionalizar a utilização da energia obtendo a diminuição do consumo dos insumos energéticos e substituir progressivamente os derivados de petróleo por combustíveis alternativos nacionais” (BRASIL, 1982, v. 4, p. 2) e o documento cita o biogás e a biomassa como alternativa para cumprir esse objetivo e incentiva a instalação de biodigestores em áreas rurais.

Devido a esse incentivo, até 1984 havia, em média, 3 mil biodigestores instalados no Brasil, entretanto, as dificuldades operacionais relacionadas a falta de conhecimento e mão de obra especializada, tornaram os sistemas de baixa eficiência, não suprimindo as necessidades dos produtores e culminando no progressivo abandono do uso de biodigestores (CIBIOGAS, 2020). A Figura 4 mostra os acontecimentos que marcaram estes primeiros passos do biogás no Brasil.

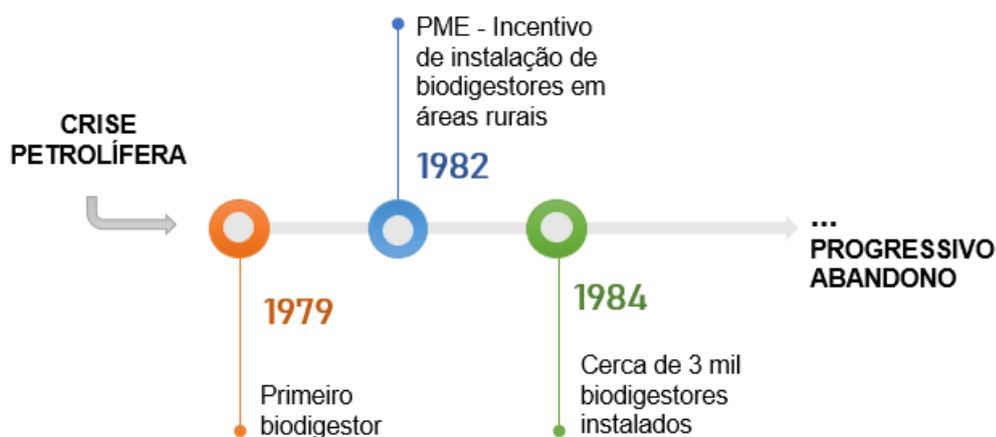


Figura 4 - Primeiros passos do biogás no Brasil

Fonte: Elaboração própria

Na década de 90, a questão ambiental tornou-se pauta de grandes discussões no mundo, devido ao aquecimento global e as mudanças climáticas decorrentes das emissões de GEE (MILANEZ *et al.*, 2021). Com o intuito de reverter esse cenário, diversos países estabeleceram metas de redução de emissões de GEE, através do Protocolo de Quioto (1997), na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Com o intuito de auxiliar os países a cumprirem suas metas de redução de emissões, o protocolo considerou o Mecanismo de Desenvolvimento

Limpo (MDL), o Comércio de Emissões (créditos de carbono) e Implementação Conjunta (MMA, 2022)

O MDL foi estabelecido como uma maneira de reduzir as emissões de gases do efeito estufa através de negociações (NEOENERGIA, 2022). Empresas ao adotarem projetos que diminuem a emissão de gases poluentes na atmosfera, chamados projetos de MDL, são “recompensadas” com 1 “*crédito de carbono*” a cada uma tonelada de dióxido de carbono equivalente de emissão evitada. Esses créditos de carbono possuem um valor monetário, e empresas, países ou indústrias com um nível de emissão muito alto podem comprar esses créditos para compensar suas emissões e bater suas metas de redução, contribuindo, assim, na manutenção do projeto e no equilíbrio do nível de GEE na atmosfera, como evidencia a Figura 5 (SUSTAINABLE CARBON, 2015).



Figura 5 - Funcionamento do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e Créditos de Carbono

Fonte: Elaboração própria

A produção e queima do biogás foi vista como um projeto de MDL, e, motivados por esse mercado de carbono implementado, muitos proprietários rurais brasileiros instalaram biodigestores em suas terras. Cerca de 1000 biodigestores foram instalados no Brasil, no período de 2000 a 2013, dentro do contexto do MDL (CIBIOGÁS, 2020).

Os anos 2000 foram marcados por uma explosão da energia limpa e, muitos foram os estímulos para a expansão do biogás no Brasil desde então, dando destaque para os seguintes eventos de maior impacto (CIBIOGÁS, 2020; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2021; MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2022; MACHADO, 2022):

- implementação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), com o objetivo de ampliar a geração de energia elétrica por meios alternativos, entre eles a biomassa – 2003;
- autorização da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para a geração distribuída de energia elétrica a partir de fontes renováveis – 2010;
- elaboração da Política Nacional de Resíduos Sólidos, com a finalidade de prevenir e reduzir a geração de resíduos sólidos, incentivando a geração de biogás a partir dos resíduos – 2010;
- construção do primeiro laboratório de biogás no Brasil, em parceria com a EMBRAPA – 2010;
- implementação do Centro Internacional de Energias Renováveis com ênfase em Biogás (CIBiogás) – 2011;
- lançamento da Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (ABC) com o intuito de consolidar uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura – 2012;
- criação da Associação Brasileira de Biogás (ABiogás) a fim de incentivar e demonstrar o potencial do Brasil na produção de energia e combustível a partir de resíduos – 2013;
- criação do Projeto Brasil-Alemanha de fomento ao aproveitamento energético do biogás no Brasil (Probiogás) – 2013;
- lançamento do projeto de mobilidade a biometano, incentivando a utilização de veículos movidos a esse combustível renovável – 2014;

- instituição do Programa Federal RenovaBio. O RenovaBio é uma política nacional de biocombustíveis que tem por objetivo estabelecer metas nacionais anuais de descarbonização para o setor de combustíveis, incentivando o aumento da participação de biocombustíveis na matriz energética de transportes do país – 2017;
- sanção da nova Política Estadual de Biogás e Biometano, em diversos estados como Paraná e Rio de Janeiro, que tem como papel regular os investimentos da geração dessa energia renovável e incentivar as cadeias produtivas – 2018.
- instauração do Programa Novo Mercado de Gás, com o intuito de gerar um mercado de gás natural mais aberto, dinâmico e competitivo, dando espaço para que demais fontes energéticas, como o biogás, se estabeleçam neste mercado – 2019;
- sanção do Novo Marco Legal de Saneamento, que visa universalizar o acesso a coleta e tratamento de esgoto – 2020;
- instituição do Programa Combustível do Futuro, que visa ampliar, cada vez mais, o uso de combustíveis sustentáveis e de baixa intensidade de carbono – 2021;
- lançamento do Plano Nacional de Fertilizantes, focado em reduzir a dependência dos produtores rurais brasileiros dos fertilizantes importados e aumentar a produção nacional – 2022;
- lançamento do Programa Metano Zero, o qual visa incentivar a produção nacional de biometano, dialogando com o mercado de carbono – 2022

Os eventos que marcaram esse momento de expansão do biogás no Brasil, estão relatados na Figura 6, sendo que o cenário nacional de produção e utilização de biogás atual é resultado destes diversos fatores ao longo dos anos.



Figura 6 - Linha do tempo do impulso do biogás no Brasil

Fonte: Elaboração própria

2.4. CADEIA PRODUTIVA

A produção do biogás desenrola-se seguindo as etapas descritas a seguir e exemplificadas na Figura 7 (DATASEBRAE, 2022):

- (1) Seleção da fonte de matéria-orgânica que será utilizada como matéria-prima;
- (2) Pré-tratamento: etapa que consiste em preparações da matéria-prima, que antecedem seu destino aos biodigestores;

(3) Digestão Anaeróbica: esta etapa é o coração do processo. Nela a matéria-orgânica será decomposta anaerobicamente, em biodigestores, liberando o biogás;

(3.1) Como todo processo, a digestão anaeróbica não tem 100% de eficiência, portanto nem toda matéria-orgânica que entra no processo sai como biogás. A parte restante, que fica retida no biodigestor ou sai como efluente, é chamada digestato e pode ser reaproveitado.

(4) Tratamento e purificação do biogás: para alguns usos, o biogás bruto, que sai do biodigestor, já estaria pronto, mas para outros, ainda é necessário retirar umidade e alguns gases indesejados da composição.¹



Figura 7 - Etapas da produção de biogás

Fonte: Elaboração própria

2.4.1. Matérias-primas

Uma vez que a geração de biogás se dá através da degradação anaeróbica de matéria orgânica, quaisquer fontes de material orgânico, passível de biodegradação, podem ser matéria-prima para a produção de biogás.

¹ Industrialmente, as etapas de remoções de alguns contaminantes como água, H₂S, nitrogenados, halogenados e siloxanos, são conhecidas como etapas de tratamento, enquanto denomina-se purificação somente a etapa que acontece após o tratamento separando o metano do CO₂.

Posto isso, é factível o cultivo e utilização de biomassas dedicadas, como milho e beterraba por exemplo, para a geração deste energético. Entretanto, este emprego abrange dois principais dilemas:

1. **competitividade com o setor alimentício:** as biomassas dedicadas são altamente desfrutadas para consumo alimentar e, aproveitá-las em demais setores cria um ambiente de alta competitividade pela matéria-prima. Um exemplo, que ilustra bem a situação, é o setor sucroenergético, o qual utiliza a cana-de-açúcar para a produção de etanol de primeira geração, paralelamente, à produção de açúcar.
2. **preservação da fauna e flora:** é muito provável que as porções de terras que temos hoje, voltadas exclusivamente para o cultivo de biomassas dedicadas, não sejam suficientes para atender tanto a demanda do setor alimentício quanto a do setor energético. Torna-se contraditório a necessidade de desmatar, a fim de levantar novas florestas plantadas, para gerar um produto que tem por intuito reduzir os impactos negativos no meio ambiente.

Em contrapartida, existem diversos resíduos gerados a partir da própria atividade humana e de atividades industriais, que possuem elevada matéria orgânica biodegradável. O descarte inadequado desses resíduos acarreta danos ambientais, sociais e econômicos. Por exemplo, um efluente líquido com elevada carga orgânica biodegradável quando lançado em um corpo hídrico sem o devido tratamento causa um aumento da carga orgânica no corpo receptor, levando a uma diminuição do oxigênio dissolvido, reduzindo assim a diversidade de espécies aquáticas (VON SPERLING, 1996). Por esse motivo, são necessários tratamentos prévios, com o objetivo de reduzir a quantidade de carga orgânica antes do descarte.

Estes resíduos são ótimas oportunidades de serem empregados como matérias-primas para a produção de biogás, pois possibilitará a valorização de resíduos, atribuindo a estes uma finalidade, de forma que além de despoluir, haverá o aproveitamento energético com a geração do biogás. Os principais resíduos utilizados para a produção de biogás serão abordados a seguir.

2.4.1.1. Resíduos da agropecuária

Atividades agropecuárias, como suinocultura, pecuária e avicultura, geram resíduos orgânicos de origem animal, que podem ser dejetos/fezes ou até mesmo porções não comestíveis dos animais.

No Brasil, a agropecuária é uma das principais atividades econômicas, representando em torno de 21% do PIB e sendo responsável por um terço da empregabilidade do país. Apesar da sua significativa contribuição econômica, este setor também é um dos maiores produtores de resíduos e tem grande parcela de contribuição nas emissões de gases do efeito estufa (ABIOGÁS, 2022). Por isso, há largo incentivo, por parte dos governos, não só do Brasil, para o emprego dos resíduos provenientes da agricultura, com o intuito de evitar a contaminação que estes geram quando dispostos de forma incorreta no meio ambiente (MATA, 2018).

Entre os despejos da agropecuária, possíveis de serem empregados na produção de biogás, destacam-se os esterco, principalmente o esterco de aves por apresentar maior produção de biogás a partir de 1 tonelada de substrato se comparado com os demais, além de ter maior proporção metano/biogás (cerca de 64,3%) e maior rendimento em metano, como exemplifica a Tabela 2.

Tabela 2 - Produção de biogás e biometano a partir de resíduos da agropecuária

<i>Substrato</i>	<i>Produção de biogás (Nm³/t substrato)</i>	<i>Produção de biometano (Nm³/t substrato)</i>	<i>Rendimento de biometano (Nm³/t MOS)</i>
<i>Esterco bovino</i>	80	44	250
<i>Esterco líquido bovino</i>	24	14	210
<i>Esterco líquido suíno</i>	28	17	250
<i>Esterco de aves</i>	140	90	280
<i>Esterco de cavalo sem palha</i>	63	35	165

Legenda: MOS – Matéria Orgânica Seca. Fonte: Adaptado de PROBIOGÁS; 2010

2.4.1.2. Resíduos da agroindústria de transformação

A agroindústria de transformação, refere-se ao conjunto de atividades que se propõem em transformar produtos primários, advindos da agricultura, em produtos de

maior valor agregado, promovendo o beneficiamento de plantas e/ou partes das mesmas e deixando de lado as fronteiras entre campo e indústria. Podemos citar os seguintes beneficiamentos realizados pelas mais notáveis agroindústrias (PROBIOGÁS, 2010):

- beneficiamento do malte para fabricação de cerveja;
- beneficiamento da cana-de-açúcar para produção de etanol e/ou açúcar;
- beneficiamento da soja para produção de biodiesel;
- beneficiamento da batata para fabricação de amido;
- beneficiamento de frutas para a produção de sucos e vinhos;
- beneficiamento de plantas para extração de óleos vegetais.

Estas atividades geram resíduos orgânicos, principalmente devido às porções das culturas que não são aproveitadas, como bagaços, cascas, polpas e palhas, e, aos rejeitos do próprio processo de transformação, como melaço, tortas de filtro, grãos destilados, águas residuais, glicerol bruto e mais (MATA, 2018).

Estes resíduos podem ocasionar grandes problemas ambientais, como contaminação do solo, poluição das águas e até transmissão de doenças, quando descartados incorretamente. Diante disto, aproveitá-los para a produção de biogás é uma excelente estratégia.

A Tabela 3 apresenta o quanto de biogás e biometano podem ser produzidos e o rendimento de biometano a partir dos principais resíduos orgânicos resultantes das atividades das agroindústrias de transformação. Enquanto a água residual de batata se destaca por apresentar elevado rendimento de biometano por tonelada de matéria orgânica seca, o glicerol bruto, o melaço e o bagaço de uva se destacam por apresentarem maior volume de biogás produzido por tonelada de substrato e maiores porcentagens de metano em relação à produção de biogás (58,8%, 72,7% e 67,7%, respectivamente).

Tabela 3 - Produção de biogás e biometano a partir de resíduos da agroindústria de transformação

<i>Substrato</i>	<i>Produção de biogás (Nm³/t substrato)</i>	<i>Produção de biometano (Nm³/t substrato)</i>	<i>Rendimento de biometano (Nm³/t MOS)</i>
<i>Bagaço do malte</i>	118	70	313
<i>Grãos destilados de cereais</i>	39	22	385
<i>Resíduo do destilado de batata</i>	34	18	362
<i>Resíduo do destilado de fruta</i>	15	9	285
<i>Glicerol bruto</i>	250	147	185
<i>Polpa de batata</i>	80	47	336
<i>Água residual da batata</i>	53	30	963
<i>Torta de filtro de beterraba sacarínea</i>	68	49	218
<i>Melaço</i>	315	229	308
<i>Bagaço de maçã</i>	148	100	453
<i>Bagaço de uva</i>	260	176	448

Legenda: MOS -Matéria Orgânica Seca. Fonte: Adaptado de PROBIOGÁS; 2010

2.4.1.3. Saneamento

A ABIOGÁS (2020), define o setor de saneamento como um “conjunto dos serviços, infraestrutura e instalações operacionais de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana, drenagem urbana, manejos de resíduos sólidos e de águas pluviais”. Neste setor são gerados dois potenciais substratos para a produção de biogás: resíduos sólidos urbanos (RSU) e esgotos sanitários. Ambos necessitam de uma destinação correta a fim de evitar contaminações ambientais (MATA, 2018).

Os resíduos sólidos urbanos, também conhecidos como resíduos sólidos municipais, são resíduos gerados em áreas urbanas devido às atividades intrínsecas às aglomerações humanas. Podemos citar, como exemplo, os resíduos residenciais, comerciais, industriais, dos serviços de saúde, os provenientes da limpeza pública, entre outros (Grupo de Pesquisa em Sustentabilidade e Inovação; 2022). Aproximadamente 50% do resíduo gerado é orgânico, passível de ser biodigerido e transformado em biogás (ABIOGÁS, 2020).

Já os esgotos sanitários são, segundo a norma brasileira NBR 9648 (ABNT; 1996), os despejos líquidos constituídos de:

- esgotos domésticos – resultantes do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas;
- esgotos industriais – resultantes dos processos industriais;
- água de infiltração – toda água proveniente do subsolo, que penetra nas canalizações, e;
- contribuição pluvial parasitária – parcela de deflúvio superficial inevitavelmente absorvida pela rede de esgoto sanitário.

Os esgotos sanitários, pelo menos uma parcela destes, são coletados e tratados em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) em uma rota anaeróbica. Grande parte do biogás gerado nestas estações são queimados, porém, se aproveitados, podem reduzir os gastos energéticos do sistema e ainda trazer receita adicional para unidade de maior porte (ABILOGÁS, 2020).

2.4.2. Pré-tratamento

A etapa de pré-tratamento compreende tanto o transporte e armazenamento dos substratos como também operações físicas, químicas e/ou bioquímicas que são necessárias aos resíduos para que estes possam ser submetidos ao biodigestor, como, por exemplo, trituração, diluição, homogeneização, hidrólise, entre outros (Figura 8).

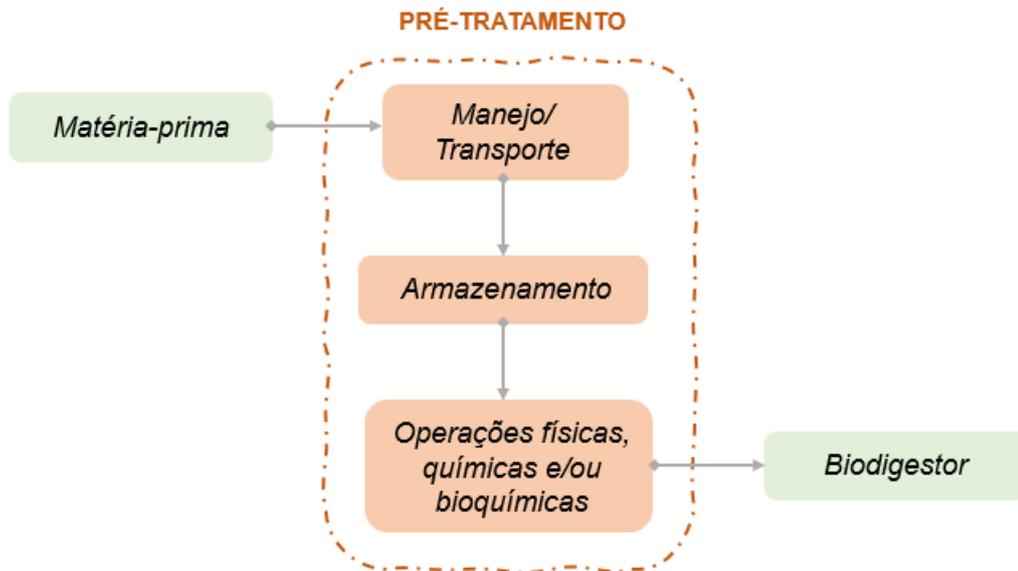


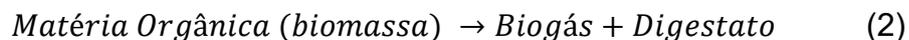
Figura 8 - Etapa de pré-tratamento que antecede a decomposição do substrato

Fonte: Elaboração própria

O pré-tratamento pelo qual a matéria-prima estará sujeita depende tanto da origem quanto da composição do substrato.

2.4.3. Digestão anaeróbica

A digestão anaeróbica converte matéria orgânica biodegradável, presente nas biomassas residuais, em biogás. A reação básica é esquematizada na Equação 2:



Esse processo de degradação pode ser dividido em duas fases. Fase fermentativa, na qual bactérias fermentativas hidrolíticas e acidogênicas realizam a conversão dos compostos orgânicos complexos em compostos simples como ácidos orgânicos voláteis, CO₂, H₂, etc. Os ácidos orgânicos, ainda na fase fermentativa, são transformados pelas bactérias acetogênicas em ácido acético (CH₃COOH), CO₂ e H₂. Esses produtos serão substrato para as arqueas metanogênicas, organismos estritamente anaeróbios, sendo transformados principalmente em metano (CH₄) e

CO₂., na fase metanogênica, etapa final no processo de degradação anaeróbia (CHERNICHARO, 1997).

As biotransformações que fazem parte desse processo são explicitadas na Figura 9 e quatro fases principais podem ser distinguidas:

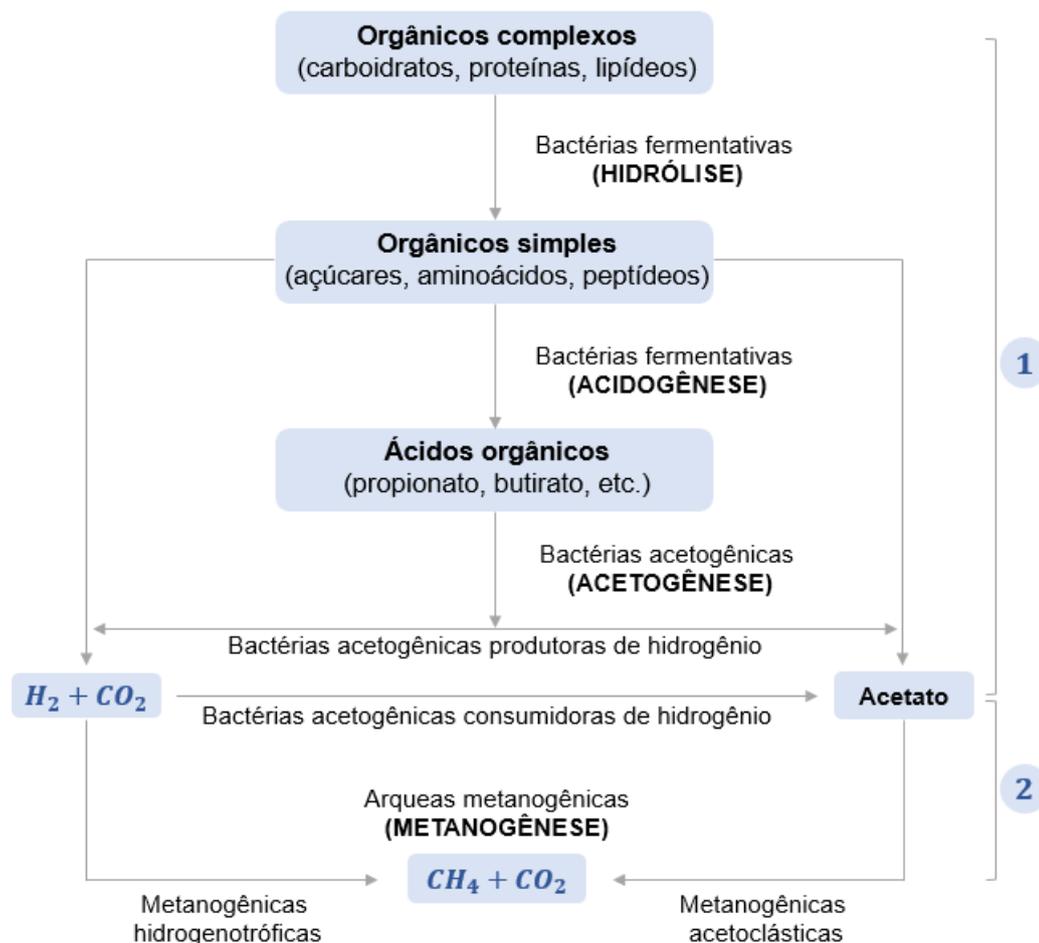


Figura 9 - Processo de digestão anaeróbia. 1-Fase Fermentativa, 2-Fase Metanogênica.

