



Novas oportunidades de aproveitamento do biogás no Brasil

Richard Manuel Batista Almeida

Monografia em Engenharia Química

Orientadora

Clarice Campelo de Melo Ferraz, *D.Sc.*

Março de 2021

NOVAS OPORTUNIDADES DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS NO BRASIL

Richard Manuel Batista Almeida

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

Aprovado por:

Marcelo Mendes Viana, D.Sc.

Bruno Didier Olivier Capron, D.Sc.

Orientado por:

Clarice Campelo de Melo Ferraz, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Março de 2021

Almeida, Richard Manuel Batista.

Novas oportunidades de aproveitamento do biogás no Brasil/ Richard Manuel Batista Almeida. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2021.

x, 70 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2021.

Orientadora: Clarice Campelo de Melo Ferraz,

1. Biogás 2. Biometano 3. Energia renovável 4. Monografia (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Clarice Campelo de Melo Ferraz. I. Novas oportunidades de aproveitamento do biogás no Brasil

AGRADECIMENTOS

À minha família, por sempre ter me incentivado e nunca ter me deixado desistir.

Ao meu grande amor Matheus, por ter sido meu companheiro nos melhores e piores momentos.

À minha orientadora, por sua presteza, profissionalismo e dedicação.

A esta universidade e seu corpo docente, por todas as oportunidades proporcionadas.

Aos amigos, por toda a ajuda pelos momentos de lazer fornecidos durante toda essa jornada.

Aos meus colegas de trabalho, que contribuíram grandemente para meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Agradeço a todos que direta ou indiretamente participaram de nossa formação, vocês serão para sempre parte dessa história.

Resumo da Monografia apresentada à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para a obtenção de grau de Engenheiro Químico

NOVAS OPORTUNIDADES DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS NO BRASIL

Richard Manuel Batista Almeida

Março, 2021

Orientadora: Clarice Campelo de Melo Ferraz, D.Sc.

O crescimento nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) tem incentivado a busca por alternativas à dependência mundial de combustíveis fósseis. Apesar de contar com uma matriz energética com uma relevante participação de energias renováveis (46%), em 2018 o Brasil foi o 14º país com a maior emissão de gás carbônico (CO₂) a partir da queima de combustíveis fósseis e possui seus setores industrial e de transportes fortemente dependentes destes. Neste contexto, o biogás se destaca como uma alternativa para o avanço na descarbonização da matriz energética brasileira. O biogás é gerado a partir da digestão anaeróbia da matéria orgânica e pode substituir integralmente o gás natural em seus diversos usos. Apesar do alto potencial para sua produção, o Brasil ainda não possui um mercado consolidado para este novo produto, tendo alcançado somente 1,5% de seu potencial produtivo. Este trabalho se propõe a estudar as características de produção e de mercado do biogás, no Brasil e no mundo, a fim de identificar as barreiras à sua difusão no mercado brasileiro e propor soluções baseadas em práticas bem-sucedidas de países como Alemanha e Suécia. Concluiu-se que os principais entraves para o escalonamento da sua produção têm caráter institucional, econômico, tecnológico, logístico e informacional. Para combater estes entraves, é essencial que a esfera pública adote algumas medidas, como a criação de políticas de incentivo, o desenvolvimento de políticas setoriais, a disponibilização de linhas de financiamento e o investimento em capacitação e pesquisa.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	O BIOGÁS.....	3
2.1	DEFINIÇÃO.....	3
2.2	ORIGEM E EVOLUÇÃO	3
2.3	BENEFÍCIOS.....	4
2.4	CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA	5
3	PROCESSOS DE PRODUÇÃO E MATÉRIAS-PRIMAS	7
3.1	DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	7
3.2	PARÂMETROS OPERACIONAIS	8
3.3	PRINCIPAIS MATÉRIAS-PRIMAS E SUAS FORMAS DE APROVEITAMENTO.....	9
3.3.1	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E ATERROS SANITÁRIOS.....	10
3.3.2	EFLUENTES INDUSTRIAIS	13
3.3.3	RESÍDUOS AGROSSILVOPASTORIS.....	14
3.3.4	LODO DE ESGOTO	15
3.4	TRATAMENTOS	16
4	PRINCIPAIS APLICAÇÕES	18
4.1	GERAÇÃO DE ELETRICIDADE	18
4.2	GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA	19
4.3	PRODUÇÃO DE BIOMETANO.....	20
4.4	PRODUÇÃO DE BIOFERTILIZANTE	21
5	EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS.....	22
5.1	UNIÃO EUROPEIA	23
5.1.1	ALEMANHA.....	25
5.1.2	SUÉCIA.....	30
6	O BIOGÁS NO BRASIL	35
6.1	HISTÓRICO.....	35
6.2	PANORAMA ATUAL E POTENCIAL TEÓRICO	36
6.3	CARACTERIZAÇÃO DAS PLANTAS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS BRASILEIRAS.....	39

6.4	LEGISLAÇÃO, POLÍTICAS PÚBLICAS E FONTES DE FINANCIAMENTO	41
6.5	INICIATIVAS DO SETOR PRIVADO	44
6.6	CASOS DE SUCESSO	45
7	BARREIRAS PARA A AMPLIAÇÃO DO BIOGÁS NO MERCADO BRASILEIRO	47
7.1	DIMENSÃO HISTÓRICA E INSTITUCIONAL	47
7.2	DIMENSÃO ECONÔMICA	49
7.3	DIMENSÃO TECNOLÓGICA E LOGÍSTICA	50
7.4	DIMENSÃO INFORMACIONAL.....	50
8	ANÁLISE COMPARATIVA E PROPOSTAS DE SOLUÇÕES	52
8.1	PROPOSTAS DE SOLUÇÕES	54
8.1.1	POLÍTICAS DE INCENTIVO.....	55
8.1.2	LINHAS DE FINANCIAMENTO ESPECÍFICAS.....	56
8.1.3	DESENVOLVIMENTO DE POLÍTICAS SETORIAIS	57
8.1.4	INVESTIMENTOS EM CAPACITAÇÕES, PESQUISA E DESENVOLVIMENTO	58
9	CONCLUSÃO	59
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática das etapas da digestão anaeróbia.....	7
Figura 2 - Tubos de coleta de gás.....	12
Figura 3 - Aplicações para o biogás.....	18
Figura 4 - Produção de biogás nos maiores produtores – 2018 (Mtoe).....	23
Figura 5 - Evolução do número de plantas de biogás na Europa.....	24
Figura 6 - Mercado de biometano na Alemanha.....	29
Figura 7 - Vendas de veículos movidos a gás na Suécia no período 2009-2018 em GWh.....	33
Figura 8 - Distribuição por estado do volume de biogás produzido no Brasil em 2019	40
Figura 9 - Primeira planta da GEO Energética.....	46
Figura 10 - Ônibus movido a biometano da Usina de Itaipu.....	46

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Principais componentes do biogás.....	3
Tabela 2 - Comparação do poder calorífico do biogás com o de outros gases.....	6
Tabela 3 - Equivalência energética de 1m ³ do biogás com outros combustíveis	6
Tabela 4 - Tecnologias para produção de biogás com resíduos municipais	11
Tabela 5 - Tecnologias para produção de biogás na agroindústria.....	13
Tabela 6 - Tecnologias para a produção de biogás na agropecuária.....	15
Tabela 7 - Tecnologias para produção de biogás no setor de saneamento.....	16
Tabela 8 - Principais contaminantes e tratamentos utilizados.....	17
Tabela 9 - Composições típicas de biogás e biometano	20
Tabela 10 - Resumo das principais políticas de incentivo ao biogás na Alemanha ..	26
Tabela 11 - Status das plantas de biogás na Alemanha em 2018	27
Tabela 12 - Utilização de biogás na Alemanha em 2018	27
Tabela 13 - Estimativa do consumo de biogás e gás natural na Alemanha em 2030	28
Tabela 14 - Resumo das principais políticas de incentivo ao biogás e biometano na Suécia	30
Tabela 15 - Taxas de CO ₂ na Suécia em 2020	31
Tabela 16 - Status das plantas de biogás na Suécia em 2018	32
Tabela 17 - Utilização do biogás produzido na Suécia em 2018.....	32
Tabela 18 – Estimativa do consumo de biogás e gás natural na Suécia em 2030....	34
Tabela 19 - Situação das plantas de biogás no Brasil em 2019.....	36
Tabela 20 - Estimativa do consumo de biogás e gás natural no Brasil em 2030	37
Tabela 21 - Classificação por porte das plantas de biogás em operação no Brasil em 2019	39
Tabela 22 - Classificação por substrato das plantas de biogás em operação no Brasil em 2019	40
Tabela 23 - Classificação por aplicação energética do biogás das plantas em operação no Brasil em 2019	41
Tabela 24 - Políticas a produção de biogás em alguns países estudados pela <i>Global Methane Initiative</i>	52
Tabela 25 - Incentivos à produção de biogás em alguns países estudados pela <i>Global Methane Initiative</i>	52

Tabela 26 - Comparativo de principais matérias primas utilizadas e principais formas de uso do biogás nos países selecionados.....	53
Tabela 27 - Comparativo da representatividade das fontes renováveis na matriz energética e da representatividade do biogás na matriz energética nos países selecionados	54
Tabela 28 - Comparativo das projeções de redução na emissão de GEE em 2030 e dos percentuais de atingimento das metas de Paris nos países selecionados..	54
Tabela 29 - Impostos e contribuições a esperar para plantas de biogás e biometano	55

1 INTRODUÇÃO

A descarbonização da matriz energética se tornou uma necessidade devido ao aumento nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) ao qual está relacionada. Com efeito, segundo a Agência Internacional de Energia, IEA (2019), o setor energético é responsável por mais de 27% das emissões poluentes. Assim, a necessidade de descarbonização do setor tem provocado uma forte expansão das energias renováveis.

Define-se energia renovável, ou limpa, como aquela proveniente de fontes renováveis (FER) e livre de emissões em sua geração e uso final. Este tipo de energia não gera grandes impactos ambientais, conferindo maior segurança energética aos seus utilizadores, bem como servindo de agente de combate às mudanças climáticas (COELHO, GARCILASSO, *et al.*, 2018).

Neste contexto de preocupação mundial com os impactos das mudanças climáticas, em 2015, foi instituído o Acordo de Paris na 21ª Conferência das Partes da UNFCCC (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima), a COP21. Este tratado propôs a reorientação da economia mundial a fim de estabilizar o aquecimento do planeta abaixo de 2 °C no século atual, mirando a atingir, no máximo, um aquecimento de 1,5 °C. Os países envolvidos apresentaram propostas de redução nas emissões de GEE que se tornaram as chamadas NDCs (Contribuições Nacionalmente Determinadas) (SEEG, 2018).

O Brasil estabeleceu como metas a redução de emissões de GEE (comparado aos índices apresentados em 2005) em 37% até o ano de 2025 e em 43% até 2030. Para o setor de energia, os objetivos são: “(i) Aumentar a participação de bioenergia sustentável na matriz energética brasileira para aproximadamente 18% até 2030; (ii) Assegurar 45% de renováveis na matriz energética – incluindo energia hidrelétrica – em 2030; (iii) Assegurar 28% a 33% de renováveis não-hidrelétricas – solar, eólica, biomassa, etanol – na matriz energética brasileira até 2030; (iv) Aumentar o uso sustentável de energias renováveis, excluindo energia hidrelétrica, para ao menos 23% da geração de eletricidade do Brasil até 2030” (SEEG, 2018).

Apesar de contar com uma matriz energética diversificada, alguns setores da economia brasileira ainda dependem de fontes de origem fóssil. Cerca de 75% do consumo energético do setor de transportes e 43% do consumo do setor industrial é proveniente de fontes fósseis (EPE, 2020). Assim, em 2019, o país emitiu 2,17 bilhões

de toneladas brutas de GEE, valor 9,6% superior ao do ano anterior, tornando-o o 6º colocado no ranking de maiores poluidores. A título de comparação, o aumento no PIB nacional foi de apenas 1,1% entre os anos de 2018 e 2019. Este dado indica que as emissões brasileiras não estão atreladas à geração de riqueza em uma mesma proporção (SEEG, 2020).

Nesta perspectiva, uma opção que tem ganhado espaço mundialmente no auxílio a redução de emissões de carbono é o biogás. Este composto, obtido a partir da degradação de diferentes fontes de matéria orgânica, pode ser aplicado para geração de energia elétrica e térmica, produção de biofertilizantes e conversão a combustível veicular (na forma de biometano). Apesar de encontrar no Brasil um potencial superior a outros países, o mercado deste gás ainda é restrito por conta de barreiras em diferentes esferas encontradas em território nacional.

O objetivo deste trabalho é analisar os pontos fortes e as barreiras encontradas no Brasil para a alavancagem do mercado do biogás. Além disso, o trabalho realiza uma análise de experiências bem-sucedidas em outros países, revisando as práticas e incentivos adotados para que os países em questão se tornassem referências.

Para atingir este objetivo, foi necessário, primeiramente, fazer um enquadramento teórico sobre o biogás, envolvendo sua definição, história e caracterização (capítulo 2). Em seguida, no capítulo 3, estuda-se o processo de produção, analisando as matérias-primas disponíveis. No capítulo 4, são discutidos os principais usos em âmbito global. No capítulo 5, é discutida a participação do biogás no mercado mundial, destacando os países que mais desenvolveram sua produção e discorreu-se sobre as práticas apontadas como referência. No capítulo seguinte é realizada uma análise do mercado brasileiro, da cadeia produtiva, do panorama atual e do ambiente regulatório. O capítulo 7 aborda as diversas barreiras à difusão da adoção do biogás no e, por fim, o capítulo 8 apresenta uma análise comparativa dos estudos de caso discutidos no trabalho e, a partir delas, são propostas soluções para os desafios anteriormente apontados.

2 O BIOGÁS

2.1 Definição

O biogás é um biocombustível de origem orgânica, com produção proveniente da decomposição de materiais de origem vegetal e animal em ambientes com ausência de oxigênio. O processo de sua formação é chamado de digestão anaeróbica, que necessita de microrganismos para desempenhar o papel de agentes digestores e de um biodigestor como equipamento para aplicar as condições ideais de temperatura e pressão (NÓBREGA, 2019).

De forma geral, ele é uma mistura gasosa incolor, insolúvel em água e inodora. Conforme dados apresentados na Tabela 1, seus principais componentes são o metano e o dióxido de carbono. Sua composição exata depende da matéria prima da qual ele provém e das variáveis do processo, como a temperatura e o pH. Por possuir densidade inferior à do ar, esse gás tem uma acumulação dificultada e, conseqüentemente, não apresenta alto risco de explosão. Não é considerado um gás tóxico, apesar de ser corrosivo por conta do teor de sulfeto de hidrogênio (CETESB, 2020; LIMA e PASSAMANI, 2012).

Tabela 1 - Principais componentes do biogás

Componentes	Teor
Metano (CH₄)	50% - 70% (vol.)
Dióxido de carbono (CO₂)	25% - 50% (vol.)
Vapor de água (H₂O)	2% - 7% (vol.)
Sulfeto de hidrogênio (H₂S)	20 - 20.000 ppm
Amônia (NH₃)	0 - 0.05% (vol.)
Nitrogênio (N₂)	0 - 5% (vol.)
Siloxanos^[1]	0 - 50 mg/m ³

[1] Grupo funcional químico com ligações Si – O – Si.

Fonte: Adaptado de (PEREIRA, 2014, p. 7; SANTOS, 2016, p. 8).

2.2 Origem e evolução

No século XIX, foi realizada a primeira fermentação anaeróbia por Ulysse Gayon utilizando-se de estrume e água e percebeu-se a formação de um gás. A partir

deste trabalho, Louis Pasteur constatou em 1884 que o processo ocorrido gerou uma possível fonte de energia devido à presença de metano (CETESB, 2020).

A primeira planta de produção de biogás, utilizando dejetos e outros materiais de descarte como fontes teve como cenário a Índia, em 1941 (CETESB, 2020). Posteriormente, o processo de digestão anaeróbica foi utilizado em lodo de esgoto para reduzir sua quantidade neste país, sendo a geração do biogás uma consequência. O foco na geração do biocombustível se deu na década de 1970, durante o período de crise de petróleo caracterizado por escassez de combustível e altos preços. A partir dos anos 1980, outras matérias primas passaram a ser utilizadas e foram popularizadas, resultando no desenvolvimento de novos projetos de produção do gás (KARLSSON, KONRAD, *et al.*, 2014).

Nos anos subsequentes, com o avanço das pesquisas tecnológicas, novas formas de produção e aplicação surgiram ao longo do globo. Em países desenvolvidos nos quais a melhoria no saneamento ambiental era uma necessidade, foram montadas plantas de biodigestores com enfoque no tratamento de resíduos orgânicos. Além disso, os estudos sobre efeito estufa e aquecimento global contribuíram para o aumento da preocupação da sociedade e dos governos com a preservação do meio ambiente. Assim, intensificou-se a substituição de gases derivados do petróleo por elementos de origem natural – dentre eles o biogás, objeto de estudo deste trabalho (OLIVEIRA, 2009).

2.3 Benefícios

Desde o século XX, a sociedade apresenta uma alta dependência de combustíveis fósseis, responsáveis por inúmeros impactos ambientais. A sua queima libera GEE que afetam o clima da Terra. As matérias primas à origem dos combustíveis fósseis foram armazenadas por milhões de anos e são limitadas, mostrando que são fontes esgotáveis de energia (KARLSSON, KONRAD, *et al.*, 2014). Neste contexto, uma solução que substitua derivados do carbono fóssil, que forneça energia de forma limpa e eficiente e que utilize como fonte passivos ambientais – deposições antigas que impactam na saúde e vida humana – tem significativo valor. Mesmo que em sua estrutura existam GEE como metano e gás carbônico, a lista de benefícios atrelada ao uso do biogás torna o seu uso extremamente vantajoso, principalmente em comparação ao gás natural fóssil.

A produção de biogás a através de um biodigestor, por exemplo, apresenta diversos benefícios como a redução de custos com fertilizantes e geração de energia, a diversificação nas fontes energéticas utilizadas e o direcionamento otimizado dos resíduos gerados (NÓBREGA, 2019). Se instalado em uma propriedade rural, permite o aproveitamento de dejetos de bovinos e suínos, que agrega valor a um objeto de descarte. Além disso, podem ser utilizados na geração de energia limpa para os moradores locais aplicarem como combustível. Outro benefício é a possibilidade da produção de biofertilizante, que permite a conclusão de um ciclo de utilização de produtos vegetais e traz mais benefícios econômicos ao eliminar ou reduzir os gastos com este tipo de insumo (SOARES e SILVA, 2018).

2.4 Caracterização Técnica

Para realizar a caracterização técnica do biogás, destacam-se os seguintes parâmetros: a densidade absoluta, a densidade relativa, o fator de compressibilidade e o poder calorífico, item de maior importância para a aplicação do elemento de estudo.

A densidade absoluta é definida como “a quantidade de massa por unidade de volume do gás a uma dada pressão e temperatura”, levando em consideração o tamanho, peso e tipo de ligação química realizada pelos átomos. Após análise de valores obtidos em diferentes estudos e linearização das funções obtidas, a base padrão de densidade encontrada foi de $1,2039 \text{ kg.m}^{-3}$ (CIBIOGAS, 2018; FNR, 2013).

Já a densidade relativa tem por definição “a relação entre a densidade absoluta de um gás e a densidade absoluta do ar seco com composição padronizada, nas mesmas condições de temperatura e pressão” e independe de qualquer estado de referência. O valor encontrado experimentalmente foi de $1,2273 \text{ kg.m}^{-3}$.

A definição de fator de compressibilidade é “o volume real da massa de um gás, a uma dada temperatura e pressão, dividida pelo seu volume, nas mesmas condições, calculado a partir da equação do gás ideal” e é variável de acordo com a composição do gás, tendo sido obtido um valor médio de 0,9970 (CIBIOGAS, 2018).

O poder calorífico é um fator essencial na avaliação do potencial energético de qualquer fonte e tem como definição a quantidade de energia liberada por unidade de massa ou de volume na oxidação de um combustível (OLIVEIRA, 2009). Este parâmetro está diretamente relacionado à proporção de metano na composição do

biogás analisado, variando normalmente entre 5.000 e 7.000 kcal/Nm³ (CIBIOGAS, 2018; OLIVEIRA, 2009).

Na Tabela 2 há um comparativo entre o poder calorífico do biogás com o de outros gases e na Tabela 3, um comparativo em termos de equivalência energética.

Tabela 2 - Comparação do poder calorífico do biogás com o de outros gases

Gás	Poder Calorífico (kcal/Nm³)
Biogás	5.500
Butano	28.000
Gás de cozinha (GLP)	25.775
Gás natural	7.600
Metano	8.500
Propano	22.000

Fonte: (LIMA e PASSAMANI, 2012, p. 31).

