

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ARTUR CHAMILET DE FRANCESCHI FORTES
CAIO PETERSEN FABER
LUCAS AGOSTINHO PRATA

**Análise da Produção de Biogás e Biometano no Brasil: Perspectivas,
Desafios e Oportunidades**

São Paulo, SP
Abril, 2024

ARTUR CHAMILET DE FRANCESCHI FORTES
CAIO PETERSEN FABER
LUCAS AGOSTINHO PRATA

**Análise da Produção de Biogás e Biometano no Brasil: Perspectivas,
Desafios e Oportunidades**

Versão Original

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. José Luis Pires Camacho

Co-orientador: Prof. Dra. Martina Costa Reis

São Paulo, SP

Abril, 2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo ou pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Chamilet de Franceschi Fortes, Artur; Petersen Faber, Caio; Agostinho Prata, Lucas

Análise da Produção de Biogás e Biometano no Brasil:
Prespectivas, Desafios e Oportunidades/ A. Chamilet de Franceschi Fortes, C.
Petersen Faber, L. Agostinho Prata – São Paulo, 2024.
45 p.

Orientador: Prof. Dr. José Luis Pires Camacho
Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo. Departamento de Química.

1.Biogás 2.Biometano 3.Energia Renovável 4.Sustentabilidade
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Química II.t.

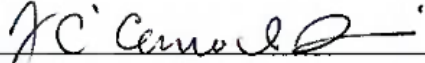
ARTUR CHAMILET DE FRANCESCHI FORTES
CAIO PETERSEN FABER
LUCAS AGOSTINHO PRATA

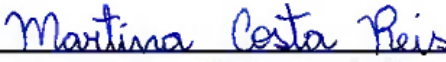
ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E BIOMETANO NO BRASIL:
PRESPECTIVAS, DESAFIOS E OPORTUNIDADES

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado ao Departamento de Engenharia
Química da Escola Politécnica da Universi-
dade de São Paulo como parte dos requisitos
para obtenção do grau de Bacharel em Enge-
nharia Química.

Aprovado em 22 de Abril de 2024

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. José Luis Pires Cantacho


Prof. Dra. Martina Costa Reis

Resumo

FORTES, Artur Chamilet de Franceschi; FABER, Caio Petersen; PRATA, Lucas Agostinho . Análise da Produção de Biogás e Biometano no Brasil: Perspectivas, Desafios e oportunidades. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2024. versão 1.

No Brasil, existe a crescente necessidade de produzir uma matriz energética verde, o que impulsiona a exploração de fontes como o biogás e o biometano. Neste trabalho, iremos concentrar as avaliações de condições ambientais, recursos disponíveis e tecnologias aplicáveis para a sua produção, visando a eficiência e movimentação econômica, do biogás e sua subsequente purificação para o biometano.

Navegando desde a coleta de matéria prima ao estágio final de comercialização do biometano, este trabalho apresentará os estudos visitados tanto em forma de simulações computacionais quanto em forma de levantamentos de campo. No âmbito econômico, serão apresentadas estimativas de investimentos iniciais, custos operacionais e previsões de receitas, visando o retorno financeiro desse tipo de empreendimento.

Busca-se fazer conclusões, em forma de orientações, para a implementação bem sucedida dessa matriz energética na indústria brasileira, navegando pelas tecnologias mais adequadas e modernas. De um ponto de vista político-econômico, é visado o oferecimento de uma análise completa dos custos e dos benefícios associados ao desenvolvimento de projetos nessa matriz energética, destacando os desafios financeiros e oportunidades no investimento.

Em última análise, almejamos contribuir para o avanço do setor de energias renováveis no Brasil, promovendo uma transição mais sustentável e diversificada na matriz energética do país.

Palavras-chave: Biogás. Biometano. Energia Renovável. Sustentabilidade.

Abstract

FORTES, Artur Chamilet de Franceschi; FABER, Caio Petersen; PRATA, Lucas Agostinho . Analysis of the production of biogas and biomethane in Brazil: Perspectives, Challenges and Opportunities. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2024. version 1.

In Brazil, there is a growing necessity of mass production from a green energy matrix, fact that drives the exploration of sources such as the biogas and biomethane. In this present work, we are going to concentrate the valuation of environmental conditions, available resources and applicable technologies for the production, targeting the efficiency and economical raise, of biogas and its subsequent purification for the biomethane.

Navigating from the feedstock to the final stage of comercialization of biomethane, this work presents the visited studies both in the form of computational simulations and field surveys. On the economic sphere, there will be presented estimations of initial investments, operational costs, and receipt previews, targeting the revenue of this type of enterprise.

The goal is to make conclusions, in the form of orientations, for the successful implementation of this energy matrix on the brazilian industry, navegating through the most adequate and modern technologies. From a political and economic standpoint, it is targeted the offering of a complete analysis about the associated costs and benefits from the development of projects in this energy matrix, highlighting the financial challenges and investment oportunities.