Fonte: Adaptado de CHERNICHARO, 1997

- **Hidrólise:** consiste na transformação de matéria orgânica complexa particulada (polímeros) em compostos orgânicos mais simples, através de enzimas extracelulares excretadas por bactérias fermentativas hidrolíticas. Os compostos solúveis resultantes são acessíveis as bactérias, atravessando suas paredes celulares e membranas.

- **Acidogênese:** os produtos solúveis resultantes da hidrólise são metabolizados, com o auxílio de endoenzimas no interior de bactérias fermentativas acidogênicas, sendo convertidos em ácidos orgânicos. Esse estágio pode ser considerado uma fase ácida devido à grande quantidade de ácidos formados.

- **Acetogênese:** nessa fase, os produtos formados na acidogênese são convertidos em substrato apropriado para as arqueas metanogênicas. Os produtos gerados pelas bactérias fermentativas acetogênicas são ácidos de menor cadeia, com um ou dois átomos.

Quando as populações de microrganismos presentes estão em quantidades adequadas, os ácidos são degradados na acetogênese a medida em que são formados na acidogênese, evitando o acúmulo e mantendo o pH do meio na faixa favorável para as arqueas metanogênicas, organismos extremamente sensíveis ao pH, com um valor ótimo entre 6,7 e 7,5 (WELLINGER, et al, 2013). Devido à essa sensibilidade das arqueas, o monitoramento do pH é de extrema importância para controlar a digestão anaeróbia e evitar falência do biorreator, o que será comentado mais precisamente na Seção 2.5.

- **Metanogênese:** etapa final do processo de degradação anaeróbia, na qual arqueas metanogênicas convertem compostos orgânicos em CH₄ e CO₂. Em função da afinidade por substratos e da magnitude de produção de metano, as arqueas podem ser divididas em dois grupos:

- I. Metanogênicas Hidrogenotróficas – produzem metano a partir de hidrogênio (H₂) e CO₂.

- II. Metanogênicas Acetoclásticas – são os microrganismos predominantes, sendo responsáveis por 60 a 70% da produção de metano na digestão anaeróbia. Produzem metano a partir de ácido acético ou metanol.

A metanogênese é a etapa que limita a digestão devido ao crescimento lento das arqueas metanogênicas e o número de substratos limitado utilizado por esse grupo de microrganismo (CHERNICHARO, 1997).

2.4.4. Biodigestores

O processo de digestão anaeróbica é conduzido dentro de equipamentos herméticos e impermeáveis, denominados biodigestores, projetados para realizar a fermentação anaeróbica do material orgânico, promovendo a produção do biogás e o digestato, como subproduto.

É pertinente salientar que a produção de biogás ocorre naturalmente no meio ambiente, em locais como zonas úmidas, sedimentos de lagos, campos de arroz, e até mesmo no estômago de ruminantes (MANUAL BÁSICO DE BIOGÁS, 2014). Áreas como estas são propensas à geração de biogás porque há, naturalmente, matéria orgânica em companhia dos micro-organismos ativos no processo de degradação. Embora, em muitos resíduos orgânicos, já haja micro-organismos atuantes na digestão, no *start up*² do biodigestor, em alguns casos, para que o processo seja estimulado, faz-se necessário a adição não só do substrato, mas também de um inóculo.

O inóculo consiste em uma suspensão contendo o consórcio microbiano capaz de realizar a degradação anaeróbica, em concentração adequada para auxiliar e impulsionar o início da fermentação. O próprio dejetos bovino pode ser adicionado ao biodigestor como inóculo, uma vez que o rúmen de um bovino atua basicamente como um biodigestor em miniatura, contendo nele todos os micro-organismos necessários ao processo (MANUAL BÁSICO DE BIOGÁS, 2014).

Os micro-organismos acrescentados ao biodigestor demandam um tempo para se adaptar ao substrato, pois tanto este quanto o ambiente e condições em que estão sendo inseridos são diferentes dos de origem. Este período de aclimação é de extrema importância para que a estabilidade do processo seja obtida. Para obter um processo de início rápido, é recomendado utilizar como inóculo um material retirado de um processo já em andamento, de modo a iniciar a operação com uma comunidade microbiana adaptada, a priori, ao substrato e condições semelhantes (MANUAL BÁSICO DE BIOGÁS, 2014).

² *start up* – início da operação

De maneira geral, os biodigestores são compostos por um reservatório para armazenar e fermentar a biomassa, e um gasômetro, responsável pelo armazenamento do biogás produzido (ARAÚJO, 2017). Podem ser classificados, de acordo com sua forma de operação, em batelada e contínuo (MATOS, 2018):

- **Batelada:** trata-se de um biodigestor no qual o substrato é abastecido ao sistema uma única vez, e é submetido à fermentação por um período de tempo determinado. Ao término deste período, o biodigestor é completamente descarregado, limpo e uma nova carga de substrato é abastecida, dando início a um novo processo. É raro a condução em batelada, mas quando feita, normalmente, se utiliza, no mínimo, dois biorreatores em série, com o intuito de aumentar a eficiência do processo.
- **Contínuo:** trata-se de um sistema com abastecimento contínuo de substrato durante o processo de digestão e, portanto, a produção de biogás e de subprodutos também ocorre continuamente. O abastecimento pode acontecer em períodos diários ou até mesmo com frequência menor do que 24 horas. São indicados para matérias-primas líquidas ou semilíquidas e podem ser verticais ou horizontais, de acordo com seu posicionamento sobre o solo.

Para mais, existem diversos modelos de biodigestores, cada qual com suas características próprias de operação. A escolha do biodigestor apropriado depende principalmente do substrato disponível: suas características, quantidade e qualidade. Os principais modelos de biodigestores são abordados a seguir.

2.4.4.1. Modelo Indiano

É um modelo de operação contínua, posicionado verticalmente em relação ao solo e caracteriza-se por possuir um tanque cilíndrico destinado à fermentação, enterrado ao solo e todo construído em alvenaria, e uma redoma, geralmente feita de ferro, que atua como o gasômetro. A redoma é localizada na parte superior do tanque cilíndrico, mergulhada sobre a própria biomassa em fermentação ou em um selo

d'água externo, e se movimenta verticalmente em concordância com a produção de biogás, tendo um deslocamento para cima quando há grande acúmulo de gás e um deslocamento para baixo na situação oposta. Esta mobilidade da redoma permite que a pressão interna de operação seja constante. O tanque de fermentação apresenta uma parede central que o divide em duas câmaras, de modo a garantir que o material circule por todo o interior do reator. A circulação de matéria para dentro e fora do sistema é feita através de canos, que conectam os compartimentos de alimentação e descarga, localizados à nível terreno, ao tanque (ARAÚJO, 2017; SOARES et.al; 2010).

A estrutura do modelo indiano está representada esquematicamente na Figura 10 e suas vantagens e desvantagens listadas na Tabela 4.

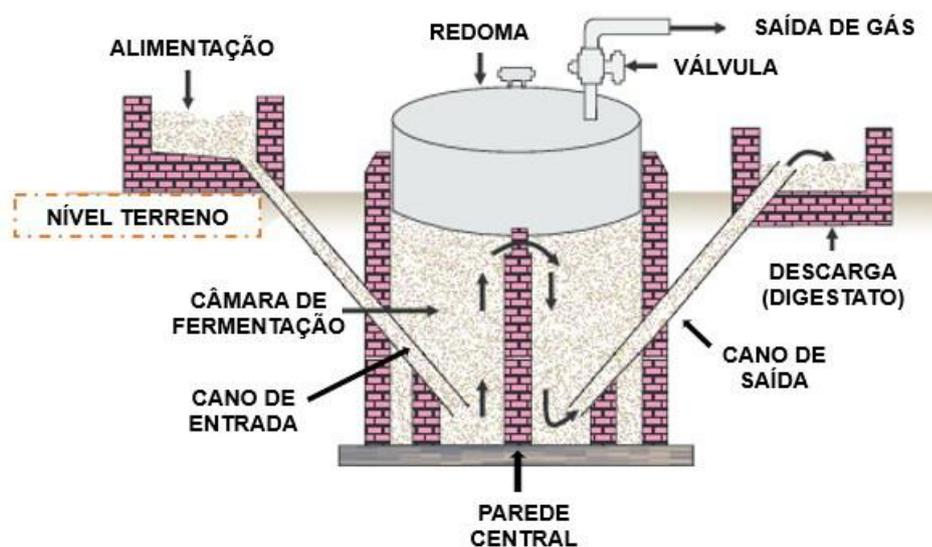


Figura 10 – Representação esquemática do biodigestor modelo indiano

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, 2017

Tabela 4 - Vantagens e Desvantagens do modelo indiano

BIODIGESTOR - MODELO INDIANO	
VANTAGENS	DESVANTAGENS
○ Fácil construção	○ Redoma de metal encarece o equipamento
○ Ocupa pouco espaço	○ Redoma de metal está sujeita à corrosão
○ Temperatura do sistema pouco variável	○ Possíveis entupimentos nas tubulações
○ Reduzida perda de gás durante o processo	○ Pode ocorrer infiltração no lençol freático

Fonte: Elaboração própria (SOARES, et.al, 2010)

Este modelo se restringe a degradação de resíduos com concentração de sólidos totais menor ou igual à 8%, para facilitar a circulação pelo interior da câmara e evitar entupimentos dos canos de entrada e saída do material (DEGANUTTI *et al.*, 2001).

2.4.4.2. Modelo chinês

É um modelo também de operação contínua, posicionado verticalmente em relação ao solo e inspira-se no modelo indiano, com algumas modificações a fim de tornar o equipamento mais viável economicamente. O que distingue estruturalmente o modelo chinês do modelo indiano é que este é composto por uma única câmara cilíndrica em alvenaria, na qual ocorre a fermentação, contendo um teto curvado e impermeável destinado ao armazenamento de biogás, como exemplificado na Figura 11. Como no modelo chinês o volume interno é fixo, a pressão no equipamento varia com o tempo e seu funcionamento é baseado no princípio de prensa hidráulica, ou seja, aumentos de pressão em seu interior, devido ao acúmulo de biogás, resultam no deslocamento do efluente da câmara de fermentação para caixa de saída (FRIGO *et al.*, 2015).

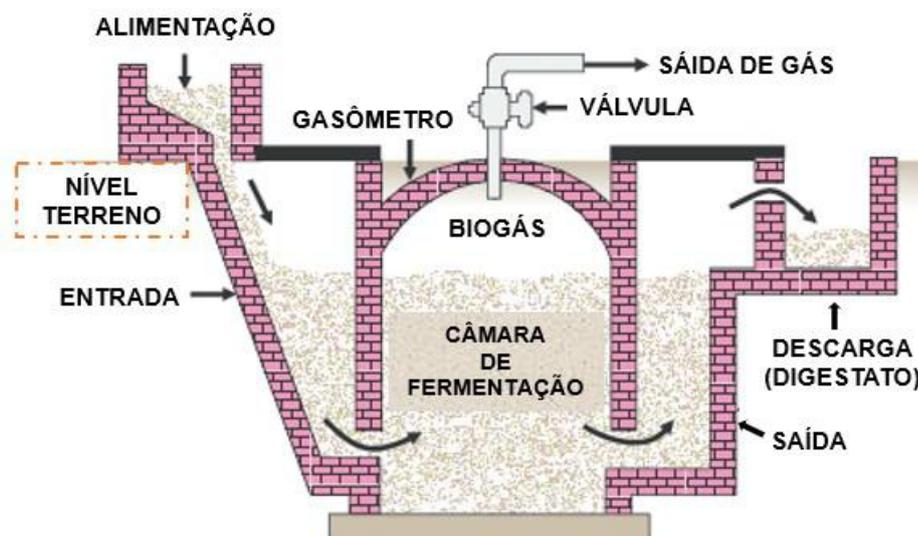


Figura 11 - Representação esquemática do biodigestor modelo chinês

Fonte: Adaptado de ARAÚJO, 2017

Similarmente ao modelo indiano, o modelo chinês se restringe à degradação de resíduos com concentração de sólidos totais menor ou igual a 8% para evitar entupimento e facilitar circulação interna de material. As vantagens e desvantagens deste modelo estão elencadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Vantagens e desvantagens do modelo chinês

BIODIGESTOR - MODELO CHINÊS	
VANTAGENS	DESvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ○ Baixo custo ○ Ocupa pouco espaço ○ Temperatura do sistema pouco variável 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Está sujeito a entupimentos ○ Pequena área de reserva de gás ○ Construção limitada em solos superficiais ○ Ocorrência de vazamentos, em casos de má vedação

Fonte: Elaboração própria (SOARES, et.al, 2010)

2.4.4.3. Modelo canadense ou lagoa coberta

O modelo canadense, também conhecido como lagoa coberta, opera em regime contínuo e é posicionado horizontalmente em relação ao solo, em outras

palavras, seu comprimento e largura são maiores que sua profundidade. É composto por uma câmara de fermentação, normalmente subterrânea, revestida por uma lona plástica impermeável, que infla, como um balão, de acordo com o volume de biogás produzido, e funciona como local de armazenamento do gás (MATOS, 2018). Além disso, conta com uma caixa de alimentação, feita de alvenaria, e de descarga e um registro para captação do biogás, conforme exibido na Figura 12.

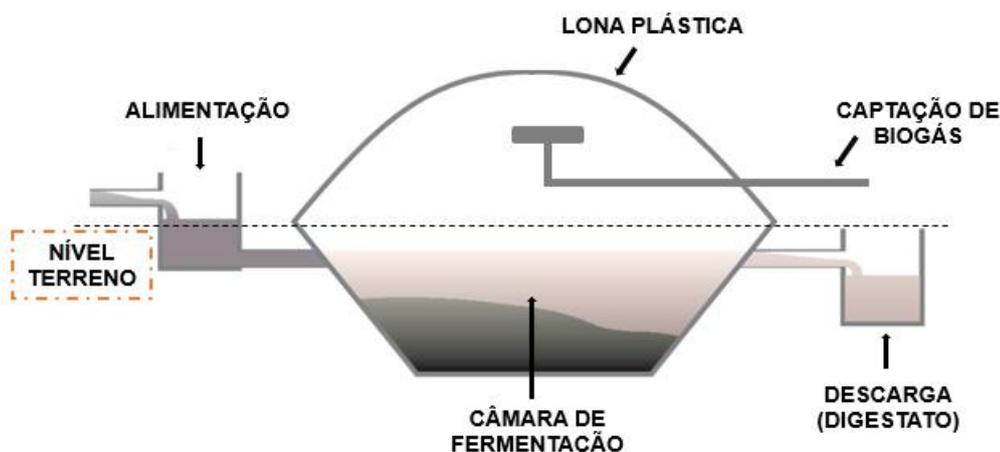


Figura 12 - Representação esquemática do biodigestor modelo lagoa coberta

Fonte: Adaptado de PALHARES, 2019

A disposição horizontal da lagoa coberta em relação ao solo, confere à mesma maior área de exposição ao sol, o que possibilita grande produção de biogás, principalmente em regiões tropicais, e reduz os riscos de entupimento (SOARES et.al, 2010; MATOS, 2018). Suporta um volume de carga de resíduos maior que os modelos indiano e chinês, porém se limita a degradação de matéria com, no máximo, 3% de concentração de sólidos totais (ARAÚJO, 2017).

Demais vantagens e desvantagens do modelo canadense podem ser consultadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Vantagens e desvantagens do modelo canadense

BIODIGESTOR - MODELO CANADENSE	
VANTAGENS	DESVANTAGENS
○ Construção simples	○ Maior sensibilidade a variações térmicas
○ Maior área de exposição ao sol	○ Podem apresentar menor eficiência em dias frios
○ Não exhibe restrições ao tipo de solo	○ A presença da lona encarece o equipamento
○ Lona plástica pode ser removida, possibilitando a limpeza do digestor	○ Tendência ao acúmulo de lodo no fundo do tanque

Fonte: Elaboração própria (MATOS, 2018; SOARES *et al.*, 2010)

Os modelos indiano, chinês e canadense são ditos modelos rurais, justamente por serem amplamente utilizados em propriedades rurais, voltados à produção de biogás a partir de resíduos gerados nessas áreas. Entretanto, o modelo canadense é o mais barato e mais fácil de construir, sendo o mais aplicado no ambiente rural brasileiro.

2.4.4.4. Tanque de agitação contínua

O tanque de agitação contínua, mais conhecido como CSTR (do inglês *Continuous Stirred Tank Reactor*) é um biodigestor que opera de forma contínua, cujo tempo de retenção hidráulica (TRH)³ varia entre 15 e 20 dias. Consiste em uma câmara cilíndrica, construída acima do solo, e sua principal característica é a presença de um sistema de agitação que mantém o conteúdo em constante homogeneização. A implementação desse recurso, aumenta de 15 a 30% a produtividade de biogás, pois a movimentação contínua garante boa distribuição de substratos, enzimas, nutrientes e micro-organismos por todo o volume preenchido do reator, além de melhorar o contato entre a matéria-prima e os organismos decompositores (CIBIOGÁS, 2021).

O CSTR também contém isolamento térmico e conta com um sistema de controle, através do qual é possível monitorar e regular diversos parâmetros, como

³ tempo de retenção hidráulica (TRH) - tempo em que o substrato permanece no interior do biodigestor.

temperatura, pH e nível de biomassa, proporcionando um processo muito mais controlável e estável (CIBIOGÁS, 2021). A Figura 13 exhibe esquematicamente um corte vertical de um biodigestor do tipo CSTR.

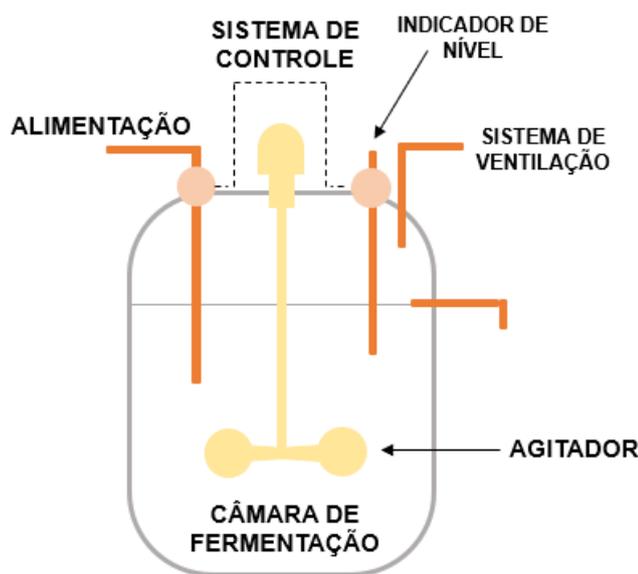


Figura 13 - Representação esquemática de um tanque de agitação contínua – CSTR

Fonte: Elaboração própria

A tecnologia aplicada neste biodigestor é mais elaborada e complexa, em razão de ter sido criada, precisamente, para suportar grandes cargas volumétricas e aceitar concentração mais elevada de sólidos, e torna custoso a implementação e manutenção da máquina. Contudo, devido a sua estabilidade e controle, o tanque de agitação contínua é o biodigestor mais utilizado em plantas de biogás, especialmente, na Europa (CIBIOGÁS, 2021).

2.4.4.5. Biodigestor tipo UASB

O biodigestor do tipo UASB (do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), opera em regime contínuo e apresenta como principal característica o fluxo ascendente do afluente (substrato), que passa através de um material terroso, denominado lodo, repleto de micro-organismos, até o topo do reator, onde há um separador trifásico (KUNZ *et al.*, 2019).

O reator contém duas zonas de digestão, as chamadas leito de lodo e manta de lodo. O leito de lodo é uma região bastante densa e de intensa atividade microbiológica, que contém partículas grosseiras de elevada capacidade de sedimentação, localizada no fundo do biodigestor. Logo acima, encontra-se a manta de lodo, rica em partículas mais dispersas e leves e com reduzida atividade microbiológica. O substrato entra pela parte inferior, em fluxo ascendente, e à medida que vai perpassando pelo leito e manta de lodo vai sendo digerido e convertido em biogás.

Devido ao fluxo ascensional, tanto o gás quanto o líquido restante e algumas partículas sólidas, que se desgarram da manta de lodo, são direcionados para o separador trifásico, no topo do reator. No separador trifásico, enquanto as partículas de gás são guiadas para a saída central, a mistura líquido-sólido é orientada para um decantador, no qual as partículas sólidas são decantadas, retornando a compor a manta de lodo, e o líquido deixa o reator pela parte sobrenadante.

O esquema de funcionamento de um biodigestor tipo UASB está elaborado na Figura 14.