Tabela 3 - Equivalência energética de 1m³ do biogás com outros combustíveis

Gasolina	Gasóleo	Biodiesel	GLP	Eletricidade	Lenha	Pellets Madeira
0,61 L	0,7 L	0,55 L	0,45 kg	6,9 kWh	1,538 kg	0,304 g

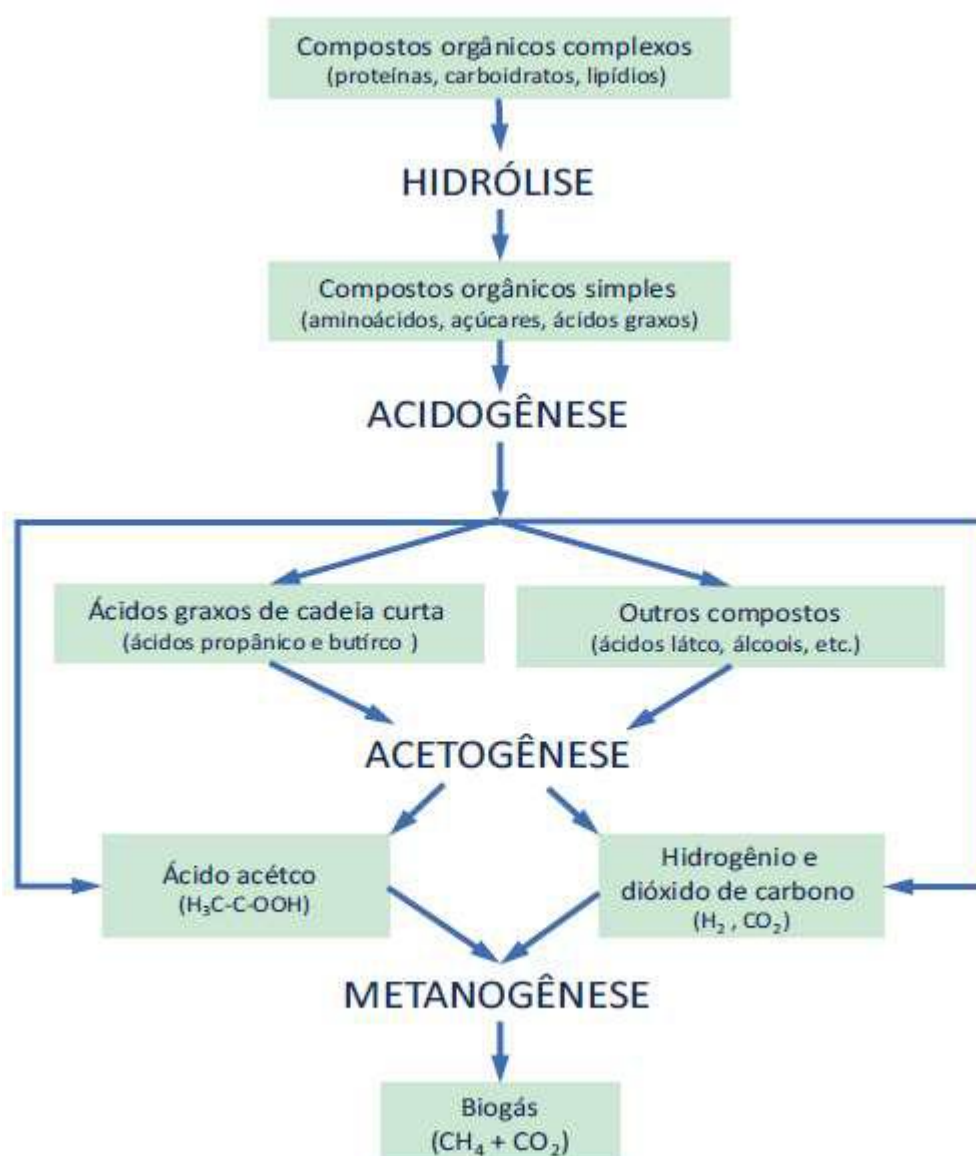
Fonte: (LIMA e PASSAMANI, 2012, p. 31).

3 PROCESSOS DE PRODUÇÃO E MATÉRIAS-PRIMAS

3.1 Digestão anaeróbia

O processo bioquímico realizado na produção de biogás é a digestão anaeróbia. Esse processo consiste na decomposição de matéria orgânica constituinte do substrato em ambiente sem oxigênio (FNR, 2010). Abaixo, há um detalhamento de cada etapa do processo.

Figura 1 - Representação esquemática das etapas da digestão anaeróbia



Fonte: (COELHO, GARCILASSO, *et al.*, 2018).

- 1. Hidrólise:** Bactérias hidrolíticas presentes no biodigestor liberam enzimas com objetivo de converter proteínas em aminoácidos, hidratos de carbono

em açúcares simples e álcoois e graxas em ácidos graxos. Esta etapa permite que os microrganismos absorvam o material orgânico nas próximas etapas e pode ocorrer tanto na presença quanto ausência de oxigênio.

2. **Acidogênese:** Nesta fase, bactérias fermentativas acidogênicas são responsáveis por decompor os compostos formados na etapa anterior em ácidos graxos voláteis como ácidos acético, propiônico e butírico, além de outros compostos como ácido lático e álcoois.
3. **Acetogênese:** Microrganismos oxidam os ácidos graxos e álcoois para formar ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. O ponto crítico é a proporção de H_2 , pois em altas concentrações pode inibir a conversão dos substratos e, conseqüentemente, impedir a conclusão do processo.
4. **Metanação:** Na última etapa do processo, os substratos advindos da acetogênese são convertidos em metano por bactérias de caráter anaeróbio (COELHO, GARCILASSO, *et al.*, 2018; FNR, 2010; KARLSSON, KONRAD, *et al.*, 2014).

3.2 Parâmetros operacionais

Um processo biológico, de forma geral, é muito sensível a alterações nos parâmetros do sistema. No caso da biodigestão, mudanças na temperatura, no pH, na concentração de oxigênio e composição do substrato presentes no meio podem reduzir drasticamente a eficiência do processo (MANFRON, 1991).

- a) **Temperatura:** Mudanças na temperatura impactam diretamente na metanogênese, podendo causar desequilíbrio nas culturas dos microrganismos responsáveis. Classificam-se as bactérias e, conseqüentemente, os processos de três formas quanto a este parâmetro: psicofílicas (operam em faixa inferior a 20 °C), mesofílicas (operam na faixa entre 20 e 45 °C) e termofílicas (operam na faixa de 45 a 60 °C). As bactérias devem ser selecionadas de acordo com os intervalos a serem trabalhados, que devem ser respeitados para que o processo não seja interrompido.
- b) **pH:** As bactérias hidrolíticas e acidogênicas desenvolvem plenamente suas atividades na faixa de pH entre 5,2 a 6,3, enquanto as acetogênicas e metanogênicas dependem de pH neutro, entre 6,5 e 8. Uma maneira de

estabilizar este parâmetro é incluir uma solução do tampão, como carbonatos dissolvidos.

- c) **Concentração de oxigênio:** Como já mencionado, as bactérias metanogênicas são estritamente anaeróbicas, produzindo apenas CO₂ caso haja presença de oxigênio no meio reacional.
- d) **Composição do substrato:** Há uma relação direta entre a quantidade de matéria orgânica disponível na fonte e o potencial de produção de biogás. Além disso, é importante que haja homogeneidade no substrato para que não haja diminuição no contrato entre ele e as bactérias, pois, caso não estejam devidamente misturados, os nutrientes estarão disponibilizados em camadas distintas (COELHO, GARCILASSO, *et al.*, 2018; MACHADO, 2013).

3.3 Principais Matérias-Primas e suas formas de aproveitamento

Uma das maiores vantagens associadas à produção de biogás é a grande variedade de matérias primas a partir das quais ele pode ser produzido. Em geral, descartes de outras atividades produtivas, agrossilvopastoris ou industriais, que teriam grandes chances de causar impactos ambientais negativos caso não fossem devidamente tratados e possuem baixíssimo valor agregado (OLIVEIRA, 2009).

A escolha do substrato é de extrema importância no processo de formação do biogás, influenciando diretamente nos indicadores qualitativos e quantitativos do produto gerado. Os critérios a seguir são principais a serem avaliados, sendo comuns em todas as matérias-primas utilizadas nas plantas:

- a) **Composição:** o substrato escolhido deve atender às demandas energéticas dos microrganismos envolvidos nos processos enzimáticos. Alguns componentes cruciais são oligoelementos e vitaminas. Um fator chave é a relação carbono: nitrogênio (C:N), que deve estar alta (ou seja, com o carbono superior ao nitrogênio) a fim de que a inibição das bactérias seja evitada. A relação considerada ideal está na faixa 20-30:1 no início do tratamento e 10-13:1 ao final. Outros tópicos avaliados são o percentual de sólidos totais (entre 7% e 10%) e a quantidade de água no composto (ideal que haja o mínimo de diluição possível);

- b) Toxicidade:** caso haja contaminação, o processo será inibido e a carga será perdida, por isto a importância da avaliação deste indicador;
- c) Granulometria e solubilidade:** substratos menores em tamanho são mais solúveis e, por conseguinte, dispõem de maior disponibilidade de material orgânico e entregam maior eficiência. Por este motivo, uma etapa de pré-tratamento é inserida com o intuito de desintegrar a matéria – como exemplo, existem a moagem, a utilização de misturados e a decomposição química por meio da adição de ácidos, bases e enzimas hidrolíticas (KARLSSON, KONRAD, *et al.*, 2014).

A seguir, são explorados os principais substratos na produção do biogás e os processos vinculados a eles.

3.3.1 Resíduos Sólidos Urbanos e Aterros Sanitários

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define os resíduos sólidos urbanos (RSU) como aqueles que se encontram nos estados sólido ou semissólido e têm como origem indústrias, domicílios, hospitais, comércios, agricultura, serviços e varrição urbana (COELHO, GARCILASSO, *et al.*, 2018). Vale destacar o diferencial na composição desta matéria prima no Brasil – pesquisas apontam um percentual de até 60% maior em material orgânico se comparado com o RSU alemão, provando seu maior potencial de geração energética.

Há 3 principais tipos de destino final para estes resíduos: vazadouros a céu aberto (também conhecido como “lixões”), aterros controlados e aterros sanitários, sendo os dois primeiros mais ofensivos ao meio ambiente (FIGUEIREDO, 2011). No cenário nacional, os aterros, principalmente os sanitários, têm ganhado mais força ao longo dos anos e serão abordados em maiores detalhes no próximo tópico.

Abaixo, na Tabela 4, há um resumo das principais tecnologias utilizadas no processo de produção do biogás utilizando como base os RSU.

Tabela 4 - Tecnologias para produção de biogás com resíduos municipais

	DIGESTÃO ANAERÓBIA SECA DESCONTÍNUA GARAGEM	DIGESTÃO ANAERÓBIA SECA CONTÍNUA	DIGESTÃO ANAERÓBIA ÚMIDA CONTÍNUA CSTR
Requisitos	Substratos mistos relativamente secos, pouco selecionados, com grande quantidade de impurezas.	Substrato misto separado com trituração e, eventualmente, umidificação com água.	Substratos com teor de umidade mais alto, bem separados, nível aceitável de impureza <5%.
	Sólidos Totais > 35%	Sólidos Totais > 25%	Sólidos Totais < 15%
	Amplamente aplicáveis para RSU		Aplicação limitada
Vantagens	Eficiente forma de tratamento de resíduos com a oportunidade de aproveitamento de biogás. Utilizável como processo termofílico com a higienização do material digerido.		
	Em comparação com a digestão contínua: Pouca preparação do substrato. Baixa utilização de energia e equipamentos. Tecnologia modular.	Em comparação com a digestão descontínua: Maior eficiência energética. Alta estabilidade do processo. Controle das emissões de metano.	Em geral: Alta taxa de produção de gás. Alta estabilidade de processo. Controle das emissões de metano. Material digerido utilizável na agricultura.
Desvantagens	Material digerido não aplicável na agricultura em alguns países.		
	Demanda de área relativamente alta. Maiores emissões de metano, com conseqüente menor aproveitamento energético. Grande quantidade de resíduo gerado e transporte caro.	Desgaste dos equipamentos mecânicos. Necessidade de alimentação contínua, de armazenagem dos resíduos e, conseqüentemente, custos e logística exigentes.	Separação e preparação do substrato muito exigentes. Desgaste dos equipamentos mecânicos. O fluxo homogeneizado exige volume de armazenamento. O desaguamento do material digerido cria grande quantidade de efluente líquido que exige tratamento

Fonte: Adaptado de (JENDE, PLATZER, *et al.*, 2015, p. 49).

Aterros Sanitários

Principal forma de tratamento do lixo no Brasil e um dos modelos mais conhecidos no mundo, o aterro sanitário é um espaço isolado que permite o alojamento de resíduos sólidos sem a contaminação do ambiente ao redor. Algumas medidas tomadas para garantir tal segurança são a impermeabilização do solo e a criação de um sistema de drenagem de líquidos. Desta maneira, os líquidos lixiviados não infiltram no solo e, conseqüentemente, não poluem os lençóis freáticos (FIGUEIREDO, 2011).

Nesta espécie de reator biológico o biogás de aterro é formado em duas etapas. A primeira etapa é aeróbia e ocorre durante a disposição do lixo, quando microrganismos consomem em alta velocidade o oxigênio do meio. A segunda é a digestão anaeróbia, processo detalhado anteriormente no item 3.1 e que acontece de forma mais lenta e apenas é possível devido às alterações no ambiente causadas pela fase anterior. O gás produzido contém majoritariamente metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de hidrogênio (H_2), gás sulfídrico (H_2S), amônia (NH_3), nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2) em menores quantidades (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2012).

A captação do gás produzido se dá por meio de um sistema formado por poços de coleta e tubos condutores, além de sistemas de compressão que trabalham com pressão negativa para realizar a transmissão do produto. O sistema é exemplificado na Figura 2. Uma tecnologia também utilizada (com menor frequência, porém, devido ao alto custo) é a inclusão de uma membrana impermeável protetora, que tem como função impedir a perda do biogás produzido para a atmosfera (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 2 - Tubos de coleta de gás



Fonte: (FIGUEIREDO, 2011, p. 58).

3.3.2 Efluentes Industriais

As indústrias de alimentos e bebidas são as principais emissoras de compostos orgânicos. O setor sucroalcooleiro se destaca por produzir um volume considerável de vinhaça, resíduo líquido ou pastoso e rico em sólidos orgânicos e minerais (COELHO, GARCILASSO, *et al.*, 2018).

Reatores de mistura como o CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor* ou reator contínuo do tipo tanque agitado) avançado e o UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor* ou reator anaeróbio de leito fluidizado) são comumente utilizados na digestão desses efluentes, além das lagoas anaeróbias cobertas. Um comparativo entre as tecnologias mencionadas é apresentado na Tabela 5 (JENDE, PLATZER, *et al.*, 2015).

Tabela 5 - Tecnologias para produção de biogás na agroindústria

	CSTR Versão Avançada	Lagoa Anaeróbia intensificada	UASB
Requisitos	Substratos líquidos/pastosos ou que se tornem líquidos (ST 15%-20%).	Substratos líquidos (ST<5%), alimentação contínua ou descontínua.	Substratos líquidos (ST<300 mg/L).
	Utilização de substratos sólidos e co-substratos líquidos, ricos em energia.	Adaptação das lagoas sobrecarregadas e/ou não cobertas para a utilização de biogás.	Efluentes com alta carga orgânica, com poucos sólidos ou sólidos sedimentáveis.
Vantagens	Eficiência do tratamento de resíduos com a oportunidade de utilização de biogás		
	Em comparação com as lagoas: mais compacto, possível aquecer para tratamento meso e termofílico mais controlável.	Em geral custos relativamente baixos, construção rápida e despesas operacionais moderadas. Não suscetível à corrosão.	Em comparação com CSTR: extremamente compacto, maior eficiência com alta produção de biogás, logo (grânulos) concentrado e separado do efluente. Cobertura pequena, operação/ controle mais fácil.
Desvantagens	Nenhuma (para essa aplicação, sem concorrência).	A maior demanda de área e aplicação depende do lençol freático. O isolamento não é possível (perda de calor do processo).	Limitado a poucos tipos de efluentes. Para aproveitamento do potencial, a operação exige um monitoramento mais rígido (vazão, pH e temperatura).

Fonte: (JENDE, PLATZER, *et al.*, 2015, p. 40)

3.3.3 Resíduos Agrossilvopastoris

Os substratos da agropecuária, tanto de origem vegetal quanto animal, podem ser utilizados como fontes em uma planta de biogás. Alguns exemplos são culturas dedicadas de milho, de batata e de mandioca, resíduos das safras e até mesmo esterco animal. Todos estes elementos possuem um fator em comum: alto teor de matéria orgânica em suas composições, em específico, de carboidratos, como açúcares e amidos (JENDE, PLATZER, *et al.*, 2015).

Analisando os dejetos animais, os mais utilizados são os provenientes de suínos, bovinos e da avicultura. A reutilização de material digerido é possível, sendo avaliadas anteriormente as condições sanitárias e as proporções de nutrientes como nitrogênio e fósforo. Alguns pontos a serem observados na produção brasileira são em relação à diluição dos substratos, pois a lavagem dos meios nos quais os animais são criados com água sob pressão podem reduzir o teor de sólidos totais do substrato, tendo como impacto a redução na eficiência da planta (JENDE, PLATZER, *et al.*, 2015).

A fim de obter plantas mais eficientes, utiliza-se da técnica da co-digestão, na qual combinam-se substratos distintos no mesmo reator. Um exemplo de co-substratos com efeitos comprovados é a mistura de resíduos sazonais da agroindústria e de estrume (FNR, 2010; JENDE, PLATZER, *et al.*, 2015).

O reator de mistura contínua (CSTR) e as lagoas anaeróbias cobertas são algumas das tecnologias de maior destaque atualmente na produção de biogás de origem agropecuária. A Tabela 6 lista as diferentes vantagens e desvantagens para cada um desses métodos (JENDE, PLATZER, *et al.*, 2015). Nas áreas rurais o modelo de biodigestor mais utilizado é o LFA (Lagoa Coberta de Fluxo Ascendente), um exemplo de lagoa coberta. Sua estrutura promove maior eficiência (de 50% a 100%) quanto à remoção de carga orgânica e apresentam maior sucesso em regiões tropicais pois há uma manutenção de calor natural por conta do clima (COELHO, GARCILASSO, *et al.*, 2018).

Tabela 6 - Tecnologias para a produção de biogás na agropecuária

	CSTR Versão Básica	Lagoa Anaeróbia com Misturador	Lagoa Anaeróbia coberta (Clássica)
Requisitos	Substratos orgânicos líquidos e pastosos, ou sólidos que se tornam líquidos no processo da digestão anaeróbia, com concentração de Sólidos Totais (ST) de:		
	ST < 20%	ST < 15%	ST < 5%
Vantagens	Tecnologias de baixo custo para tratamento e aproveitamento energético de resíduos agropecuários. Equipamentos simples, implementáveis em todo o mundo. Preparação e mistura do substrato relativamente fáceis de executar.		
	Tecnologia comprovada de geração de biogás com substratos agropecuários. Projeto e construção com valores padrões. Possível controle eficiente do processo por meio de mistura otimizada, aquecimento e isolamento do reator.	Possível adaptar as lagoas existentes para o aproveitamento de biogás. Sem limitação de tamanho. Volumes grandes oferecem maior estabilidade para o processo.	Método simples estabelecido e comprovado. Custos relativamente baixos, ampliável em etapas no método intensivo. Projeto e construção com valores padrões.
Desvantagens	Limite de aplicação para substratos com altos teores de impurezas de natureza flutuante ou rico em fibras.		
	Manutenção complexa dos equipamentos. Maiores Custos de operação e manutenção se comparados com os das lagoas.	Separação de sólidos necessária. Custos elevados com a membrana de cobertura. Membrana única oferece pouca resistência, podendo rasgar caso não esteja sempre cheia de gás	
		Em comparação com CSTR: mistura limitada; limitação de fixação de agitadores; grandes superfícies; pequenas profundidades. Demanda maior de espaço e tempo de construção.	Em comparação com os CSTR, com as lagoas com misturador e com lagoas intensificadas, têm menor eficiência de degradação e menor produção de biogás.

Fonte: Adaptado de (JENDE, PLATZER, *et al.*, 2015, p. 32; COSTA e VASCONCELOS, 2018, p. 15).

3.3.4 Lodo de Esgoto

O esgoto sanitário é composto, em média, por aproximadamente 99,9% de água e apenas 0,01% de matéria orgânica, apresentando uma diluição muito elevada do substrato, o que não é desejável conforme visto na seção 3.2. Por este motivo, é preferível utilizar o lodo de esgoto, um dos subprodutos emitidos no tratamento destes resíduos líquidos, como matéria prima na produção do biogás (JENDE, PLATZER, *et al.*, 2015).