In a final analysis, we long to contribute on the advance of the renewable energy sector in Brazil, promoting a more sustainable and diverse transition of the contry's energy matrix.

Key words: Biogas. Biomethane. Renewable Energy. Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Potencial produtivo de biogás por setor, em milhões Nm ³ /dia	14
Figura 2 – Fluxograma simplificado da digestão anaeróbia	15
Figura 3 – Participação (%) de cada região brasileira na geração de RSU (ABRELPE, 2022)	17
Figura 4 – Plantas de biogás em operação no Brasil e volume de produção. Fonte: CIBiogás	18
Figura 5 – Diagrama dos principais componentes do CCHP, de acordo com (BROUCHE; LAHOUD, 2018)	20
Figura 6 – Evolução do setor de Biogás no Brasil	27
Figura 7 – Número de plantas de biogás do Brasil	28
Figura 8 – Esquema representativo do corte de um reator do modelo BLC	29
Figura 9 – Modelo de um biodigestor CSTR. Fonte: CIBiogás	30
Figura 10 – Modelo de um biodigestor em fase sólida. Fonte: CIBiogás (Traduzido)	31
Figura 11 – Rotas tecnológicas para a produção de hidrogênio no setor sucroenergético. Retirado de (PANORAMA..., 2023)	36
Figura 12 – Potenciais investimentos no setor de biogás no Brasil	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos de substratos comumente utilizados (MACHADO, 2023) . . .	18
Tabela 2 – Qualidade do GN para uso comprimido como combustível para veículos de acordo com a ISO CD 15403	22
Tabela 3 – Programa BID-CEBRI-EPE de Transição Energética. Produção de biometano por cenário em milhões de m ³ por dia. De acordo com (PANORAMA..., 2023)	35
Tabela 4 – Programa BID-CEBRI-EPE de Transição Energética. Produção de biometano por cenário em milhões de m ³ por dia. De acordo com (PANORAMA..., 2023)	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
3	MÉTODOS	12
4	DESENVOLVIMENTO	14
4.1	BIOGÁS E BIOMETANO	14
4.2	PROCESSO DE PRODUÇÃO DO BIOGÁS	15
4.2.1	Processo de biodigestão	15
4.2.2	Parâmetros chave	16
4.3	MATÉRIAS PRIMAS	17
4.4	APLICAÇÕES DO BIOGÁS E BIOMETANO	19
4.4.1	Produção de Calor e Eletricidade	19
4.4.2	Injeção de Biometano na Rede de Gás Natural	21
4.4.3	Combustível para veículos	22
4.5	ASPECTOS AMBIENTAIS	23
4.5.1	Processos de Purificação do Biogás	23
4.5.1.1	Remoção de CO_2	24
4.5.1.2	Sistemas bioeletroquímicos	24
4.5.1.3	Fotossíntese de células microalgais	25
4.5.1.4	Remoção de H_2S	25
4.5.1.5	Remoção das demais impurezas	26
4.6	PANORAMA ATUAL DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO BRASIL E NO MUNDO	27
4.6.1	Panorama da produção no Brasil	27
4.6.2	Panorama da produção nos Estados Unidos e Europa	28
4.6.3	Tecnologias de produção de biogás	29
4.6.3.1	Biodigestor Lagoa Coberta (BLC)	29
4.6.3.2	Tanque de Agitação Contínua - ou CSTR	29
4.6.3.3	Biodigestor em fase sólida (<i>dry digestion</i>)	30
4.7	ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE DO PROCESSO PRODUTIVO	31
4.7.1	Avaliação do impacto ambiental da produção de biometano em comparação com outras fontes de energia	31
4.7.2	Análise da contribuição para a redução de emissões de gases de efeito estufa	31

4.8	INCENTIVOS E POLÍTICAS PÚBLICAS	32
4.8.1	Incentivos e Políticas Públicas no Brasil	32
4.8.2	Análise de incentivos fiscais e subsídios disponíveis para a produção de biometano	33
4.9	DESAFIOS E OPORTUNIDADES FUTURAS	33
4.10	IDENTIFICAÇÃO DE DESAFIOS ENFRENTADOS PELA INDÚSTRIA DE BIOMETANO NO BRASIL	33
4.10.1	Exploração de oportunidades futuras e possíveis avanços na área	34
4.10.1.1	Licenciamento Ambiental	34
4.10.1.2	Biometano Sucoenergético	34
4.10.1.3	Energia Elétrica	37
4.10.1.4	Biometano	38
4.10.1.5	Saneamento	39
4.11	CONSIDERAÇÕES SOBRE INVESTIMENTOS E PERSPECTIVAS PARA OS MODELOS DE NEGÓCIO EM BIOGÁS NO BRASIL	40
5	CONCLUSÃO	43
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

Durante o período da Primeira Revolução Industrial, é sabido que o consumo de energia na sociedade permaneceu estável, sem apresentar mudanças significativas em seus níveis. Isso ocorreu devido ao uso predominante de biomassa tradicional como base para a geração de energia primária. Posteriormente, com os avanços tecnológicos alcançados durante a Segunda Revolução Industrial, a relação entre o desenvolvimento da sociedade e o consumo de energia passou por uma mudança drástica, adquirindo uma natureza recíproca.