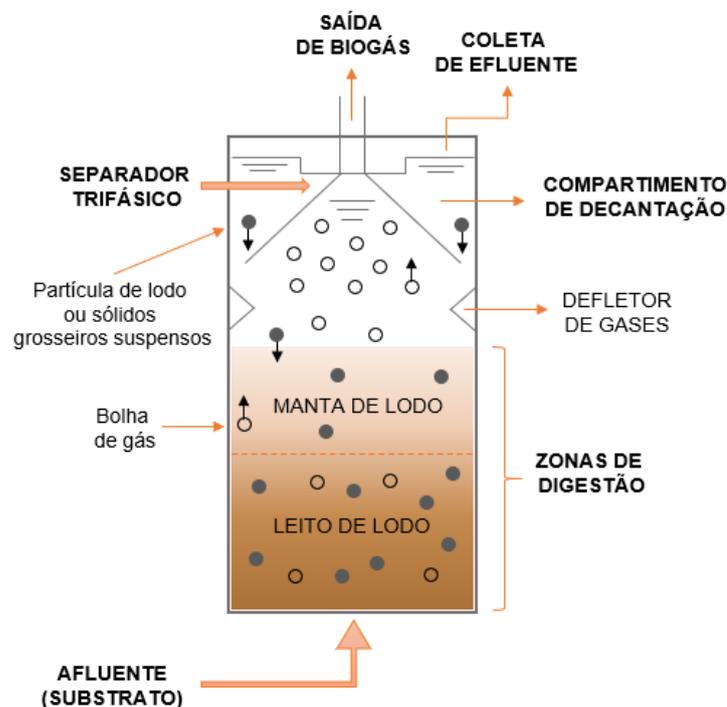


Figura 14 - Esquema de funcionamento de um reator UASB

Fonte: Elaboração própria (KUNZ *et al.*, 2019)

Biodigestores do tipo UASB têm alta eficiência, necessitando de um curto TRH (4 a 72 horas). Em contrapartida, por questões hidrodinâmicas, se limitam à substratos com concentração de sólidos totais menor que 2%, como por exemplo os esgotos sanitários. Para serem utilizados na produção de biogás a partir de demais resíduos, como os dejetos animais, é necessária uma diluição prévia na etapa de pré-tratamento (KUNZ *et al.*, 2019).

2.4.4.6. Biodigestor em fase sólida

O biodigestor em fase sólida, também conhecido como *dry digestion*, opera em batelada e é específico para resíduos que contém entre 20 e 40% de sólidos. O substrato é adicionado ao reator, juntamente com um inóculo, e após o início da degradação, o líquido percolado, gerado nesse processo, passa a ser coletado e reintroduzido ao biodigestor, através de um aspersor, com o auxílio de uma bomba peristáltica, de modo a permanecer recirculando sobre a fração sólida (Figura 15).

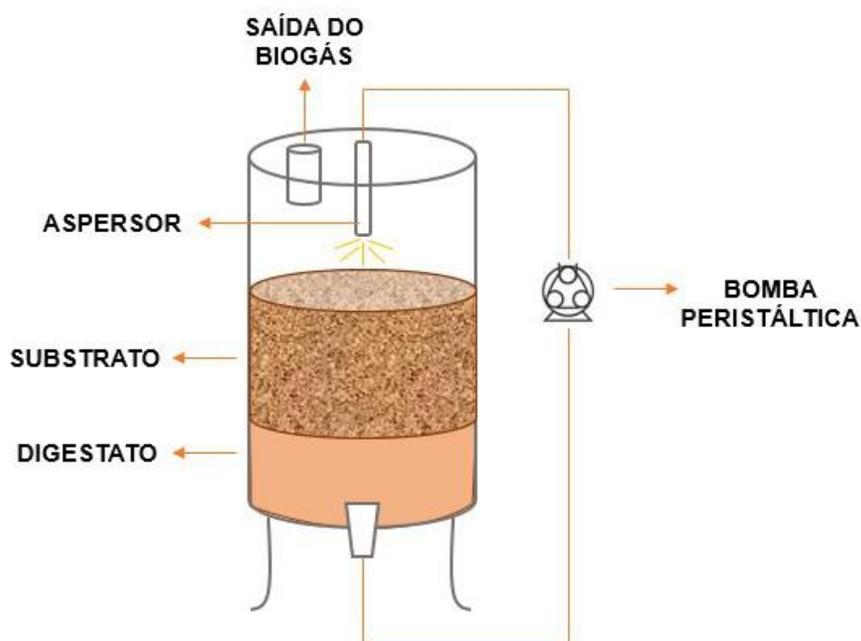


Figura 15 - Representação esquemática do biodigestor em fase sólida

Fonte: Elaboração própria (KUNZ *et al.*, 2019)

De acordo com KUNZ *et al.* (2019), a digestão em fase sólida apresenta características muito relevantes, a serem ditas:

- acontece com menor volume de biodigestor, devido à baixa concentração de água se comparado com as demais tecnologias;
- a produtividade de biogás é de 15 a 40% menor quando comparado com uma digestão mais úmida. Em contrapartida, o biogás produzido apresenta concentração de metano relativamente alta, sendo aproximadamente 80%;
- o tempo médio de digestão é entre 2 e 4 semanas;
- suporta substratos com maior concentração de sólidos e também maior tamanho de partícula;
- não é necessário diluir o substrato;
- o biorreator precisa ser aberto para ser preenchido e/ou esvaziado

2.4.5. Tratamento e purificação do biogás

O biogás, em sua forma bruta, é totalmente saturado de vapor d'água e, além de CH_4 e CO_2 , contém quantidades significativas de sulfeto de hidrogênio (H_2S). A presença destas substâncias é um inconveniente porque, além do H_2S ser tóxico e exalar um odor desagradável de ovo podre, ele combina-se com o vapor contido no biogás originando ácido sulfúrico (H_2SO_4). A existência de H_2SO_4 no interior de motores utilizados no processamento de biogás, como também em tubulações, causa corrosão e conseqüente perda destes equipamentos (PROBIOGÁS, 2010). Para mais, a presença do CO_2 interfere diretamente no potencial energético do biogás, por ser inerte em termos de combustão e ocupar muito volume (SILVA, 2019).

Por essas razões, não é possível aproveitar diretamente o biogás bruto produzido em uma usina, sendo imprescindível submetê-lo a estágios de purificação, que combinados de diferentes maneiras, são pré-requisitos das opções de aplicações, como mostra a Figura 16 (PROBIOGÁS, 2010).

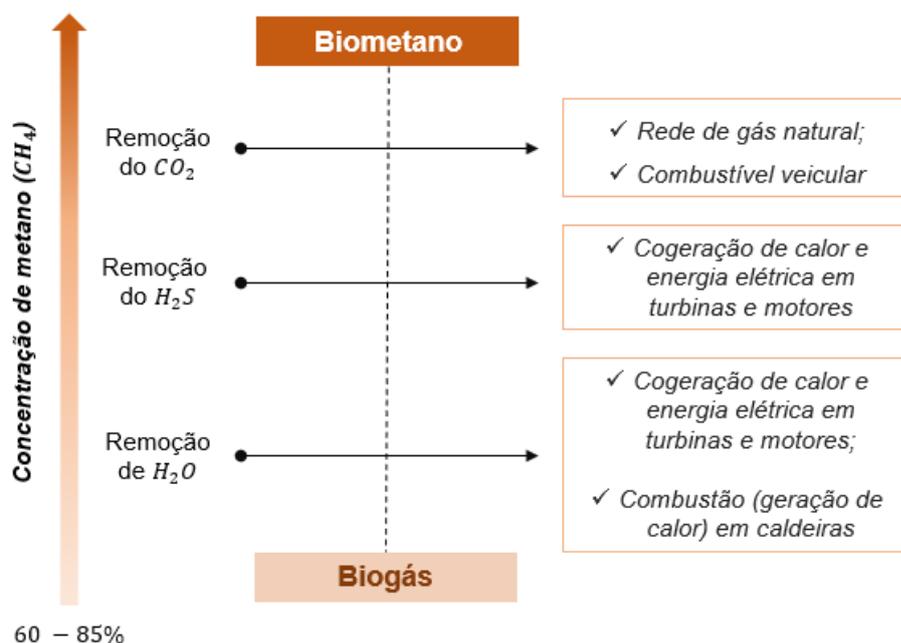


Figura 16 – Tratamento e purificação do biogás conforme o uso final

Fonte: Adaptado de MORAIS, 2021

2.4.5.1. Remoção de vapor d'água

No biodigestor, o biogás encontra-se completamente saturado, apresentando umidade relativa de 100%. A secagem, ou remoção do vapor d'água, do biogás é realizada com o fim de proteger os componentes de processamento de gás contra danos e desgastes, e para atender às exigências dos estágios de purificação seguintes (PROBIOGÁS, 2010). A retirada de água pode dar-se por três diferentes processos: condensação, adsorção e absorção.

O processo de secagem por condensação fundamenta-se no princípio de separação do condensado pelo resfriamento do gás abaixo do ponto de orvalho. O ponto de orvalho é definido como a temperatura até a qual o gás precisa ser resfriado para que a condensação de água se inicie. Ao resfriar o biogás a uma temperatura abaixo do ponto de orvalho, grande parte do vapor d'água, senão todo, é passado para o estado líquido e pode ser recolhido. Usualmente, o resfriamento é feito na própria tubulação de gás, se esta for instalada com uma certa inclinação, de maneira que o condensado pode ser coletado em um reservatório localizado no ponto mais baixo da tubulação (PROBIOGÁS, 2010).

O processo de secagem por adsorção ou absorção, mais conhecidos como secagem química, consistem no uso de reatores cilíndricos, contendo no seu volume interno um leito fixo rico em materiais adsorventes como zeólitas, géis de sílica ou óxido de alumínio ou absorventes como o trietileno glicol ou sais higroscópicos, respectivamente (SILVA, 2019). Estes materiais possuem grande afinidade pela água e, conforme o biogás bruto vai percorrendo o leito, as moléculas de água ficam retidas por adsorção ou absorção.

A secagem química é a técnica mais empregada por apresentar eficiência significativamente melhor, porém possui custos adicionais relativos a trocas e regeneração frequente dos materiais internos (PROBIOGÁS, 2010; SILVA, 2019).

2.4.5.2. Dessulfurização

A dessulfurização, remoção de H_2S , pode ocorrer através de processos biológicos, químicos e físicos. O processo distingue-se ainda em dessulfurização grossa, na qual os níveis de H_2S são reduzidos a valores menores de 500 ppm, e dessulfurização fina, que reduz os níveis do contaminante a menos de 0,005 ppm. A dessulfurização fina é caracterizada como um processo de precisão, aplicada para ajustar as concentrações de H_2S de acordo com as especificações e requisitos para injeção na rede de gás natural, quando esta é a aplicação final (PROBIOGÁS, 2010; SILVA, 2019).

É possível realizar a dessulfurização tanto dentro quanto fora do próprio biodigestor, através de técnicas específicas para cada caso, como mostra a Figura 17.

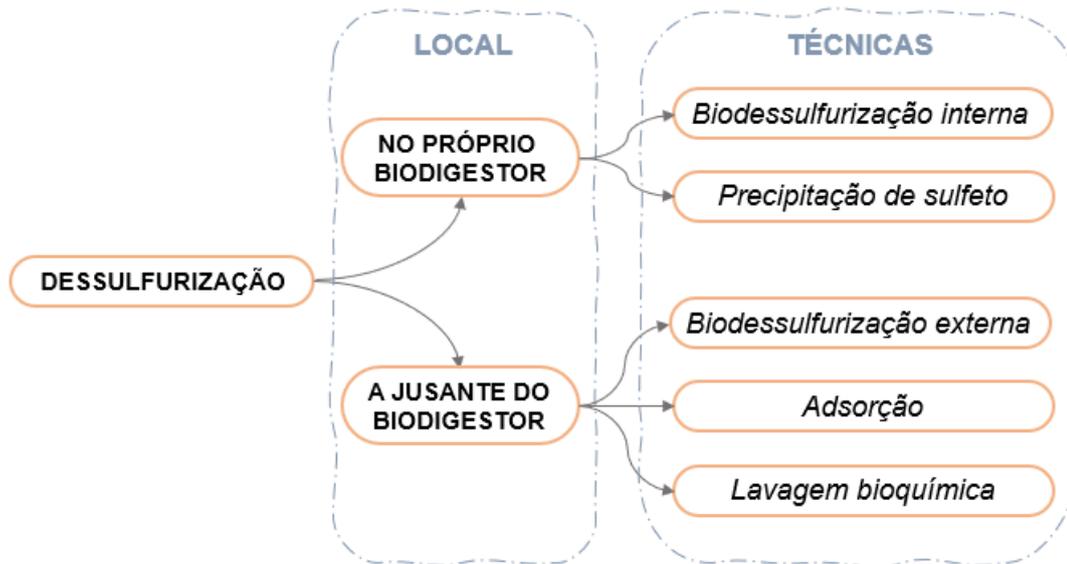


Figura 17 - Processos tecnológicos mais comumente empregados na dessulfurização do biogás

Fonte: Elaboração própria (PROBIOGÁS, 2010)

No interior do biodigestor, há duas técnicas passíveis de serem utilizadas: biodessulfurização interna e precipitação de sulfeto. Na biodessulfurização interna, oxigênio é introduzido no biodigestor por meio de um compressor, e, em condições aeróbicas, o crescimento de bactérias que oxidam o H_2S em enxofre elementar é estimulado. O enxofre formado passa a compor o digestato e é descarregado junto deste (PROBIOGÁS, 2010). Em alternativa, na precipitação de sulfeto, cloretos de ferro ($FeCl_3/FeCl_2$) são adicionados ao biodigestor, os quais reagem com o H_2S formando sulfeto de ferro insolúvel (FeS) através da reação de precipitação do sal de ferro. Ambos os processos tratam de uma dessulfurização grossa (SILVA, 2019).

Com o biogás já coletado, três principais técnicas podem ser empregadas a jusante do biodigestor: biodessulfurização externa, adsorção e lavagem bioquímica. A biodessulfurização externa baseia-se exatamente no mesmo processo biológico que norteia a biodessulfurização interna, com o diferencial que ocorre fora do biodigestor por meio de biofiltros. Os biofiltros são reatores preenchidos internamente com materiais porosos que dispõem de elevada área superficial para crescimento e fixação dos micro-organismos. Conforme o biogás atravessa o biofiltro, o H_2S vai sendo oxidado à enxofre elementar (SILVA, 2019).

Na dessulfurização por adsorção, o carvão ativado, devido à sua afinidade pelo H₂S, é utilizado como material adsorvente. O H₂S quando em contato com a superfície do carvão ativado sofre oxidação catalítica. Por fim, o processo de lavagem bioquímica realiza a remoção de H₂S através de um sistema de três estágios: uma coluna de lavagem que tem como princípio a absorção do H₂S em uma solução de soda cáustica diluída, seguida de um biodigestor com a função de regenerar a solução de soda cáustica através da oxidação de H₂S a enxofre elementar, e, para finalizar, um separador de enxofre para remover o enxofre elementar formado. Tanto a adsorção, quanto a lavagem química, são processos de dessulfurização fina (PROBIOGÁS, 2010).

2.4.5.3. Remoção de CO₂

A etapa de remoção do dióxido de carbono é necessária quando o objetivo é injetar o biogás na rede de gás natural e/ou utilizá-lo como combustível veicular. Diversificadas técnicas vem sendo estudadas e estruturadas para serem aplicadas neste estágio da purificação, entretanto, a adsorção com modulação de pressão e a lavagem com água sob pressão são técnicas já muito bem consolidadas e amplamente empregadas (PROBIOGÁS, 2010).

Na adsorção com modulação de pressão, mais conhecida como PSA (do inglês *pressure swing adsorption*), utiliza-se carvão ativado ou zeólitas, para promover a separação física do CO₂. O processo, basicamente, decorre em ciclos de adsorção/dessorção. Primeiramente, o biogás percorre a coluna de adsorção, à pressão de 6 a 10 bar, aproximadamente, para que o CO₂ se adsorva, e, em seguida a coluna é despressurizada a fim de promover a dessorção do CO₂ e regenerar o equipamento para um novo ciclo. Por outro lado, a técnica de lavagem com água sob pressão funda-se na diferença de solubilidade em água do CH₄ e do CO₂. Ambos os métodos exigem dessulfurização e secagem prévia e, proporcionam teor de CH₄ maior que 97% (PROBIOGÁS, 2010).

2.5. FATORES QUE INFLUENCIAM NA PRODUÇÃO

Em virtude de a produção de biogás ser realizada por um consórcio microbiano, os fatores que afetam a sobrevivência dos micro-organismos afetarão diretamente a formação do biogás. Estes fatores devem ser controlados nos biodigestores, de modo a manter as condições físicas e químicas necessárias ao desenvolvimento e metabolismo das bactérias e arqueas que atuam no processo (MATOS, 2018).

2.5.1. Impermeabilização do sistema

As arqueas metanogênicas são organismos estritamente anaeróbicos e não sobrevivem na presença de oxigênio, portanto, em condições aeróbicas, a degradação da matéria orgânica gerará apenas CO₂. Por essa razão, o sistema deve ser completamente impermeabilizado, garantindo ausência de oxigênio (MANUAL BÁSICO DE BIOGÁS, 2014).

2.5.2. Temperatura

O processo de digestão anaeróbica pode ser conduzido a temperaturas termofílicas (entre 50°C e 70°C) ou a temperaturas mesofílicas (entre 20°C e 45°C). Esta faixa de temperatura exerce influência sobre a velocidade do processo. Em temperaturas termofílicas, produz-se maior quantidade de biogás em menos tempo, porém é necessário arcar com os custos relacionados ao aquecimento do biodigestor. Já em faixas mesofílicas, não é necessário aquecimento extra, em contrapartida o tempo de produção será maior (MANUAL BÁSICO DO BIOGÁS, 2014).

2.5.3. pH

Grupos distintos de micro-organismos participam da digestão anaeróbica, porém as arqueas metanogênicas são os organismos mais sensíveis às variações de pH, sobrevivendo apenas em uma faixa estreita de 6,7 a 7,5. Em condições ótimas

não há acúmulo de ácidos no reator, pois à medida que estes são produzidos também são instantaneamente consumidos, mantendo o meio neutro, favorável para as arqueas. Contudo, pode ser interessante a utilização de soluções tamponantes para evitar variações bruscas (PRAMANIK *et al.*, 2019).

2.5.4. Razão entre carbono e nitrogênio

A razão entre carbono e nitrogênio (C:N) é um parâmetro fundamental para manter o equilíbrio com relação aos nutrientes necessários para o crescimento microbiano. É primordial que a razão C:N não seja muito alta e nem muito baixa, porque a baixa disponibilidade de nitrogênio reduz a taxa de crescimento dos micro-organismos, ao passo que o excesso de nitrogênio pode causar inibição. Em um processo de geração de biogás, a relação C:N deve variar entre 20:1 e 30:1 (MANUAL BÁSICO DO BIOGÁS, 2014).

2.5.5. Carga orgânica

A carga orgânica refere-se à quantidade de material novo que é agregado ao biodigestor por unidade de tempo. A adição de grande carga ao processo de uma única vez, resulta na formação de ácidos graxos, porque os micro-organismos presentes não são suficientes para degradar todo material. Esta situação faz com que o pH do meio diminua e instabilize o processo de degradação. O ideal é iniciar com uma carga relativamente baixa e ir aumentando gradativamente conforme ocorre o crescimento dos organismos anaeróbicos (MANUAL BÁSICO DO BIOGÁS, 2014).

3. BIOGÁS: ECONOMIA E SUSTENTABILIDADE

Tradicionalmente, o modelo de produção e serviços disseminado e empregado em todo o mundo, segue uma lógica linear, que tem como objetivo a fabricação de novos produtos a partir da extração de matérias-primas de recursos naturais (fonte finita), seguida do despejo, muitas vezes de maneira inapropriada, dos resíduos gerados em aterros sanitários, após o uso/consumo (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013). Esse modelo é conhecido como modelo de Economia Linear ou “*take-make-dispose*”, no qual não há preocupação com a reutilização e reaproveitamento dos produtos e/ou matérias-primas, sendo todo o resíduo transformado em lixo.

A escassez de recursos e a poluição gerada, juntamente ao crescimento populacional, que requererá mais alimentos, mais produtos industriais, mais energia e mais água, induzem cada vez mais a implementação de um novo sistema de desenvolvimento econômico que preserve, dentre outros, a natureza. Neste âmbito, a Economia Circular (EC) se apresenta como um modelo alternativo de sustentabilidade, que se dedica em manter o fluxo de materiais e produtos em sua maior utilidade e valor, visando a redução da necessidade de extração e da geração de resíduos e a regeneração de sistemas naturais.

O fluxo de materiais na EC pode ser ilustrado através do diagrama de borboleta (Figura 18), desenvolvido pela Fundação *Ellen MacArthur* de grande notabilidade no assunto e que busca, desde sua criação, a disseminação desse modelo de economia. O diagrama ilustra dois principais ciclos – o ciclo técnico e o ciclo biológico. No ciclo técnico, os produtos são mantidos em circulação na economia por meio de reutilização, reparo, remanufatura e reciclagem. Dessa maneira, os materiais encontram-se continuamente em uso e nunca se tornam resíduos. No ciclo biológico, os nutrientes dos materiais biodegradáveis são devolvidos à Terra, por meio de compostagem ou digestão anaeróbica, permitindo que haja regeneração e que o ciclo possa continuar (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2022).