Quando adotado o sistema de cogeração de energia, o biogás gerado para o aquecer os digestores e o secador de lodo, otimiza o processo, aumentando a eficiência e reduzindo custos operacionais (ARCADIS TETRAPLAN, 2010).

Os destaques nos tipos de reatores utilizados para estes processos estão no comparativo apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Tecnologias para produção de biogás no setor de saneamento

	LAGOA ANAERÓBIA	UASB OU RALF SECA CONTÍNUA	DIGESTOR DE LODO
Requisitos	Esgoto bruto, pré tratado somente com gradeamento.	Esgoto bruto, pré tratado com gradeamento, desarenador, caixa de gordura e peneira.	Lodo com alto valor energético (ST>3%) ou também com co-substratos em qualidade suficiente.
	Cobertura e coleta do biogás.		
Vantagens	<p>Tratamento de esgoto com eficiência de 60 a 70%, sem gasto de energia, com pouca produção de lodo e com oportunidade de utilização do biogás.</p> <p>Operação extremamente simples. Alta tolerância a variações de carga e de vazão.</p>	Extremamente compacto. Comparado a outras tecnologias, apresenta operação pouco exigente	<p>Aproveitar o valor energético de lodos e a possibilidade de usar co-substratos.</p> <p>Eficiente para estabilizar lodos com alto valor energético.</p> <p>Permite várias condições operacionais (meso ou termofílicas, digestão em duas etapas).</p>
Desvantagens	Ocupação de grandes áreas. Cobertura econômica e tecnicamente exigente. Possibilidade de geração de odores.	Baixa tolerância a grandes alterações hidráulicas e a cargas tóxicas. Formação de espumas. Para cumprir a legislação, o efluente necessita de um pós tratamento.	Nenhuma (para a aplicação sem concorrência).

Fonte: Adaptado de (JENDE, PLATZER, *et al.*, 2015, p. 56).

3.4 Tratamentos

O biogás bruto necessita de uma etapa de purificação específica de acordo com a aplicação desejada. Porém, de maneira geral, alguns componentes precisam ser tratados em qualquer situação.

Substâncias não combustíveis como água (H₂O) e dióxido de carbono (CO₂) são eliminadas por tornarem o processo de combustão menos eficiente, além de causar condensação nos dutos, comprometer as turbinas e formar soluções ácidas, promovendo a corrosão. O ácido sulfídrico (H₂S), se presente, causa perda de potência, falha de alimentação e combustão incompleta, impactando negativamente no rendimento e vida útil do motor térmico (LIMA e PASSAMANI, 2012).

Outros compostos que precisam ser eliminados do produto bruto são hidrocarbonetos pesados, siloxanos, oxigênio e amônia. As principais técnicas utilizadas para removê-los são a separação por catalisador de platina e paládio e a adsorção química em contatos de cobre. Além destas técnicas, a eliminação indireta ocorre durante as etapas de secagem, de dessulfurização e de purificação do metano (FNR, 2010).

A relação com os principais contaminantes e seus respectivos tratamentos pode ser vista na Tabela 8.

Tabela 8 - Principais contaminantes e tratamentos utilizados

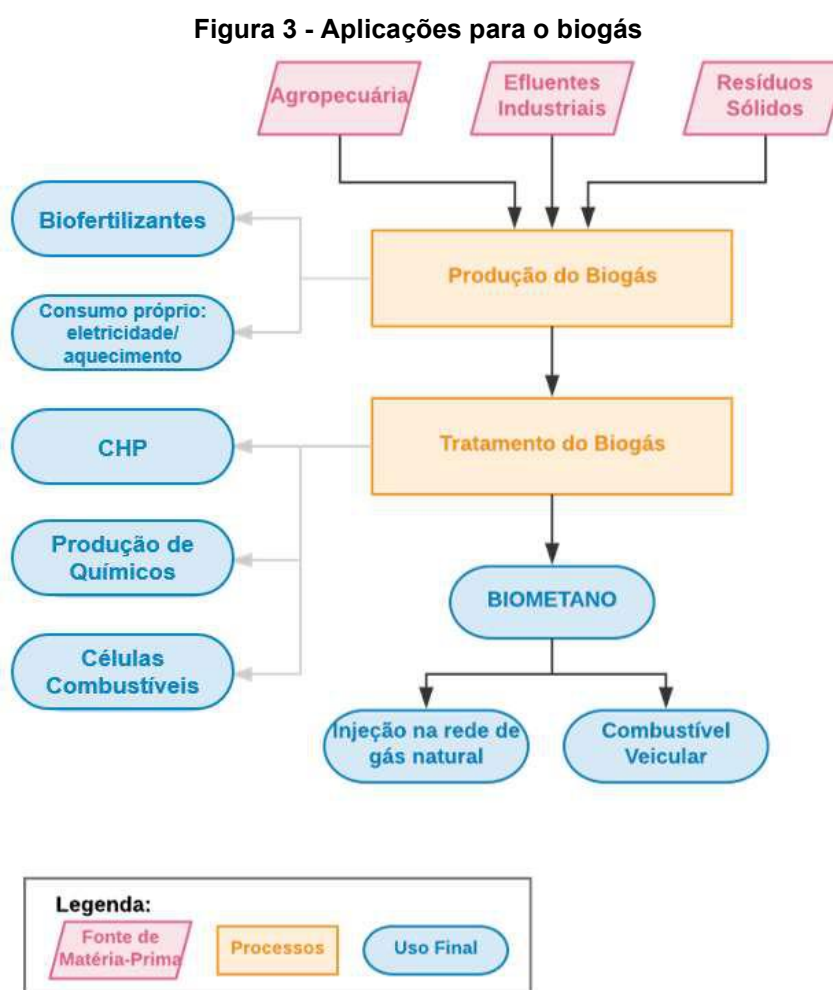
Necessidade de remoção	Tratamentos	Teor de CH ₄ possível
H₂S	Biodessulfurização no digestor	-
	Biodessulfurização externa	-
	Lavador biológico de gás	-
	Precipitação biológica de sulfeto	-
	Dessulfurização química interna	-
	Carvão ativado	-
CO₂	Adsorção com modulação de pressão (PSA)	> 97%
	Lavagem com água sob pressão	> 98%
	Tratamento com aminas	> 99%
	Processo de separação por membranas	> 98%
	Processo criogênico	> 98%
H₂O	Secagem por condensação	-
	Secagem por adsorção	-
	Secagem por absorção	-

Fonte: Adaptado de (COSTA e VASCONCELOS, 2018, p. 19).

4 PRINCIPAIS APLICAÇÕES

O biogás é um substituto eficiente para o gás natural uma vez que ambos podem ser utilizados para as mesmas aplicações (LIMA e PASSAMANI, 2012).

Na Figura 3, observa-se toda a cadeia de valor do biogás. Neste trabalho, serão apresentadas suas principais aplicações, a saber: geração de energia elétrica, de energia térmica, de biometano e suas utilizações finais e, por fim, os biofertilizantes, como ilustrado na figura a seguir.



Fonte: Adaptado de (COSTA e VASCONCELOS, 2018, p. 28).

4.1 Geração de Eletricidade

A primeira aplicação do biogás que será destacada neste trabalho é a geração de eletricidade. Isto é feito através de uma conversão energética, processo que transforma a energia química contida nas moléculas do gás em energia mecânica através de uma combustão controlada. A energia mecânica obtida, por sua vez, ativa

um gerador que tem como papel convertê-la em energia elétrica (LIMA e PASSAMANI, 2012).

Entre as principais tecnologias para aproveitamento energético de biogás, os motores de cogeração (CHP) apresentam um papel de destaque por possibilitar a exploração de 90% da energia contida no gás. Neste tipo de processo, motores à combustão de ciclo Otto (ignição por centelha) ou de ciclo Diesel (ignição por compressão) são acoplados a geradores de eletricidade, produzindo simultaneamente energias elétrica e térmica. O primeiro tipo de motor apresenta como vantagens as menores emissões e custos de manutenção, apesar do investimento para instalação ser mais alto. Já o segundo tipo de motor apresenta menor custo inicial, em detrimento de maiores impactos ambientais. Analisando a eficiência elétrica, os resultados se assemelham: enquanto nos motores Otto entregam produtividade na faixa de 34% a 45%, os motores Diesel variam entre 30% e 45% (FNR, 2010; JENDE, PLATZER, *et al.*, 2015).

A geração de eletricidade também pode ser proveniente de turbinas e microturbinas a gás. Comparando estas tecnologias com os modelos clássicos de conversão, os motores a combustão interna apresentam maior eficiência de conversão, apesar de serem maiores emissores (FIGUEIREDO, 2011).

4.2 Geração de Energia Térmica

Como mencionado no item anterior, os sistemas de cogeração produzem também energia térmica. Essas usinas são classificadas em dois tipos: as que produzem principalmente calor e as que têm como foco a eletricidade. Porém, o biogás também pode ser utilizado em queimadores para disponibilizar calor através de combustão, equipamentos estes que são conectados a caldeiras (FNR, 2010). Nestes sistemas, o biogás funciona como substituto da lenha, do carvão mineral ou vegetal e de óleos combustíveis (OLIVEIRA, 2009).

Alguns pré-requisitos técnicos são especificados para a aplicação deste tipo de processo: o gás deve apresentar umidade inferior a 60%, o teor total de compostos sulfurosos não deve ultrapassar 0,1%, a porcentagem de metano na composição necessita ser superior a 50% e a pressão deve apresentar variação linear (JENDE, PLATZER, *et al.*, 2015).

Os níveis de eficiência obtidos para as caldeiras de aquecimento estão na faixa de 85% a 95%, considerados, assim, satisfatórios. Se comparados aos CHPs,

percebe-se que, apesar de serem menos custosas, não são necessariamente melhores que a cogeração se levando em conta que somente um tipo de energia é produzido (JENDE, PLATZER, *et al.*, 2015).

4.3 Produção de Biometano

Define-se biometano como a mistura gasosa resultante do processo de *upgrading* do biogás, no qual são retirados umidade, CO₂, H₂S, siloxanos e outros contaminantes. Se comparado ao seu precursor, o biometano possui maior poder calorífico que o biogás, além de possuir características bem próximas às do gás natural, fato este que possibilita sua substituição como combustível em diversas aplicações. Por este motivo, o biometano é considerado um GNR, gás natural renovável. A Tabela 9 dispõe de um comparativo entre as composições dos dois gases (COELHO, GARCILASSO, *et al.*, 2018).

Tabela 9 - Composições típicas de biogás e biometano

Componentes	Biogás	Biometano
Metano (CH₄)	50% - 70%	90% - 95%
Dióxido de carbono (CO₂)	25% - 50% (vol.)	4%
Vapor de água (H₂O)	2% - 7% (vol.)	0
Sulfeto de hidrogênio (H₂S)	20 - 20.000 ppm	<20 ppm
Amônia (NH₃)	0 - 0.05% (vol.)	<0.002% (vol.)
Nitrogênio (N₂)	0 - 5% (vol.)	0 - 3% (vol.)
Siloxanos	0 - 50 mg/m ³	-

Fonte: Adaptado de (SANTOS, 2016, p. 8; COELHO, GARCILASSO, *et al.*, 2018, p. 86).

Uma das aplicações do biometano é a injeção na rede gás natural. Para isso, ele deve ser pressurizado a fim de atingir as recomendações técnicas desejadas. Além disso, para que esta utilização seja possível, necessita-se da existência de uma malha de gasodutos robusta – como é o caso da Alemanha, que será analisado adiante (FNR, 2010).

Outro uso importante é como combustível veicular, vantajoso por não exigir nenhuma modificação nos veículos que já operem com o gás natural fóssil. Apesar disso, outros combustíveis fósseis (como o diesel, por exemplo), tendem a ser mais vantajosos economicamente por apresentarem maior densidade energética. A título

de comparação, 1 litro de diesel equivale em potencial energético a 1000 litros de metano e 5 litros de metano comprimido a 200 bar (BECHER, 2016).

4.4 Produção de Biofertilizante

Os resíduos provenientes da degradação da matéria orgânica no processo do biogás também possuem valor. Se o substrato utilizado for de boa qualidade – sem uma alta concentração de dejetos e resíduos de material vegetal e de alimentos – seus nutrientes minerais estarão concentrados no produto final e poderão, assim, ser utilizados como biofertilizantes (KARLSSON, KONRAD, *et al.*, 2014).

Há algumas vantagens ao inserir este tipo de fertilizante em plantações agrícolas. A primeira delas é a disponibilização de maneira direta para as plantas de nutrientes como fósforo, potássio e magnésio, elementos essenciais para o crescimento. Além disso, é promovido enriquecimento e aumento da capacidade de tamponamento dos solos à longo prazo devido à presença de carbono e nitrogênio resultantes da digestão anaeróbia. Outra vantagem é a estimulação generalizada do crescimento microbiano na terra adubada, as tornando mais férteis, nutritivas e resistentes ao ataque de doenças. Em adição, outro benefício é o potencial de estocagem de carbono no solo quando se utiliza de um biofertilizante (KARLSSON, KONRAD, *et al.*, 2014).

Nas esferas ambiental e econômica, a substituição dos adubos de origem petroquímica também apresenta outros benefícios. Uma delas é a mitigação de poluentes oriundos de fertilizantes químicos, dentre eles GEEs, e a redução de custos com a importação de fertilizantes. Ademais, há a possibilidade de geração de renda extra para pequenos produtores com a comercialização deste subproduto e há um aumento na produtividade e no equilíbrio nutricional das plantas (SEBRAE, 2016).

Os biofertilizantes podem ser utilizados sem tratamento prévio: em geral, são usados em áreas próximas às imediações da usina de biogás, a fim de reduzir custos de transporte e armazenamento. Porém, é preferível que se inclua uma etapa de enriquecimento de nutrientes e redução do teor de água a fim de agregar maior valor ao produto. Um processo utilizado é o de separação de sólidos, que visa reduzir o sobrenadante e a camada de sedimentos armazenada, seguidos de compostagem e secagem, ambas visando a estabilização dos componentes orgânicos. A separação por membrana, evaporação e o esgotamento também são processos físicos que possuem o mesmo objetivo (FNR, 2010).

5 EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS

As vantagens da utilização de energias renováveis como o biogás têm chamado a atenção de países em diversos países. Seja pela abundância de matéria prima disponível em seus territórios ou pela necessidade em resolver os problemas relacionados à destinação de resíduos urbanos ou agrossilvopastoris, o uso deste gás de fonte natural tem crescido ao longo dos anos.

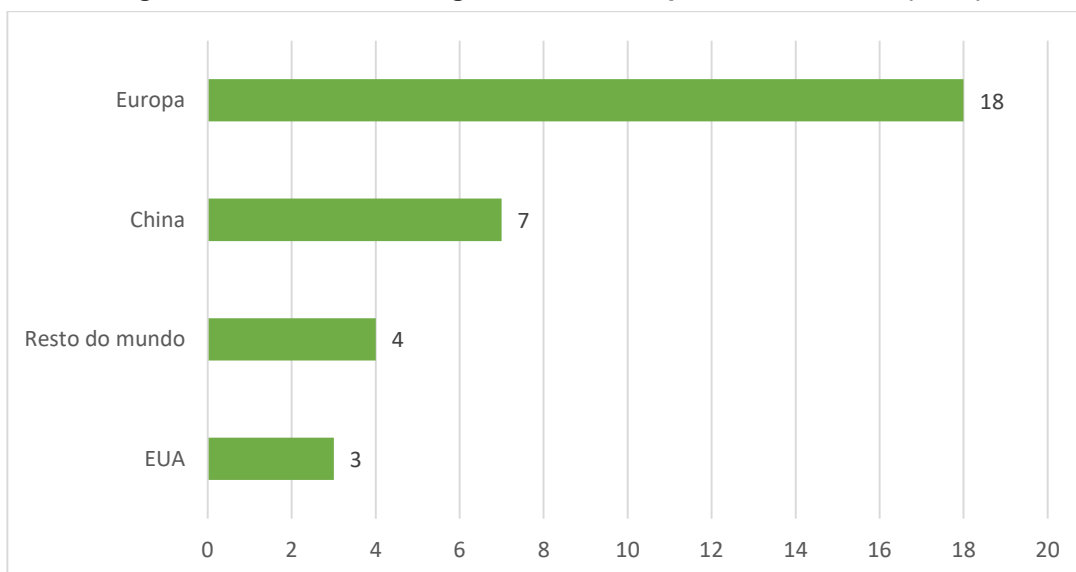
Neste contexto, a IEA criou um setor dedicado a bioenergia dentro do qual se encontra o *Task 37*, um grupo de trabalho destinado ao desenvolvimento sustentável da produção de biogás e de suas aplicações. Anualmente, os países membros se reúnem com intuito de compartilhar estatísticas setoriais, comparar seus volumes de produção e a distribuição das matérias primas utilizadas, avaliar o uso final do biogás produzido e as novas tecnologias envolvidas em seu processo e discutir as estratégias para alcançar as metas estabelecidas nos encontros anteriores (IEA, 2020).

Segundo dados apresentados no relatório anual da IEA sobre biogás e biometano, a produção mundial somada destes gases em 2019 foi de 32 Mtoe¹ (IEA, 2020). A título de comparação, também em 2019 foram produzidos cerca de 3.773 Mtoe de gás natural em escala global (IEA, 2021).

A Figura 4 mostra a distribuição da produção de biogás pelo mundo no ano de 2018. A liderança do continente europeu frente às outras potências mundiais fica bastante evidente. Esse destaque está associado ao estabelecimento de diretrizes e políticas voltadas para o incentivo do biogás e do biometano comuns a todo o bloco econômico e específicas em alguns países (EUROPEAN COMMISSION, 2020).

¹O toe ou tonelada de petróleo equivalente é uma unidade de medida utilizada para comparar o potencial de diferentes fontes energéticas, indicando a quantidade aproximada de energia que pode ser extraída de uma tonelada de petróleo bruto. O Mtoe equivale a 10⁶ toe (EUROSTAT, 2020).

Figura 4 - Produção de biogás nos maiores produtores – 2018 (Mtoe)



Fonte: Adaptado de (IEA, 2020, p. 11).

O cenário futuro para o biogás é promissor: espera-se que em 2040 a produção efetiva seja 50% maior que a atual. Tal crescimento será baseado na redução do custo das plantas e no aumento da disponibilização global de matérias primas. Estes números são bastante positivos, visto que possibilita uma utilização de biogás de forma mais homogênea em diferentes continentes do globo se comparado ao quadro atual (IEA, 2020).

Nos próximos itens serão feitos estudos de casos do continente europeu, focando em dois países que se destacam pelo volume de biogás produzido, pela quantidade de plantas em seu território, pelas políticas adotadas e pelas tecnologias desenvolvidas.

5.1 União Europeia

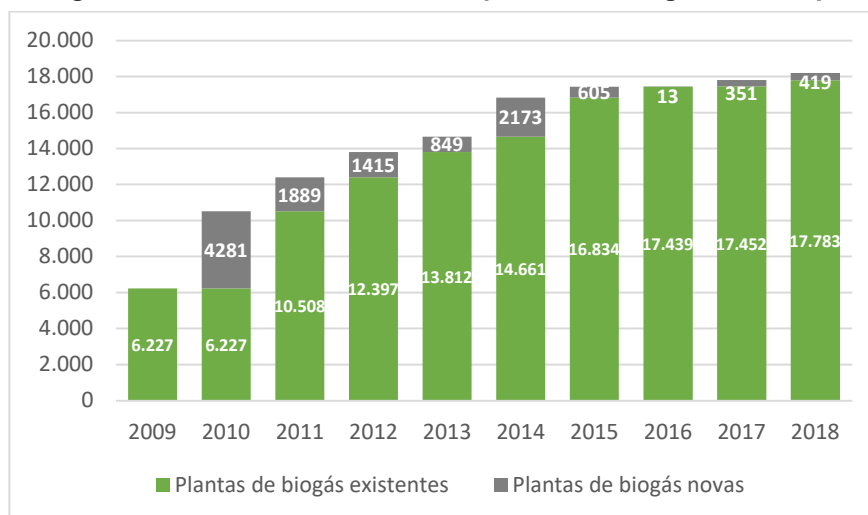
Ao longo dos últimos anos, o mercado de biogás tem crescido na União Europeia (UE). Esta expansão tem como base uma estratégia política de incentivo ao uso de energias renováveis em prol da redução dos GEE, sobretudo a partir de abril de 2009, a partir da criação do *National Renewable Action Plan (NRAP)*, plano de referência para os países pertencentes ao bloco econômico. Dentro do NRAP foi aprovado o *2020 Climate & Energy Package*. Esta política pública definiu como objetivos a serem atingidos até o final do ano de 2020: (i) cortar em 20% a emissão de GEE em relação aos números de 1990; (ii) garantir que 20% da energia europeia provenha de fontes renováveis; (iii) crescer em 20% a eficiência energética; (iv) todos

os Estados-membros devem obter 10% de seus combustíveis utilizados para transportes a partir de fontes de energia renováveis (FER). Foi estabelecido também que o biogás deveria representar cerca de 8% da matriz energética entre as fontes renováveis escolhidas. Algumas destas metas foram atingidas com sucesso, sendo revistas para 2025 e 2030 (EUROPEAN COMMISSION, 2020; PARLAMENTO EUROPEU, 2020).