Desde o término da Segunda Revolução Industrial, estima-se que o consumo anual de energia pela civilização humana tenha crescido mais de dez vezes. Nesse período, a geração de energia proveniente de fontes não renováveis, como carvão mineral, petróleo e gás natural, experimentou o maior aumento. A partir do início do século XX, a principal fonte de energia passou a ser a queima de carvão mineral, que era abundante e apresentava alto poder calorífico. Simultaneamente, outras fontes não renováveis, como o petróleo, foram desenvolvidas e amplamente utilizadas. Esse aumento no consumo energético impulsionou significativos avanços na produção industrial, contudo, teve como contrapartida um impacto substancial no meio ambiente, manifestado por problemas como poluição atmosférica, aquecimento global e alterações climáticas.

O crescente desafio global de garantir o acesso sustentável e eficiente à energia tem impulsionado a busca por fontes alternativas e renováveis. Nesse contexto, a produção de biometano emerge como uma promissora alternativa, alinhada não apenas à diversificação da matriz energética, mas também à necessidade premente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover a sustentabilidade ambiental. No contexto brasileiro, caracterizado por sua vasta biodiversidade e potencial agrícola, a produção de biometano apresenta-se como uma oportunidade estratégica para atender às demandas energéticas, ao mesmo tempo em que contribui para a mitigação das mudanças climáticas.

No contexto das discussões sobre mudanças climáticas e sustentabilidade, o termo “Net Zero” ganhou destaque mundialmente, referindo-se a um estado em que as emissões de gases de efeito estufa (GEE) produzidas por uma atividade, setor, empresa ou até mesmo por um país são equilibradas ou compensadas pela remoção de uma quantidade equivalente dessas emissões da atmosfera. Em outras palavras, o objetivo é alcançar um equilíbrio entre as emissões liberadas e as retiradas, resultando em zero emissões líquidas.

O Net Zero foi promovido como uma resposta estratégica para limitar o aumento da temperatura global e atenuar os impactos adversos das mudanças climáticas. O Acordo de Paris, firmado em 2015, teve um papel fundamental ao estabelecer a meta global de conter o aumento da temperatura média global a um nível bem abaixo de 2 graus Celsius em relação aos níveis pré-industriais, buscando limitar o aumento a 1,5 grau Celsius.

A interconexão entre o conceito de Net Zero e a produção de biogás e biometano é notável, destacando-se pela significativa redução de emissões de gases de efeito estufa. A produção de biogás, proveniente de resíduos orgânicos, desempenha um papel crucial ao evitar a liberação direta de metano, contribuindo assim para a mitigação dos impactos climáticos. Além disso, o biometano, enquanto gás renovável, emerge como uma alternativa eficaz na redução das emissões de carbono, especialmente quando substitui combustíveis fósseis em diversas aplicações.

Essa conexão estende-se à gestão sustentável de resíduos, onde a produção de biogás não apenas fornece uma fonte de energia, mas também abraça uma abordagem ambientalmente responsável. Ao converter materiais orgânicos em energia, evita-se a decomposição anaeróbica desses resíduos, processo que liberaria metano diretamente na atmosfera, intensificando os impactos negativos. Adicionalmente, a integração do biometano à infraestrutura de gás natural contribui de maneira expressiva para as metas de transição para fontes mais limpas, promovendo a sustentabilidade na matriz energética. Esse gás renovável, devido à sua densidade energética e versatilidade, surge como uma solução promissora, especialmente nos setores desafiadores de eletrificação, como o transporte pesado.

A base fundamental desse fenômeno reside na conversão de matéria orgânica, proveniente de resíduos agrícolas, urbanos e industriais, em biogás, por meio de processos anaeróbios. O biogás, composto principalmente por metano, pode ser refinado para a obtenção de biometano, um combustível de alta qualidade que pode ser diretamente integrado à infraestrutura de gás natural.

A ABiogás calcula que, anualmente, o Brasil não utiliza cerca de 44,1 bilhões de metros cúbicos de biogás, originados dos resíduos de agroindústrias, pecuária e sistemas de saneamento. Esse volume de biogás poderia contribuir com 19 GW de capacidade de geração de energia elétrica ou fornecer cerca de 120 milhões de m³ por dia de biometano, equivalente ao gás natural renovável. Em termos de equivalência energética, esse biogás poderia atender 34,5% da demanda por energia elétrica do Brasil ou substituir 70% do consumo de diesel no país.