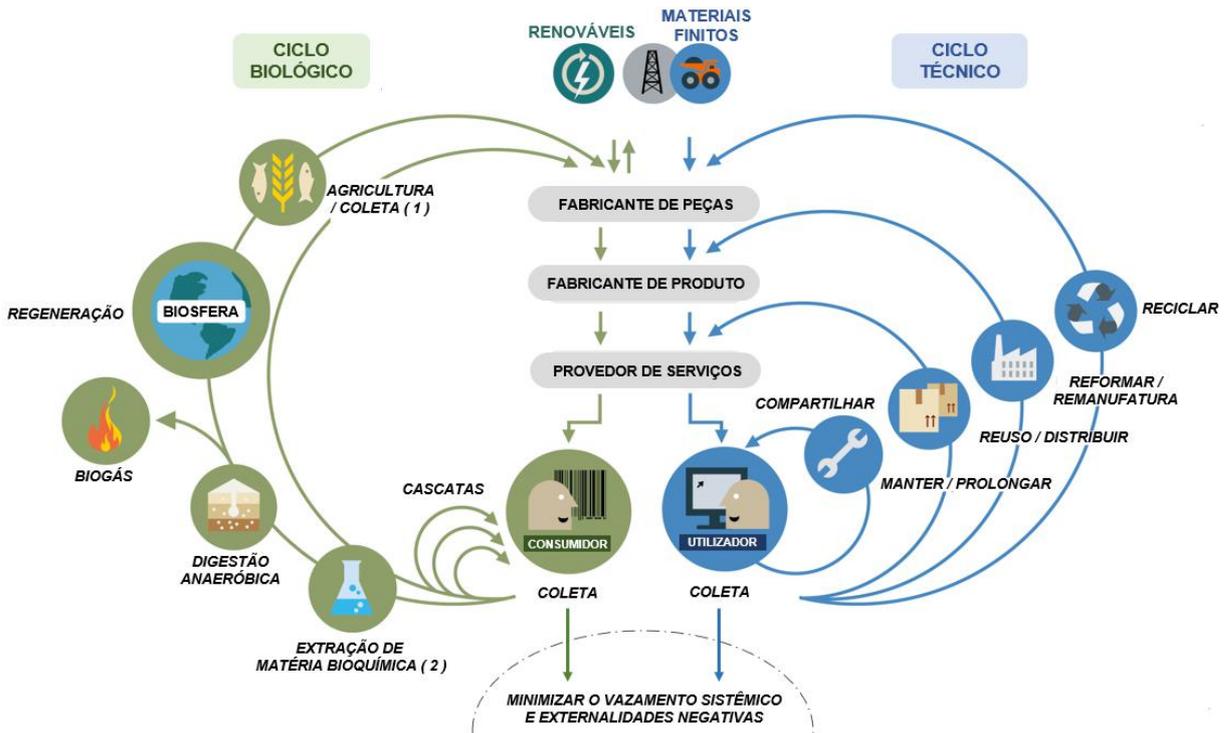


Figura 18 - Diagrama de borboleta. 1. Caça e pesca; 2. Pode tomar como insumo tanto resíduos pós-colheita quanto pós-consumo

Fonte: Adaptado de ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2022

O conceito de EC surgiu como produto de diversas escolas de pensamento, tendo grande contribuição da linha de pensamento conhecida como “do berço ao berço”, a qual afirma que o material retirado de determinado local, precisa retornar para o seu ponto de origem para dar continuidade aos processos (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2012).

O notável é que a geração de biogás está prevista nesse modelo de economia mais sustentável. No diagrama de borboleta, o biogás se apresenta apenas como uma consequência da regeneração da matéria biodegradável, através da digestão anaeróbica, mas, devido à grande concentração de metano em sua composição, o lançamento deste gás na atmosfera impacta negativamente a vida humana e o meio ambiente, pois o metano quando inalado pelo ser humano pode causar desmaios, asfixia e até parada cardíaca, dependendo da quantidade inalada, além de ser o principal agente causador do aceleração do efeito estufa, tendo um efeito 21 vezes maior que o dióxido de carbono, no âmbito das mudanças climáticas (ABILOGÁS, 2021).

O setor de geração e aproveitamento de biogás expõe, intrinsecamente, um carácter cíclico, pois o biogás e até mesmo o digestato são utilizados em atividades que geram mais materiais orgânicos residuais, e estes, por sua vez, são utilizados para gerar o próprio biogás (Figura 19).

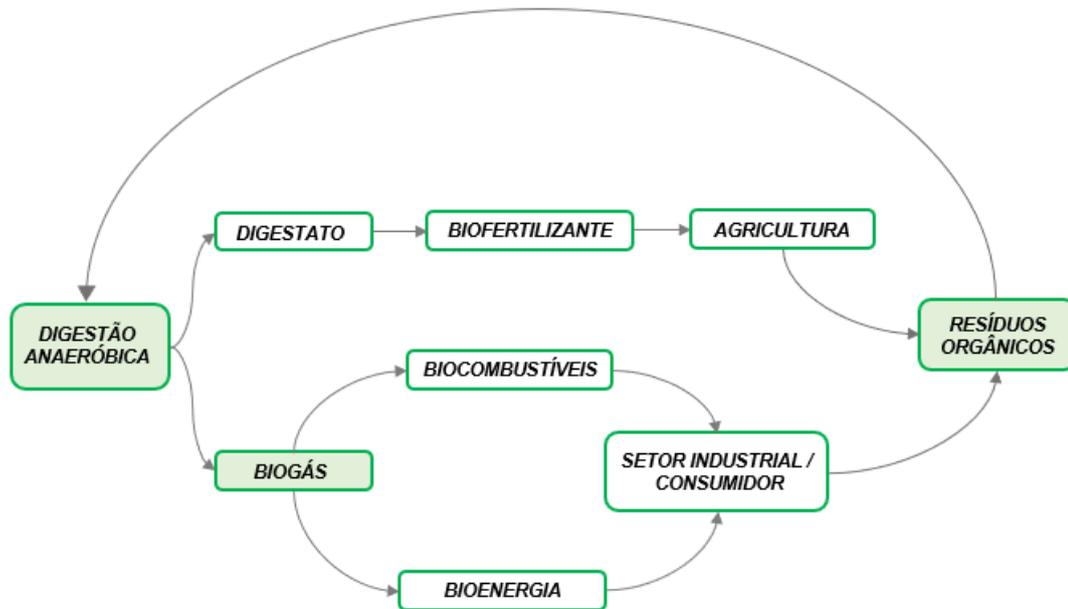


Figura 19 - Fluxograma simplificado do setor de biogás

Fonte: Adaptado de CARDOSO, 2017

Sendo assim, ao entendermos o biogás, não apenas como consequência, mas como o produto principal do processo de digestão anaeróbica, de grande valor energético, é possível completar o ciclo de utilidade e valor e negativar as externalidades. Por isso, o biogás é o único energético com emissão de carbono negativa, em torno de $-20 \text{ gCO}_{2eq}/\text{MJ}$ ⁴, segundo a ABiogás (2017). O valor negativo não leva em consideração apenas a baixa emissão de carbono, mas também contabiliza a não emissão de metano para a atmosfera caso os resíduos que constituem suas fontes de matéria-prima não fossem aproveitados.

⁴ $\text{gCO}_{2eq}/\text{MJ}$ – grama de gás carbônico equivalente por mega joule de energia gerada e utilizada

4. PANORAMA GERAL DO BIOGÁS NO BRASIL

4.1. BIOGÁS NA MATRIZ ENERGÉTICA

Toda a energia disponível em um país é retirada de um conjunto de fontes primárias de energia que chamamos de matriz energética do país. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a matriz energética representa o conjunto de fontes primárias de energia disponíveis em um país, estado ou no mundo, para suprir a necessidade (demanda) de energia.

A matriz energética mundial é composta, majoritariamente, por fontes não renováveis de energia. Segundo dados do Ministério Mineiro de Energia (MME), a parcela renovável da matriz energética mundial é substancialmente pequena, totalizando apenas 14,1%, no ano de 2021. Entretanto, cada vez mais as energias renováveis têm ocupado um espaço que antes era dominado pelas fontes não renováveis e, nesse âmbito, o Brasil tem uma supremacia em relação à sua proporção de energias renováveis, tendo uma das matrizes energéticas mais renováveis do mundo. Com as fontes renováveis representando 44,8% da matriz energética, o Brasil está à frente da média de 11,5% da OCDE e dos 14,1% da média mundial, segundo dados de 2021 (MME; EPE, 2022). Na Figura 20 está representada a matriz energética brasileira.

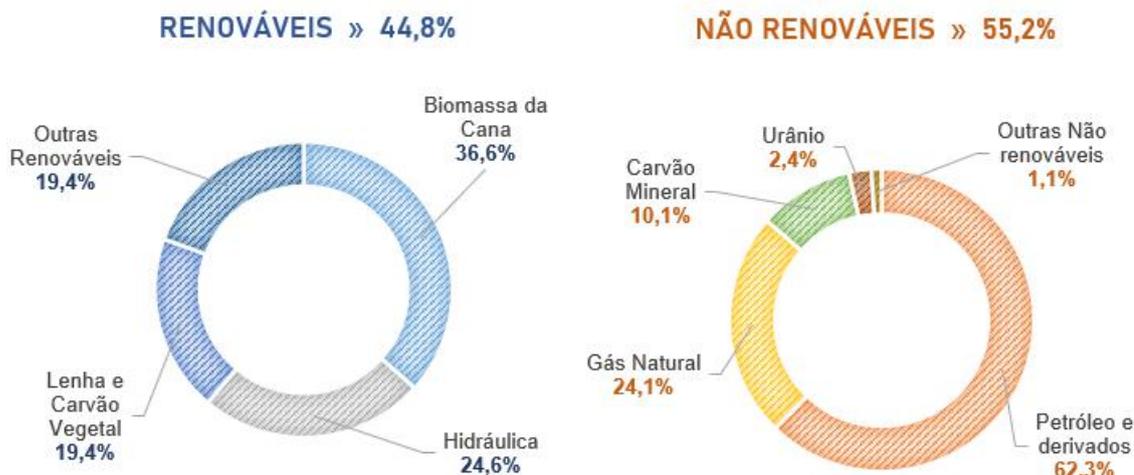


Figura 20 - Matriz energética brasileira - 2021

Fonte: Adaptado de Resenha energética brasileira, MME e Balanço Energético Nacional (BEN), EPE; 2022

Embora, de forma geral, a utilização de fontes de energia renováveis esteja em um cenário bem avançado no Brasil, a participação do biogás ainda é muito restrita. Em 2021, este representava apenas 1,4% do grupamento que chamamos de “outras renováveis”, como explicitado na Figura 21, totalizando, somente, 0,12% de toda matriz energética brasileira.

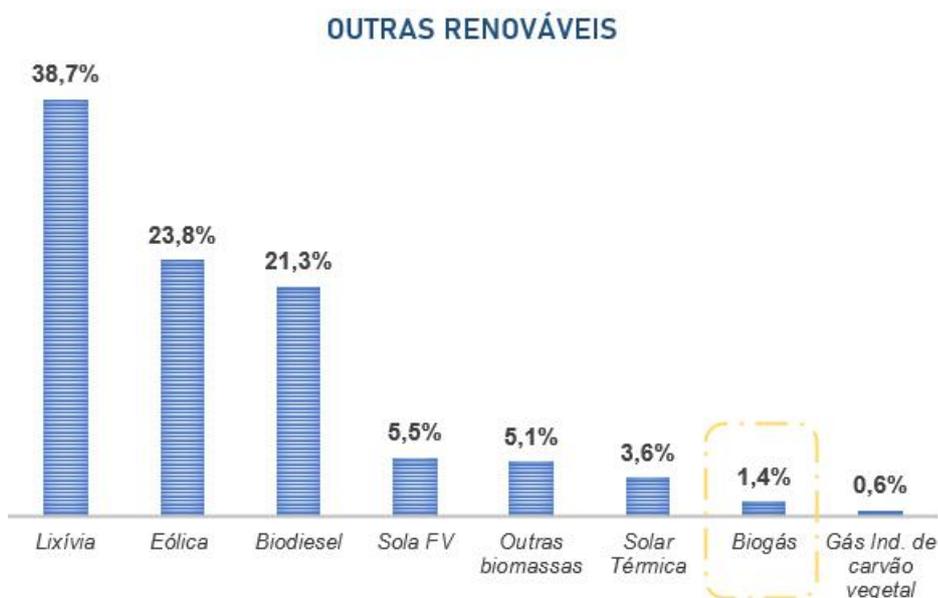


Figura 21 - Participação do biogás em “outras renováveis”

Fonte: Adaptado de Balanço Energético Nacional (BEN), EPE; 2022

Apesar disso, o histórico da matriz energética brasileira entre o período de 2015 a 2021 (Figura 22), mostra que conforme as fontes de energia renováveis foram ganhando espaço, o biogás foi se mostrando cada vez mais presente. De 2020 para 2021, observou-se uma queda da participação das renováveis na matriz, devido à queda da oferta de energia hidráulica, associada a escassez hídrica e ao acionamento das usinas térmicas (EPE; 2022); entretanto, o biogás seguiu apresentando um perfil de ascensão. Esse cenário indica a tendência de crescimento do setor de biogás no Brasil e corrobora com a motivação do presente estudo.

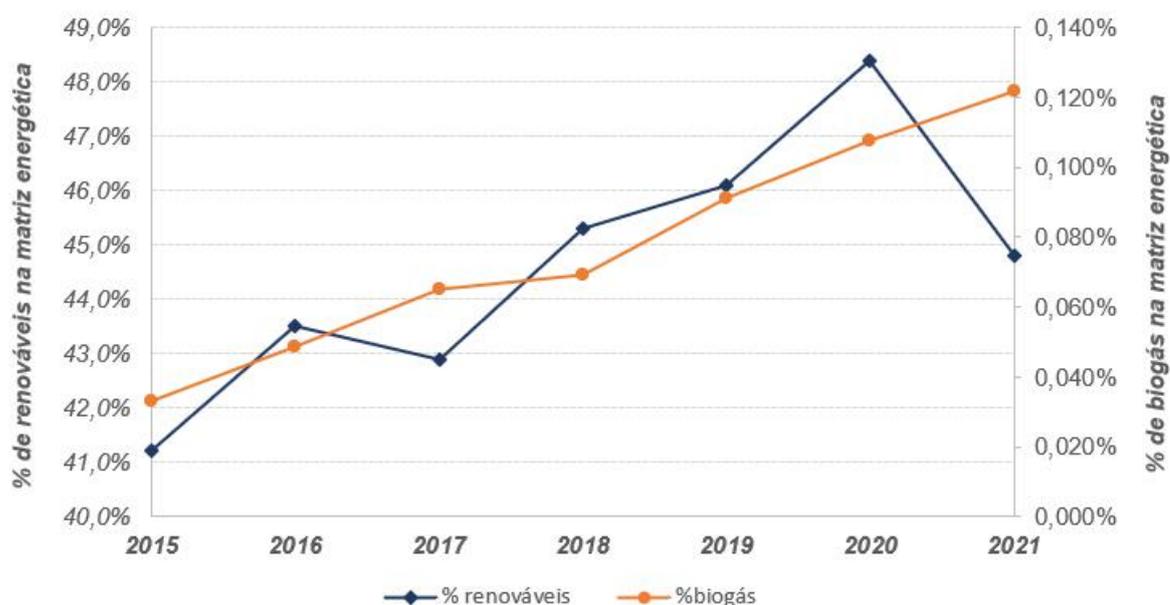


Figura 22 - Evolução, entre o período de 2015 a 2021, da participação das energias renováveis e do biogás, em especial, na matriz energética brasileira

Fonte: Elaboração própria (Balanço Energético Nacional, 2022; 2021; 2020; 2019; 2018; 2017; 2016)

4.2. CENÁRIO PRODUTIVO

Em termos de produção, até 2021, eram produzidos 2,35 bilhões de metros cúbicos por ano de biogás (ABIÓGÁS, 2022). Entretanto, de acordo com a ABiogás (2022), o país tem um potencial de produção de biogás bruto de 84,6 bilhões de metros cúbicos por ano, como mostra a Figura 23, considerando os setores industrial, agrícola e saneamento. Nota-se que apenas 3% do potencial é de fato aproveitado, ou seja, há oportunidades para a produção de biogás crescer em 97% no Brasil.

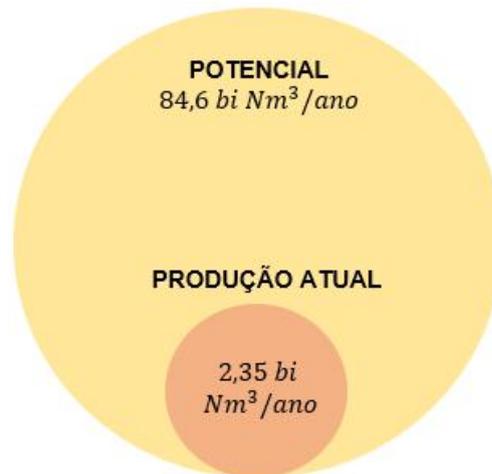


Figura 23 - Produção atual e potencial do biogás no Brasil. Nm³ representa o volume medido em condições padrão (1 atm, 273 K e 0% de umidade relativa)

Fonte: Adaptado de Panorama do Biogás no Brasil 2020, CIBIOGÁS; 2021

A quantidade de plantas de biogás em vigor, responsáveis por essa produção nacional, apresentaram um crescimento significativo desde 2017. Como resultado, nos últimos 5 anos (2017-2021), a produção de biogás para uso energético mais que dobrou no Brasil, como demonstra a Figura 24 (CIBIOGÁS, 2022).

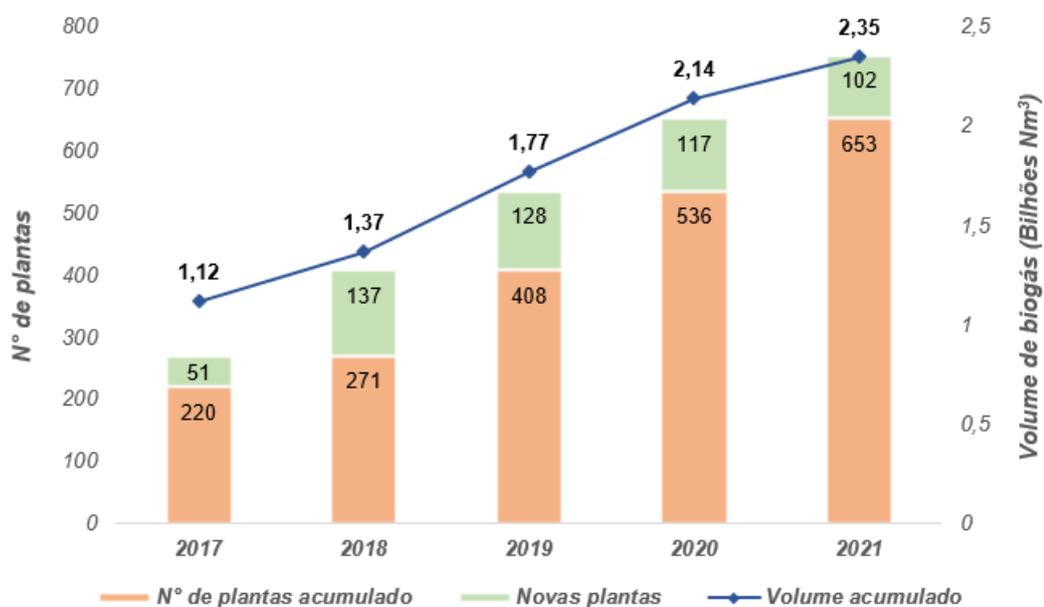


Figura 24 - Crescimento do setor de biogás nos últimos 5 anos

Fonte: Elaboração própria (CIBIOGÁS, 2022)

Para que todo o potencial de produção de biogás (84,6 bilhões Nm³/ano) do país seja aproveitado o mais rápido possível, o crescimento na produção do biogás precisa ser alavancado nos próximos anos. Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), o Brasil atingirá, em 2030, uma produção de biogás de 6,9 bilhões de metros cúbicos por ano (EPE, 2020), valor inferior a 10% do potencial nacional. Portanto, é válido identificar no cenário atual, as fraquezas e ameaças que possam estar impedindo a expansão da produção de biogás no Brasil, bem como identificar as forças e oportunidades que auxiliariam em um aumento da do potencial de produção nacional de biogás.

4.3. PLANTAS DE BIOGÁS

Dados do Biogas Map e Biogas Data, contabilizaram um total de 811 plantas de biogás distribuídas em todo território brasileiro, até o ano de 2021. De acordo com o status operacional, 755 destas foram identificadas como plantas “*em operação*”, representando 93% das plantas categorizadas, 44 “*em implantação*” e 12 “*em reformulação*” (Figura 25).

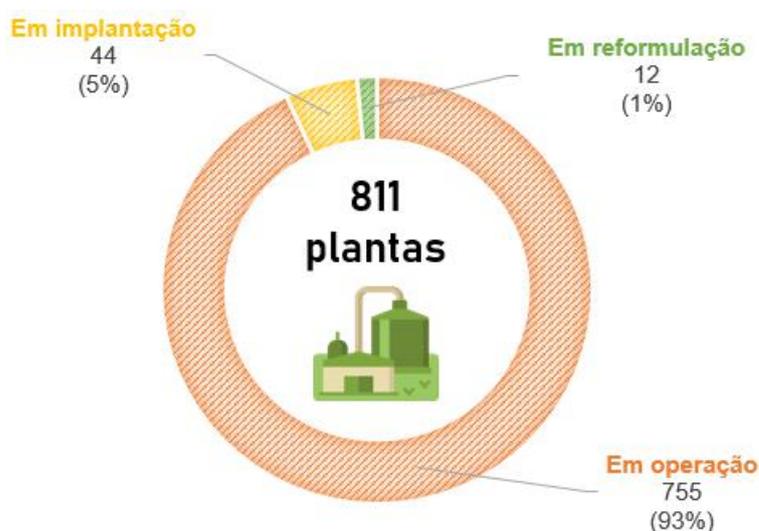


Figura 25 - Distribuição das plantas de biogás no Brasil em 2021 de acordo com o status operacional

Fonte: Biogas Map e Biogas Data (CIBIOGÁS; 2022)

As plantas em operação, são responsáveis pelo cenário produtivo de 2,35 bilhões de metros cúbicos de biogás ao ano, no ano de 2021. Considerando o volume que as plantas em implantação e em reformulação produzirão após iniciarem suas operações, o Brasil alcançará uma produção anual de 2,8 bilhões de metros cúbicos (Figura 26).

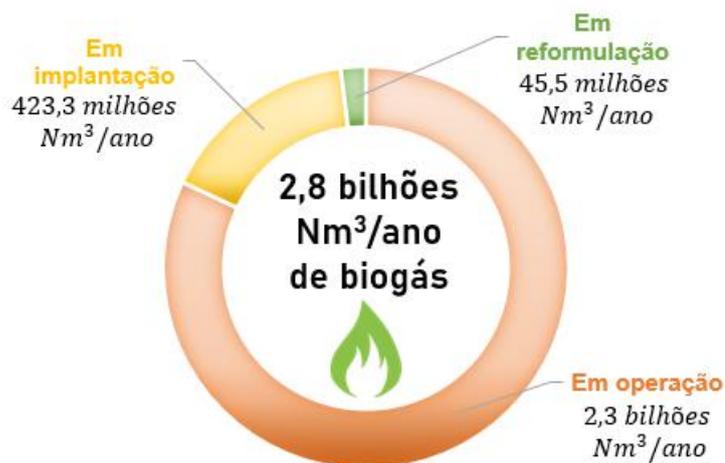


Figura 26 - Distribuição do volume de biogás produzido no Brasil de acordo com o status operacional

Fonte: Biogas Map e Biogas Data (CIBIOGÁS; 2022)

4.3.1. Plantas em operação

Tendo em vista que as plantas em operação são as que, de fato, se encarregam da produção de biogás no Brasil, é válido um estudo mais detalhado e crítico das mesmas.