Ainda em 2009, no mês de junho, foi estabelecida a Diretiva de Energias Renováveis (2009/28/CE), atualizada em dezembro de 2018 sob o nome de RED II (2018/2001/EU). Esta política promoveu a utilização de energia proveniente de FER através de medidas como: controle do consumo de energia de origem não-renovável, incentivo ao uso de energias renováveis como combustível em transportes públicos e o investimento em desenvolvimento de novas tecnologias e qualificação de mão de obra. Com a atualização até 2030 o percentual de energia proveniente de fontes renováveis no bloco econômico deve ser de 32%. Para o biogás e biometano, a meta é de 3,5% de crescimento ao ano (UNIÃO EUROPEIA, 2020).

A relação de políticas mencionadas teve como consequência uma forte concentração de uso de biogás neste bloco econômico, se comparado ao resto do globo, bem como um crescimento de 186% na quantidade de plantas entre os anos de 2009 e 2018, como mostra a Figura 5. As matérias primas mais utilizadas nestas plantas são os dejetos da agricultura, esgotos e aterros, respectivamente, e os principais usos são como fonte de energia elétrica e térmica (COELHO, GARCILASSO, *et al.*, 2018).

Figura 5 - Evolução do número de plantas de biogás na Europa



Fonte: Adaptado de (EBA, 2020, p. 10).

Dentre os países europeus, escolheram-se dois casos para estudo neste trabalho: a Alemanha, líder mundial na produção de biogás e a Suécia, referência em novas tecnologias e políticas públicas de incentivo, sobretudo referentes ao biometano.

5.1.1 Alemanha

Dentre os países europeus, a Alemanha é o que mais se destaca em relação à produção do biogás e à participação de energias renováveis em sua matriz energética. Isto foi possível graças a um intenso sistema de subsídios através de programas e leis de incentivo.

O início do desenvolvimento deste mercado no país se deu nos anos 1970 a partir da crise do petróleo, em 1973, ocasionada pelos conflitos entre as nações árabes e os países que apoiavam Israel na guerra do *Yom Kippur* (HIJO, 2015). Devido aos altos preços dos barris na época, o biogás passou a se tornar um possível substituto e, com isso, plantas utilizando estrume como matéria prima começaram a ser construídas. Nas décadas seguintes, entretanto, não houve crescimento significativo da demanda ou incentivos públicos relevantes, tendo o volume produtivo ficado estagnado (THRAN, SCHAUBACH, *et al.*, 2020).

Nos anos 1990, o crescimento foi apoiado pelos primeiros subsídios governamentais, permitindo a exploração de substratos como outros resíduos orgânicos e dejetos da agricultura. Durante os anos 2000, o crescimento foi mais acelerado, visto o cenário de redução na emissão de GEE após os compromissos assumidos sob o Protocolo de Kyoto, acordo internacional firmado entre países da ONU em vista de mitigar os impactos do aquecimento global (THRAN, SCHAUBACH, *et al.*, 2020).

Nos anos subsequentes, os incentivos governamentais apoiados em marcos regulatórios se intensificaram, sobretudo amparando os pequenos produtores. Como resultado, a quantidade de plantas instaladas dobrou entre os anos de 2004 e 2008. Com as atualizações realizadas na Lei das Fontes Renováveis de Energia, o mercado pôde se consolidar no período 2009-2017. Desde então, o governo tem aquecido o setor oferecendo licitações para pequenos e grandes produtores, apesar de ter reduzido os valores das taxas de incentivo à produção (THRAN, SCHAUBACH, *et al.*, 2020).

Um resumo com os principais marcos regulatórios e políticas adotadas encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Resumo das principais políticas de incentivo ao biogás na Alemanha

Medida	Ano	Conteúdo
Lei das Fontes Renováveis de Energia (EGG em alemão)	2000 (revisada em 2004, 2009, 2012, 2014 e 2017)	Determina tarifas <i>feed-in</i> ² para eletricidade produzida a partir de fontes renováveis. Na atualização de 2017, estabeleceu pagamentos específicos a geradores de eletricidade a partir do biogás.
Decreto das tarifas da rede de distribuição de gás	2005 (revisada em 2008)	Define critérios sobre a definição de tarifas de acesso aos gasodutos para a injeção de biometano nas redes de distribuição. Após a revisão, passou a incluir o pagamento adicional de 0,7 EUR/kWh ao fornecedor de biogás pelo operador de rede devido à redução de custos promovida pela descentralização.
Decreto sobre as cotas de biocombustíveis	2006 (revisada em 2009)	Estabelece as quotas mínimas para incorporação de biocombustíveis ao petróleo e diesel. O biometano foi incluído como biocombustível permitido a partir da revisão feita em 2009.
Decreto de acesso aos gasodutos	Revisado em 2010	Garante acesso preferencial aos fornecedores de biometano à rede, que arcam com apenas 25% dos custos de conexão enquanto o resto deve ser pago pelos operadores de gasodutos, que devem assegurar no mínimo uma disponibilidade de 96% da rede e preferência no transporte.
Lei do Calor obtido de Fontes Renováveis	2009 (revisada em 2011)	Segundo essa Lei, 14% da demanda de calor deve ser fornecida por fontes renováveis. Também determina que todos os edifícios construídos a partir de janeiro de 2009 devem usar essas fontes para o aquecimento, até que 30% da demanda seja suprida pelo biogás.
Decreto sobre a geração de biocombustíveis a partir da biomassa	2010	Determina que somente os projetos que usem biomassa de áreas não protegidas e que reduzam as emissões de GEE em comparação aos combustíveis fósseis são passíveis de receber incentivos financeiros e entrarem nas quotas de biocombustíveis.

Fonte: Adaptado de (IEA, 2020, p. 33; VEIGA, 2016, p. 75).

Atualmente, 14% de todo o consumo de energia alemã é proveniente de fontes renováveis. As projeções futuras deste percentual são ainda maiores: 45% em 2025,

² Tarifas *feed-in* são taxas de pagamento fixas fornecidas pelo governo aos geradores de energia renovável. Essas tarifas são determinadas em contratos de longo prazo e permitem o desenvolvimento de unidades produtivas a partir do barateamento dos custos (ANEEL, 2010; APPUNN e WEHRMANN, 2019).

60% em 2035 e 80% em 2050. Analisando apenas a produção de biogás, observa-se que mais de 90% utilizaram como substrato resíduos da agricultura, destacando-se o milho (69%), capim (14%) e cereais (6%) (FNR, 2020). O status das plantas no ano de 2018 pode ser visto na Tabela 11.

A forte concentração de plantas relacionadas a práticas de agricultura está associada à grande representatividade deste setor na economia alemã e à preocupação do governo quanto a sustentabilidade dos resíduos de biomassa gerados (THRAN, SCHAUBACH, *et al.*, 2020).

Tabela 11 - Status das plantas de biogás na Alemanha em 2018

Tipo de planta	Número de plantas	Produção de energia (GWh/ano)	Produção de energia (Mtoe/ano)
Estação de Tratamento de Esgoto	1.274	3.657	0,31
Resíduo de biomassa	336	1.257	0,11
Agricultura	8.270	40.655	3,49
Biometano	203	6.167	0,53
Aterro Sanitário	468	422	0,03
Total geral	10.551	52.158	4,47

Fonte: Adaptado de (IEA, 2020, p. 34).

Em 2018, o país produziu 52.158 GWh ou 4,47 Mtoe de biogás, com 10.551 plantas ativas. Em termos de consumo, o volume total foi de 56.608 GWh ou 4,86 Mtoe, e teve como principais formas de uso a geração de energia elétrica e térmica. A utilização como combustível veicular apresentou leve queda em relação ao ano anterior (IEA, 2020). O detalhamento destes números se encontra na Tabela 12.

Tabela 12 - Utilização de biogás na Alemanha em 2018

Utilização	Utilização (GWh/ano)	Utilização (Mtoe/ano)	%
Eletricidade	33.345	2,86	58
Calor	18.813	1,62	33
Combustível veicular	389	0,03	1
Flaring³	4.061	0,35	7
Total geral	56.608	4,86	100

Fonte: Adaptado de (IEA, 2020, p. 35).

Analisando a redução na emissão de GEE, a produção anual mencionada representou uma economia de 16.135 toneladas equivalentes de CO₂, 25% do total das emissões poupadas pelo uso de biocombustíveis (FNR, 2020).

³ *Flaring* é um sistema de queima do excesso de gás emitido industrialmente a fim de reduzir o risco de explosões (COELHO, GARCILASSO, *et al.*, 2018).

A título de comparação, também em 2019 foram consumidos cerca de 63,35 Mtoe de gás natural no país (IEA, 2021), valor 1.203% acima do volume consumido de biogás, um número bastante preocupante visto que a Alemanha é um país de referência na produção de biogás. Estes números mostram que ainda existe uma grande dependência de combustíveis fósseis no país, não somente do GN, mas também do petróleo e do carvão. Tal cenário impede que a redução nas emissões de GEE promovidas por fontes renováveis seja ainda maior (FNR, 2020).

Um ponto chave que também foi imprescindível para o alcance dos resultados no país foi o compromisso firmado no Acordo de Paris. Em novembro de 2016, o governo alemão lançou o *Climate Action Plan 2050*, um plano de estratégias que estima uma redução de 55% nas emissões de GEE até 2030, percentual mais ambicioso que o da União Europeia como um todo (BMU, 2021).

Foi feita uma estimativa a partir da produção atual de biogás e da consideração de que o crescimento médio de 11% na capacidade produtiva do país dos últimos anos (FNR, 2020) se estenderá até 2030 com intuito de analisar se as metas do plano tendem a ser atingidas. Um resumo destes valores pode ser visto na Tabela 13. O volume de consumo de biogás alemão será de 17,00 Mtoe/ano, possibilitando uma redução de 27% na utilização do gás de origem fóssil, um valor bem abaixo da meta estipulada.

É importante destacar que para essa estimativa foi considerada apenas a redução de GEE proveniente de gás natural, que ele pode ser totalmente substituído pelo biogás e que o crescimento de novas instalações produtivas de biogás será o mesmo. As possíveis emissões de GEE proveniente do uso do biogás também foram desconsideradas. Além disso, não foi considerada a taxa de redução de consumo no gás natural e de outros combustíveis fósseis, nem levados em conta outros substitutos renováveis. De qualquer forma, é possível concluir que a transformação da matriz energética pode ser um desafio até mesmo para o maior produtor de biogás no mundo.

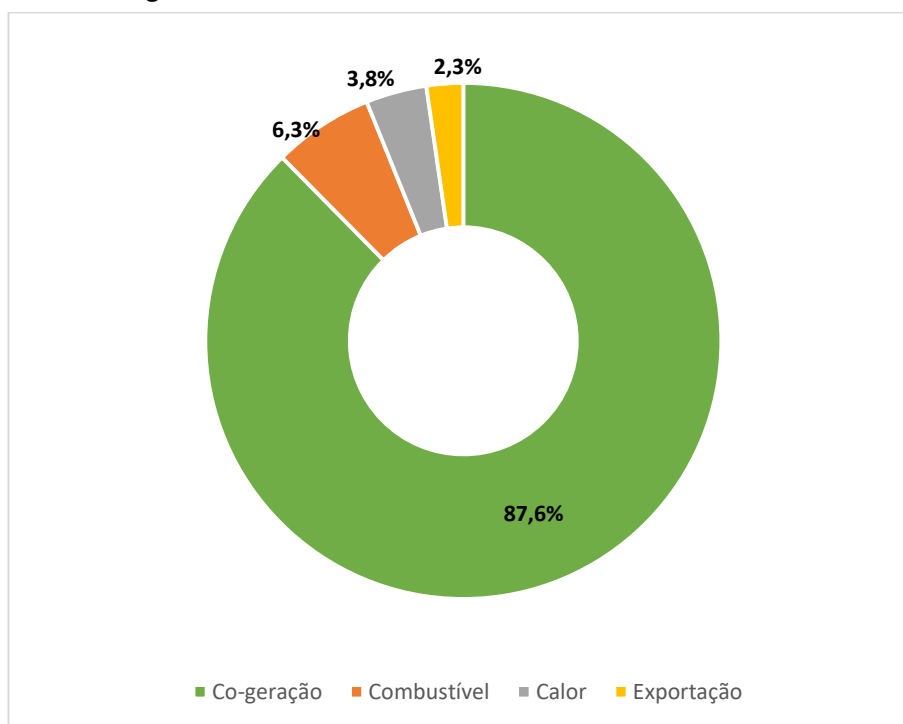
Tabela 13 - Estimativa do consumo de biogás e gás natural na Alemanha em 2030

	Biogás	Gás Natural
Consumo atual (Mtoe/ano)	4,86	63,35
Taxa de crescimento anual	11%	-
Consumo estimado em 2030 (Mtoe/ano)	17,00	46,35
Redução de GEE		-27%
Meta		-55%
Crescimento total de biogás		101%

Fonte: Elaboração própria com dados de (FNR, 2020, p. 41; IEA, 2020, p. 34; IEA, 2021).

Sob a ótica do biometano, o volume do biocombustível produzido no país representa 75% do volume total de biometano produzido mundialmente, tendo seu principal uso na injeção na rede de gás natural e misturado ao próprio GN para geração de energia (EBA, 2016). Com isso, apenas 389 GWh, ou 0,03 Mtoe, da produção de biometano do último ano foi destinada a mobilidade, número bem inferior a outros países do continente, mostrando que há um enorme potencial de crescimento no segmento em questão a fim de contribuir para as reduções estimadas de GEE no setor veicular (IEA, 2020). A distribuição dos usos do biometano alemão é vista na Figura 6.

Figura 6 - Mercado de biometano na Alemanha



Fonte: Adaptado de (FNR, 2020, p. 45; IEA, 2020, p. 34).

Apesar de ser o país com maior produção em nível mundial, a Alemanha ainda está distante de atingir seu potencial total em relação ao biogás. Todo o volume produzido em 2018 representa apenas 1% do total de energia consumida no país (FNR, 2020). Além disso, estima-se um potencial produtivo de 155 TWh/ano ou 13,33 Mtoe/ano, valor 198% acima do que é de fato gerado (IEA, 2020).

Para que seu potencial seja plenamente atingido, a IEA (2020) recomenda a atualização de processos produtivos para que algumas matérias primas sejam

exploradas em maior quantidade, como colheitas destinadas a produção energética e pastagens.

5.1.2 Suécia

Apesar de não figurar entre os 5 principais países produtores de biogás, a Suécia se destaca pela alta eficiência em desenvolver e aplicar medidas para a utilização de energias renováveis, sobretudo o biogás e o biometano.

A produção de biogás no país teve início nos anos 1960 com o objetivo de reduzir o volume de efluentes emitidos nas estações de tratamento de água e esgoto. Sua demanda como recurso energético surgiu na década de 1970, no cenário de crise mundial do petróleo. Nas duas décadas subsequentes, aumentou-se a criação de plantas que utilizassem de aterros sanitários como matéria prima (VEIGA, 2016).

Assim como no caso alemão, o crescimento deste mercado na Suécia foi possibilitado por um extenso apoio governamental de subsídios e regulações. Um resumo com as principais políticas e marcos regulatórios pode ser visto na Tabela 14. Em adição, a Tabela 15 mostra as taxas de CO₂ no país.

Tabela 14 - Resumo das principais políticas de incentivo ao biogás e biometano na Suécia

Medida	Ano	Conteúdo
Taxação de CO₂	1991	Passou a taxar as emissões de CO ₂ provenientes de fontes fósseis, coibindo o uso de energias não renováveis. A relação destas taxas para o ano de 2018 podem ser vistos na Tabela 15. Estes valores equivalem, em média, a 19% do preço de varejo total dos combustíveis, aumentando a margem de lucro quando se utiliza o biometano.
Climate Investment Program (Klimp em sueco)	2003	Relacionou os financiamentos municipais para criação de plantas de biogás, visando a redução na emissão de GEE a longo prazo nos principais setores da economia.
Atualização do Ato do Gás Natural	2009	Incluiu o biogás e o biometano na legislação aplicável ao gás natural, permitindo a injeção na rede de gás natural.
Financiamentos à produção	2010 (em diante)	Financiamentos oferecido aos produtores domésticos de biometano a fim de reduzir os custos do processo, possibilitar o acesso a novas tecnologias e torná-los mais competitivos perante a concorrência.

Mercado certificado de eletricidade	2012	Em conjunto com a Noruega, pagou certificados a geradores de eletricidade para cada MWh gerado a partir de fontes renováveis, com um bônus para os que utilizassem biogás a partir de resíduos como matéria prima.
Incentivos fiscais	2014 (revisada em 2020)	Redução nas taxas para a produção, transporte e utilização de biogás e de biometano em suas principais formas de uso. Recentemente atualizado até 2030.
Estratégia Nacional de Biogás	2018	Colocou como meta um uso de 15 TWh de biometano e biogás em 2030, sendo 12 TWh provenientes do setor de transportes e 3 TWh do setor industrial
Taxação reduzida para veículos leves	2018	Redução de taxas na compra e no abastecimento de combustível de veículos movidos a biometano e redução no imposto de renda para empresas que adotarem estes veículos em suas frotas

Fonte: Elaboração própria a partir de (IEA, 2020, p. 52; KLACKENBERG, 2019, p. 12-15).

Tabela 15 - Taxas de CO₂ na Suécia em 2020

Produto	Taxa de CO₂	% do Preço
Gasolina	2,78 SEK ⁴ /litro	18%
Querosene de Aviação	2,66 SEK/litro	20%
Diesel	3,49 SEK/litro	17%
Carvão	2895 SEK/1000 kg	16%
Gás Natural	2485 SEK/1000 m ³	18%

Fonte: Adaptado de (SWEDEN, MINISTRY OF FINANCE, 2021).

A relação de medidas mencionadas proporcionou um resultado de grande destaque do país frente ao mundo. Atualmente, 54% de todo o consumo de energia sueco é proveniente de fontes renováveis. A efeito de comparação, este percentual se encontra em 17% na União Europeia e em 18% no mundo (SWEDEN, 2021). Um fato relevante a se observar é que 50% da utilização total de energia ser proveniente de fontes renováveis era uma meta estipulada para 2020 pautada no Acordo de Paris, tendo sido atingida em 2017 (KLACKENBERG, 2019)

Visto que as metas para 2020 foram atingidas com antecedência, o governo sueco atualizou suas metas para os próximos anos: redução de 63% nas emissões de GEE até 2030, de 75% até 2040 e alcançar uma emissão negativa até 2045. Além disso, objetiva conquistar um setor de transportes livre de combustíveis fósseis até 2030 e atingir 100% da produção de eletricidade a partir de fontes renováveis (IEA,

⁴ SEK (Coroa Sueca) é a unidade monetária da Suécia. No dia 31 de janeiro de 2021, 1 SEK correspondia a R\$ 0,65 e a \$0,12.

2020). Além disso, a principal meta para o biometano é de substituir 30% da infraestrutura do GN até 2030 (GREEN GAS INITIATIVE, 2017).

O status das plantas de biogás na Suécia no ano de 2018 pode ser visto na Tabela 16. O fato de a maior quantidade de plantas estar associado a estações de tratamento de água e esgoto está diretamente relacionado a questões históricas, visto que foi a primeira forma de produção descoberta no país e que mais se desenvolveu desde então (VEIGA, 2016).

Tabela 16 - Status das plantas de biogás na Suécia em 2018

Tipo de planta	Número de plantas	Produção de energia (GWh/ano)	Produção de energia (Mtoe/ano)
Estação de Tratamento de Esgoto	138	715	0,06
Resíduo de biomassa	36	961	0,08
Agricultura	44	61	0,005
Industrial	6	143	0,01
Aterro Sanitário	55	143	0,01
Biometano (Gaseificação)	1	20	0,001
Total geral	280	2.044	0,16

Fonte: Adaptado de (IEA, 2020, p. 49).