O Brasil se destaca globalmente pelo seu excepcional potencial de produção de biogás, derivado exclusivamente de resíduos. Isso implica que a ampliação da capacidade de geração de energia pode ser alcançada sem a necessidade de novos plantios ou a desocupação de áreas agrícolas, simplesmente aproveitando os resíduos atualmente descartados que contribuem para as emissões de metano.

O biogás representa uma estratégia viável para a descarbonização de setores críticos da economia brasileira no curto a médio prazo. Ele pode aumentar a disponibilidade de energia estável e renovável a custos competitivos, assegurando a segurança energética do país e diminuindo a dependência em relação às flutuações dos preços internacionais e ao câmbio.

2 OBJETIVOS

A presente pesquisa visa realizar uma análise aprofundada referente à produção de biogás e biometano no Brasil, explorando suas potencialidades, desafios e implicações para a sustentabilidade. Ao abordar aspectos relacionados às tecnologias de produção, aos custos envolvidos, aos incentivos governamentais e às perspectivas futuras, esta investigação pretende contribuir significativamente para a compreensão do papel do biometano no contexto energético nacional. Nesse sentido, o estudo não apenas busca avaliar a viabilidade prática dessa alternativa energética, mas também contextualizá-la em relação às metas ambientais e econômicas do país, proporcionando uma visão holística e informada sobre o tema.

A análise proposta não se limitará apenas a uma abordagem técnica e econômica, mas também incorporará uma dimensão ambiental, considerando a contribuição potencial do biometano para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Desta forma, a pesquisa não apenas se posiciona como um guia pragmático para potenciais investidores e tomadores de decisão no setor energético, mas também como um alicerce teórico para a formulação de políticas públicas que incentivem a transição para fontes mais limpas e sustentáveis.

Por meio dessa investigação, espera-se lançar luz sobre as oportunidades e desafios inerentes à produção de biometano no Brasil, catalisando discussões informadas e promovendo o desenvolvimento de estratégias eficazes para a integração bem-sucedida dessa fonte de energia renovável no panorama energético nacional.

3 MÉTODOS

Para atingir o objetivo detalhado, será seguido um fluxo de trabalho: a análise da produção de biogás e biometano no Brasil é conduzida através de uma metodologia abrangente que integra diversas abordagens.

Ao integrar essas etapas, é visado oferecer uma análise abrangente, robusta e aplicável da produção de biogás e biometano no Brasil, contribuindo para o avanço do setor de energias renováveis no país. Serão levados em conta os seguintes passos:

- **Levantamento de dados e mapeamento ambiental**

A coleta e o levantamento de dados não serão realizados em ações diretas, mas serão obtidos através de fontes disponíveis na literatura.

É mirada, primeiramente, a identificação de regiões propensas para a produção dessa fonte de energia renovável através de bases de dados geográficas, fatores de rendimento e conversão advindos da literatura, parâmetros dos equipamentos utilizados, entre outros.

Além disso, fazer a identificação e classificação dos resíduos orgânicos mais viáveis para a conversão, que podem incluir resíduos agrícolas, dejetos animais e descartes urbanos.

- **Avaliação da Biomassa**

Deseja-se quantificar e classificar os recursos, estudando o potencial produtivo, utilizando metodologias de amostragem para elencar tais valores em diferentes categoria, mirando na produção de maior sustentabilidade e menor pegada de carbono.

Após isso, avaliar diferentes biodigestores, como eles operam e a influência de diferentes parâmetros na produção final de biogás. Por fim, uma análise de viabilidade de coleta e utilização de recursos para a produção de tal matriz energética.

- **Potencial econômico e avaliação de incentivos**

Deverão ser analisadas, financeiramente, etapas de implementação, bem como incentivos políticos e monetários que podem ser usufruídos pelos empreendedores dessa indústria.

Serão passadas estimativas de investimentos iniciais - levando em consideração custos com infraestrutura, equipamentos e instalações - e retorno financeiro - considerando programas de crédito de carbono e evidenciando incentivos existentes de órgãos públicos para projetos como esse.

- **Elaboração das recomendações**

Formular recomendações práticas para *stakeholders*, órgãos governamentais e investidores, destacando ações necessárias para o sucesso do projeto, trazendo à tona impactos socioambientais, equilíbrio entre sustentabilidade e rentabilidade e também trazendo maneiras de interações com políticas públicas, construindo a viabilidade geral de todo o processo.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 BIOGÁS E BIOMETANO

De acordo com a Associação Brasileira do Biogás (ABiogás), o biogás é o gás bruto gerado naturalmente pela decomposição da matéria orgânica na ausência de oxigênio. Conforme um estudo realizado pela ABiogás em 2021, os setores de maior potencial produtivo de biogás são, em ordem decrescente: sucroenergético, proteína animal, produção agrícola e saneamento, conforme descrito na figura 1.