4.3.1.1. Porte

O CIBiogás classifica as plantas segundo o porte em 3 categorias (pequeno, médio e grande), de acordo com o volume de biogás produzido, como mostra a Tabela 7.

Tabela 7 - Classificação do porte das plantas de acordo com o volume de biogás produzido

Porte da Planta	Volume de biogás produzido (Nm ³ /ano)
Pequeno	≤ 1 milhão
Médio	> 1 milhão e ≤ 5 milhões
Grande	> 5 milhões

Fonte: Biogas Map (CIBIOGÁS; 2021)

O Brasil tem uma predominância de plantas de pequeno porte. Estas representam 79% das plantas em operação, mas só contribuem em 8% para a produção nacional atual. Por outro lado, as plantas de grande porte são responsáveis por 82% de toda a produção, mesmo representando só 7% do total de plantas.

Esse comparativo, está explicitado na Tabela 8 e pode ser um dos fatores que explica o fato da produção de biogás atual ser tão irrelevante frente ao potencial nacional.

Tabela 8 - Plantas em operação no Brasil agrupadas de acordo com o porte

Porte	PLANTAS		VOLUME DE BIOGÁS PRODUZIDO	
	Quantidade	Porcentagem	Quantidade Nm ³ /ano	Porcentagem
Pequeno	595	79%	178.340.000	8%
Médio	109	14%	236.660.000	10%
Grande	51	7%	1.930.000.000	82%
TOTAL	755	100%	2.345.000.000	100%

Fonte: Biogas Data (CIBIOGÁS; 2021)

4.3.1.2. Origem do substrato

A matéria-orgânica (substrato) utilizada para a produção de biogás pode ser oriunda de três principais fontes (Seção 2.4.1): resíduos agropecuários, resíduos industriais e por fim esgotos sanitários e/ou resíduos sólidos urbanos (RSU), obtidos das estações de tratamento de esgoto (ETE) e aterros sanitários, respectivamente.

As plantas em operação no Brasil foram agrupadas de acordo com a origem do substrato na Tabela 9. Nota-se que há uma prevalência de geração do biogás a partir da agropecuária (80% das plantas utilizam esses resíduos como matéria-prima). Esse cenário reflete totalmente a evolução histórica desse energético no país, pois as primeiras descobertas e incentivos de geração e utilização do biogás no Brasil foram a partir de resíduos agropecuários em áreas rurais. Sendo assim, é esperado que o país tenha mais bagagem técnica acerca da produção de biogás a partir destes resíduos e por isso o emprego deles é muito mais difundido.

Tabela 9 - Agrupamento, a partir da fonte de substrato, das plantas de biogás em operação no Brasil

Fonte do Substrato	PLANTAS		VOLUME DE BIOGÁS PRODUZIDO	
	Quantidade	Porcentagem	Quantidade Nm³/ano	Porcentagem
Agropecuária	606	80%	240.630.000	10%
Indústria	84	11%	367.680.000	16%
RSU e Esgoto	65	9%	1.740.000.000	74%
TOTAL	755	100%	2.348.310.000	100%

Fonte: Biogas Data (CIBIOGÁS; 2021)

Por outro lado, é interessante destacar que embora as plantas que utilizam os resíduos agropecuários estejam em maior número, elas são responsáveis por apenas 10% de todo o biogás produzido no país. Isso ocorre justamente porque a maior parte das plantas em áreas rurais são de pequeno porte, pois historicamente os proprietários rurais utilizavam/utilizam o biogás para consumo local e não para geração distribuída.

O grande destaque está no potencial que os esgotos sanitários têm na geração de biogás. As plantas que os utilizam produzem 74% de todo o biogás nacional, mesmo sendo apenas 9% do total. Hoje, no Brasil, 45% do esgoto sanitário gerado não é sequer coletado, quanto mais tratado, o que impacta negativamente o meio ambiente e a saúde pública. Nesse cenário, a recuperação do biogás através do tratamento dos esgotos se apresenta como uma grande oportunidade para o setor de saneamento e para que todo o potencial produtivo do país seja aproveitado (ABIOGÁS; 2021).

Segundo a última Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), realizada em 2017, o serviço de coleta e tratamento de esgoto, além de não atender a todo o esgoto gerado no Brasil, não é distribuído igualmente nas grandes regiões do país. Enquanto na região Sudeste 96,5% dos municípios eram atendidos com esses serviços, na região norte essa proporção era de apenas 16,2% (Figura 27).

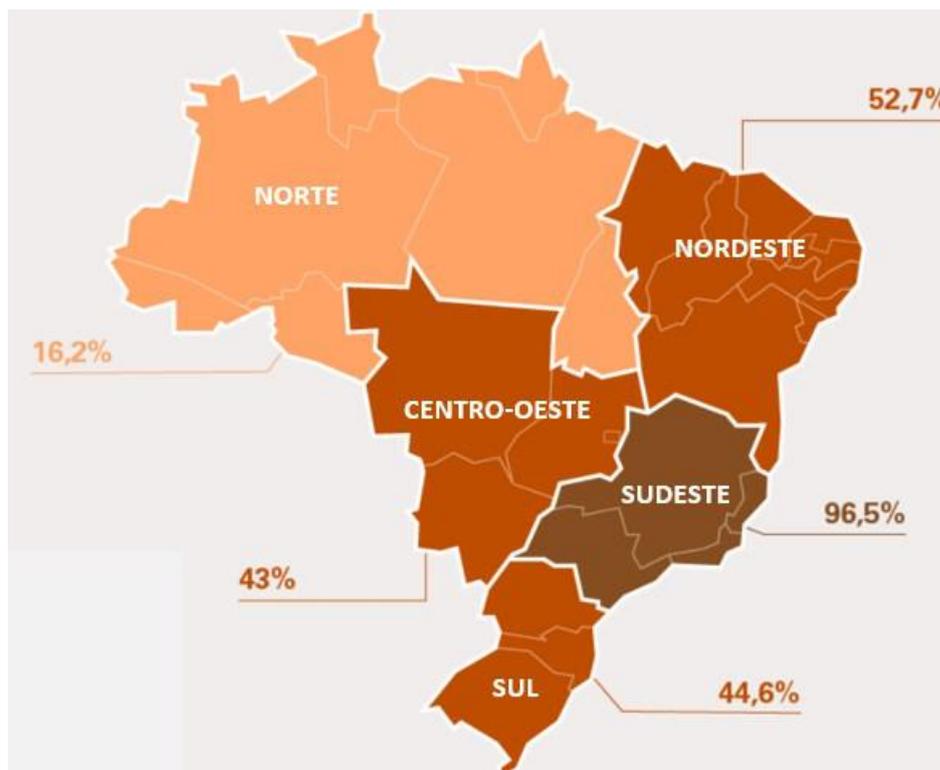


Figura 27 - Municípios com esgotamento sanitário (%) por grandes regiões do Brasil

Fonte: IBGE; 2017

Ao abrir a distribuição de plantas de acordo com a origem de substrato por grandes regiões do Brasil (Figura 28), nota-se que, até mesmo dentro de regiões com grande porcentagem de municípios atendidos com esgotamento sanitário, o aproveitamento desse esgoto para a produção de biogás é limitado. O padrão de maior utilização de resíduos da agropecuária se repete dentro das grandes regiões, até mesmo naquelas que tem fartura de outra fonte com maior potencial, mostrando novamente o peso que o contexto histórico ainda tem atualmente.

A região nordeste, por motivos não conhecidos, se apresenta como uma exceção e parece aproveitar o esgoto coletado para a geração de biogás.

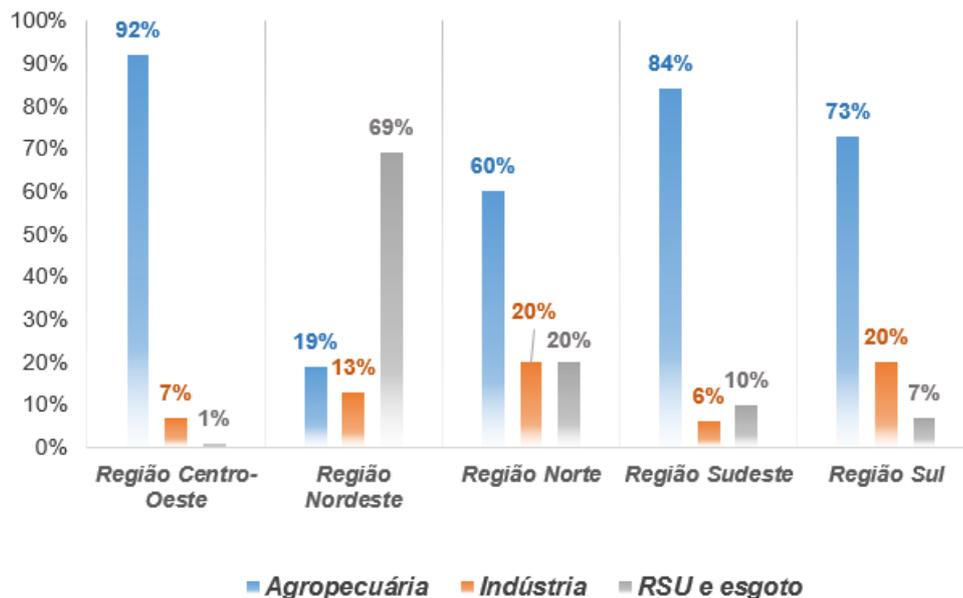


Figura 28 - Distribuição de plantas de acordo com a origem de substrato por grandes regiões do Brasil

Fonte: Biogas Data (CIBIOGÁS; 2021)

Em adição, o Marco Legal de Saneamento foi sancionado em 2020, o qual tem por objetivo universalizar e qualificar a prestação de serviços, como esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, que se enquadram no conceito de saneamento básico, estabelecido pela Lei nº 11.445 de 2007 (PLANO NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO, 2022). A meta com este novo marco é alcançar a universalização até 2033, garantindo que 90% da população brasileira tenha acesso ao tratamento e coleta de esgotos.

Diante de todo esse cenário, a recuperação do biogás através do tratamento dos esgotos se apresenta como uma grande oportunidade para o setor de saneamento, pois é uma maneira de alcançar a meta prevista pelo marco sancionado e com o aproveitamento e comercialização do biogás gerado, há uma nova fonte de receitas que pode fazer com que o investimento em saneamento se pague mais rapidamente. Deste modo, atraindo mais empresas a investirem em saneamento.

Além do mais, este cenário se apresenta também como um incentivo para que todo o potencial produtivo de biogás do país seja aproveitado (ABIOGÁS; 2021).

4.3.1.3. Aplicação energética

O levantamento de plantas feito pela CIBiogás levou em consideração apenas as plantas que utilizam o biogás para algum fim energético. Sendo assim, foi possível agrupá-las também de acordo com essa aplicação energética, como mostra a Tabela 10.

Tabela 10 - Agrupamento das plantas em operação de acordo com a aplicação energética

Aplicação Energética	PLANTAS		VOLUME DE BIOGÁS PRODUZIDO	
	Quantidade	Porcentagem	Quantidade Nm³/ano	Porcentagem
Energia Elétrica	656	87%	1.670.000.000	71%
Energia Mecânica	6	1%	7.530.000	0,3%
Energia Térmica	83	11%	150.710.000	6%
GNR/Biometano	10	1%	522.170.000	22%
TOTAL	755	100%	2.350.410.000	100%

Fonte: Biogas Data (CIBIOGÁS; 2021)

Observa-se que a utilização do biogás para geração de energia elétrica é altamente disseminada, se sobressaindo, frente as demais aplicações. O intrigante é a baixíssima ocorrência de plantas geradoras de biometano (Gás Natural Renovável – GNR) e, portanto, voltadas para a utilização do biogás no setor de transporte.

Em 2021, o setor de transporte foi o setor que mais consumiu energia no país, usando 32,54% da OIE (EPE; 2022), além de ser o subsetor energético que mais emite gases do efeito estufa do país. O fato deste setor demandar tanta energia demonstra a grande influência na matriz energética do Brasil e, por ser um dos mais poluidores, a descarbonização do país está muito atrelada à redução de fonte fósseis no setor de transporte, que em 2021, era apenas 23% renovável (EPE; 2022).

O Brasil, dentro do Acordo de Paris⁵, propôs-se a reduzir os níveis de emissões de GEE do país em 37% até 2025 e 50% até 2030 (MILANEZ *et al.*, 2017; GENIN;

⁵ O Acordo de Paris é um tratado que estabelece um compromisso mundial com as mudanças climáticas, através do qual cada país implementa medidas e metas para que as emissões de gases do efeito estufa sejam reduzidas e o aumento médio de temperatura global se limite a 2°C, quando comparado à níveis pré-industriais.

FRASSON, 2022). Para que essas metas sejam atingidas, muito precisa ser feito na área de energia, especialmente em relação aos transportes, visto que possuem grande relevância tanto no consumo de energia, quanto na poluição ambiental.

O plano do Brasil, no Acordo de Paris, para o setor de transporte é expandir o consumo de biocombustíveis, inclusive biocombustíveis avançados, aqueles ditos de segunda geração por usarem resíduos e não biomassas dedicadas na sua produção (MILANEZ *et al.*, 2017).

Dito isso, há grande oportunidade e incentivo para o crescimento do uso do biogás (biometano), neste setor. É compreensível que a aplicação em energia elétrica esteja mais difundida, porque não é necessário um processo de purificação extenso e complexo do biogás, como é preciso para a geração do biometano; porém, é válido colocar esforços para consolidar e alastrar a geração de combustível veicular a partir do biogás, com o intuito de tornar renovável um setor tão expressivo no Brasil.

Já existem grandes movimentos voltados à inserção do biometano no setor de transporte: a Scania, empresa global que comercializa caminhões, vem, desde 2021, fabricando e transacionando caminhões movidos a gás natural ou biometano e a New Holland, empresa fabricante de implementos para área agrícola e industrial, começou a vender, em 2022, tratores movidos a gás (SUGARCANE, 2021).

Neste mesmo quesito, a Raízen, empresa integrada de energia, anunciou em abril de 2022 o investimento de 300 milhões de reais na construção de sua primeira planta dedicada a produção de biometano, em Piracicaba, São Paulo. A planta está projetada para produzir 26 milhões de metros cúbicos de biometano por ano, volume suficiente para abastecer cerca de 200 mil clientes residenciais, e sua inauguração está prevista para 2023. Embora o biometano que será produzido nesta unidade já esteja destinado, majoritariamente, para a produção de amônia verde pela Yara Brasil Fertilizantes, parte será ofertada para o mercado de transporte (NOVACANA, 2022).

4.3.1.4. Localização

As plantas de biogás em operação estão distribuídas por todo o território brasileiro, como observado na Figura 29.

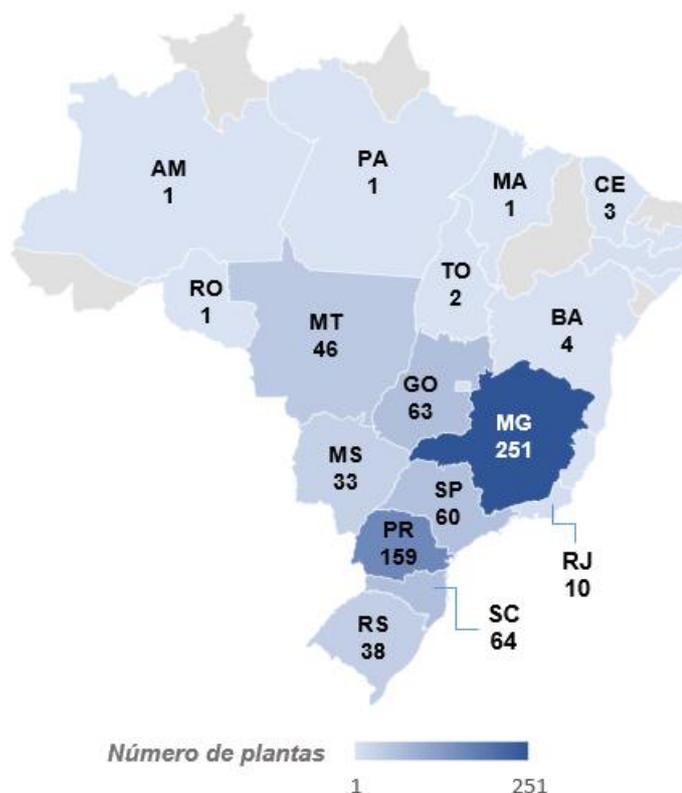


Figura 29 - Distribuição das plantas de biogás em operação de acordo com a localização no território brasileiro

Fonte: Biogas Data (CIBIOGÁS; 2021)

Analisando a distribuição das plantas de biogás em operação, observa-se que Minas Gerais é o estado que se destaca com 251 plantas em operação em 2021, seguido do Paraná com 159 plantas e o estado de Santa Catarina ocupa a terceira posição com 64 plantas.

Embora o estado de São Paulo ocupe o quinto lugar no ranking de número de plantas, com 60 plantas instaladas, ele é o estado que mais produz biogás, concentrando 34% do volume total produzido no país. O segundo estado que mais produz biogás é o Rio de Janeiro, sendo responsável por 17% de toda a produção nacional, mesmo tendo em suas terras apenas 10 plantas (Figura 30).

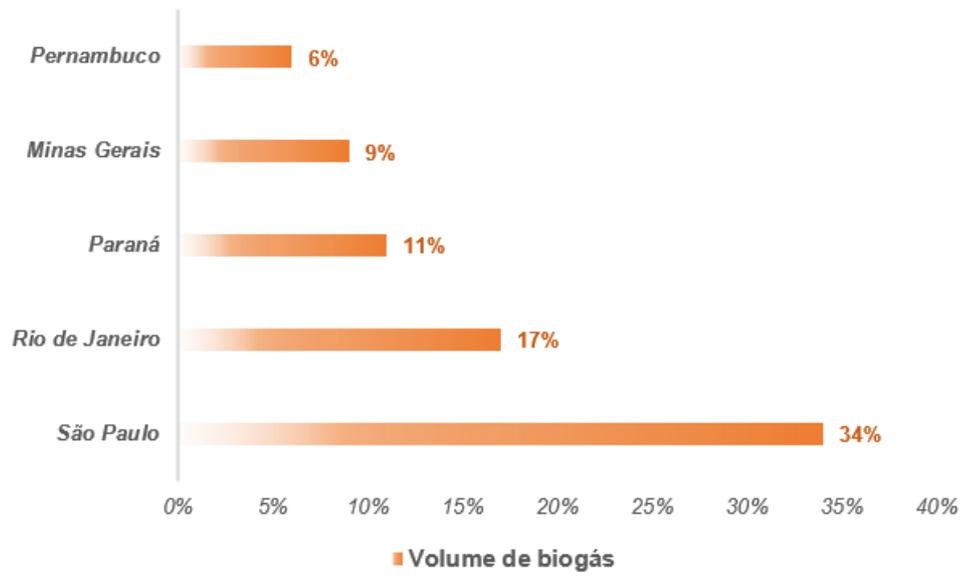


Figura 30 - Top 5 estados com maiores volumes de produção de biogás no Brasil

Fonte: Biogas Data (CIBIOGÁS; 2021)

5. AÇÕES DE INCENTIVO À PRODUÇÃO E APROVEITAMENTO

A evolução do setor de biogás no Brasil deve-se muito ao conjunto de ações, seja implementação de políticas de incentivo, pesquisa, desenvolvimento e inovação ou financiamentos, que instigam a produção e aproveitamento desse energético. Muitas são as iniciativas público-privadas ligadas direta ou indiretamente ao setor. Neste capítulo serão abordadas aquelas que mais se destacam no atual cenário nacional.

5.1. AÇÕES DE PESQUISA, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO

As ações de pesquisa, desenvolvimento e inovação se dão, principalmente, através de órgãos e/ou associações orientadas especificamente para o biogás ou para setores nos quais o biogás pode ser aplicado.

5.1.1. CIBiogás

O CIBiogás é uma Instituição de Ciência e Tecnologia (ICT), em forma de associação, instalada no Parque Tecnológico Itaipu (PTI), em Foz do Iguaçu, no Paraná.

Por se tratar de uma ICT, os desafios científicos e tecnológicos são o que, essencialmente, motivam e desencadeiam o trabalho da associação, que busca através de seus projetos de P&D ampliar a viabilidade técnica e econômica, segurança e robustez em produção e aplicações de biogás e biometano, expandindo a competitividade dos agentes do setor (CIBIOGÁS, 2022). A unidade de demonstração de Biogás e Biometano de Itaipu é um dos projetos de maior sucesso da instituição, promovendo o tratamento de resíduos orgânicos produzidos em restaurantes locais, gerando biometano, para utilização como combustível veicular, e biofertilizante, para recuperação de áreas degradadas.

O CIBiogás tem instalado em suas dependências o primeiro laboratório de Biogás no Brasil, certificado pelo Inmetro desde 2016, tendo realizado mais de 35 mil

ensaios no que se refere a qualidade dos diversos resíduos para produção e aproveitamento do biogás. A Instituição também realiza projetos de consultoria, oferecendo soluções de engenharia personalizadas para gestão de resíduos, de energia, de biofertilizante, e demais cenários.

Para mais, a associação ainda tem a preocupação de disseminar o conhecimento geral acerca do biogás, seja ele técnico, mercadológico ou econômico, através de relatórios anuais, bibliotecas de artigos, podcasts, oferecimento de cursos - pagos ou gratuitos - e dashboards interativos.

5.1.2. ABiogás

A ABiogás é formada por instituições privadas, entre elas o CIBiogás, que juntas trabalham para aumentar a participação do biogás na matriz energética brasileira. A ABiogás atua como um canal entre a sociedade civil, os governos federais e estaduais e os demais órgãos responsáveis pelo planejamento energético do país, com o intuito de transformar qualquer energia, seja ela elétrica, térmica ou combustível, gerada através do biogás, em commodities energéticas amplamente utilizadas (ABILOGÁS, 2022).

Por ser uma fonte de interlocução, uma das principais funções da ABiogás, prevista em seu estatuto social, é, constantemente, analisar e atualizar o cenário do país frente à produção e utilização do biogás, conflitar este cenário com os interesses e necessidades de suas empresas associadas, que representam todos os setores da cadeia de produção, aproveitamento e beneficiamento do segmento de biogás, e através desta fundamentação, propor ações que visem o crescimento da participação desse energético (ABILOGÁS, 2022).

O Plano Nacional de Biogás e Biometano (PNBB) é um documento estruturado pela ABiogás, que reúne todas estas intervenções necessárias que objetivam a ampliação do uso e produção do biogás dado a situação vigente. É um documento de extrema importância, pois baseia e motiva a implementação de políticas públicas de incentivo, investimento e/ou financiamento e é reestruturado ano a ano de acordo com a demanda.