Em 2018, o país produziu 2.044 GWh ou 0,16 Mtoe de biogás, com 280 plantas ativas. O consumo total foi de 2.044 GWh ou 0,17 Mtoe e as principais formas de uso foram como combustível veicular e na geração de calor. Além disso, existem 69 plantas destinadas ao processo de enriquecimento do biogás a biometano, responsável pela conversão de 63% de todo o biogás produzido e gerando 1,2 TWh ou 0,08 Mtoe de biometano. Este resultado garantiu ao país o posto de terceiro maior produtor de biometano no mundo. (IEA, 2020). O detalhamento destes números se encontra na Tabela 17.

Tabela 17 - Utilização do biogás produzido na Suécia em 2018

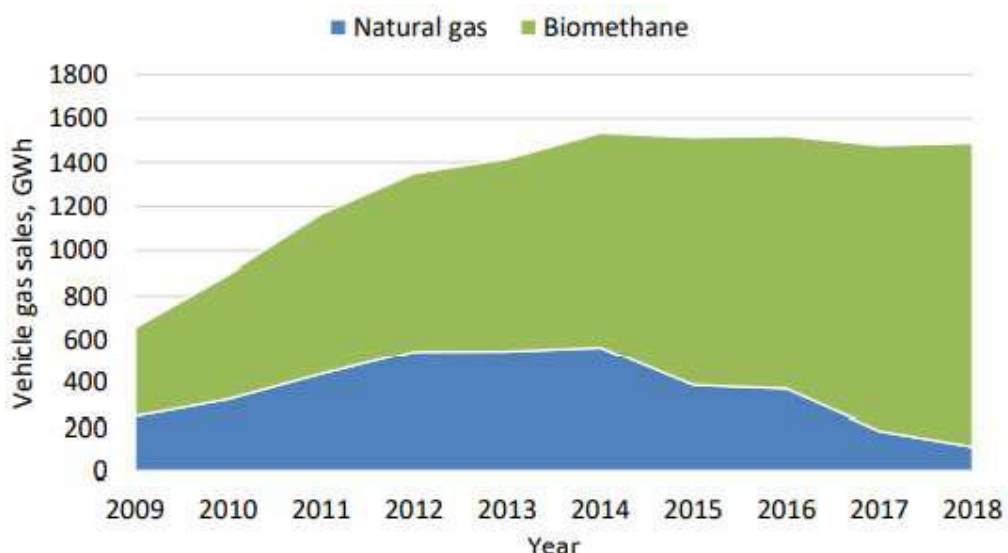
Utilização	Utilização (GWh/ano)	Utilização (Mtoe/ano)	%
Eletricidade	41	0,003	2
Calor	409	0,04	20
Combustível veicular	1.124	0,09	55
Biometano – Outros	164	0,01	8
Indústria	61	0,006	3
Outros	20	0,001	1
Flaring	204	0,01	10
Perdas/Não reportado	20	0,001	1
Total geral	2.044	0,17	100

Fonte: Adaptado de (IEA, 2020, p. 50).

A demanda sueca por biometano e biogás é maior do que sua capacidade produtiva instalada atualmente. Com isso, 45% destes gases são importados de outros países, sobretudo da vizinha Dinamarca, um importante aliado comercial. Deste modo, o uso total destes gases, em 2018, foi de 3,7 TWh ou 0,25 Mtoe, 29% a mais que o ano anterior (KLACKENBERG, 2019).

Enquanto a geração de energia térmica a partir do biogás tem diminuído do país nos últimos 10 anos, o uso como combustível tem crescido majoritariamente devido ao sistema de apoio governamental. Com isso, no mercado automotivo os veículos movidos a gás natural têm sido substituídos pelos que utilizam de biometano, conforme mostra a Figura 7 (IEA, 2020).

Figura 7 - Vendas de veículos movidos a gás na Suécia no período 2009-2018 em GWh



Fonte: (IEA, 2020, p. 50).

O volume de biogás consumido em 2018 representou apenas 0,5% do total de energia consumida no país (IEA, 2021). Entretanto, a participação de combustíveis gasosos na matriz energética sueca é baixa, representando apenas 3% do total (IEA, 2020).

O potencial produtivo estimado de biometano a ser atingido nos próximos 10 anos é de 12 TWh/ano ou 1,03 Mtoe/ano, valor 900% acima do que é gerado atualmente. Estudos da IEA (2020) indicam que este número pode chegar até a faixa de 22 TWh/ano, a depender da criação de novas políticas de incentivo e de uma melhora no cenário econômico mundial, além da exploração de matérias primas ainda

pouco utilizadas perante seu potencial, como resíduos domésticos e colheitas destinadas a produção energética.

Uma análise importante a ser feita é a do concorrente direto do biometano, o gás natural fóssil. Apesar de não haver extração deste na Suécia (SWEDISH ENERGY AGENCY, 2019), em 2018, foram importados 6,2 TWh ou 0,50 Mtoe de gás natural no país (KLACKENBERG, 2019), aproximadamente o dobro do volume consumido de biogás. Este número mostra que apesar dos avanços e da grande representatividade da energia renovável na matriz sueca, ainda há grandes oportunidades na substituição do GN pelo biogás (KLACKENBERG, 2019).

Fez-se uma estimativa a partir da produção atual de biogás e de biometano na Suécia. Klackenberg (2019) cita um crescimento médio de 24% no consumo de ambos os gases no período 2015-2018. Porém, por ter tomado como base um período tão curto, para a estimativa feita neste trabalho considerou-se um crescimento anual mais conservador de 10%, ainda alto comparado à média observada em outros países. O objetivo desta projeção é avaliar se as metas do plano estratégico do país tendem a ser atingidas. Um resumo destes valores pode ser visto na Tabela 18. O volume de geração dos biogases sueco seria de 0,53 Mtoe/ano em 2030, possibilitando uma redução de 100% na utilização do gás de origem fóssil e ultrapassando a meta estipulada. Apesar de ser uma projeção simplista e com uma expectativa bastante otimista, o fato de a Suécia antecipar o atingimento de suas metas climáticas não seria algo inédito.

Tabela 18 – Estimativa do consumo de biogás e gás natural na Suécia em 2030

	Biogás e Biometano	Gás Natural
Consumo atual (Mtoe/ano)	0,25	0,5
Taxa de crescimento anual	10%	-
Consumo estimado em 2030 (Mtoe/ano)	0,53	0,0
Redução de GEE		-100%
Meta		-63%
Crescimento total de biogás		112%

Fonte: Elaboração própria com dados de (IEA, 2020, p. 54; KLACKENBERG, 2019, p. 7).

6 O BIOGÁS NO BRASIL

6.1 Histórico

Na década de 1970, a matriz energética brasileira mostrava forte dependência do petróleo importado de mercados internacionais, como o Oriente Médio, por exemplo. A crise do petróleo iniciada em 1973 provocou importante aumento do preço do barril de petróleo. Houve um choque de oferta que afetou severamente a economia brasileira devido ao alto grau de dependência dessas importações. A escassez de combustível provocou uma crise energética, aumento do endividamento externo brasileiro e redução no crescimento do Produto Interno Bruto (PIB). Para remediar esta situação a partir da diversificação das fontes de energia, o governo brasileiro lançou o Proálcool, em 1975. Este programa visou estimular a utilização de álcool como combustível e funcionou como introdução à produção de biocombustíveis. Nesta época, o biogás surgiu como outra opção estratégica, considerando a elevada produção de biomassa proveniente da agropecuária (KARLSSON, KONRAD, *et al.*, 2014).

Em 1977, foi proposto o Projeto de Difusão do Biogás da EMATER (Empresa Brasileira de Tecnologia e Extensão Rural) que tinha como objetivo a implantação de aproximadamente 9.000 unidades produtivas. Para isso, seriam oferecidos pelo governo incentivos aos produtores por meio de financiamentos e doações de recursos. No entanto, problemas operacionais na utilização de dejetos como matéria prima inviabilizaram tecnicamente o uso dos primeiros biodigestores instalados. Em paralelo, a ausência de unidades biodigestoras prontas para uso e a insuficiência de investimentos governamentais, acompanhados da amenização da crise mundial do petróleo corroboraram para que o projeto cessasse, conseguindo atingir apenas um terço da quantidade de plantas proposta (AVELLAR, 2001; MARIANI, 2018).

A segunda onda de desenvolvimento do biogás se deu entre os anos 1990 e 2000. A esta época, o país visava a diversificação da matriz energética como forma de prevenção à futuras crises energéticas. Além disso, o governo assinou o Protocolo de Kyoto em 1997, colocando em enfoque a redução na emissão de GEE (KARLSSON, KONRAD, *et al.*, 2014). Deste modo, o Ministério de Minas e Energia (MME) elaborou um novo projeto, o chamado PROINFA, Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica. Seus principais objetivos eram o aumento na

geração de energia elétrica através da biomassa, de fontes eólicas e de pequenas centrais hidrelétricas (ELETROBRÁS, 2014).

6.2 Panorama atual e potencial teórico

O Brasil é conhecido internacionalmente por possuir uma matriz energética diversificada, com 46% de sua demanda energética suprida por fontes renováveis como hidroeletricidade e o etanol. Entretanto, apenas uma parte de seu potencial de geração de energia renovável é utilizado. Tal fato é resultado de poucas políticas de incentivo eficientes e barreiras em diferentes magnitudes que serão exploradas adiante neste texto (COELHO, GARCILASSO, *et al.*, 2018).

Em 2019, o país contava com 521 plantas em operação, com uma produção em volume de 1,3 bilhões Nm³/ano, frente a um potencial anual de 84,6 bilhões Nm³. Deste potencial, 75% seriam provenientes do setor sucroenergético e 7% de saneamento. Isto indica uma oportunidade de expansão de 6.408%, já que apenas 1,5% do potencial foi atingido (CIBIOGÁS, 2020). Em termos energéticos, a produção brasileira atual é de 5.219 GWh ou 0,44 Mtoe/ano, enquanto o consumo é de 5.223 GWh ou 0,44 Mtoe/ano (IEA, 2020). No mesmo ano, o total de energia consumida no Brasil foi de 245,63 Mtoe (EPE, 2020), logo, o biogás representou 0,18% da matriz.

Levando-se em consideração as plantas que se encontram em implantação ou em reforma, a produção brasileira de biogás seria ainda maior, conforme dados da Tabela 19. Além disso, IEA (2020) afirma que o potencial produtivo do Brasil é o maior do planeta e, conseqüentemente, caso este potencial fosse atingido, o país se tornaria o líder mundial em produção de biogás.

Tabela 19 - Situação das plantas de biogás no Brasil em 2019

Situação	Quantidade de plantas	Volume de biogás (Nm ³ /ano)
Em operação	521	1.345.498.670
Em implantação	15	390.048.888
Em reformulação ou reforma	12	43.714.780
Total geral	548	1.779.262.339

Fonte: Adaptado de (CIBIOGÁS, 2020, p. 3)

Avaliando o concorrente direto do biogás, em 2019 foram consumidos 17,46 Mtoe de gás natural no país (EPE, 2020), o que representa cerca de 7% da matriz energética. No Acordo de Paris, a meta de redução nas emissões de GEE estabelecidas para o Brasil foi de 43% até 2030 (IEA, 2020).

Deste modo, assim como feito para a Alemanha e para a Suécia neste trabalho, foram estimadas as produções de biogás e de gás natural no país em 2030 a fim de verificar a viabilidade de se atingir a meta de Paris. Neste estudo, foi considerado um crescimento médio de 19% ao ano na capacidade produtiva de biogás instalada no Brasil, que foi a taxa observada pela EPE (2020) no período 2010-2020. Um resumo dos valores atingidos pode ser visto na Tabela 20. O volume de consumo de biogás estimado para 2030 seria de 3,55 Mtoe/ano, possibilitando uma redução de 20% na utilização do gás de origem fóssil, ficando 17 pontos percentuais aquém da meta estabelecida. Apesar das considerações feitas nessa estimativa serem simplistas, este resultado reforça o quanto a produção brasileira de biogás nos moldes atuais está distante de seu potencial, sendo pouco impactante dentro da matriz de fontes renováveis.

Tabela 20 - Estimativa do consumo de biogás e gás natural no Brasil em 2030

	Biogás	Gás Natural
Consumo atual (Mtoe/ano)	0,44	17,46
Taxa de crescimento anual	19%	-
Consumo estimado em 2030 (Mtoe/ano)	3,55	13,91
Redução de GEE		-20%
Meta		-43%
Crescimento total de biogás		706%

Fonte: Elaboração própria com dados de (IEA, 2020, p. 12; IEA, 2021).

O ano de 2020 se iniciou com altas expectativas para o setor de biogás no país, impulsionadas principalmente por dois grandes acontecimentos. O primeiro foi a inauguração da Minicentral Termelétrica de Biogás em Entre Rios do Oeste (PR) no final de 2019, onde o tratamento de resíduos agropecuários fornece eletricidade para 66 prédios públicos da região. Os resultados do primeiro ano de projeto foram animadores: um volume de 4.600 m³/dia foi produzido e 215 toneladas de resíduos foram tratados diariamente, totalizando uma produção anual de 3.000 MWh ou 0,0002 Mtoe, equivalente a 0,05% do total produzido no país (CIBIOGÁS, 2020). Outro acontecimento marcante do ano, foi a ultrapassagem da meta de tratamento de dejetos animais estipulada no Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Plano ABC) em 9 vezes. Esperava-se o tratamento de 4,4 milhões de m³ de dejetos e foi alcançado um total de 38,3 milhões de m³ (CIBIOGÁS, 2020).

Para os anos de 2021 e 2022 espera-se que o avanço da transição energética no setor de transportes amplie o uso do biometano. Isto é reforçado pela construção

de uma nova planta de biogás em Narandiba/SP pelas empresas Cocal Energia e Gasbrasiliiano, com previsão de conclusão em julho de 2022. O investimento total será de R\$ 130 milhões, incluindo os custos de produção e da criação de uma rede de distribuição. Resíduos do processamento da cana-de-açúcar servirão de matéria prima para a planta, que tem potencial produtivo de 8,9 milhões Nm³/ano de biometano e atenderá residências, comércios, indústrias e veículos nas cidades vizinhas. Caso este volume seja de fato atingido, representará 0,66% do total produzido atualmente no Brasil (UDOP, 2021).

Uma cooperação assinada em agosto de 2020 entre a Companhia Paranaense de Energia (Copel) e a CIBIOGÁS para o desenvolvimento de novas estratégias de atuação e de modelos de negócio utilizando como fonte energética o biogás também é uma ação promissora. A parceria faz parte de um projeto da ONU de desenvolvimento industrial sustentável e tem previsão de 3 anos de duração, fortalecendo o estado do Paraná como um dos protagonistas em ações inovadoras no setor (CANALENERGIA, 2020).

Os avanços mencionados podem ocorrer de forma desacelerada devido à pandemia mundial do COVID-19⁵ que agravou a crise econômica brasileira e não dá sinais de recuperação, visto que a queda do PIB brasileiro foi de 4,1% em 2020, a maior da história do país (IBGE, 2021).

Em paralelo a esses empecilhos, estudos recentes apontam um enorme potencial de geração de biogás em regiões pouco exploradas, como a região Norte do país. O Amapá, estado que passou recentemente por 2 blecautes totais e 22 dias de fornecimento parcial de eletricidade após um transformador da unidade de transmissão sofrer um incêndio (G1, 2020) possui uma capacidade de geração aproximada de 15 milhões de metros cúbicos ou 31,1 GWh a partir dos RSU e rejeitos da piscicultura (ARANDA, 2020). Este volume seria capaz de abastecer 6% da população em situações emergenciais como a ocorrida em novembro de 2020 (ARANDA, 2020).

Outro exemplo na região Norte com elevado potencial de geração, mas que ainda é pouco explorado se encontra na região Amazônica. O maior ecossistema do

⁵Os números de casos da COVID-19 e de mortes decorrentes desta doença continuam batendo recordes no Brasil, fazendo com que o governo tome medidas como o fechamento de comércios e a instauração de *lockdown* em algumas cidades. Estas ações são necessárias para conter o avanço da doença, mas podem impactar negativamente a recuperação econômica (G1, 2021).

planeta possui uma grande quantidade de biomassa disponível para ser utilizada como matéria prima e enfrenta dificuldades históricas no abastecimento elétrico de sua população. A produção de biogás pode ser uma forma de reduzir a dependência elétrica externa, de substituir uma parcela da matriz de combustíveis - hoje muito baseada na utilização do diesel - e uma forma de diversificar as fontes de renda da região, tendo a bioeconomia⁶ como pilar (INSTITUTO ESCOLHAS, 2020).

6.3 Caracterização das plantas de produção de biogás brasileiras

Uma análise mais detalhada do perfil de produção de biogás no país revela alguns pontos de destaque. Observando o tamanho das unidades produtivas, conforme presente na Tabela 21, quase 80% das plantas são de pequeno porte, com produção anual até 1 milhão Nm³. Este número é influenciado, sobretudo, pela atividade pecuária, que instala biodigestores voltados para a produção energética para consumo próprio. Em contrapartida, o maior volume de gás gerado é referente às plantas de grande porte (77%). Além disso, ao avaliar a distribuição de gás produzido no país, ao menos 60% do volume total está concentrado na região Sudeste, com destaque para São Paulo (35%), conforme a Figura 8. Já os estados líderes em unidades produtivas são Minas Gerais, com 196 plantas, seguido do Paraná, com 110 (CIBIOGÁS, 2020).

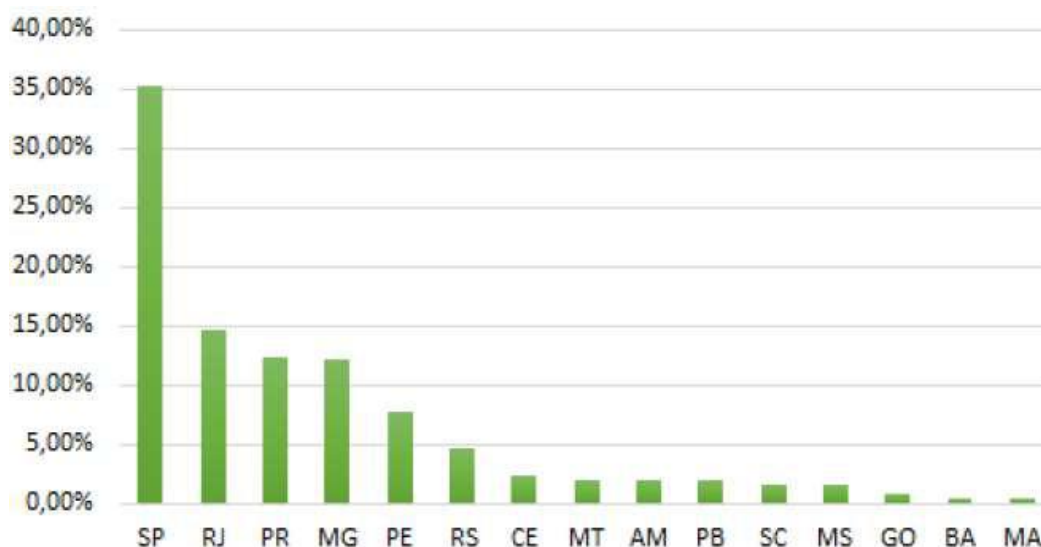
Tabela 21 - Classificação por porte das plantas de biogás em operação no Brasil em 2019

Porte das plantas	Quantidade de plantas		Volume de biogás (Nm ³ /ano)	
Pequeno porte (até 1.000.000 Nm³/ano)	408	78%	125.788.989	9%
Médio porte (entre 1.000.000 e 5.000.000 Nm³/ano)	83	16%	189.729.266	14%
Grande porte (maior que 5.000.000 Nm³/ano)	30	6%	1.029.980.415	77%
Total geral	521		1.345.498.670	

Fonte: Adaptado de (CIBIOGÁS, 2020, p. 4).

⁶Bioeconomia é um modelo de produção industrial baseado no uso de recursos biológicos, oferecendo soluções sustentáveis aos sistemas produtivos a fim de substituir recursos fósseis por renováveis (EMBRAPA, 2021).

Figura 8 - Distribuição por estado do volume de biogás produzido no Brasil em 2019



Fonte: (CIBIOGÁS, 2020, p. 9).

Em relação à matéria-prima utilizada, 80% das plantas existentes utilizam substratos provenientes da agropecuária, seguido por resíduos industriais (12%) e, por fim, resíduos sólidos urbanos e lodo de esgoto (8%). Quanto ao volume de biogás gerado o caminho é inverso: o grupo que contém os aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto produzem 76% do montante total (CIBIOGÁS, 2020). A relação destes dados é explorada na Tabela 22.

Tabela 22 - Classificação por substrato das plantas de biogás em operação no Brasil em 2019

Origem dos substratos	Quantidade de plantas	Volume de biogás (Nm ³ /ano)
Agropecuária	416	165.112.571
Indústria	62	153.858.569
Resíduo Sólido Urbano e Estação de Tratamento de Esgoto	43	1.026.527.529
Total geral	521	1.345.498.670

Fonte: Adaptado de (CIBIOGÁS, 2020, p. 5).