O biometano é equivalente (CH_4) e intercambiável com o gás natural, possuindo a mesma faixa de índice de Wobbe - medida que representa a qualidade da combustão de um gás combustível. Ele é usado para comparar a intercambiabilidade de gases combustíveis - e poder calorífico superior.

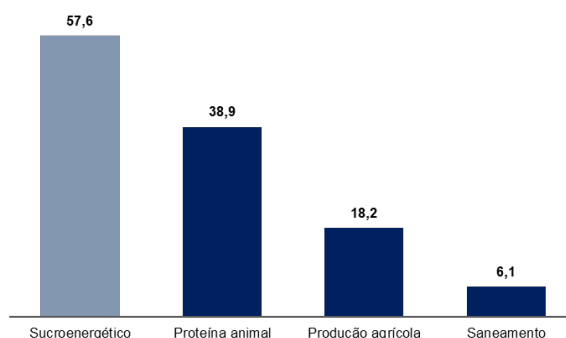


Figura 1 – Potencial produtivo de biogás por setor, em milhões Nm³/dia

O biogás é uma mistura de diversos gases, e sua composição varia conforme o substrato utilizado no processo de digestão anaeróbica. Os principais componentes do biogás são o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2).

O biometano pode ser obtido através da purificação do biogás, um processo que eleva o teor de metano ao remover outros contaminantes, como sulfeto de hidrogênio (H_2S), dióxido de carbono (CO_2), siloxanos, vapor d'água, entre outros.

A produção de biometano a partir do biogás envolve um processo de purificação conhecido como upgrading. Este processo consiste fundamentalmente na separação do metano (CH_4) do dióxido de carbono (CO_2). Como resultado, não apenas se obtém biometano com uma alta concentração de CH_4 , mas também se gera uma corrente enriquecida em CO_2 . (PANORAMA... , 2023)

Ao ser entregue para distribuição, são necessários os mesmos cuidados que são aplicados ao gás natural, podendo ser transportado da mesma maneira. Além disso, é permitido o enriquecimento do biometano com gás natural, GLP ou propano.

4.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO BIOGÁS

4.2.1 Processo de biodigestão

A reação para produção do biogás é chamada de biodigestão (ou digestão anaeróbia) e consiste na degradação da matéria orgânica presente, realizada por bactérias, na ausência de oxigênio. O processo ocorre em quatro etapas: Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese, conforme a imagem 2.

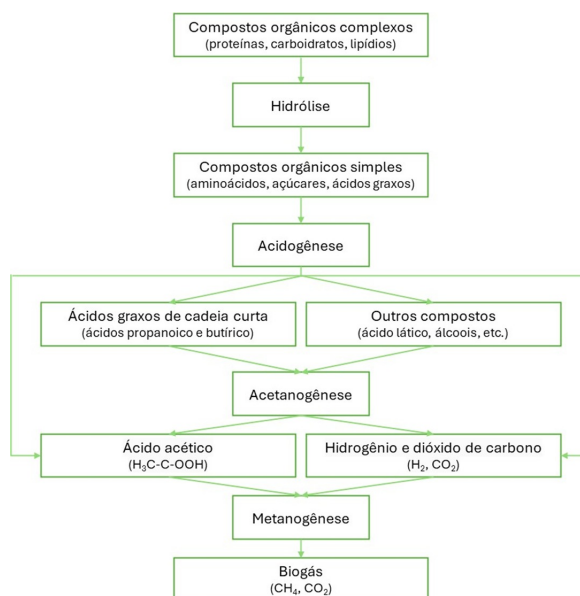


Figura 2 – Fluxograma simplificado da digestão anaeróbia

Na primeira etapa, Hidrólise, as bactérias hidrolíticas, através de reações bioquímicas, liberam enzimas que decompõem compostos orgânicos complexos como carboidratos, lipídios e proteínas em compostos menores - como aminoácidos, ácidos graxos e açúcares - os quais serão processado pelas células em etapas futuras.

Em seguida, ocorre a Acidogênese, etapa na qual as bactérias fermentativas decompõem os compostos intermediários, produzidos na etapa anterior, em ácidos graxos voláteis (como ácido acético, propanoico e butírico) e outros compostos como ácido láctico e alcoóis.

Na terceira etapa, a Acetogênese, acontece a oxidação dos produtos gerados na Acidogênese, gerando substratos apropriados para os microrganismos responsáveis por produzir o biogás. Os compostos da segunda etapa são degradados em ácido acético, hidrogênio e CO_2 .

Por fim, ocorre a Metanogênese. As bactérias envolvidas nessa etapa são estritamente anaeróbias e tem a capacidade de produzir metano, principal componente do biogás, a partir dos compostos gerados na etapas anteriores.

4.2.2 Parâmetros chave

O processo de biodigestão é influenciado por diversos fatores, porém os principais são: composição do substrato, oxigênio no meio, temperatura e pH.