5.1.3. Ministério de Minas e Energia

O MME é um órgão do Poder Executivo Federal, cuja principal função institucional é “formular e assegurar a execução de Políticas Públicas para a gestão sustentável dos recursos energéticos e minerais, contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico do País” (Portal Brasileiro de Dados Abertos, 2022). Como o intuito é promover uma gestão sustentável dos recursos energéticos, obviamente o biogás e suas diversas matérias-primas e aplicações são pautas muito relevantes dentro do MME.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), e a Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP) são organizações vinculadas ao MME, fundamentais para dar suporte e garantir a qualidade do serviço prestado pelo Ministério (EPE; 2022, ANEEL; 2022 e ANP; 2022).

Enquanto a ANEEL e a ANP são agências reguladoras do setor elétrico e de petróleo, gás e biocombustíveis, respectivamente, a EPE atua no planejamento do setor energético brasileiro, tanto do setor elétrico quanto do setor de petróleo, gás e biocombustíveis, através de estudos e pesquisas que, posteriormente, irão direcionar a construção de procedimentos, ações e políticas, pelas agências reguladoras, que visam assegurar o suprimento de energia. Sendo assim, a ANEEL, a ANP e a EPE estão, constantemente, em ampla articulação.

5.1.4. Projeto GEF biogás Brasil

O *Global Environment Facility* (GEF), em português Fundo Global para o Meio Ambiente é um projeto, desenvolvido em 1990 e que atua até os dias de hoje, cuja função é auxiliar os países, principalmente os em desenvolvimento, a implementar em seus territórios projetos que busquem soluções para as preocupações globais no que se refere à preservação do ecossistema e a biodiversidade.

O GEF, juntamente com o CIBiogás e o MME, com parceria da ABiogás, desenvolveram o projeto GEF Biogás Brasil. Entre os propósitos do projeto, pode-se citar:

- ✓ estimular a inovação tecnológica no setor de biogás;
- ✓ oferecer apoio técnico para conversão de resíduos orgânicos em energia e combustível;
- ✓ oferecer suporte na criação de novos modelos de negócio;
- ✓ cooperar no planejamento de políticas públicas e de financiamento

O projeto conta com três principais ferramentas, totalmente abertas à comunidade, que visam propagar informações e auxiliar no desenvolvimento de novos projetos, como descreve a Tabela 11.

Tabela 11 - Ferramentas associadas ao projeto GEF Biogás Brasil

FERRAMENTA	OBJETIVO
DataSebrae Biogás	Lançado em setembro de 2020, o DataSebrae é uma plataforma digital, que reúne diversas informações relevantes sobre o cenário de biogás no Brasil, como por exemplo, legislações e potenciais de produção. Conta com uma interface interativa para a consulta.
BiogásInvest	Ferramenta desenvolvida para que produtores, empresários, agentes financiadores e gestores públicos possam fazer, de maneira independente, uma análise customizada sobre a viabilidade de novos projetos de biogás.
PIBiogás	A Plataforma de Informações do Biogás (PIBiogás) é uma rede de colaboração digital entre instituições com o objetivo de facilitar o acesso às informações do setor de biogás, assim como fomentar novas ações e parcerias.

Fonte: GEFBIOGÁS, 2022; Governo Federal, 2022

O projeto também é responsável pelo Programa de Tropicalização, o qual promove uma cooperação entre empresas brasileiras e estrangeiras a fim de adaptar à realidade do Brasil (“tropicalizar”) soluções tecnológicas e modelos de negócios que solucionem os desafios enfrentados pelo mercado brasileiro de biogás. De maneira geral, o programa abre chamadas públicas e dentro do prazo de inscrição, as empresas podem submeter seus projetos. Os projetos são avaliados e se aprovados recebem, em até 280 horas, suporte técnico especializado (GEFBIOGÁS; 2022).

5.1.5. Rede BiogásFert

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), desenvolveu a Rede BiogásFert, um projeto que reúne pesquisadores de biogás e biofertilizantes de diversos institutos de pesquisa do país com o propósito de disponibilizar à sociedade soluções tecnológicas para produção e uso integrado de biogás e biofertilizantes orgânicos, a partir de dejetos animais nos diferentes sistemas de produção agropecuários. Todo esse esforço visa a implementação de estratégias de desenvolvimento sustentável com foco em uma agricultura com níveis baixos de emissão de GEE, chamada agricultura de baixo carbono (EMBRAPA; 2022).

5.1.6. PROBIOGÁS

O Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil é fruto de uma colaboração técnica entre o Governo Brasileiro, por meio da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, e o Governo Alemão, por meio da *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH*, que tem como meta ampliar o uso energético do biogás gerado através de resíduos orgânicos e inserir o biogás e o biometano na matriz energética (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2022).

Para alcançar o objetivo, o PROBIOGÁS desempenha três principais funções (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2022):

- atuar nas melhorias das condições regulatórias;
- aproximar instituições de ensino e pesquisa, e;
- fomentar a indústria nacional de biogás.

5.2. POLÍTICAS PÚBLICAS

Existem diversas leis, decretos e convênios, fundamentados nas ações de pesquisa e desenvolvimento, que regulamentam e incentivam a produção e

aproveitamento do biogás em todo território brasileiro. As políticas que têm maior relevância e impacto à nível federal, estão identificadas e descritas na Tabela 12.

Tabela 12 - Políticas públicas de maior impacto à nível federal

Política	Descrição
Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio)	Lei 13.576/2017: Criada com o intuito de expandir a participação dos biocombustíveis na matriz energética brasileira e reduzir as emissões de GEE. Prevê o aproveitamento energético de resíduos para a geração de biogás e sua aplicação como combustível veicular. Até princípio de 2022, era a única política brasileira que usava o mercado de carbono como base.
Política Nacional de Resíduos Sólidos	Assegura o aproveitamento de RSU (Resíduos Sólidos Urbanos) para produção de biogás e posterior geração de energia elétrica.
Programa Novo Mercado de Gás	Tem por objetivo implementar um mercado de gás natural aberto, dinâmico e competitivo. Este ambiente abre espaço para a inserção do biogás no mercado de biocombustíveis e bioenergia.
Novo Marco Legal de Saneamento	Tem por objetivo garantir que, até 2033, 90% da população brasileira tenha acesso ao tratamento e coleta de esgotos. Como consequência, há o incentivo da geração do biogás a partir de esgotos sanitários.
Programa Combustível do Futuro	Visa ampliar o uso de combustíveis sustentáveis e de baixa intensidade de carbono.
Programa Metano Zero	Lançado em março de 2022, o Programa Metano Zero incentiva a produção nacional de biometano, dialogando com o mercado de carbono. Projetos de biometano serão agraciados com créditos de metano, por não fazer a sua liberação na atmosfera, e com créditos de carbono, ao utilizar o biometano como combustível substituto.
Plano Nacional de Fertilizantes	Tem por finalidade reduzir a dependência de fertilizantes importados através do aumento da produção nacional, que pode se dar como consequência da produção de biogás.

Fonte: MATA, 2018; DATASEBRAE BIOGÁS, 2022; MACHADO, 2022; NOVO MERCADO DE GÁS, 2022

Além destas, cada estado possui seu conjunto próprio de leis e políticas. A Tabela 13 lista algumas políticas de maior pertinência a nível estadual.

Tabela 13 - Políticas públicas de maior impacto à nível estadual

<i>Política</i>	<i>Descrição</i>
Chamada Sulgás	Chamada pública que ocorreu em 2017, selecionando empreendimentos destinados à produção de biometano para fechar contrato garantindo o fornecimento do gás por 20 anos, estando em vigor ainda atualmente.
Programa Paulista de Biogás	O programa regulariza a adição de biometano ao gás canalizado e a substituição de 20% da frota dos motores à diesel por biodiesel, biogás ou biometano.
Convênio Confaz nº112/2013	O convênio autoriza os estados da Bahia, Mato Grosso, Rio de Janeiro e São Paulo a reduzirem em 12% o imposto sobre a circulação de mercadoria quando for utilizado biogás e biometano como fontes de energia.
Código Tributário de Minas Gerais	Esse código prevê isenção de imposto sobre circulação de mercadorias usadas para conexão e transmissão de energia elétrica em usinas com fonte de biogás.
Política Estadual de Gás Renovável	Lei N° 6361: Voltada para o estado de Rio de Janeiro, esta política obriga a compra de biogás no estado na relação de 10% ao volume de GN convencional.

Fonte: MATA, 2018; DATASEBRAE BIOGÁS, 2022

5.3. PROGRAMAS DE FINANCIAMENTO

5.3.1. Programa ABC (Agricultura de Baixo Carbono)

O programa ABC tem como finalidade realizar financiamentos e investimentos em projetos que contribuam para a redução de impactos ambientais causados por atividades agropecuárias (BNDES, 2022). Nesse âmbito, projetos com biogás se justificam por estimular o tratamento de dejetos animais, uma vez que estes são utilizados como substrato, e, assim, contribuir para a redução de emissões de metano. Entre 2010 e 2019, 90% do volume de dejetos animais no Brasil foi tratado a partir da digestão anaeróbia, consequentemente havendo geração e aproveitamento do biogás, devido ao incentivo do Programa ABC (ABIOGÁS; 2022).

5.3.2. Programa Nacional para Agricultura Familiar (ProNAF)

O ProNAF tem por objetivo financiar custos e investir em implantação, ampliação ou modernização das estruturas de produção e beneficiamento de serviços no estabelecimento rural ou em comunidades rurais, sempre dando créditos maiores em projetos que levam em consideração as questões de sustentabilidade ambiental na agricultura, como a produção de biogás. Todo o programa visa aumentar a geração de renda e melhorar o uso da mão de obra familiar de maneira sustentável (BNDES; 2022).

5.3.3. Plano Safra

O Plano Safra foi instituído para fomentar a produção rural brasileira, destinando verbas anuais para investir ou custear, industrializar e comercializar produtos agrícolas. Parte desse orçamento é direcionado a projetos que contribuem na ampliação de modelos sustentáveis, como a produção de bioinsumos, biogás e biofertilizante. Projetos com biogás são beneficiados com até 20 milhões de reais e esse investimento amplia as opções para produtores que ainda não conseguem explorar todo o potencial do biogás e do biometano de suas atividades (ABIOGÁS, 2022).

5.3.4. Fundo Clima

O Programa Fundo Clima tem como objetivo apoiar a implementação de empreendimentos, projetos e desenvolvimentos tecnológicos que estão comprometidos com a redução de emissão de gases do efeito estufa e adaptações às mudanças do clima e seus efeitos (BNDES, 2022). Esse apoio se dá através da garantia de recursos financeiros para a aquisição de máquinas, equipamentos e demais despesas necessárias. Projetos de biogás se enquadram no escopo do programa e podem receber financiamentos de até 80 milhões de reais ao ano.

5.3.5. Leilões da ANEEL

A ANEEL promove frequentemente leilões de energia elétrica, nos quais ocorre a exposição de projetos de geração de energia elétrica e de contratação de energia elétrica para suprir a demanda de energia por um determinado tempo. Existem diversas classificações de leilões, entre eles o leilão de fontes alternativas (CBIE, 2022), que abre espaço para contratação de energia elétrica proveniente de fontes alternativas, como o biogás. Através dessa ação, projetos de biogás têm a oportunidade de conseguir aporte financeiro, além de, aos poucos, ir abrindo caminho para o crescimento de seu uso nesse mercado.

É interessante perceber que há uma maior predominância de investimentos financeiros em projetos de biogás que utilizam fontes de substratos oriundas de atividades rurais (Programa ABC, ProNAF e Plano Safra), incentivando mais fortemente o aproveitamento de resíduos agropecuários. Não é para menos que os resíduos agropecuários são a matéria-prima mais usada, atualmente, em número de plantas, mas não em volume de biogás produzido. Além disso, existem políticas públicas bem influentes e relevantes, que acometem diretamente os estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais, como o Convênio Confaz nº112/2013, o Programa Paulista de Biogás e o Código Tributário de Minas Gerais, estados estes que estão no top 5 de maiores produtores de biogás no Brasil.

Diante destes fatos, é evidente o quanto o panorama geral de biogás reflete as ações de incentivo que estão em vigor, e o quanto elas são essenciais para expandir o setor de biogás no Brasil.

6. ANÁLISE SWOT

O termo *SWOT* é a abreviação das palavras em inglês: *stregths* (forças), *weaknesses* (fraquezas), *opportunities* (oportunidades) e *threats* (ameaças), e FOFA é sua tradução à Língua Portuguesa. A análise *SWOT* é uma ferramenta empregada para fazer estudo de cenário ou ambiente e é aplicada, comumente, à gestão e planejamento estratégico de uma corporação ou empresa, mas, em virtude de sua simplicidade, pode ser aplicada para qualquer tipo de análise de cenário (NEUMANN e SCALICE, 2015; ZIMMERMAN, 2015).

Esta ferramenta analisa, tanto em pontos positivos quanto em pontos negativos, o ambiente interno (forças e fraquezas), abordando fatores intimamente ligados à organização, e externo (oportunidades e ameaças), através de fatores voltados ao mercado ou setor que a organização está inserida, com o intuito de auxiliar futuras tomadas de decisões para expansão e solidificação no mercado.

Os aspectos levantados na análise são compilados em uma tabela, de acordo com a Figura 31, chamada matriz *SWOT*. Segundo Zimmerman (2015, p.29), a matriz *SWOT*

é uma “fotografia” tirada do ambiente como um todo, propicia a visão do terreno onde se encontra a instituição, serve de apoio para que as fraquezas sejam minimizadas e os pontos fortes maximizados, melhor aproveitados, através de uma estratégia que contemple, ao mesmo tempo, as oportunidades do ambiente e o que de melhor a organização poderá fazer para aproveitá-las.

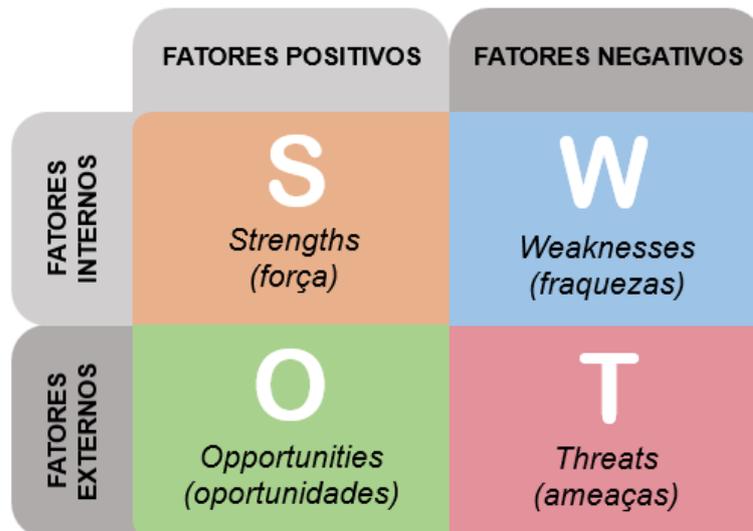


Figura 31 - Organização da matriz SWOT

Fonte: Adaptada

6.1. METODOLOGIA

Para avaliar como o setor de biogás está se posicionando dentro do mercado de bioenergia e biocombustíveis, e a viabilidade da expansão do biogás no Brasil, valeu-se da ferramenta de planejamento estratégico Análise *SWOT*. O objetivo da análise, no presente trabalho, é expor as forças e fraquezas do setor de biogás e sua expansão no mercado de bioenergia e biocombustíveis, assim como as oportunidades e ameaças que se apresentam, a fim de maximizar os aspectos positivos e minimizar os negativos para viabilizar a sua operação e potencializar os ganhos econômicos, sociais e ambientais.

A escolha da análise *SWOT* como metodologia para o corrente estudo teve como estímulo diversos projetos da literatura, entre eles pode-se citar os trabalhos de Bakman (2021), Scherer (2017), Soares (2020) e Araújo (2012), os quais utilizaram-se da matriz *SWOT* para entender a viabilidade de um projeto específico dentro de um território predefinido.

Bakman (2021) avaliou os ganhos operacionais, econômicos e ambientais da ampliação da compostagem no município do Rio de Janeiro. Scherer (2017) analisou a viabilidade estratégica para a produção de biogás a partir de dejetos suínos no município de Itaipulândia/PR; enquanto, Soares (2020) explorou as perspectivas da

tecnologia da biodigestão anaeróbica de águas residuárias da suinocultura na região Oeste do Paraná, e; por fim, Araújo (2012) examinou o aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica em aterros.

Como observado, os trabalhos anteriores enfocaram no uso da análise *SWOT* em projetos específicos de biogás em uma única localidade. Todavia, o presente estudo busca utilizar a análise *SWOT* para mapear e identificar janelas de oportunidades para a utilização do biogás no Brasil.

Para a construção da matriz *SWOT*, foram formuladas perguntas guias, descritas no Quadro 1, com base no trabalho de Bakman (2021).

Quadro 1 - Perguntas guias para elaboração da matriz *SWOT*

	POSITIVO	NEGATIVO
	FORÇAS	FRAQUEZAS
AMBIENTE INTERNO	<i>Quais os fatores internos que contribuem para a geração de biogás?</i>	<i>Quais obstáculos impedem a expansão do biogás no Brasil?</i>
	<i>Quais são os atributos positivos da produção e aproveitamento do biogás?</i>	<i>Quais os obstáculos para uma produção e utilização eficiente do biogás?</i>
	<i>Quais são os fatores que permitem que o Brasil seja uma referência positiva na geração e utilização do biogás como energético?</i>	<i>Quais aspectos relacionados ao biogás precisam ser fortalecidos?</i>
	OPORTUNIDADES	AMEAÇAS
AMBIENTE EXTERNO	<i>Quais vantagens podem ser identificadas com a expansão do biogás no setor de bioenergia e biocombustíveis?</i>	<i>Há interesse do setor de bioenergia e biocombustíveis?</i>
	<i>Há políticas públicas que apoiam e incentivam a expansão da produção de biogás?</i>	<i>Existe uma possibilidade da concorrência com o gás natural interno e/ou externo por um aumento de oferta ou outro motivo?</i>
	<i>Quais acontecimentos no setor de bioenergia e biocombustíveis são portas de entrada para a expansão do biogás?</i>	<i>Quais são os obstáculos externos que o Brasil pode enfrentar ao desenvolver a expansão do biogás como energético?</i>

Fonte: Elaboração própria

6.2. FORÇAS (S)

a) Matérias-primas acessíveis, subvalorizadas e de baixo custo

Como a economia brasileira ainda é majoritariamente linear, os resíduos em geral, incluindo os orgânicos utilizados na produção de biogás, continuam sendo vistos por muitos apenas como “lixo”, sem nenhum valor agregado. Desse modo, os resíduos são constantemente gerados, mas como não é um costume reutilizá-los, estão sempre muito disponíveis e acessíveis. Se valer de resíduos orgânicos para a produção de biogás reduz drasticamente os custos com matérias-primas, uma vez que aquelas extraídas diretamente da natureza estão cada vez mais limitadas e, conseqüentemente, com alto valor de venda.

b) Distribuição

O biogás é um combustível armazenável, que pode ser comprimido e distribuído conforme a demanda. Esta estrutura assegura rápida entrega, alta eficiência e permite a distribuição mediante gasodutos ou não, o que proporciona a expansão do setor de biogás também por áreas não integradas com gasodutos, abrindo caminho para novas integrações (SUGARCANE, 2021). Todavia, é necessário avaliar se haverá limitações de distância economicamente viável para o transporte do biogás ou se o biogás será produzido e utilizado localmente.

c) Energético renovável

O biogás é de origem renovável e o aproveitamento dele como energético contribui radicalmente para a redução do efeito estufa, dado que nesse processo a emissão de metano é evitada e a emissão de gás carbônico para a atmosfera é reduzida, podendo ser zero ou até mesmo negativa, dependendo do processo (ABIOGÁS, 2017).

d) União do descarte consciente de resíduos e aproveitamento energético

O mesmo processo de digestão anaeróbica que trata os resíduos orgânicos, a fim de estarem adequados para o descarte, é o responsável pela geração de biogás. Digerir anaerobicamente as biomassas residuais apenas para poder descartá-las, desperdiçando o biogás gerado, apenas encarece todo o processo produtivo, além de favorecer o efeito estufa ao permitir a liberação de metano para a atmosfera, quando não há, por exemplo, a queima do gás em um *flare* para reduzi-lo a CO₂. Por outro lado, ao aproveitar energeticamente o biogás gerado, os impactos negativos oriundos do descarte inadequado dos resíduos são reduzidos e há retorno financeiro.

e) Geração de subproduto ecologicamente benéfico

O digestato, material orgânico restante após o processo de extração dos gases, pode ser utilizado como adubo orgânico que não provoca contaminações dos recursos naturais. Este pode ser vendido para produtores agrícolas, agregando ainda mais renda a todo o processo.

f) Estimula a integração entre diversos setores industriais (Simbiose Industrial)

O conceito de simbiose industrial baseia-se no estabelecimento de relações “produtivas” entre diferentes empresas de uma região, de modo que o que é fluxo residual para uma indústria torna-se recurso para outra atividade industrial, em benefício do meio ambiente e da economia (ECONOMIA, 2022). O ambiente industrial funciona como um ecossistema, estabelecendo relações similares àquelas que ocorrem em um ecossistema natural entre seres vivos, e através dessa cooperação pode-se compartilhar e reutilizar resíduos e assim, obter economia e minimizar a quantidade de resíduos.