. Quanto ao uso final, a Tabela 23 mostra os volumes produzidos de energia elétrica como os maiores (86% do total geral), enquanto a produção de biometano ainda é bastante modesta, com a maioria destinada ao uso veicular. Apesar de apenas 6 plantas produzirem o biocombustível como aplicação principal no momento, seu alto potencial de agregação de valor à cadeia do biogás cria uma expectativa geral de que estes números tenderão a crescer nos próximos anos (CIBIOGÁS, 2020).

Tabela 23 - Classificação por aplicação energética do biogás das plantas em operação no Brasil em 2019

Principal aplicação energética do biogás	Quantidade de plantas		Volume de biogás (Nm ³ /ano)	
Energia elétrica	439	84%	1.168.138.811	86%
Energia térmica	70	14%	132.094.572	10%
Biometano	6	1%	37.739.175	3%
Outros	6	1%	7.526.112	1%
Total geral	521		1.345.498.670	

Fonte: Adaptado de (CIBIOGÁS, 2020, p. 6).

A curva de evolução do setor desde 2003 é positiva e mostra um comportamento exponencial, com um crescimento de 31% no número de plantas existentes e de 36% no volume de biogás gerado comparando-se o ano de 2019 ao anterior. O fato de a taxa de crescimento associada ao número de unidades produtivas ser maior que a de volume de gás pode estar associado ao início de operação de mais plantas de pequeno porte do que de grande porte, como as da agropecuária, promovendo menor volume de produção por unidade. Apesar da clara expansão da cadeia de biogás no Brasil, os números entregues estão bem abaixo da capacidade conforme já mostrado no trabalho, o que indica que o país está em um nível inicial de desenvolvimento.

6.4 Legislação, políticas públicas e fontes de financiamento

Em âmbito federal, três leis constituem o pilar do marco regulatório acerca da produção de biogás e de biometano no Brasil.

A primeira delas foi a Lei nº 12.187/2009, que proclamou a Política Nacional de Mudanças Climáticas (PNMC), responsável pela criação das diretrizes necessárias para a redução de GEE no país. A PNMC estabeleceu planos setoriais de mitigação e adaptação à mudança climática de modo a evitar emissões poluentes. Apesar do texto não promulgar medidas específicas para o biogás, este foi indiretamente incentivado como substituto de combustíveis fósseis. Esta política ainda está em vigor, tendo sido revisada em 2016 e 2019 com intuito de atualizar as metas para o ano de 2050 (MMA, 2021).

No ano seguinte, entrou em vigor a Lei nº 12.305/2010, responsável por instituir a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), orientando quanto à destinação dos resíduos. Com objetivo de melhorar a disposição dos resíduos sólidos emitidos no país, a produção de biogás a partir de aterros sanitários foi estimulada (MMA, 2010).

Já em 2017, foi promulgada a Lei nº 13.576/2017, que criou a Política Nacional de Biocombustíveis (Renovabio). Seus objetivos principais foram aumentar a produção de biocombustíveis, promover a descarbonização da matriz energética brasileira e assegurar a expansão dos biocombustíveis na matriz energética, garantindo uma regularidade de abastecimento. O funcionamento desta política se deu a partir da criação de metas a serem atingidas até 2029, com previsão de penalidades em caso de descumprimento. Para estimular o alcance das metas, a Lei criou o Crédito de Descarbonização (CBIO), programa de creditação para cada tonelada de CO₂ evitado pelos produtores de biocombustíveis (MME, 2020).

Algumas normativas publicadas pela ANEEL também impactaram o setor. A Resolução Normativa nº 271/2000 especificou que empreendimentos que utilizassem insumos energéticos provenientes de biogás de aterro, de estações de tratamento de água, de RSU ou de resíduos agrícolas teriam uma redução de 100% nas tarifas relacionadas a transmissão e distribuição da energia elétrica gerada (ANEEL, 2000). Já a Resolução Normativa nº 687/2015 revisou o tema da Geração Distribuída – ato de o consumidor brasileiro gerar sua própria eletricidade a partir de fontes renováveis, permitido desde 2012 – e ampliou as possibilidades para atingir um maior público (ANEEL, 2015). No entanto, discussões recentes questionam a tarifação aplicada nestes casos, propondo mudanças contratuais para os produtores independentes de energia. Isto mostra que Resoluções Normativas têm mais fragilidade do que Leis, podendo ser insuficientes como incentivo (ANEEL, 2021).

A regulamentação do biometano se deu a partir de duas resoluções da ANP: a de nº 8/2015 e a de nº 685/2017. Estas tratam das especificações qualitativas necessárias do biocombustível oriundo de resíduos orgânicos agrossilvopastoris e do proveniente de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto, respectivamente (ANP, 2019).

Além de medidas legislativas, algumas políticas públicas também contribuíram para o desenvolvimento da bioenergia brasileira, como o PROINFA, instituído em 2002 (ELETROBRÁS, 2014). Esta medida pode ser considerada um exemplo de sistema de cotas, que são valores recolhidos por distribuidoras, transmissoras e cooperativas que custeiam o programa, mas também um exemplo de tarifa *feed-in*, visto que foram elaborados contratos de longo prazo com uma remuneração garantida pelo governo (MARIANI, 2018).

O Plano Nacional de Agroenergia, lançado em 2006 com duração determinada até 2011, apresentou metas específicas para o biogás. Dentre as metas estabelecidas, as principais foram o desenvolvimento de estudos de novos modelos de biodigestores, o investimento em novas tecnologias para processamento e purificação do biogás e a ampliação do uso de biofertilizantes. Apesar do atingimento de algumas das metas, como a de crescimento no uso dos biofertilizantes, os resultados mais expressivos do plano foram relacionados a outras fontes de agroenergia (MAPA, 2006).

Outro critério essencial para o desenvolvimento de um novo mercado são as fontes de financiamento. O Plano ABC, previa linhas de crédito atreladas ao cumprimento dos compromissos assumidos pela nação de redução de GEE no setor (MAPA, MDA, 2012). No período de 2011 a 2020, os recursos financiados se encontraram na faixa de R\$ 197 bilhões, providos pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e bancos parceiros (MAPA, 2020).

Outra linha de crédito disponível é a PRONAF Sustentável, específica para projetos de sustentabilidade ambiental envolvendo agricultura familiar (IEA, 2020). O Programa Fundo Clima é um projeto que ainda se encontra em vigor e garantiu recursos para projetos de empreendimentos que mitigassem os impactos das mudanças climáticas, não possuindo uma linha específica para projetos de biogás ou de biometano (BNDES, 2018).

No âmbito estadual, algumas medidas legislativas tiveram destaque. Em São Paulo, foi instaurado em 2012 o Programa Paulista de Biogás e Biometano que estabeleceu um percentual do biocombustível a ser injetado na rede do gás natural não renovável. No texto do projeto não foi estabelecida uma duração específica, estando o programa ainda vigente atualmente (SÃO PAULO, 2012). Como principal resultado, o estado em questão foi o maior produtor de biogás no país, representando aproximadamente 35% do volume total produzido com um total de 471 milhões de Nm³ (CIBIOGÁS, 2020).

No Rio de Janeiro, a Lei nº 6.361/12 impôs que as concessionárias distribuidoras de gás canalizado adquirissem, de forma compulsória, todo o Gás Natural Renovável (GNR) ofertado no estado. A medida, objetivava aumentar a participação do biogás e do biometano na matriz energética estadual, reduzir a emissão de GEE, a valoração econômica de resíduos orgânicos e a melhoria na disposição final de RSU (RIO DE JANEIRO, 2012). Como resultado, o estado produziu

cerca de 201 milhões de Nm³ no ano de 2019, resultado que representa 15% do total produzido no país e assumindo, assim, a vice-liderança entre os estados com maior capacidade produtiva (CIBIOGÁS, 2020). A Lei sofreu alterações em 2014 e 2018 relacionadas ao preço máximo e compra e venda do GNR, estando em vigor com as atualizações até o presente momento (LEGISWEB, 2018)

Ademais, os estados do Mato Grosso, Rio de Janeiro, Bahia e São Paulo estão inseridos no Convênio ICMS nº 112/2013 que permite uma redução de 18% para 12% na tributação nas saídas internas de biogás e biometano. Este tipo de operação é aquele na qual a mercadoria tem remetente e destinatário no mesmo estado (LEGISWEB, 2013).

6.5 Iniciativas do Setor Privado

As medidas públicas mencionadas incentivaram a organização do setor dando origem às associações representativas que desempenharam, e continuam exercendo, um papel fundamental na alavancagem do setor de biogás no Brasil. A Associação Brasileira de Biogás e Metano (ABBM), lançada em 2013, conta com participantes de categorias como professores, pesquisadores, empresários e produtores rurais, a fim de fornecer apoio institucional e planejamento setorial para o fortalecimento da cadeia de suprimentos do setor. No mesmo ano, em São Paulo, houve a fundação da Associação Brasileira do Biogás e Biometano (ABiogás) que reúne empresas e instituições públicas e privadas envolvidas em diferentes segmentos – pesquisa, produção, transformação e distribuição – em prol do crescimento do setor e o atingimento das metas estipuladas por eles.

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) é um grupo voltado à criação, ampliação, desenvolvimento e fortalecimento do mercado de gestão de resíduos, e possui uma interface com o setor de biogás em vista do controle e redução das emissões de GEE (MARIANI, 2018). Já a CIBiogás, instituição de ciência e tecnologia domiciliada nas dependências do Parque Tecnológico Itaipu (PTI) em Foz do Iguaçu, PR, promove o desenvolvimento do mercado do biogás através da coleta e análise de dados nacionais, serviços de consultoria técnica, capacitação e soluções de gestão de resíduos, energia e biofertilizantes (CIBIOGÁS, 2020).

6.6 Casos de sucesso

Alguns casos de produção de biogás no Brasil se destacaram pelas tecnologias utilizadas, por seus modelos de negócio e por seus resultados. Um destes casos é o da Granja Haacke, uma área rural em Santa Helena, PR, que utiliza do excremento de 84 mil aves poedeiras e 750 bovinos de corte para produzir 1.500 m³/dia de biogás para geração de energia com finalidade de uso próprio e 560 m³/dia de biometano para abastecimento de frotas de veículos (ZANK, 2015). Este volume produtivo é decorrente de uma quantidade de 35 m³ de dejetos que são gerados diariamente e, antes do projeto entrar em vigor, eram despejados no meio ambiente. A implantação do biodigestor reduziu em 90% as emissões de GEE e promoveu uma economia de 75% com sua frota de 56 veículos, visto que o uso da gasolina foi substituído pelo uso do biometano e alguns impostos veiculares foram reduzidos ou isentos (AVICULTURA INDUSTRIAL, 2016). Este exemplo ilustra a sustentabilidade da cadeia do biogás: em uma mesma unidade se encontram o fornecedor de matéria prima, o produtor do bem e o consumidor, completando um ciclo da cadeia de valor.

No Paraná, foi fundada a empresa GEO Energética, líder nacional na produção de biogás proveniente de resíduos da indústria sucroalcooleira. Sua primeira planta foi instalada ao lado de uma cooperativa formada por 127 produtores rurais e de uma usina de açúcar e álcool, facilitando o transporte dos insumos. Ela pode ser vista na Figura 9 (GEO ENERGÉTICA, 2012). A empresa expandiu seu mercado, formando uma *joint venture* em 2018 com a Raízen para construir em São Paulo uma unidade produtiva a partir da conversão da torta de filtro e vinhaça, subprodutos da cana-de-açúcar, em biogás e eletricidade. A capacidade de geração anual desta planta é de 138 mil MWh, volume capaz de abastecer 62 mil domicílios ou 150 mil habitantes. Esta tecnologia é pioneira no cenário mundial e teve o início parcial de suas atividades no final de 2020, com algumas de suas unidades produtivas com previsão de início para o primeiro semestre de 2021. Após pleno funcionamento, é esperada uma redução de 90% até 2030 nas emissões de GEE originados da produção de cana de açúcar na região (UDOP, 2020).

Figura 9 - Primeira planta da GEO Energética



Fonte: (GEO ENERGÉTICA, 2012).

A unidade de Demonstração de Biogás e Biometano, instalada na usina hidrelétrica de Itaipu em Foz do Iguaçu, PR se destaca com uma geração média de $18 \text{ Nm}^3/\text{ano}$ a partir de lodo de esgoto, grama de posa e restos de alimento dos restaurantes internos. O biocombustível produzido substitui o etanol em 80 veículos da frota da empresa e promove uma economia de até 15 mil reais, o biofertilizante gerado como subproduto é utilizado como adubo nos gramados da usina e a planta piloto como um todo evita a emissão de 1.260 kg de GEE (ITAIPU BINACIONAL, 2019). Um exemplo é visto na Figura 10.

Figura 10 - Ônibus movido a biometano da Usina de Itaipu



Fonte: (BAZANI, 2017).

7 BARREIRAS PARA A AMPLIAÇÃO DO BIOGÁS NO MERCADO BRASILEIRO

Conforme discutido ao longo deste trabalho, a produção e o uso do biogás proporcionam diversos ganhos aos agentes envolvidos em suas cadeias produtivas e contribuem para o objetivo nacional de redução de emissões e sustentabilidade, a partir de diferentes modelos de negócio. Além disso, o Brasil tem capacidade para se tornar líder mundial na produção, estando hoje distante de sua capacidade produtiva. Neste capítulo serão identificadas as principais barreiras que impedem o país de atingir seu potencial por completo.

7.1 Dimensão Histórica e Institucional

Douglass North definiu as barreiras institucionais como aquelas relacionadas a fatores culturais, políticos e regulatórios, sendo inerentes ao domínio macro de uma organização. Estas têm como raízes acontecimentos históricos que moldaram o comportamento atual da população e, conseqüentemente, sua demanda (LOPES e CONCEIÇÃO, 2019).

Até hoje, ainda existem poucas plantas de biogás que possam ser consideradas de referência em escala comercial, que atendam a demanda de diferentes produtos e que consumam grandes quantidades de resíduos sólidos e líquidos. Este aspecto pode ser explicado pelas tentativas mal-sucedidas durante as décadas de 1970 e 1980 de instalação de biodigestores apoiada pelos governos federal e estaduais. Apesar de estas experiências terem sido frustradas por motivos como o dimensionamento incorreto de equipamentos, a utilização equivocada de materiais e a falta de assistência técnica, conseqüências da falta de *know-how* dos envolvidos, tais fatos ainda afastam empreendedores pela falta de confiança no segmento (JENDE, ROSENFELDT, *et al.*, 2016).

Jende *et al.* (2016) realizou uma pesquisa com atores do mercado de biogás no Brasil a fim de identificar outras barreiras. Como resultado, foi observado que a inexistência de uma política que englobe os setores de energia e saneamento a fim de fomentar o ganho sinérgico para os dois segmentos promovido pela digestão anaeróbia. Além disso, a ausência de uma regulamentação específica para o biogás em esfera nacional, assim como a regulamentação do biometano já feita pela ANP, dificulta o planejamento de novos projetos. Um exemplo citado por empreendedores foi em relação ao transporte de biogás bruto em baixa pressão através de gasodutos

particulares. Apesar de ser uma prática já realizada em estados como o Paraná, não há uma clareza na legislação sobre esta prática, impedindo o potencial avanço desta prática que seria benéfica à alavancagem do biogás (JENDE, ROSENFELDT, *et al.*, 2016).

Outro impeditivo levantado foi a falta de uma linha de crédito e de incentivos financeiros específicos para projetos do setor. As linhas de financiamento hoje disponíveis são destinadas a projetos de infraestrutura voltados à destinação de RSU ou de desenvolvimento industrial. Contudo, relatos apontaram que, devido a sua alta complexidade e ao desconhecimento das instituições financeiras, projetos específicos de biogás não estiveram aptos a receber estes recursos devido à necessidade de garantias (JENDE, ROSENFELDT, *et al.*, 2016).

Aliada a estes fatos, a falta de um plano específico em escala nacional para o biogás com metas exclusivas sobre sua geração, qualidade, usos finais e perspectivas em todos os setores envolvidos contribui para a dificuldade de sua penetração na matriz energética brasileira (MARIANI, 2018). Este ponto é reforçado pelo fato de o biogás ainda não ser considerado em documentos de planejamento do setor elétrico, como PNE 2030, o Plano Nacional de Energia com as projeções dos recursos energéticos para o ano de 2030 (VEIGA, 2016). Apesar de mencionar de forma mais clara a produção de biogás e biometano como alternativas para a disposição final de RSU, o PNE 2050 também não apresenta metas para estes gases (MME, 2020).

Na dimensão legal regional, alguns tópicos das legislações estaduais mencionadas no capítulo anterior também constituíram barreiras à difusão da utilização do biogás. Olhando o caso de São Paulo, o Programa Paulista de Biogás não define as porcentagens das cotas compulsórias das distribuidoras de eletricidade. Além disso, o texto destaca apenas o biogás de vinhaça, deixando assim de englobar as outras matérias primas. No caso do Rio de Janeiro, o plano instaurado considera apenas a geração de eletricidade como aplicação do biogás e não apresentou uma deliberação clara sobre a injeção de biometano em gasodutos (VEIGA, 2016).

Deste modo, por não haver medidas de longo prazo suficientes que indiquem certa estabilidade e mostrem que o segmento em questão é estratégico e promissor para o país, muitos empresários hesitam na injeção de capital (JENDE, ROSENFELDT, *et al.*, 2016).

7.2 Dimensão Econômica

Os elevados custos relacionados ao investimento inicial (CAPEX) e à operação e manutenção (OPEX), o risco associado e o longo tempo de retorno são fatores que afastam possíveis investidores de projetos de grande porte para geração de biogás. Estes valores elevados são consequência direta do subdesenvolvimento deste mercado no Brasil, pois, para a implantação de um projeto, são necessários: (i) investimentos em aquisição de conhecimento, capacitação de profissionais e desenvolvimento de fornecedores e clientes de modo que os padrões exigidos de qualidade de produto sejam seguidos; (ii) opções limitadas de equipamentos e mão de obra especializada no país; (iii) alto custo para importação de serviços, conhecimento e máquinas, amplificado pelos altos impostos; (iv) customização de soluções internacionais para que funcionem conforme as condições geoeconômicas do país – Fatores estes que, aliados, encarecem todo o processo (JENDE, ROSENFELDT, *et al.*, 2016).

Para o biometano a situação é ainda mais complexa: o alto valor associado ao processo de *upgrading* do biogás para convertê-lo torna o biocombustível menos atrativo que o etanol e biodiesel, por exemplo, dificultando sua penetração na economia. A adição deste processo pode aumentar em até 60% o CAPEX de uma planta. Por este motivo os produtores tendem a direcionar o uso do biogás para setores considerados mais maduros e menos onerosos por não possuir o custo de purificação agregado, como a geração de energia elétrica e térmica (VEIGA, 2016).

Os fatores mencionados acima contribuem para que o biogás seja pouco competitivo comercialmente se comparado às outras fontes energéticas, tanto renováveis quanto às não-renováveis. Como resultado, a matriz energética brasileira é composta atualmente de 34% de petróleo e seus derivados, seguido de 18% de derivados da cana de açúcar, 12% de fontes hídricas e 12% também de gás natural. O setor de óleo e gás, em específico, apresenta domínio mercadológico e uma tendência de crescimento, em específico pela queda de 20% no valor do barril de petróleo no último ano e pelo custo de produção ser menor que o do biogás, visto a maturidade tecnológica e produtiva já alcançadas por esta indústria (EPE, 2020).

7.3 Dimensão Tecnológica e Logística

Conforme já mencionado, a dependência de tecnologias importadas torna-se uma barreira de grau elevado por conta de seu alto custo associado. Este desafio, porém, continua sem solução enquanto os investimentos destinados à área de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) continuarem escassos, interrompendo a trilha que torna o processo de conversão de matéria orgânica em energia economicamente viável (JENDE, ROSENFELDT, *et al.*, 2016).

Outra dificuldade existente que está atrelada à anterior está relacionada à matéria-prima. Como os substratos utilizados são majoritariamente rejeitos e dejetos, a obtenção de um produto de composição constante, sem contaminantes – como os siloxanos - e estável em diferentes condições a longo prazo é um desafio (VEIGA, 2016). Além disso, analisando em específico o setor de RSU, outra dificuldade existente é na retirada de biogás de aterros sanitários que não foram projetados inicialmente para isso (MARIANI, 2018).

A questão logística também deve ser levada em consideração, em específico para a produção de biometano pois a infraestrutura existente para sua distribuição influencia no seu uso final. Fatores estruturais evidenciam a necessidade de expansão das redes logísticas e da conquista e crescimento de novos mercados. Dentre eles, alguns exemplos são o fato da rede de gasodutos brasileira não ser extensa ou uniforme em todo seu território e a malha de postos disponíveis para abastecimento de GNV ser restrita e concentrada na região Sudeste (COELHO, 2018).