A composição do substrato é importante pois ela determina a qualidade do produto final. Quanto maior a quantidade de matéria orgânica no substrato usado, maior será a eficiência do processo e conseqüentemente maior será o potencial de produção de biogás. Falando sobre o oxigênio no meio, para que as bactérias metanogênicas atuem da maneira desejada, é necessário que não haja O_2 no meio, dado que essas são células essencialmente anaeróbicas. A decomposição da matéria orgânica na presença de oxigênio produz apenas CO_2 e não o metano desejado.

A temperatura e o pH são fatores que influenciam diretamente a atuação das bactérias. É importante controlar tais parâmetros: se estiverem fora da faixa de atuação dos microrganismos, a reação é afetada negativamente. Altas temperaturas podem causar desnaturalização das enzimas, enquanto para temperaturas muito baixas o processo é interrompido. No caso do pH, a situação é similar, porém a faixa ideal de atuação varia durante as etapas, e realizar esse controle é de suma importância para o resultado final.

4.3 MATÉRIAS PRIMAS

Desde 2022, com a retomada das atividades pós-pandemia de COVID-19, os centros de geração de resíduos foram sendo novamente deslocados dos domicílios para escritórios, escolas, centros comerciais, entre outros. Além disso, o modelo híbrido de trabalho passou a ser adotado em maior escala, diversificando os locais de descarte de resíduos, fazendo com que as residências também mantivessem um papel relevante na geração de resíduos.

Em 2022, quase 82 milhões de toneladas de RSU (Resíduos Sólidos Urbanos) foram produzidas. Com isso, cada brasileiro gerou uma média de 1,043kg de resíduos por dia ou 381 kg/hab/ano. (ABRELPE, 2022)

Em 2020, mais de 34 milhões de toneladas de resíduos orgânicos foram gerados no Brasil; o grande volume de RSU gerado demonstra o forte potencial de geração de biogás nacional - com destaque para o estado de São Paulo, que foi responsável por gerar quase 50% desse volume, conforme observado na figura 3.

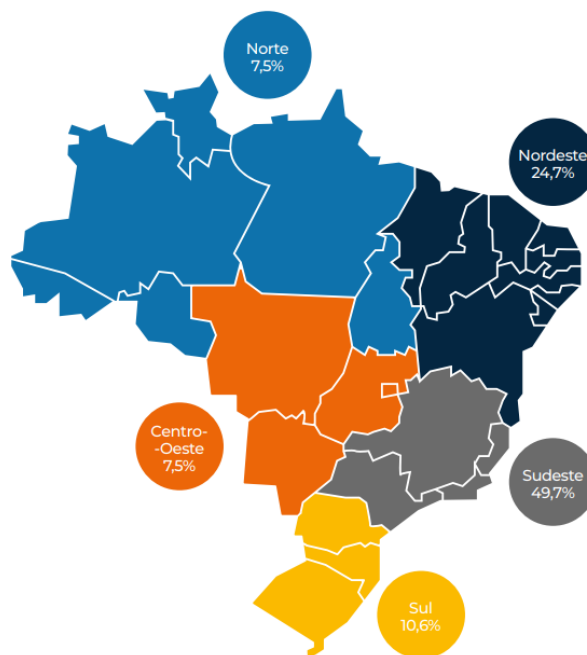


Figura 3 – Participação (%) de cada região brasileira na geração de RSU (ABRELPE, 2022)

Diversos tipos de matéria-prima podem ser usados para a produção de biogás. Os substratos mais eficazes para usinas são os que oferecem uma boa relação entre carbono e nitrogênio e estão prontamente disponíveis na localidade onde a usina será implementada. Exemplos típicos de substratos frequentemente empregados estão descritos na tabela 1.

A atual situação de produção de biogás no Brasil pode ser visto na figura 4. Na imagem é possível ver que apesar da maioria das plantas produtoras desse composto usarem como

Substrato	Descritivo
Esterco animal	Um dos substratos mais comuns e mais utilizados nas usinas de biogás, uma vez que contém uma mistura ideal de nitrogênio e carbono
Resíduos alimentares	A grande quantidade de matéria orgânica e nutrientes presente no substrato tornam essa uma promissora fonte de substrato para produção de biogás
Silagem de milho	Muito eficiente para produção de biogás, pois a grande quantidade de açúcar e amido em sua composição são facilmente digeridos pelos microrganismos
Resíduos agroindustriais	Bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz e vinhaça são substratos amplamente utilizados nas usinas de biogás por conta da sua alta disponibilidade e teor de matéria orgânica
Plantas energéticas	Ajudam no equilíbrio da dieta para o substrato e aumentam significativamente o rendimento de biogás do projeto
Lodos de estações de tratamento de água e esgoto	Alta concentração de matéria orgânica e nutrientes

Tabela 1 – Exemplos de substratos comumente utilizados (MACHADO, 2023)

matéria prima recursos agropecuário, o volume de biogás produzido é muito maior nas plantas que usam o saneamento como recurso.