A produção de biogás é um exemplo, em menor escala, de simbiose industrial, pois a matéria-prima é oriunda do fluxo residual e/ou de outras atividades industriais; o produto gerado (biogás) pode ser aplicado nos mais variados setores e o subproduto gerado (digestato) é direcionado para o setor agropecuário. Todo esse movimento contribui positivamente para a minimização de resíduos e para uma economia mais

sustentável, e pode ser o pontapé inicial para implementação desse ecossistema industrial no Brasil.

g) Geração de energia limpa e de baixo custo

Devido aos benefícios ambientais e o baixo custo com matérias-primas, o biogás é uma fonte de energia limpa e de baixo custo, sendo sua expansão no Brasil de grande importância para conquistar a meta 7 da ODS. Todavia, é importante salientar que o baixo custo do biogás dependerá do modelo e do objetivo da produção de biogás.

h) Diversidade de aplicações energéticas

A flexibilidade de aplicações energéticas do biogás é uma característica relevante e que permite ao mesmo inserir-se em diversas vertentes no mercado de bioenergia e biocombustíveis.

i) Obtenção de créditos de carbono, créditos de descarbonização (CBIOS) e créditos de metano

Plantas de biogás estão inseridas no programa de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, no Programa RenovaBio e também no Programa Metano Zero, por isso, podem acumular créditos de carbono, CBIOS (INSTITUTO TOTUM, 2020) e créditos de metano, utilizando-os como uma maneira de conseguir incentivos e investimentos para a própria produção.

j) Enorme potencial de produção de biogás no Brasil

O Brasil é o país que possui o maior potencial mundial de produção de biogás (ENGIE, 2022). Até 2021, o país apresentava um potencial de produzir 84,6 bilhões de metros cúbicos de biogás por ano. Entretanto, só produziu de fato 3% de toda essa capacidade. Este cenário de potencial produtivo mostra o quão favorável é a expansão desse energético no Brasil, e, como o país pode ser uma referência nesse assunto.

k) Diversidade de matérias-primas

Os resíduos da agroindústria da transformação e da agropecuária são abundantes no Brasil, devido a riqueza agropecuária que o país apresenta. À vista disso, o Brasil possui uma grande disponibilidade de resíduos para a geração de biogás, se comparado aos demais países, levando vantagem na expansão deste energético.

l) Previsibilidade de preço

O preço do biogás pode ser previsto, uma vez que é definido localmente, e, por isso, seu valor não depende da cotação do dólar ou dos preços do mercado internacional (ABILOGÁS, 2022).

6.3. FRAQUEZAS (W)

a) Curto tempo de vida da biomassa residual

Os resíduos orgânicos *in natura* têm micro-organismos, que quando submetidos a condições adequadas realizam a decomposição do material. Se esta matéria-prima precisar ser transportada por grandes distâncias, o material orgânico será decomposto no caminho e parte do potencial de geração de biogás será perdido. Por este motivo, o ideal é que as usinas de biogás estejam localizadas próximas às áreas com abundância de biomassas residuais (HOMEBIOGAS, 2022).

b) Elevado custo de escalabilidade

O custo de implementação de um sistema pequeno de geração de biogás, para tratar os rejeitos e gerar biogás para consumo local, como o caso de pecuaristas, é baixo, pois não é necessário tecnologias muito caras e complexas. Em contrapartida, a instalação de plantas de grande porte para geração de elevados volumes de biogás e injeção na rede, necessita de alto investimento, principalmente em profissionais

técnicos. Como exemplo, tem-se o investimento da Raízen de 300 milhões de reais para construção de uma planta de produção de biometano (NOVACANA, 2022).

c) Presença de impurezas

Como apresentado na Seção 2.4.5, o biogás bruto, produzido na digestão anaeróbica, não pode ser diretamente aplicado para a geração de energia, é imprescindível a realização de etapas de purificação. Este ponto pode se apresentar como uma desvantagem do biogás, pois dependendo do uso final e da quantidade de etapas de purificação que serão necessárias, esta fase encarece o processo.

d) Controle das condições reacionais

Diversos são os fatores que influenciam na produção de biogás, isto porque a digestão anaeróbica é um processo muito sensível, onde estão envolvidos microorganismos de domínios diferentes (bactérias e arqueas), cada qual realizando uma etapa importante, e estes carecem de condições muito específicas, principalmente as arqueas metanogênicas. Todos estes fatores que interferem na sobrevivência e no metabolismo do consórcio microbiano, precisam ser muito bem controlados no interior dos biodigestores para que haja uma produção eficiente de biogás.

6.4. OPORTUNIDADES (O)

a) Evolução do ambiente regulatório

Entre os anos de 2011 e 2022, o surgimento de decretos, leis, resoluções e políticas que incentivam e regulamentam a geração e utilização do biogás foi significativa. Esta evolução do ambiente regulatório é, sem dúvidas, um estímulo para inserção e expansão do biogás na matriz energética brasileira (ESTEVES, 2020).

b) Programa Nacional Metano Zero

O Programa Metano Zero, lançado em março de 2022 no Brasil, é uma estratégia econômica e ambiental para reduzir as emissões de GEE, dando enfoque ao CH₄, custos de combustíveis e energia. O foco do programa é incentivar o aproveitamento energético e como combustível, de resíduos ou produtos orgânicos como fontes de biogás e biometano. O principal benefício fornecido pelo programa aos empreendimentos de biogás é a geração de receita adicional, através de créditos de metano e créditos de carbono, como uma forma de beneficiar o projeto por evitar a emissão de metano, oriunda dos resíduos orgânicos, e a emissão de carbono com a substituição de combustíveis fósseis (PROGRAMA NACIONAL METANO ZERO, 2022).

Essas compensações financeiras podem ser decisivas na viabilização ou não de um projeto e, por esse motivo, o lançamento deste programa é uma grande oportunidade para a expansão de empreendimentos de biogás no setor de bioenergia e biocombustíveis.

c) Programa RenovaBio

O Programa RenovaBio é uma política de Estado que reconhece o papel estratégico que todos os biocombustíveis têm na matriz energética, por contribuírem efetivamente para a segurança energética e a mitigação de emissões de GEE (RENOVABIO, 2022). Assim como o Programa Metano Zero, o RenovaBio, agracia os empreendimentos de biocombustíveis com créditos de carbono, que aumentam a viabilidade econômica desses projetos.

O RenovaBio foi o primeiro programa brasileiro que se baseou no mercado de carbono e que incentivou o crescimento do mercado de biocombustíveis no Brasil, mas dentro do contexto de geração e utilização de biogás, o Programa Metano Zero é mais relevante por voltar-se especificamente à projetos de biogás. Entretanto, o RenovaBio também dá suporte para a expansão do biogás no Brasil.

d) Novo Mercado de Gás

O Novo Mercado de Gás tem por objetivo a formação de um mercado de gás natural aberto, dinâmico e competitivo (NOVO MERCADO DE GÁS, 2022). O principal pilar desse novo mercado é promover concorrência, fato que abre espaço para que o biogás possa se inserir nesse mercado, atuando como biocombustível e/ou sendo injetado na rede de gás natural. Além disso, no âmbito dessa lei, foi estabelecida a equivalência regulatória do biometano e outros gases intercambiáveis com o gás natural, desde que sejam atendidas as especificações da ANP.

e) Novo Marco Legal de Saneamento

Segundo Chiappini (2020), o Novo Marco Legal de Saneamento, que visa, até 2033, garantir que 90% da população brasileira tenha acesso à coleta e tratamento de esgoto, elevou a produção potencial de biometano no Brasil em 2,9 milhões de metros cúbicos por dia, a partir do biogás gerado nas ETE. Este volume representa 10% da meta estimada pela ABiogás de 30 metros cúbicos por dia de biometano até 2030 (CHIAPPINI, 2020).

Deste modo, fica clara a oportunidade de expansão do biogás impulsionada pela sanção deste marco legal.

f) Redução e/ou isenção de impostos

Na Tabela 13, de políticas públicas relevantes à nível estadual, expôs-se o Convênio Confaz nº112/2013 e o Código Tributário de Minas Gerais, através dos quais os impostos sobre circulação de mercadorias são reduzidos quando o transporte é feito utilizando biogás como fonte de energia e zerados quando se trata de mercadorias para conexão e transmissão de energia elétrica entre usinas com fontes de biogás, respectivamente.

Esta redução de custo é atrativa e, portanto, impulsiona a ampliação do uso de biogás no setor energético do Brasil.

g) Programas de financiamento

Todos os programas de financiamento, citados na Seção 5.3, são ações que viabilizam economicamente os empreendimentos enfocados na geração e utilização de biogás. Este aporte financeiro abre portas para a expansão e consolidação do biogás no Brasil.

h) Ações de P&D

Todas as ações de P&D são extremamente valiosas para ampliar a viabilidade técnica e econômica, segurança e robustez em produção e aplicações de biogás e biometano, e, por isso, revelam-se como oportunidades para a expansão do biogás no Brasil. Esse fato se mostra presente no recente edital lançado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) no valor de R\$ 50 milhões para incentivar o desenvolvimento de combustíveis sustentáveis, dentre os quais, encontra-se o biometano.

i) Cooperação no alcance das metas estabelecidas no Acordo de Paris

A meta do Brasil, dentro do Acordo de Paris, é reduzir os níveis de emissão de GEE em 50% até 2030. A principal ação para caminhar rumo ao alcance dessa meta é a substituição de combustíveis fósseis na matriz energética por combustíveis de origem renovável, visto que as emissões antropogênicas de CO₂ são, em sua maioria, devido à queima de combustíveis fósseis para geração de energia. Desta maneira, a expansão do biogás no setor de bioenergia e biocombustíveis do Brasil, contribuiu diretamente para o alcance da meta, pois a sua utilização reduz tanto a emissão de CO₂, quanto de CH₄.

j) Cooperação no alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU

A expansão do biogás na matriz energética brasileira contribuiu ativamente para o alcance das metas 7 – Energia limpa e acessível – e 13 – Ações contra as

mudanças globais do clima – estabelecidas pela ONU, que inclusive se apresentam como motivação do presente trabalho.

k) Substituição do óleo diesel no setor agropecuário

Além das diversas aplicações do biogás, já mencionadas, o energético pode ainda substituir o óleo diesel no setor agropecuário, o qual é responsável por 12 a 15% da demanda de óleo diesel total do Brasil (ESTEVES, 2020), contribuindo assim para reduzir a dependência do país por diesel de origem fóssil.

l) Uso de diferentes substratos

Muitos dos rejeitos orgânicos gerados não são devidamente aproveitados. Neste sentido, deve haver um incentivo do uso de diferentes substratos para geração de biogás e a utilização do digestato como fertilizante. Dentro da PNRS, há o estímulo para o envio apenas de rejeitos para os aterros sanitários, o que aumentaria o potencial de geração da produção de biogás. Todavia, essa questão não é observada na prática, onde quase a totalidade de resíduos orgânicos é aterrada (EPE, 2020).

m) Aumento da oferta de gás natural

Com a política do Novo Mercado de Gás há novos atores no setor, que fazem com que haja uma previsão do aumento da oferta de gás natural no Brasil. De acordo com o PDE 2030 (PDE, 2030), a oferta líquida nacional de gás natural é de 140 MMm³/d, que é o dobro da oferta atual.

À primeira vista, esse ponto foi entendido como ameaça. Entretanto, na visão mercadológica, o aumento da oferta de gás natural, aumenta a infraestrutura de gasodutos no país. Esta expansão de gasodutos é uma oportunidade para criação de plantas de biogás de geração distribuída ou para injeção do biometano nessa nova malha que está sendo desenvolvida.

6.5. AMEAÇAS (T)

a) Dependência da atividade de outros setores

Por questões econômicas ou técnicas as atividades da agropecuária ou da agroindústria de transformação podem sofrer reduções, devido a saída de uma ou mais indústrias da atividade ou uma baixa de demanda, por exemplo. A redução da atividade destes setores, reduz, conseqüentemente, a produção de resíduos orgânicos, matéria-prima básica do biogás, minimizando a geração de biogás (SCHERER, 2017).

b) Entrada de outras fontes renováveis no mercado

A crescente preocupação da sociedade com as questões ambientais que cercam o processo de geração de energia, resulta em uma busca constante por novas fontes de energia limpa, como por exemplo, a fotovoltaica, eólica, solar, entre outras. Tais alternativas são tão benéficas quanto o biogás, e se apresentariam como novos “concorrentes” (SCHERER, 2017), quando observamos o uso do biogás para geração de energia elétrica. Para uso como biocombustível há poucos concorrentes.

c) Necessidade de expansão de veículos movidos a biometano

Atualmente, são poucos os veículos que podem ser movidos à biometano. Esta carência, limita a utilização do biogás e, portanto, a sua expansão (ESTEVES, 2020).

d) Carência de coordenação entre políticas públicas

Embora haja políticas públicas que incentivam a geração e aproveitamento do biogás, elas são mais individuais e específicas para cada setor. Por exemplo, a política nacional de resíduos sólidos é específica para o setor de saneamento, enquanto o RenovaBio é específico para o setor de transporte. Desse modo, a coordenação destas políticas pelas agências reguladoras é dificultada (ARAÚJO, 2012). A formação de políticas coordenadas, que abranjam simultaneamente energia, transporte,

agricultura, meio ambiente e gestão de resíduos potencializaria os benefícios do biogás para a sociedade e incentivaria sua expansão (ESTEVES, 2020).

e) Alto custo dos motores geradores de energia

O custo dos motores geradores de energia a partir do biogás é muito elevado. Este fato se apresenta como uma resistência externa à utilização do biogás como energético e complica sua expansão (ARAÚJO, 2012).

f) Uso de biomassa para geração de outros combustíveis

Outros setores industriais, como a indústria de aviação, produtos químicos e transportes rodoviários, também têm implementado esforços para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, o que pode gerar competição no fornecimento de biomassa (DOLIENTE, *et. al.*, 2020)

6.6. MATRIZ SWOT

A matriz resultante da análise *SWOT* se apresenta no Quadro 2. Ressalta-se que o mercado é extremamente dinâmico, de modo que a matriz *SWOT* exposta no presente trabalho reflete o cenário observado no momento atual do presente estudo, e está sujeita a modificações se analisada em outro contexto.

Quadro 2 - Matriz SWOT

FORÇAS	FRAQUEZAS
<ul style="list-style-type: none"> • Matérias-primas acessíveis; • Distribuição; • Energético renovável; • Aproveitamento energético de resíduos; • Subproduto ecologicamente benéfico; • Simbiose industrial; • Energia limpa e de baixo custo; • Diversidade de aplicações; • Créditos de carbono e CBIOS; • Créditos de metano; • Potencial brasileiro de produção; • Diversidade de matérias-primas; • Previsibilidade de preço 	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de vida da matéria-prima; • Elevado custo de escalabilidade; • Presença de impurezas; • Controle das condições reacionais;
OPORTUNIDADES	AMEAÇAS
<ul style="list-style-type: none"> • Evolução do ambiente regulatório; • Programa Nacional Metano Zero; • Programa RenovaBio; • Redução e/ou isenção de impostos; • Novo mercado de gás; • Novo Marco Legal de Saneamento; • Programas de financiamento; • Ações de P&D; • Acordo de Paris • ODS • Substituição do óleo diesel • Uso de diferentes substratos • Aumento da oferta de gás natural 	<ul style="list-style-type: none"> • Dependência da atividade de outros setores; • Competitividade; • Expansão de veículos; • Coordenação entre políticas públicas; • Motores geradores de energia • Competição pela biomassa

Fonte: Elaboração própria

Ao analisar o cenário interno e externo, nota-se que os pontos que fortalecem e que abrem novas oportunidades para o crescimento do biogás no mercado de bioenergia e biocombustíveis se sobressaem frente a barreiras impostas pelo mercado ou limitações internas. Sendo assim, o cenário atual mostra-se favorável a expansão do biogás no Brasil no médio e longo prazo.

As ações de incentivo, sejam elas voltadas para pesquisa, desenvolvimento e inovação, políticas públicas ou programas de financiamento, são grandes aliadas à inserção e crescimento do biogás no mercado de bioenergia e biocombustíveis. Vale enfatizar o Programa RenovaBio, que foi o primeiro do país a basear-se no mercado de carbono para incentivar a produção de biocombustíveis, e o Programa Metano Zero, que é bem recente, mas que se volta especificamente à projetos de biogás e demonstra o quanto o mercado está aquecido e direcionado para a expansão do biogás.

Todos os pontos fortes listados na matriz são relevantes, mas o enorme potencial de produção que o Brasil apresenta e a variedade de matérias-primas frente os demais países, demonstra o potencial de crescimento do Brasil e de se tornar referência tanto como produtor de biogás quanto como país de economia sustentável.

Embora as fraquezas e ameaças sejam inferiores frente a abundância de forças e oportunidades, é importante salientar o quanto as ações de P&D são necessárias para alcançar cada vez mais domínio sobre o processo de digestão anaeróbica e sobre as tecnologias de biodigestores, de modo a aumentar a eficiência de produção de biogás, através do aumento do conhecimento acerca de parâmetros cinéticos e operacionais de forma a mitigar ainda mais as limitações internas à expansão.

Além disso, apesar do avanço de políticas públicas, que indicam que o aproveitamento energético de resíduos para geração de biogás é uma oportunidade estratégica para o setor, é importante perceber os desafios do desenvolvimento de novas tecnologias direcionadas para o uso de resíduos.

Em relação às ameaças, a dependência da atividade de outros setores para que haja matéria-prima disponível para ser utilizada na produção de biogás é o ponto mais difícil de ser superado. Entretanto, como é possível utilizar resíduos de três setores distintos e, o setor agropecuário é o que mais cresce no Brasil, essa dependência não parece ser tão influente a ponto de impedir a expansão do biogás.

A ABiogás e a Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado (Abegás) mapearam, em maio de 2022, 27 novas plantas de biometano. A expectativa dessas associações é que, até 2027, a produção nacional de biometano especificamente, excluindo o biogás gerado para aplicações fora do setor de transporte, atinja 2,2 milhões de metros cúbicos por dia (MANSO, 2022). Para mais,

tem-se que, deste total, 1,3 milhões de metros cúbicos por dia devem ser oriundos de biogás gerado a partir do setor de saneamento, enquanto o segmento sucroenergético deve responder por 700 mil metros cúbicos e o agroindustrial por 200 mil (MANSO, 2022).

Esta estimativa futura de uma participação mais intensa do biogás, como biometano, mostra o quanto o plano do Brasil, dentro do acordo de Paris, principalmente a meta de expandir a utilização de biocombustíveis no setor de transporte, se apresenta como uma oportunidade de grande oportunidade para a expansão do biogás no país. Além disso, o Novo Marco Legal de Saneamento também se mostra um incentivo extremamente relevante, pois estima-se que grande parte dessa produção futura de biometano será oriunda do setor de saneamento. Além disso, o setor de saneamento pode ter seus investimentos amortizados pela geração de biogás nas ETE e pela obtenção de créditos de carbono e de metano, o que auxiliaria no crescimento na cobertura de saneamento nacional.

O PDE calcula que o Brasil atingirá uma produção de biogás de 6,9 bilhões de metros cúbicos por ano, sendo 3,8 bilhões de biometano. em 2030 (EPE, 2020). Essas hipóteses futuras reafirmam o cenário favorável à expansão de biogás percebido na matriz *SWOT*.

De maneira geral, a geração e utilização do biogás para fins energéticos traz ganhos econômicos, sociais e ambientais para o país. O cenário do mercado é favorável à sua expansão e seu crescimento carece de ser mobilizado, atacando os pontos fracos e buscando modos de reduzir as ameaças, para que o Brasil possa desfrutar dos benefícios que o biogás tem a oferecer. Nas palavras de Alessandro Gardemann, "...não se pode pensar em um futuro de energia barata e limpa sem incluir o biogás" (ABIOGÁS, 2022).

7. CONCLUSÃO

O impacto ambiental, mais precisamente as emissões de GEE, gerado pela queima de combustíveis fósseis, mobilizou o mundo a buscar novas fontes de energia que substituíssem as fontes fósseis e impactassem em menor grau o meio ambiente. O uso de fontes renováveis cresce a cada ano e ocupam cada vez mais espaço na matriz energética mundial. O Brasil, devido ao seu grande potencial de geração de energia renováveis de diversas fontes, apresenta uma vantagem competitiva em relação a outros países e apresenta uma das matrizes energéticas mais renováveis do mundo industrial e com uma alta possibilidade de geração de produtos “verdes”.

Embora o Brasil tenha supremacia na utilização de fontes renováveis em sua matriz energética, o biogás, energético com diversas aplicações, que pode ser produzido através de resíduos, ainda representa uma parcela muito pequena da matriz brasileira. Até o final de 2021, eram produzidos por ano apenas 2,35 bilhões de metros cúbicos, frente a um potencial de produção de 84,6 bilhões.

O presente estudo, aponta a existência de 755 plantas de biogás em operação no Brasil, que se encarregam de toda a produção nacional, além da construção de 27 novas plantas de biometano. Como reflexo da evolução histórica, atualmente predominam-se plantas de pequeno porte, que utilizam resíduos agropecuários como fonte de substrato e que têm como aplicação final a geração de energia elétrica.

Entre os anos de 2011 e 2022, houve um significativo surgimento de decretos, leis, resoluções e políticas que incentivam e regulamentam a geração e utilização do biogás. Esta evolução do ambiente regulatório foi e é, sem dúvidas, um estímulo para inserção e expansão do biogás na matriz energética brasileira.

Com base na matriz *SWOT*, este estudo mostrou que o biogás tem se posicionado bem dentro do setor de bioenergia e biocombustíveis, tanto que o cenário atual é favorável a expansão do biogás no Brasil, uma vez que as forças e oportunidades se sobressaem frente às fraquezas e ameaças, comprovado pela estimativa futura de 6,9 bilhões de produção de biogás por ano, em 2030.

Os programas RenovaBio e Metano Zero são os que se destacam como oportunidades para alavancar o setor de biogás no Brasil, enquanto o potencial de

produção que o país tem e a diversidade de matérias-primas são pontos fortes que salientam a capacidade que o Brasil tem de expandir este combustível.