7.4 Dimensão Informacional

Tanto no setor de agroindústria quanto no de saneamento, a utilização de reatores anaeróbicos é vista, sobretudo, como uma forma de tratamento dos resíduos orgânicos produzidos, não sendo contemplada em sua total potencialidade como uma chance de aproveitar o potencial energético do biogás produzido. Até mesmo em plantas destinadas a geração elétrica não há um aproveitamento total do produto gerado, visto que a energia térmica emitida na cogeração não costuma ser comercializada, sendo descartada em sua maioria. Tais situações estão diretamente ligadas à dificuldade no acesso à informação e conhecimento acerca das tecnologias e oportunidades que envolvem o biogás (JENDE, ROSENFELDT, *et al.*, 2016).

Na etapa de elaboração de um projeto de planta, alguns questionamentos são comuns: (i) qual é a tecnologia, substratos e condições mais assertivas para a necessidade e realidade do produtor? (ii) existem casos de sucesso e onde estão? (iii) quais são os riscos associados? (iv) qual é o potencial produtivo e expectativa de retorno financeiro? (v) quais são os possíveis fornecedores? (vi) qual é a estrutura operacional necessária e quem oferece estes serviços? (vii) qual é a duração dos equipamentos, frequência de sua manutenção e custos associados? (viii) quais são as formas de condicionamento, tratamento e transporte do produto? – Todas estas perguntas não tem suas respostas de fácil encontro, demonstrando a baixa disseminação de informações sobre o setor de biogás (JENDE, ROSENFELDT, *et al.*, 2016).

Outros dados pouco difundidos e que são cruciais para a expansão do setor no país são em relação às tarifas para implantação de plantas, às normas e legislação de apoio, às linhas de financiamento disponíveis e às oportunidades de captação de verba para projetos de P&D (JENDE, ROSENFELDT, *et al.*, 2016). Ademais, as barreiras relacionadas ao conhecimento impactam também na disponibilidade de profissionais qualificados, visto que não há cursos técnicos, de graduação ou pós-graduação em número e qualidade adequados (MARIANI, 2018).

8 ANÁLISE COMPARATIVA E PROPOSTAS DE SOLUÇÕES

Estruturas regulatórias fiscais e políticas de incentivo são primordiais para que o crescimento da indústria de biogás seja possível, visto que seu principal concorrente, o gás natural de origem fóssil, possui menores custos operacionais em seu processamento, tratamento e distribuição.

Um estudo destas medidas de apoio foi feito pela *Global Methane Initiative* (GMI), uma iniciativa público-privada internacional que objetiva a promoção do uso de metano como fonte de energia limpa. Foram estudados 30 países e, dentre os principais resultados, observou-se que 85% destes possuíam metas para reduzir os GEE, 80% possuíam metas para utilizar da digestão anaeróbia em sua matriz energética e 93% apresentavam incentivos para o processo em questão. Além disso, a maior parcela do grupo estudado utilizava de tarifas especiais para o biogás (as chamadas *Feed-in-Tariffs*) e créditos de carbono, mas a minoria permitia a isenção de impostos (COELHO, GARCILASSO, et al., 2018).

Um resumo destes dados para os *players* tomados como objeto de estudo neste trabalho pode ser visto nas Tabela 24 e Tabela 25.

Tabela 24 - Políticas a produção de biogás em alguns países estudados pela *Global Methane Initiative*

País	Políticas específicas para a Digestão Anaeróbia	Metas para Energia Renovável	Metas de Redução de Gases de Efeito Estufa	Incentivos para a Digestão Anaeróbia
Alemanha	X	X	X	X
Brasil		X	X	
Suécia	X	X	X	X

Fonte: Adaptado de (COELHO, GARCILASSO, et al., 2018, p. 95).

Tabela 25 - Incentivos à produção de biogás em alguns países estudados pela *Global Methane Initiative*

País	Tarifas <i>feed in</i>	Créditos de carbono	Redução de impostos
Alemanha	X	X	X
Brasil	X	X	X
Suécia	X	X	X

Fonte: Adaptado de (COELHO, GARCILASSO, et al., 2018, p. 96).

Analisando as informações apresentadas, são ressaltadas as defasagens brasileiras perante outros países do cenário internacional. Em um primeiro plano, a

ausência de políticas específicas e incentivos para a digestão anaeróbia é um diferencial negativo em relação aos países com o mercado de biogás mais aquecidos, o que pode explicar o ainda baixo desenvolvimento no Brasil.

Na sequência, analisando os incentivos à produção, observa-se que o país adotou as tarifas *feed-in*, os créditos de carbono e a redução de impostos, medidas em comum aos outros países em destaque. Contudo, os resultados não são os mesmos devido às diferentes barreiras apresentadas no capítulo anterior.

As diferenças entre as políticas implementadas e a insuficiência de incentivos a nível nacional mostram por que Brasil está tão distante de atingir uma posição de referência na produção de biogás, ou até mesmo de alcançar sua capacidade teórica produtiva. Como já mencionado, hoje apenas 1,5% do potencial brasileiro é de fato produzido (CIBIOGÁS, 2020).

Comparando a experiência brasileira com as dos países analisados neste estudo, foram destacados alguns indicadores para identificar as lacunas da experiência nacional. Primeiramente, a Tabela 26 mostra que a principal fonte de matéria prima não é a mesma em nenhum dos 3 países. Tal fato está relacionado diretamente à participação de cada um destes setores nas economias. Tanto a Alemanha quanto a Suécia souberam aproveitar as oportunidades a partir de suas cadeias produtivas de destaque. O Brasil apenas ganharia se fizesse o mesmo, pois farta disponibilidade de insumos, principalmente RSU e resíduos da agropecuária, já que este é um setor bem aquecido no Brasil.

Quanto ao tipo de uso, tanto a Alemanha quanto o Brasil apresentam uma maior concentração na geração de eletricidade. Este dado mostra que há uma grande oportunidade de penetração em outras aplicações ainda pouco exploradas no Brasil, como a geração de energia térmica e o *upgrade* do biogás a biometano para utilização como combustível veicular. Este último exemplo, inclusive, é o foco principal da produção sueca, o que faz com que o país seja o melhor modelo a ser seguido.

Tabela 26 - Comparativo de principais matérias primas utilizadas e principais formas de uso do biogás nos países selecionados

País	Principal Matéria Prima	Principal Uso
Alemanha	Agropecuária	Eletricidade
Suécia	Biomassa	Combustível veicular
Brasil	RSU	Eletricidade

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 27, pode ser visto que, dentre os três países estudados, a Suécia apresenta maior representatividade de fontes renováveis em sua matriz energética. O Brasil assume a vice-liderança, com um percentual alto se comparado a média mundial de 18%. Apesar disso, fica evidente a priorização por outras fontes de energia renovável, visto que no país apenas 0,15% de sua matriz energética é representada pelo biogás. Estes dados reforçam a possibilidade de ampliação na produção brasileira de biogás e o quanto os programas governamentais de incentivo foram pouco eficientes.

Tabela 27 - Comparativo da representatividade das fontes renováveis na matriz energética e da representatividade do biogás na matriz energética nos países selecionados

País	% de fontes renováveis na matriz energética	% do biogás na matriz energética
Alemanha	14%	1%
Suécia	54%	0,5%
Brasil	46%	0,15%

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 28 retoma os valores estimados de redução na emissão de GEE em 2030 e o quanto das metas de Paris seriam atingidas com estes resultados. Nesta modelagem, a redução promovida no Brasil seria semelhante à alemã. Este resultado é animador, visto o nível de desenvolvimento do mercado de biogás na Alemanha. Entretanto, nenhum dos dois países atingiriam a meta de Paris apenas com o crescimento no volume produzido de biogás. Para isso, a taxa de criação de novas plantas e aumento de capacidade produtiva de plantas existentes deve aumentar no Brasil, o que pode depender de investimentos públicos e privados no segmento.

Tabela 28 - Comparativo das projeções de redução na emissão de GEE em 2030 e dos percentuais de atingimento das metas de Paris nos países selecionados

País	Projeção de redução na emissão de GEE em 2030	% de atingimento da meta de Paris
Alemanha	-27%	49%
Suécia	-100%	159%
Brasil	-26%	60%

Fonte: Elaboração própria.

8.1 Propostas de Soluções

O desenvolvimento do mercado de biogás brasileiro ainda enfrenta diversos desafios para alcançar a importância dos países analisados. Nesse sentido,

apresentamos algumas propostas para a superação das barreiras estudadas, com base na análise das informações e dados presentes neste trabalho. As sugestões a seguir estão diretamente associadas às barreiras exploradas no capítulo 7 e são agrupadas em blocos.

8.1.1 Políticas de Incentivo

Os incentivos fiscais e as políticas regulatórias são primordiais para o desenvolvimento de um mercado, o que é bem exemplificado ao estudar as medidas tomadas em países como Alemanha e Suécia, nos quais o governo foi protagonista na implantação do biogás em suas matrizes energéticas. A relação de impostos padrão para o mercado de biogás se encontra na Tabela 29.

Tabela 29 - Impostos e contribuições a esperar para plantas de biogás e biometano

Custos	Valor*	Observações
Impostos de importação (II)	14 – 25 %	Depende da comprovação da inexistência de produto similar no mercado nacional.
Impostos sobre produtos industrializados (IPI)	0 – 15 %	Depende do produto e não se aplica quando o importador é o exportador.
Contribuição a PIS-COFINS	9 – 10 %	Valor significativamente mais alto do que de produtos nacionais.
Imposto sobre a circulação de mercadorias e prestação de serviços (ICMS)	17 – 19 %	Cada estado tem uma política própria de tributação, redução ou isenção do ICMS.

*Valores variam em função do tipo de importação e produto.

Fonte: (JENDE, ROSENFELDT, *et al.*, 2016, p. 37).

O conjunto de impostos e contribuições tributárias impactam de forma direta nos custos de implantação de um projeto, principalmente no processo de importação, muito necessário no Brasil devido às defasagens apresentadas no capítulo anterior. Deste modo, uma oportunidade de ampliação da atratividade do negócio e estímulo da concorrência seriam a redução de impostos incidentes sobre produtos em âmbito federal, como o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) e o Imposto de Importação (II), por exemplo. Outra opção seria a diminuição a zero das alíquotas da Contribuição para o PIS/PASEP, da COFINS da Contribuição para o PIS/PASEP-Importação e da COFINS-Importação, tributos estes incididos sobre a receita de vendas e na importação de partes como peças e equipamentos (JENDE, ROSENFELDT, *et al.*, 2016). Vale ressaltar que PIS/PASEP (Programas de Integração Social e de Formação do Patrimônio do Servidor Público) e COFINS (Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social) são dois tributos previstos

pelos artigos 195 e 239 da Constituição Federal que incidem sobre a receita bruta das empresas (PORTAL TRIBUTÁRIO, 2020).

Na esfera estadual, uma sugestão é a isenção do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços (ICMS) sobre itens envolvidos com a geração de biogás, medida já aplicada em alguns estados brasileiros. Apesar da redução de arrecadação governamental em um primeiro momento, a longo prazo o retorno seria compensatório (JENDE, ROSENFELDT, *et al.*, 2016).

De forma análoga aos exemplos mundiais, a criação de leis a nível nacional para regulamentação e estímulo do setor traria impactos positivos. Aliado a isso, o fornecimento de incentivos financeiros a projetos de biogás e a estipulação do uso do biogás em percentuais mínimos da matriz energética de determinados setores impulsionariam o mercado brasileiro em direção aos exemplos estudados.

Já para fomentar o mercado de biometano, algumas possibilidades são o subsídio governamental para que os preços dos biocombustíveis sejam competitivos ao do GNV para o consumidor final, a priorização do acesso à rede de gás natural aos produtores de biometano, bem como ampliação dela. Além disso, a redução de impostos para empresas que substituam suas frotas veiculares por carros ecologicamente sustentáveis e uma estipulação de cota mínima de utilização de biometano em nível federal são outras opções viáveis (COSTA e VASCONCELOS, 2018).

Espera-se que as medidas propostas tragam consigo benefícios em diferentes níveis: a redução de carga tributária, aquecimento da oferta de peças, máquinas e componentes de plantas biodigestoras, estímulo da concorrência no setor, estruturação da cadeia de produção e, por fim, ampliação da arrecadação financeira tanto do setor privado quanto do público (JENDE, ROSENFELDT, *et al.*, 2016).

8.1.2 Linhas de Financiamento Específicas

A fim de estimular a participação no setor, se faz necessária a criação de linhas de financiamento para a implantação e operacionalização de plantas de biogás. Estes programas de incentivo por meio de crédito devem ser específicos, de modo a considerar as particularidades exigidas em um projeto do setor em questão, como os bens envolvidos, os custos e as projeções de receita. Além do governo, importantes agentes do setor como as entidades de classe e empresas privadas do próprio ramo de biogás, como das áreas de saneamento, gás natural e energia precisam ser

envolvidos no desenho das métricas desta linha de crédito (JENDE, ROSENFELDT, *et al.*, 2016).

Atualmente, o BNDES dispõe de recursos direcionados à ampliação da participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira. Dentre eles, como já mencionado, há o Fundo Clima, destinado ao desenvolvimento tecnológico e criação de projetos de geração de energia solar, eólica, hidráulica, biomassa e de oceanos (BNDES, 2018). Algumas oportunidades de melhoria envolvendo este tópico são a revisão das condições de acesso ao fundo existente, a criação de uma diretriz específica para importação de bens necessários em projetos de biodigestores e a criação de um fundo destinado apenas a plantas de biogás para que seu desenvolvimento seja de acordo com o potencial existente. Além disso, há denúncias recentes que mencionam a má destinação dos recursos disponíveis e uma recente paralisação não oficial do Fundo, o que impactam negativamente sobre a efetividade do Programa (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2021).

No âmbito público, a habilitação de empreendimentos de biogás junto ao Governo Federal através do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) e Orçamento Geral da União (OGU) funcionaria como estímulo aos empreendimentos de biodigestores que utilizam de esgoto sanitário e RSU como matéria prima. Ambos os recursos mencionados são destinados, de modo geral, a programas de infraestrutura e saneamento, podendo englobar também projetos de biogás por ser um segmento transversal aos demais temas hoje contemplados (JENDE, ROSENFELDT, *et al.*, 2016).

As propostas acima mencionadas teriam como consequência imediata o favorecimento da modernização, a transferência de tecnologias e de conhecimento bem como a evolução da eficiência e produtividade do parque industrial brasileiro voltado ao setor.

8.1.3 Desenvolvimento de Políticas Setoriais

Com intuito de colocar o biogás em posição estratégica no planejamento energético brasileiro, é necessário que haja a criação e desenvolvimento de iniciativas e marcos regulatórios em esfera nacional. Uma possibilidade é a criação de um comitê composto pelos Ministérios de Minas e Energia (MME), das Cidades (MCidades), do Meio Ambiente (MMA), da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e do

Desenvolvimento, Indústria e Comércio exterior (MDIC) para que, a partir de discussões acerca do tema, seja elaborada uma política nacional para o segmento.

Em paralelo, a representatividade do setor deve ser fortalecida com intuito de viabilizar a comunicação direta e constante entre seus agentes, a sociedade e os governos estaduais e federal. As entidades de classe podem exercer este papel, necessitando de investimentos de ordem pública e privada para a manutenção de seus projetos e estrutura.

Como resultado destas ações, espera-se a criação de um marco legal, institucional e regulamentador para projetos de biogás, que seja capaz de unificar as medidas atualmente existentes e que se encontram espalhadas em diversas áreas. Atrelado a isso, metas de curto, médio e longo prazo seriam definidas e divulgadas de forma clara, incentivando a participação no setor (JENDE, ROSENFELDT, *et al.*, 2016).

8.1.4 Investimentos em Capacitações, Pesquisa e Desenvolvimento

A capacitação técnica de profissionais que exercem funções associadas aos projetos de biogás é uma ação estratégica para aquecer o mercado brasileiro e reduzir a dependência externa de insumos pertinentes à indústria. Algumas sugestões neste contexto são a promoção de treinamentos técnicos pelo MCidades e BNDES, a criação de guias técnicos sobre licitações e empreendimentos de biogás, a inserção de conteúdos relacionados a biodigestores em cursos técnicos e universidades, a disponibilização em bibliotecas virtuais de informações traduzidas de dados relacionados à produção em outros países e a promoção de intercâmbios de experiências com parceiros internacionais.

Atrelado a isto, se faz necessária a destinação de verba para a produção científica para a criação e desenvolvimento de novas tecnologias que viabilizem a construção de novas plantas com processos otimizados e mais baratos, além da manutenção de polos industriais já existentes a partir das novas descobertas.

Além de permitir a independência do mercado brasileiro em um médio a longo prazo, estas medidas favorecem a inovação dentro do setor, o que permite uma diferenciação no mercado e, conseqüentemente, o aumento de lucro, a facilitação no acesso à informação, a ampliação de mão de obra e a redução de custos no investimento inicial (JENDE, ROSENFELDT, *et al.*, 2016).

9 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou a evolução do mercado de biogás no Brasil, com o objetivo de identificar os entraves para o seu desenvolvimento e propor soluções para superá-los. De modo geral, constatou-se que apenas uma pequena parte do potencial do biogás está sendo devidamente aproveitada. Os produtores e o governo têm reconhecido os benefícios deste produto, principalmente devido às vantagens ambientais e às diferentes aplicações possíveis.

Observou-se que a fonte de matéria-prima para a sua produção pode ser considerada a principal vantagem da cadeia e que a grande maioria do biogás produzido no Brasil atualmente é proveniente de resíduos urbanos, seguidos dos resíduos industriais e resíduos da agropecuária. A maior parte da produção é destinada para geração de energia elétrica, enquanto a elevação ao biometano é pouco expressiva, devido aos elevados custos relativos ao processo de purificação.

Nosso estudo identificou algumas políticas de fomento pulverizadas ou de duração restrita, que variam de acordo com a localização. Em contraste, os investidores valorizam um sistema legal estável além de medidas de apoio suficientemente longas para garantirem investimentos de longo prazo. Na Europa, a implementação de tarifas *feed-in* e a determinação de metas ambientais, assim como os incentivos financeiros para a produção foram primordiais para que seus países se consolidassem como referência mundial.

As políticas adotadas na Alemanha e na Suécia foram um importante objeto de estudo a fim de comparar com o cenário brasileiro. Foi possível compreender por que ambos os países se destacam internacionalmente em termos de produção de biogás e biometano. Com caracterização das plantas e estudo do consumo de biogás e de gás natural nesses países, foi feita uma projeção do volume de biogás produzido em 2030, a fim de estimar o quanto da meta de Paris seria alcançada. Caso eles sigam com o crescimento produtivo observado atualmente, a Suécia alcançará uma redução de 100% na emissão de GEE, enquanto a Alemanha alcançará 27%. Deste modo, apenas a Suécia atingiria a meta do Acordo de Paris.

Foi feito também um estudo aprofundado do mercado brasileiro, a fim de compreender inicialmente o histórico da penetração do biogás como fonte energética no país. A maior quantidade de plantas brasileiras está concentrada nos estados do SP e RJ e utiliza dos resíduos da agropecuária como principal fonte matéria prima. Os

marcos regulatórios no país quanto ao biogás não permitiram a alavancagem de sua produção rumo ao atingimento de seu potencial, tendo sido alcançado apenas 1,5% até o presente momento. A projeção de redução de GEE até 2030 também foi feita para o país, tendo um resultado 20% abaixo das presentes emissões, um valor abaixo da meta de 43% estipulada em Paris.

Por fim, viu-se que as barreiras pontuadas estão relacionadas com tentativas passadas de implementação do biogás no Brasil, a políticas e programas nacionais e regionais inconsistentes e à falta de apoios financeiros e de investimentos públicos. Em paralelo, a falta de um sistema centralizado de acesso à informação e a falta de equipamentos e tecnologias compatíveis com as especificidades da produção brasileira estão associados ao baixo desenvolvimento tecnológico do setor no país, que acaba por carecer de apoio internacional.

Concluiu-se o trabalho com a identificação de quatro propostas de soluções para as barreiras levantadas que envolvem a criação de políticas de incentivo à produção, fornecimento de linhas de crédito para implantação e operação de novas plantas, desenvolvimento de políticas setoriais através da união de ministérios, cooperativas e o terceiro setor e disponibilização de investimentos em conhecimento, pesquisa e desenvolvimento.