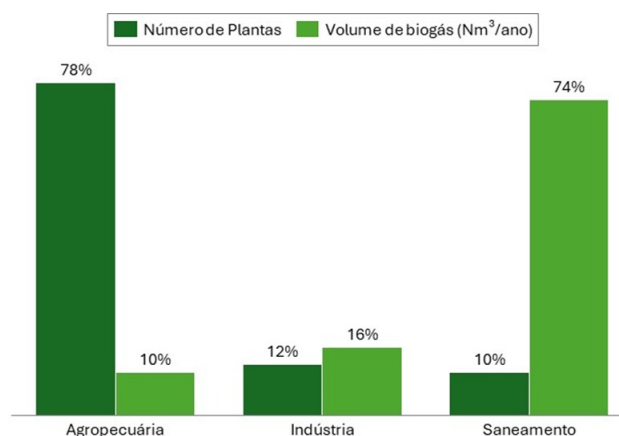


Figura 4 – Plantas de biogás em operação no Brasil e volume de produção. Fonte: CIBi-ogás

4.4 APLICAÇÕES DO BIOGÁS E BIOMETANO

A digestão anaeróbica e o biogás emergem como pilares fundamentais na transição para uma economia circular (FAGERSTRÖM et al., 2018), ultrapassando a concepção tradicional de meras fontes de energia renovável. Esta tecnologia multifacetada não só promove a gestão sustentável de resíduos, transformando matéria orgânica em energia, mas também atua na produção de biofertilizantes, contribuindo significativamente para a agricultura sustentável e a redução de emissões de gases de efeito estufa. Além disso, a digestão anaeróbica fomenta a segurança energética, oferecendo uma alternativa renovável e descentralizada aos combustíveis fósseis.

O uso do biogás pode ocorrer de forma local (on-site), próximo à instalação de biogás, ou em locais afastados (off-site) de onde o biocombustível é gerado. (MONTEIRO, 2011)

Explorando novas vias de aproveitamento, o biogás emerge como um recurso valioso. A geração de energia elétrica, a injeção de biometano nas redes de gás natural e sua aplicação como combustível veicular constituem os principais campos de utilização desse recurso renovável.

No contexto local, o emprego do biogás revela-se tanto prático quanto econômico, simplificando a rentabilização através da redução de despesas com transporte e processamento, que se limitam à secagem e filtração. Entretanto, essa conveniência acarreta em uma gama mais estreita de opções de utilização, frequentemente direcionadas ao aquecimento de água, alimentação de fornos, além da produção conjunta de eletricidade e calor em sistemas de cogeração para consumo próprio.

Adicionalmente, outras estratégias de valorização do biogás estão em voga, incluindo a injeção do biometano purificado em redes de gás natural e o seu armazenamento em condições pressurizadas para posterior uso em veículos ou residências, demandando a purificação do biogás para ampliação do seu potencial energético (transformando-o em biometano).

Este panorama sinaliza o biogás não apenas como um recurso energético de potencial renovável, mas também como um vetor para inovações sustentáveis, abrindo caminho para a investigação contínua de métodos de aplicação que ampliem seu valor e sustentabilidade.

4.4.1 Produção de Calor e Eletricidade

O uso mais comum do biogás é em sua forma não aprimorada para a produção de eletricidade e calor - CHP (Calor e Energia Centralizados), que é, de fato, a produção de eletricidade renovável e calor, também conhecido como cogeração. O calor do motor CHP também pode ser usado para acionar um *chiller* de absorção, proporcionando uma fonte de resfriamento, resultando em um sistema combinado de resfriamento, calor e energia (CCHP), também conhecido como trigeração. (FAGERSTRÖM et al., 2018)

A tecnologia CHP (Cogeração de Calor e Energia) baseia-se nas plantas de calor e eletricidade em bloco (BHPP), nas quais a eletricidade é gerada por um motor de combustão. Esta eletricidade pode ser utilizada localmente ou fornecida à rede elétrica. A energia térmica (calor renovável) é um subproduto gerado pelo motor e normalmente é utilizada localmente, como em sistemas de aquecimento distrital. Existem diversos tipos de unidades de geração de energia, incluindo motores de quatro tempos, microturbinas ou motores Stirling, cuja eficiência elétrica varia entre 25 a 45%, dependendo do conjunto de cogeração utilizado (Persson et al., 2014; Kaparaju e Rintala, 2013). A unidade de geração CHP pode ser instalada na instalação de biogás, ou o biogás pode ser transportado através de um sistema de tubulação, geralmente sob baixa pressão, para uma planta CHP ou uma unidade de aquecimento distrital na área. O aproveitamento do calor renovável é de suma importância, pois proporciona benefícios econômicos e ambientais significativos adicionais, além da utilização do biogás para a produção de eletricidade renovável. (FAGERSTRÖM et al., 2018)

A produção da eletricidade renovável sem a utilização do calor liberado é uma opção - entretanto, não é a mais economicamente viável.