Por outro lado, ressalta-se como pontos fracos, a quantidade de fatores que são necessários controlar no biodigestor para que a produção ocorra e a necessidade de purificação. E como ameaça, a dependência da atividade de outros setores, uma vez que a produção de biogás ocorre a partir de resíduos orgânicos oriundos do setor de saneamento, agropecuário e agroindustrial.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, destacam-se as seguintes:

- análise de possíveis cenários futuros para o biogás no Brasil, dado a matriz *SWOT*, considerando três possibilidades: cenário pessimista, cenário provável e cenário otimista;
- análise individual da expansão de biogás a partir de cada um dos possíveis resíduos orgânicos, com o objetivo de entender a oportunidade dentro de cada setor
- Estudo de viabilidade técnica e econômica (EVTE) da expansão do biogás no Brasil

REFERÊNCIAS

- ABIOGÁS (org.). **Entrevista com o presidente da ABiogás, Alessandro Gardemann: “O biogás é imbatível na transição energética”**. Disponível em: <https://abiogas.org.br/entrevista-com-o-presidente-da-abiogas-alessandro-gardemann-o-biogas-e-imbativel-na-transicao-energetica/>. Acesso em: 20 jun. 2022.
- ABIOGÁS (São Paulo). **O POTENCIAL BRASILEIRO DE BIOGÁS**. Disponível em: https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2020/11/NOTA-TECNICA_POTENCIAL_ABIOGAS.pdf. Acesso em 16 mar. 2022.
- ABIOGÁS (São Paulo). **POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DO TRATAMENTO DO ESGOTO**. [S. l.]. Disponível em: <https://i17.org/documents/BEP-Nota-Tecnica-Potencial-de-Producao-Biogas-Esgoto.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2022.
- ABIOGÁS (São Paulo). **PROPOSTA DE PROGRAMA NACIONAL DO BIOGÁS E DO BIOMETANO**. [S. l.]. Disponível em: https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2021/01/PNBB_Versao_Final.pdf. Acesso em: 25 nov. 2021.
- ABIOGÁS (São Paulo). **PROPOSTA DE PROGRAMA NACIONAL DO BIOGÁS E DO BIOMETANO**. [S. l.]. Disponível em: <https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2022/01/PNBB.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2022.
- ABIOGÁS. **BIOGÁS NO BRASIL: CONHECENDO O MERCADO NO PAÍS**. Ano base 2019. 2020
- ABIOGÁS. **Estatuto Social**. Disponível em: <https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2019/04/ESTATUTO-SOCIAL-03-04-2019.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2022
- ABIOGÁS. **Sobre nós**. Disponível em: <https://abiogas.org.br/sobre-nos/>. Acesso em: 13 mar. 2022.
- ÁGUA CLARAS ENGENHARIA. **Reator UASB: Saiba o que é e como funciona**. Disponível em: <https://aguasclarasengenharia.com.br/como-funciona-reator-uasb/>. Acesso em: 02 abril 2022
- ANEEL. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/>. Acesso em: 13 mar. 2022.
- ANP. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br>. Acesso em: 13 mar. 2022.
- ARAÚJO, A. P. C. *Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico*. 2017. 42 f. Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
- ARAÚJO, Marcilio Jose Cursino Soares de *et al.* ANÁLISE ESTRATÉGICA DO APROVEITAMENTO DO BIOGÁS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM ATERROS. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (ENESEP), 32°, 2012, Bento Gonçalves (RS). **Desenvolvimento Sustentável e Responsabilidade Social: As Contribuições da Engenharia de Produção**. Bento Gonçalves: Abepro, 2012. p. 1-10.
- BAKMAN, Tamar. **A IMPORTÂNCIA DA COMPOSTAGEM NO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS: ESTUDO DE CASO DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO**. 2021. 115 f. TCC

(Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

BNDES. Fundo Clima. Disponível em:

<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/fundo-clima>. Acesso em: 13 mar. 2022.

BNDES. Programa ABC. Disponível em:

<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/programa-abc>. Acesso em: 13 mar. 2022.

BNDES. Pronaf – Programa Nacional De Fortalecimento da Agricultura Familiar. Disponível em:

<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/pronaf>. Acesso em: 13 mar. 2022.

BRASIL. Decreto nº 87.079, de 2 de abril de 1982. Decreto nº 87.079, de 2 de abril de 1982 - Aprova as Diretrizes para o Programa de Mobilização Energética. Coleção de Leis do Brasil, v. 4, p. 2, 5 abr. 1982. Disponível em:

<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1980-1987/decreto-87079-2-abril-1982-436644-publicacaooriginal-1-pe.html>. Acesso em: 3 jan. 2022.

CARDOSO, Fernanda de Souza. **Elaboração de Roadmaps Tecnológicos da Produção de Biogás a partir de Palha e Vinhaça.** 2017. 328 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

CBIE. Como Funcionam os Leilões de Energia. Disponível em:

<https://cbie.com.br/artigos/como-funcionam-os-leiloes-de-energia/>. Acesso em: 13 mar. 2022.

CHERNICHARO, C.A.L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Volume 5: Reatores Anaeróbios.** Departamento de Engenharia Sanitárias e Ambiental – UFMG. Belo Horizonte, p.245, 1997.

CHIAPPINI, Gabriel. **ENTREVISTA Marco do saneamento eleva potencial do biogás em 3 milhões de m³/dia.** 2020. EPBR. Disponível em:

<https://epbr.com.br/entrevista-marco-do-saneamento-eleva-potencial-do-biogas-em-3-milhoes-de-m%20b3-dia/>. Acesso em: 18 jun. 2022.

CIBIOGÁS (Brasil). **Biogas Data**, 2022, disponível em: <

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNjQxYjg4NjgtMTI0NC00NTk2LTk5OTQtMjFkNWVxZjM1ZTk5liwidCI6ImMzOTg3Zml3LTQ5ODMtNDA2Ny1iMTQ2LTc3MGU5MWVE4NGViNSJ9> >. Acesso em 22/04/2022.

CIBIOGÁS (Brasil). **Biogas Map**, 2022, disponível em: <

<https://mapbiogas.cibiogas.org/>>. Acesso em 22/04/2022.

CIBIOGÁS (Brasil). **Biogás no Brasil, história e perspectiva de futuro [S. l.]**, jan.

2020. Disponível em: <https://cibiogas.org/blog-post/biogas-no-brasil-historia-e-perspectiva-de-futuro/>. Acesso em: 06 dez. 2021.

CIBIOGÁS (Brasil). **Biogás X outros gases: Qual a diferença entre GLP, GN, GNV e Biometano? [S. l.]**, 23 nov. 2021. Disponível em: <https://cibiogas.org/blog->

post/biogás-x-outros-gases-qual-a-diferença-entre-glp-gn-gnv-e-biometano/. Acesso em: 25 nov. 2021.

CIBIOGÁS (Brasil). **Panorama do Biogás no Brasil**: Ano base 2021. 2022

CIBIOGÁS (Brasil). **Produção de Biogás: o que são biodigestores e como produzir biogás?** Disponível em: <<https://cibiogas.org/blog-post/producao-de-biogás-o-que-sao-biodigestores-e-como-gerar-biogás/>>. Acesso em: 29 mar. 2022

CIBIOGÁS (Brasil). **Quem somos**. Disponível em: <https://cibiogas.org/quem-somos/>. Acesso em: 13 mar. 2022.

DATASEBRAE BIOGÁS. **Biblioteca de Legislação do Biogás**. Disponível em: <https://datasebrae.com.br/biblioteca-legislacao-biogás/>. Acesso em: 13 mar. 2022.

DATASEBRAE BIOGÁS. **O Biogás**. Disponível em: <https://datasebrae.com.br/biogás/#biogás>. Acesso em: 14 mar. 2022.

DEGANUTTI, Dr. Roberto *et al.* BIODIGESTORES RURAIS: MODELO INDIANO, CHINÊS E BATELADA. Sbpn - Scientific Journal: Edição dos Anais da 9ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Pesquisadores Nikkeis. São Paulo, p. 74-78. jan. 2001.

DOLIENTE, Stephen S. *et al.* Bio-aviation Fuel: A Comprehensive Review and Analysis of the Supply Chain Components. **Frontiers In Energy Research**, Suíça, jul. 2020.

ECO.NOMIA (org.). **Kalundborg (Dinamarca) - Simbiose industrial**. Disponível em: <https://eco.nomia.pt/pt/exemplos/kalundborg-symbiosis>. Acesso em: 18 jun. 2022.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (EMF). **Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition**. Isle of Wight: EMF, 2012. (v. 1).

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the Circular Economy: Opportunities for the consumer goods sector**. Ellen MacArthur Foundation, 2013.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (org.). **The butterfly diagram: visualising the circular economy**. 2022. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>. Acesso em: 12 abr. 2022.

EMBRAPA. **Rede BiogásFert**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/suinos-e-aves/biogásfert>. Acesso em: 13 mar. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional 2022**: Ano base 2021. 2022

ENGIE (org.). **Entenda por que o Brasil é uma potência de produção de biogás e biometano**. Disponível em: <https://umsoplaneta.globo.com/patrocinado/engie/noticia/2021/07/16/entenda-por-que-o-brasil-e-uma-potencia-de-producao-de-biogás-e-biometano.ghtml>. Acesso em: 18 jun. 2022.

EPE (org.). **Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 - Oferta de Biocombustíveis**. Rio: EPE, 2020. 21 slides, color. Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/topico-522/PDE%202030%20-%20Oferta%20de%20Biocombustiveis.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2022.

EPE (org.). **Quem Somos**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/a-epe/quem-somos>. Acesso em: 13 mar. 2022

ESTEVES, Heloisa Borges Bastos. **Biogás no Brasil: Visão atual e futura**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2020. 22 slides, color.

FLORES, Marcelo Costa. **VIABILIDADE ECONÔMICA DO BIOGÁS PRODUZIDO POR BIODIGESTOR PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – ESTUDO DE CASO EM CONFINADOR SUÍNO**. 2014. 34 p. Tese (Engenheiro Químico) - Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL, [S. l.], 2014.

FREITAS, G.C.; DATHEIN, R. As energias renováveis no Brasil: uma avaliação acerca das implicações para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental. **Revista Nexos Econômicos**, v. 7, n. 1, p. 71-94, 2013

FRIGO, Késia Damaris de Azevedo *et al.* Biodigestores: seus modelos e aplicações. *Acta Iguazu*, Cascavel, v. 4, n. 1, p.57-65, jan. 2015. Trimestral.

GEFBIOGÁS. **Biogás Invest**. Disponível em: <https://www.gefbiogas.org.br/biogasinvest.html>. Acesso em: 13 mar. 2022.

GEFBIOGÁS. **DataSebrae Biogás**. Disponível em: <https://www.gefbiogas.org.br/datasebrae.html>. Acesso em: 13 mar. 2022.

GEFBIOGÁS. **Sobre o Projeto**. Disponível em: <https://www.gefbiogas.org.br/sobreoprojeto.html>. Acesso em: 13 mar. 2022.

GEFBIOGÁS. **Tropicalização**. Disponível em: <https://www.gefbiogas.org.br/tropicalizacao.html>. Acesso em: 13 mar. 2022.

GENIN, Carolina; FRASSON, Caroline Medeiros Rocha. **O saldo da COP26: o que a Conferência do Clima significou para o Brasil e o mundo**. WRI BRASIL. Disponível em: <https://wribrasil.org.br/pt/blog/clima/o-saldo-da-cop26-o-que-conferencia-do-clima-significou-para-o-brasil-e-o-mundo>. Acesso em: 18 jun. 2022.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energias Renováveis: Um futuro sustentável. **Revista USP**, São Paulo, n. 72, p. 6-15, fev. 2007

Governo Federal. **PIBiogás**. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/pibiogas>. Acesso em: 13 mar. 2022.

Grupo de Pesquisa em Sustentabilidade e Inovação. **Resíduos Sólidos Urbanos**. Disponível em: < [http://www.ufrgs.br/gps/pesquisa/rsu#:~:text=Os%20Res%C3%ADduos%20S%C3%B3lidos%20Urbanos%20\(RSU,aqueles%20provenientes%20da%20limpeza%20p%C3%ABlica.>](http://www.ufrgs.br/gps/pesquisa/rsu#:~:text=Os%20Res%C3%ADduos%20S%C3%B3lidos%20Urbanos%20(RSU,aqueles%20provenientes%20da%20limpeza%20p%C3%ABlica.>). Acesso em: 19 mar. 2022.

HOME BIOGAS. **ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF BIOGAS**. Disponível em: <https://www.homebiogas.com/blog/advantages-and-disadvantages-of-biogas/>. Acesso em: 23 maio 2022.

IBGE. Censo Agro 2017. Disponível em: < <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/2012-agencia-de-noticias/noticias/28326-quatro-em-cada-dez-municipios-nao-tem-servico-de-esgoto-no-pais.html> >. Acesso em: 3 fev.2022.

INSTITUTO TOTUM (org.). **Ativos Ambientais White Paper 2020**. 2020. Disponível em:

https://www.institutototum.com.br/images/totum/arquivos/whitepaper_entendendo_ativos_ambientais.pdf. Acesso em: 06 jul. 2022.

IPEA (org.). **História - Petróleo**. Disponível em:

https://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?option=com_content&id=2321:catid=28#:~:text=Em%201979%20h%C3%A1%20um%20novo,%2C%20chegando%20a%20US%24%2040. Acesso em: 19 jun. 2022.

KUNZ, Airton; STEINMETZ, Ricardo Luis Radis; AMARAL, André Cestonaro do. OS BIODIGESTORES. In: KUNZ, Airton *et al* (org.). **FUNDAMENTOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA, PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS, USO E TRATAMENTO DO DIGESTATO**. Concórdia,SC: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019. p. 42-68.

MACHADO, Nayara. **Governo vai lançar programa para biometano**. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <nayara.machado@epbr.com.br>. em: 11 fev. 2022

MANSO, Luiz Fernando. **Brasil tem 27 novas plantas de biometano previstas para os próximos anos**. 2022. Disponível em: https://epbr.com.br/brasil-tem-27-novas-plantas-de-biometano-previstas-para-os-proximos-anos/?utm_source=newsletters+epbr&utm_campaign=c76c6d2b7e-epbr-dialogos-da-transicao&utm_medium=email&utm_term=0_5931171aac-c76c6d2b7e-203791989. Acesso em: 18 jun. 2022.

MANUAL BÁSICO DE BIOGÁS. Lajeado: UNIVATES, 2014

MATA, Natália Domingues da. **PANORAMA GERAL DA PRODUÇÃO E UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS NO BRASIL**. 2018. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2018.

Mecanismo de Desenvolvimento Limpo: O que é e como funciona. **NEOENERGIA**, 2022. Disponível em: < <https://www.neoenergia.com/pt-br/te-interessa/meio-ambiente/Paginas/mecanismo-de-desenvolvimento-limpo-o-que-e-como-funciona.aspx>>. Acesso em: 08 jan. 2022

MILANEZ, Artur Yabe; MAIA, Guilherme Baptista da Silva; GUIMARÃES, Diego Duque. BIOGÁS: EVOLUÇÃO RECENTE E POTENCIAL DE UMA NOVA FRONTEIRA DE ENERGIA RENOVÁVEL PARA O BRASIL. **BNDES Set.**, Rio de Janeiro, ano 2021, v. 27, n. 53, p. 177-216, 1 mar. 2021. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/20801/1/PR_Biogas_215276_P_BD.pdf. Acesso em: 3 jan. 2022.

MILANEZ, Artur Yabe; MANCUSO, Rafael Vizeu; GODINHO, Renato Domith; POPPE, Marcelo Khaled. O ACORDO DE PARIS E A TRANSIÇÃO PARA O SETOR DE TRANSPORTES DE BAIXO CARBONO: O PAPEL DA PLATAFORMA PARA O BIOFUTURO. **BNDS Setorial**, Rio de Janeiro, v. 45, p. 285-340, mar. 2017. Disponível em:

https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/11756/1/BS%2045%20O%20Acordo%20de%20Paris%20e%20a%20transi%C3%A7%C3%A3o%20para%20o%20setor%20de%20transportes%20de%20baixo%20carbono%20%5B...%5D_P_BD.pdf. Acesso em: 17 maio 2022.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Resenha Energética Brasileira 2021: Ano base 2020**. 2021

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (org.). **Combustível do Futuro**. 2021. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/combustivel-do-futuro>. Acesso em: 16 jun. 2022.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (org.). **PNE 2050 - Plano Nacional de Energia**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2022.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (org.). **PROBIOGÁS**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/probiogas>. Acesso em: 16 jun. 2022.

MORAIS, Taísa Nogueira. **APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS NO MODELO DE ANÁLISE INTEGRADA BRASILEIRO**. 2021. 105 p. Dissertação (Mestre em Ciências em Planejamento Energético) - COPPE - UFRJ, [S. l.], 2021.

NEUMANN, C.; SCALICE, R.K. **Projeto de fábrica e layout**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

Novo Marco de Saneamento é sancionado e garante avanços para o País. Governo Federal. Disponível em: < <https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2020/07/novo-marco-de-saneamento-e-sancionado-e-garante-avancos-para-o-pais> >. Acesso em: 16 maio 2022

NOVO MERCADO DE GÁS. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/novo-mercado-de-gas>. Acesso em: 21 maio 2022. Acesso em: 21 maio 2022.

O que é e como são gerados os créditos de carbono? **SUSTAINABLE CARBON**, 2015. Disponível em: < <https://www.sustainablecarbon.com/como-sao-gerados/> >. Acesso em: 08 jan. 2022.

Oferta Interna de Energia tem forte recuperação em 2021. 2021. Governo Federal. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/oferta-interna-de-energia-tem-forte-recuperacao-em-2021>. Acesso em: 30 maio 2022.

OLIVEIRA, G. M.; SOUZA, M. J. (2013). Energia e ambiente para um futuro sustentável. In P. Cunha, A. Toscano, C. Barros, C. Toriz Ramos, G. Jolluskin, I. C. Leite, I. Silva, J. S. Martins, M. Coutinho, N. A. Barros, P. Cardoso & T. Toldy, Construir a paz: visões interdisciplinares e internacionais sobre conhecimentos e práticas (pp. 201-211)

OLIVEIRA, Gisela Marta; VIDAL, Diogo Guedes; MAIA, Rui Leandro; ESTRADA, Rui; SOUSA, Manuel João Lemos de. **O que significa descarbonizar? Uma visão da sociedade atual sem energia fóssil.** [S. l.: s. n.], 2020

PACHECO, Fabiana. Energias Renováveis: Breves Conceitos. **Conjuntura e Planejamento**, Salvador, n. 149, p. 4-11, out. 2006

PALHARES, Julio Cesar Pascale. A abordagem do metabolismo industrial para análise da relação entre a água e a produção animal. In: EMBRAPA (org.). **Produção animal e recursos hídricos Tecnologias para manejo de resíduos e uso eficiente dos insumos.** Brasília: Embrapa, 2019. p. 212.

PARSAEE, M., KIANIA, M.K.D., KARIMI, K. Biomass and Bioenergy A review of biogas production from sugarcane vinasse. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, p. 117–125, 2019.

PLANO NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO. **Ministério do Meio Ambiente.** Disponível em: < <https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/item/651-plano-nacional-de-saneamento-b%C3%A1sico.html> >. Acesso em: 16 maio 2022

Poblete, I.B.S. *Simulação e Análise de Produção e Condicionamento de Biogás.* Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, UFRJ, 2019

Portal Brasileiro de Dados Abertos. **Ministério de Minas e Energia - MME.** Disponível em: <https://dados.gov.br/organization/about/ministerio-de-minas-e-energia-mme>. Acesso em: 13 mar. 2022.

Portal Tratamento de Água (org.). **O esgoto sanitário - A origem.** Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/o-esgoto-sanitario-a-origem/>. Acesso em: 19 mar. 2022.

PRAMANIK, S. K. *et al.* **The anaerobic digestion process of biogas production from food waste: Prospects and constraints.** *Bioresource Technology Reports*, v. 8, n. August, p. 100310, 2019.

PROBIOGÁS. **Guia prático do Biogás: Geração e Utilização**, 2010. Disponível em: http://web-resol.org/cartilhas/giz_-_guia_pratico_do_biogas_final.pdf. Acesso em: 16 mar. 2022.

Programa ABC. [S. l.]: **BNDES.** Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/pronaf>. Acesso em: 10 fev. 2022.

PROGRAMA NACIONAL METANO ZERO. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/climaozoniodesertificacao/ProgramaMetanoZero.pdf>. Acesso em: 21 maio 2022.

PRONAF - Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar. [S. l.]: **BNDES.** Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/pronaf>. Acesso em: 10 fev. 2022.

Raízen anuncia investimento de R\$ 300 milhões em planta de biometano.

NOVACANA, 2022. Disponível em: <

<https://www.novacana.com/n/industria/investimento/raizen-anuncia-investimento-r-300-milhoes-planta-biometano-260422>>. Acesso em: 16 maio 2022

RENOVABIO. Ministério de Minas e Energia. Disponível em:

<http://antigo.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/acoes-e-programas/programas/renovabio#:~:text=O%20RenovaBio%20%C3%A9%20uma%20pol%C3%ADtica,mercado%20e%20a%20mitiga%C3%A7%C3%A3o%20de>.

Acesso em: 21 maio 2022.

ROYA, Bruno *et al.* **BIOGÁS – UMA ENERGIA LIMPA. Revista Eletrônica Novo Enfoque**, [S. l.], ano 2011, v. 13, n. 13, p. 142-149.

SANTOS, Elton Márcio da Silva. A relação do Homem com o processamento de energia e seu consumo. **Inc. Soc. Brasília**, Brasília - Distrito Federal, ano 2018, v. 12, ed. 1, p. 103-113, 1 dez. 2018.

SCHERER, Leandro. **ANÁLISE ESTRATÉGICA E FINANCEIRA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE DEJETO SUÍNO EM ITAIPULÂNDIA - PR.** 2017. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Administração, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

SILVA, Juliana Marsico Correia, *et al.* **Impactos Ambientais da Exploração e Produção de Petróleo na Bacia de Campos, RJ.** ANPPAS. Disponível em: <
<http://www.anppas.org.br/encontro4/cd/ARQUIVOS/GT4-809-870-20080518190501.pdf>>. Acesso em: 04, janeiro de 2021.

SILVA, Marcio Luis Busi da; MEZZARI, Melissa Paola. TRATAMENTO E PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS. In: KUNZ, Airton *et al* (org.). **FUNDAMENTOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA, PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS, USO E TRATAMENTO DO DIGESTATO.** Concórdia, Sc: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019. p. 69-93.

SIMABUKULO, Lucas Antonio Nizuma, *et al.* **Energia, Industrialização e Modernidade – História Social.** Disponível em: <
<http://www.museudaenergia.org.br/media/63129/03.pdf>>. Acesso em: 04, janeiro de 2021.

SOARES, Caroline Monique Tietz. **TECNOLOGIA DE BIODIGESTORES RURAIS E DESENVOLVIMENTO RURAL SUSTENTÁVEL NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ.** 2020. 122 f. Tese (Doutorado) - Curso de Desenvolvimento Rural Sustentável, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2020.

SOARES, Rainy da Conceição; SILVA, Simone Raquel Caldeira Moreira da. Evolução Histórica do Uso de Biogás como Combustível. In: CONNEPI, 2010, Mato Grosso. **Evolução Histórica do Uso de Biogás como Combustível.** Mato Grosso: 2010. p. 1-6.

SUGARCANE (org.). **Expanding biogas in Brazil's energy matrix.** 2021. Disponível em: <https://www.sugarcane.org/blog/expanding-biogas-in-brazils-energy-matrix/>. Acesso em: 17 maio 2022.

ZIMMERMAN, F. **Gestão da Estratégia com o uso do BSC**. Revisão e adaptação de Alexandre Laval Silva e Carlos Eduardo Penante D'Ávila Uchôa. Brasília: ENAP, 2015. 76 p.