É válido ressaltar que o estudo realizado tem natureza qualitativa e que seriam necessárias análises quantitativas detalhadas das medidas propostas para determinar se estas são, de fato, relevantes e factíveis. Outra possibilidade para trabalhos futuros seria a realização de uma pesquisa comparativa entre os custos da produção do gás natural fóssil e o biogás, a fim de compreender em maiores detalhes as barreiras econômicas e competitivas que foram levantadas neste trabalho.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIÓGÁS. ABiogásNews | MAIO 2020. **ABIÓGÁS**, 2020. Disponível em: <<https://abiogas.org.br/abiogasnews-maio-2020/>>. Acesso em: 16 jul 2020.
- ANEEL. **Resolução Normativa nº 271/2000**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília. 2000.
- ANEEL. Geração Distribuída. **ANEEL**, 2015. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Acesso em: 18 jul 2020.
- ANEEL. ANEEL nega mudança em contratos de produtores independentes do AM e oferece mediação. **ANEEL**, 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/aneel-nega-mudanca-em-contratos-de-produtores-independentes-do-am-e-oferece-mediacao/656877?inheritRedirect=false&redirect=https%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fsala-de>. Acesso em: 20 mar 2021.
- ANP. ANP concede primeira aprovação para biometano de aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto. **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**, 21 set. 2017. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/noticias/4038-anp-concede-primeira-aprovacao-para-biometano-de-aterros-sanitarios-e-estacoes-de-tratamento-de-esgoto>>. Acesso em: 18 jul 2020.
- ANP. Biometano. **Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**, 25 jul. 2019. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/biometano>>. Acesso em: 18 jul 2020.
- ARANDA. Biogás pode contribuir com segurança energética no Amapá. **Eletricidade Moderna**, 2020. Disponível em: <<https://www.arandanet.com.br/revista/em/noticia/1273-Biogas-pode-contribuir-com-seguranca-energetica-no-Amapa.html>>. Acesso em: 03 dez 2020.
- ARCADIS TETRAPLAN. **Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), Visando Incrementar o Uso de Biogás como Fonte Alternativa de Energia Renovável**. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD); Ministério do Meio Ambiente (MMA). São Paulo, p. 44. 2010.
- AVELLAR, L. H. N. **A valorização dos subprodutos agroindustriais visando a co-geração e a redução da poluição ambiental**. Universidade Estadual Paulista "Júlio

de Mesquita Filho" Faculdade de Engenharia (Campus de Guaratinguetá). Guaratinguetá. 2001.

AVICULTURA INDUSTRIAL. Avicultor paranaense abastece veículo com biocombustível feito com dejetos de animais. **Avicultura industrial**, 2016. Disponível em: <<https://www.aviculturaindustrial.com.br/imprensa/avicultor-paranaense-abastece-veiculo-com-biocombustivel-feito-com-dejetos-de/20161006-145603-c536>>. Acesso em: 07 mar 2021.

BAZANI, A. Itaipu binacional inaugura primeira fábrica de biometano do Brasil com aproveitamento de esgoto. **Diário do Transporte**, 02 jun 2017. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2017/06/02/itaipu-binacional-inaugura-primeira-fabrica-de-biometano-do-brasil-com-aproveitamento-de-esgoto/#prettyPhoto>>. Acesso em: 19 jul 2020.

BECHER, U. **Biometano como combustível veicular / Probiogás**. Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ). Brasília, DF, p. 101. 2016. (978-85-7958-059-8).

BMU. Climate Action Plan 2050 – Germany's long-term low greenhouse gas emission development strategy. **Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety**, 2021. Disponível em: <[BNDES. Fundo Clima - Subprograma Energias Renováveis. **BNDES - O banco nacional do desenvolvimento**, 2018. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/fundo-clima-energias-renovaveis>>. Acesso em: 26 jul 2020.](https://www.bmu.de/en/topics/climate-energy/climate/national-climate-policy/greenhouse-gas-neutral-germany-2050/#:~:text=Germany's%20long%2Dterm%20goal%20is,greenhouse%20gas%2Dneutral%20by%202050.&text=With%20this%20plan%2C%20Germany%20is,more%20than%201.>>. Acesso em: 31 jan 2021.</p></div><div data-bbox=)

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Energias Renováveis: Riqueza sustentável ao alcance da sociedade**. Câmara dos Deputados. Brasília. 2012.

CANALENERGIA. Copel e CIBiogás assinam termo de cooperação para desenvolvimento de negócios. **CANALENERGIA**, 2020. Disponível em: <[62](https://www.canalenergia.com.br/noticias/53144384/copel-e-cibiogas-assinam-termo-de-cooperacao-para-desenvolvimento-de-negocios-com-biogas#:~:text=A%20Copel%20assinou%20um%20termo,da%20agroind%C3%BAstr ia%20e%20outras%20atividades.>>. Acesso em: 01 fev 2021.</p></div><div data-bbox=)

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **BIOGAS**, 2020. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/biogas/>>. Acesso em: 11 jun 2020.

CIBIOGAS. **Nota Técnica: N° 002/2018 – Características técnicas do biogás**. Foz do Iguaçu. 2018.

CIBIOGÁS. 2020 e as principais tendências de avanço do biogás no Brasil. **CIBIOGÁS**, 2020. Disponível em: <<https://cibiogas.org/news/2020-e-as-principais-tendencias-de-avanco-do-biogas-no-brasil/>>. Acesso em: 16 jul 2020.

CIBIOGÁS. Especial 1 ano de projeto: Termelétrica de Entre Rios do Oeste. **CIBIOGÁS**, 2020. Disponível em: <<https://cibiogas.org/blog-post/especial-1-ano-de-projeto-termeletrica-de-entre-rios-do-oeste/>>. Acesso em: 07 mar 2021.

CIBIOGÁS. **Panorama do Biogás no Brasil em 2019**. CIBiogás. Foz do Iguaçu. 2020.

CIBIOGÁS. Quem Somos? **CIBiogás**, 2020. Disponível em: <<https://cibiogas.org/quem-somos/>>. Acesso em: 18 jul 2020.

COELHO, J. M. **Impactos da Participação do Biogás e do Biometano na Matriz Brasileira**. Empresa de Pesquisa Energética Ministério de Minas e Energia. São Paulo, p. 36. 2017.

COELHO, J. M. **O Potencial do Biogás: Oportunidades e Desafios**. Empresa de Pesquisa Energética Ministério de Minas e Energia. Foz do Iguaçu, p. 18. 2018.

COELHO, S. T. et al. **Tecnologias de Produção e Uso de Biogás e Biometano**. São Paulo: [s.n.], 2018. 218 p. ISBN 978-85-86923-53-1.

COSTA, D. V. B. D.; VASCONCELOS, L. B. **Mercado do Biometano no Brasil: Análise**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2018.

CS BIOENERGIA. CS Bioenergia, 2019. Disponível em: <<http://www.csbioenergia.com.br/>>. Acesso em: 18 jul 2020.

DW. 1973: Carros proibidos de circular na Alemanha. **Deutsche Welle**, 2004. Disponível em: <<https://www.dw.com/pt-br/1973-carros-proibidos-de-circular-na-alemanha/a-681185>>. Acesso em: 06 mar 2021.

EBA. **Biomethane in Transport**. European Biogas Association. [S.I.]. 2016.

EBA. **Annual Report 2019**. European Biogas Association. Brussels. 2020.

ECOMETANO. Ecometano, 2020. Disponível em: <<http://www.ecometano.com.br/ecometano/index.html>>. Acesso em: 18 jul 2020.

ELETOBRÁS. Proinfa. **Eletrobrás**, 2014. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/Paginas/Proinfa.aspx>>. Acesso em: 01 fev 2021.

EMBRAPA. Bioeconomia. **Embrapa**, 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-bioeconomia#:~:text=Bioeconomia%20%C3%A9%20um%20modelo%20de,recursos%20f%C3%B3sseis%20e%20n%C3%A3o%20renov%C3%A1veis.>>. Acesso em: 06 mar 2021.

EPE. **Balço Energético Nacional**. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, p. 264. 2020.

EPE. Matriz Energetica e Elétrica. **EPE - Empresa de Pesquisa Energética**, 2020. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 19 jul 2020.

EUROPEAN COMMISSION. Climate Strategies and Targets. **European Commission**, 2020. Disponível em: <https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en>. Acesso em: 13 jul 2020.

EUROSTAT. Europa. **Glossary: Tonnes of oil equivalente (toe)**, 2020. Disponível em: <[https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Glossary:Tonnes_of_oil_equivalent_\(toe\)](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Glossary:Tonnes_of_oil_equivalent_(toe))>. Acesso em: 28 set 2020.

FIGUEIREDO, N. J. V. D. **Utilização de Biogás de Aterro Sanitário para Geração de Energia Elétrica - Estudo de Caso**. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 147. 2011.

FNR. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha (BMELV). Gülzow, p. 236. 2010.

FNR. **Biogas: an Introduction**. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). [S.l.], p. 44. 2013.

FNR. **Bioenergy in Germany: Facts and Figures 2020**. FNR. Gülzow-Prüzen, p. 50. 2020.

G1. Apagão no Amapá: veja a cronologia da crise de energia elétrica. **G1**, 2020. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ap/amapa/noticia/2020/11/18/apagao-no-amapa-veja-a-cronologia-da-crise-de-energia-eletrica.ghtml>>. Acesso em: 11 jan 2021.

G1. PIB do Brasil despensa 4,1% em 2020. **G1**, 2021. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2021/03/03/pib-do-brasil-despenca-41percent-em-2020.ghtml>>. Acesso em: 07 mar 2021.

GEO ENERGÉTICA. GEO Energética, 2012. Disponível em: <<http://www.geoenergetica.com.br/>>. Acesso em: 18 jul 2020.

GREEN GAS INITIATIVE. **Biomethane: Naturally green gas**. GGI. [S.I.]. 2017.

HIJO, M. **YOM KIPPUR: UMA DERROTA VITORIOSA**. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2015.

IBGE. Produto Interno Bruto - PIB. **IBGE**, 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php>>. Acesso em: 07 mar 2021.

IEA. Global Energy & CO2 Status Report 2019. **International Energy Agency**, 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019/emissions>>. Acesso em: 16 mar 2021.

IEA. **IEA Bioenergy Task 37 – Country Reports Summaries 2019**. IEA Bioenergy. [S.I.]. 2020.

IEA. Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth. **International Energy Agency**, Paris, 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>>. Acesso em: 04 dez 2020.

IEA. Data and statistics: Natural gas. **International Energy Agency**, 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/datatables/?country=WORLD&energy=Natural%20gas&year=2019>>. Acesso em: 09 jan 2021.

IEA. Sweden. **International Energy Agency**, 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/countries/sweden>>. Acesso em: 18 mar 2021.

INSTITUTO ESCOLHAS. **Do lixo ao luxo: biogás na agenda da Bioeconomia da Amazônia**. Instituto Escolhas. [S.I.]. 2020.

ITAIPU BINACIONAL. PROJETO PIONEIRO NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS COMPLETA SETE ANOS. **ITAIPU BINACIONAL**, 2016. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/noticia/projeto-pioneiro-na-producao-de-biogas-completa-sete-anos>>. Acesso em: 18 jul 2020.

ITAIPU BINACIONAL. VEÍCULOS A BIOMETANO DE ITAIPU DERAM O EQUIVALENTE A CINCO VOLTAS NO PLANETA EM 2018. **ITAIPU BINACIONAL**, 2019. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/noticia/veiculos-biometano-de-itaipu-deram-o-equivalente-cinco-voltas-no-planeta-em>>. Acesso em: 18 jul 2020.

JENDE, O. et al. **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil:** substratos, digestores e uso de biogás. 1ª Edição. ed. Brasília: [s.n.], 2015. ISBN 978-85-7958-039-0.

JENDE, O. et al. **Barreiras e Propostas de Soluções para o Mercado de Biogás no Brasil.** Probiogás ; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ). Brasília DF, p. 74. 2016. (978-85-7958-058-1).

KARLSSON, T. et al. **Manual Básico de Biogás.** 1ª. ed. Lajeado: UNIVATES, 2014.

KLACKENBERG, L. **Biomethane in Sweden - market overview and policies.** Swedish Gas Association. [S.l.]. 2019.

LEGISWEB. Convênio ICMS Nº 112 DE 11/10/2013. **LegisWeb**, out. 2013. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=260786>>. Acesso em: 18 jul 2020.

LEGISWEB. Decreto Nº 46476 DE 25/10/2018. **Legisweb**, 2018. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=368664>>. Acesso em: 19 mar 2021.

LEI 6361/12 | Lei nº 6361, de 18 de dezembro de 2012. **Assembleia Legislativa do Rio de Janeiro**, 2012. Disponível em: <<https://gov-rj.jusbrasil.com.br/legislacao/1033645/lei-6361-12>>. Acesso em: 07 mar 2021.

LIMA, A. C. G.; PASSAMANI, F. C. **Avaliação do Potencial Energético do Biogás Produzido no Reator UASB da ETE-UFES.** Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 106. 2012.

LOPES, H. C.; CONCEIÇÃO, O. A. C. **A TEORIA INSTITUCIONALISTA DE DOUGLASS C. NORTH: O CONCEITO DE SOCIAL ORDER E SUAS LIMITAÇÕES.** Universidade Federal da Fronteira Sul. Chapecó, p. 18. 2019.

MACHADO, G. Biodigestão Anaeróbia. **Portal do Biogás**, 2 jul. 2013. Disponível em: <<https://www.portaldobiogas.com/biodigestao-anaerobia/>>. Acesso em: 14 junho 2020.

MANFRON, M. P. Biodigestão Anaeróbica: Uma alternativa para usinas de laticínios, Santa Maria, 21, abr. 1991. 145-152.

MAPA. **Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011.** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasília. 2006.

MAPA. Plano ABC: Financiamento. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/financiamento>>. Acesso em: 01 fev 2021.

MAPA, MDA. **Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono)**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento; Ministério do Desenvolvimento Agrário. Brasília. 2012.

MARIANI, L. **Biogás: diagnóstico e propostas de ações para incentivar seu uso no Brasil**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2018.

MILANEZ, A. Y. et al. **Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas**. BNDES Setorial 47. [S.l.], p. 221-276. 2018.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Aproveitamento Energético do Biogás de Aterro Sanitário. **Ministério do Meio Ambiente**, 21 mai 2012. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario>>. Acesso em: 17 junho 2020.

MMA. LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. **Ministério do Meio Ambiente**, 2010. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>>. Acesso em: 07 mar 2021.

MMA. Política Nacional sobre Mudança do Clima. **Ministério do Meio Ambiente**, 2021. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/clima/politica-nacional-sobre-mudanca-do-clima.html#:~:text=A%20Pol%C3%ADtica%20Nacional%20sobre%20Mudan%C3%A7a,das%20emiss%C3%B5es%20projetadas%20at%C3%A9%202020.>>. Acesso em: 07 mar 2021.

MME. **PNE 2050 - Plano Nacional de Energia**. Ministério de Minas e Energia. Brasília. 2020.

MME. Renovabio. **Ministério de Minas e Energia**, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/renovabio>>. Acesso em: 07 mar 2021.

NÓBREGA, H. R. O que é Biogás? **CIBIOGAS**, 2019. Disponível em: <<https://cibiogas.org/blog-post/o-que-e-biogas/>>. Acesso em: 14 junho 2020.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. Petição Fundo Clima. **Observatório do Clima**, 2021. Disponível em: <<https://www.oc.eco.br/peticao-fundo-clima/>>. Acesso em: 20 mar 2021.

OLIVEIRA, R. D. E. **Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás Produzido pela Fermentação Anaeróbia de Dejetos em Abatedouro e as Possibilidades no Mercado de Carbono**. Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 98. 2009.

PARLAMENTO EUROPEU. **DIRECTIVA 2009/28/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO**. Jornal Oficial da União Europeia. [S.l.]: [s.n.]. 2009. p. 47.

PARLAMENTO EUROPEU. UE e Acordo de Paris: a caminho da neutralidade carbônica. **Parlamento Europeu**, 2019. Disponível em: <<https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/society/20191115STO66603/ue-e-acordo-de-paris-a-caminho-da-neutralidade-carbonica>>. Acesso em: 09 jan 2021.

PARLAMENTO EUROPEU. Energias renováveis. **Fichas temáticas sobre a União Europeia**, 2020. Disponível em: <[https://www.europarl.europa.eu/factsheets/pt/sheet/70/renewable-energy#:~:text=A%20partir%20de%202021%2C%20no,\(PNEC\)%20a%2010%20anos.>](https://www.europarl.europa.eu/factsheets/pt/sheet/70/renewable-energy#:~:text=A%20partir%20de%202021%2C%20no,(PNEC)%20a%2010%20anos.>). Acesso em: 22 nov 2020.

PEREIRA, R. L. F. **Implementação do biogás: exploração de aspectos técnicos e mercadológicos**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 69. 2014.

PORTAL TRIBUTÁRIO. **Portal Tributário**, 2020. Disponível em: <http://www.portaltributario.com.br/guia/pis_cofins.html>. Acesso em: 26 jul 2020.

RECOLAST AMBIENTAL. Biodigestor: o que é? **Recolast Ambiental**, 2018. Disponível em: <<https://www.recolastambiental.com.br/blog/uncategorized/biodigestor-o-que-e/>>. Acesso em: 14 junho 2020.

RIO DE JANEIRO. Lei 6361/12 | Lei nº 6361, de 18 de dezembro de 2012. **Assembleia Legislativa do Rio de Janeiro**, 2012. Disponível em: <<https://gov-rj.jusbrasil.com.br/legislacao/1033645/lei-6361-12>>. Acesso em: 07 mar 2021.

SANTOS, M. M. D. **Produção e uso de biogás no Brasil**. Instituto de Energia e Ambiente Universidade de São Paulo. Sao Paulo. 2016.

SÃO PAULO. DECRETO Nº 58.659, DE 4 DE DEZEMBRO DE 2012. **Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo**, 2012. Disponível em: <<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2012/decreto-58659-04.12.2012.html>>. Acesso em: 07 mar 2021.

SEBRAE. **Sustentabilidade: Boletim de Tendências**. SEBRAE. [S.l.], p. 5. 2016.

SEEG. **Emissões de GEE no Brasil e suas implicações para políticas públicas e a contribuição brasileira para o Acordo de Paris**. Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. [S.I.]. 2018.

SEEG. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas do Brasil**. SEEG. [S.I.]. 2019.

SEEG. **Gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do Brasil 1970-2019**. Observatório do Clima. [S.I.]. 2020.

SOARES, R. D. C.; SILVA, S. R. C. M. D. **Evolução Histórica do Uso de Biogás como Combustível**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso Campus Cuiabá. [S.I.]. 2018.

SWEDEN. Energy use in Sweden. **Sweden**, 2021. Disponível em: <<https://sweden.se/nature/energy-use-in-sweden/#>>. Acesso em: 31 jan 2021.

SWEDEN, MINISTRY OF FINANCE. Sweden's carbon tax. **Government Offices of Sweden**, 2021. Disponível em: <<https://www.government.se/government-policy/taxes-and-tariffs/swedens-carbon-tax/>>. Acesso em: 31 jan 2021.

SWEDISH ENERGY AGENCY. **National preventive action plan for Sweden's natural gas supply**. Energimyndigheten. Eskilstuna. 2019.

TERMOVERDE CAIEIRAS. **TERMOVERDE**, 2020. Disponível em: <<http://www.termoverde.com.br/termoverdecaieiras>>. Acesso em: 18 jul 2020.

THRAN, D. et al. Governance of sustainability in the German biogas sector—adaptive management of the Renewable Energy Act between agriculture and the energy sector. **BMC**, 2020. Disponível em: <<https://energysustainsoc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-019-0227-y#ref-CR13>>. Acesso em: 31 jan 2021.

UDOP. Raízen inicia atividades em sua planta de biogás. **União Nacional da Bioenergia**, 2020. Disponível em: <<https://www.udop.com.br/noticia/2020/04/29/raizen-inicia-atividades-em-sua-planta-de-biogas.html>>. Acesso em: 18 jul 2020.

UDOP. Cocal Energia e Gasbrasiliano avançam na construção da planta de biogás. **União Nacional de Bioenergia**, 2021. Disponível em: <<https://www.udop.com.br/noticia/2021/01/25/cocal-energia-e-gasbrasiliano-avancam-na-construcao-da-planta-de-biogas.html#:~:text=Ser%C3%A3o%20investidos%20na%20nova%20unidade,Cocal>>

%20na%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20biometano.&text=O%20potencial%20de%20produ>. Acesso em: 01 fev 2021.

UNIÃO EUROPEIA. EUR-Lex. **Access to European Union Law**, 2020. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/homepage.html>>. Acesso em: 22 nov 2020.

VEIGA, A. P. B. **Contribuição à Avaliação das Barreiras e Oportunidades Regulatórias, Econômicas e Tecnológicas do Uso de Biometano Produzido a Partir de Gás de Aterro no Brasil**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2016.

ZANK, J. **Projeto Mobilidade a Biometano**. CIBiogás. Foz do Iguaçu. 2015.