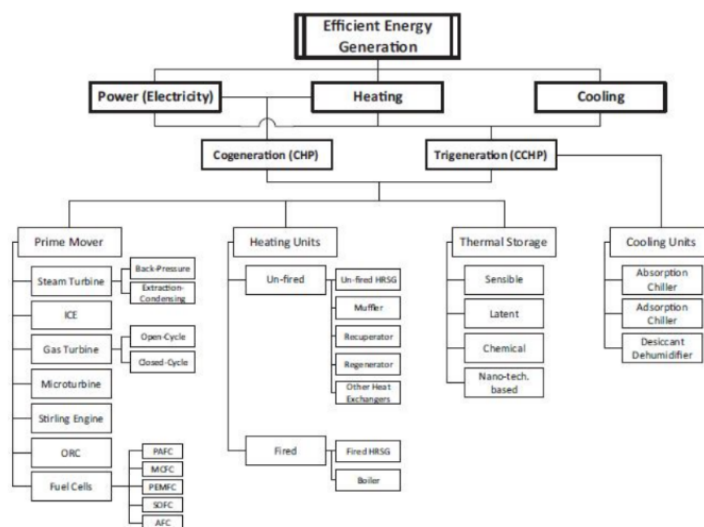


Figura 5 – Diagrama dos principais componentes do CCHP, de acordo com (BROUCHE; LAHOUD, 2018)

Para instalar um sistema CCHP, é crucial adotar métodos de projeto adequados. Durante a avaliação, os critérios principais a serem analisados incluem eficiências energética, vantagens econômicas e benefícios ambientais, juntamente com outros parâmetros variados. Por isso, é realizada uma análise abrangente dos critérios de avaliação mais utilizados na literatura. Posteriormente, são introduzidos os métodos primordiais de otimização e de tomada de decisão. (BROUCHE; LAHOUD, 2018)

Sugere-se, então, uma estratégia de seleção geral para escolher o sistema CCHP ade-

quando conforme as necessidades específicas. Assim, para concretizar um projeto CCHP, deve-se escolher e projetar cuidadosamente os componentes compatíveis, além de aplicar modelagem econômica e ambiental, otimização e técnicas decisórias para implementar a solução energética mais eficaz.

4.4.2 Injeção de Biometano na Rede de Gás Natural

O biometano possui propriedades que permitem sua substituição direta pelo gás natural em todas as suas aplicações, tornando possível sua injeção na rede de gás natural, além de ser apto para transporte como gás comprimido através de caminhões-tanque (conhecido como gasoduto virtual) ou na forma de gás liquefeito, conhecido como biometano liquefeito (Bio-GNL). (ARAÚJO, 2023)

A injeção de biometano proveniente de aterros na rede de gás natural exige que seja submetida e aprovada pela ANP uma análise de risco. Essa análise deve abordar o controle de qualidade em relação aos principais contaminantes, como siloxanos, compostos halogenados, compostos orgânicos voláteis (VOC) e metais, além de incluir medidas para barrar microrganismos. Uma segunda barreira de segurança é necessária para assegurar a remoção efetiva desses contaminantes.

Após seu tratamento, o biogás pode ser integrado à rede de distribuição de gás de duas formas: uma delas é ajustar seu valor calorífico para equiparar-se ao do gás natural, permitindo assim sua adição à rede sem quaisquer restrições como um substituto direto; a outra estratégia envolve adicionar o biogás em quantidades específicas, assegurando que a mistura final não exceda os parâmetros legais, funcionando, neste caso, como um complemento ao suprimento existente. (HUGUEN, 2010)

No Brasil, o primeiro empreendimento de inserção de biometano na malha de distribuição brasileira ocorreu no Ceará. A iniciativa, que começou em 2018, é um esforço conjunto da Marquise Ambiental com a Ecometano, pertencente ao grupo MDC, denominada GNR Fortaleza. A GNR Fortaleza produz 100.000 m³/dia de biometano proveniente de aterro sanitário, e possui certificação de biocombustíveis - Renovabio (ARAÚJO, 2023).

Esta parceria possibilita a injeção do biometano gerado no Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia, situado na área metropolitana de Fortaleza, diretamente na rede operada pela Cegás.

Além disso, a MDC possui um projeto similar no aterro de Caieiras, conectado à rede de distribuição da Comgás.

Em 2021, o Grupo Cocal também realizou um projeto significativo no setor de biometano, em Nanduba - SP, destacando-se por possuir um duto exclusivo para o transporte deste gás. Com uma extensão total de 68 km (52 km em aço e 16 km em PEAD), a instalação é capaz de produzir 118.000 m³ de biometano por dia, originário de resíduos do setor sucroenergético. (ARAÚJO, 2023)

Devido o sucesso da sua primeira planta, o Grupo iniciou, em 2023, a construção da sua segunda planta de biometano. Com investimento de R\$ 216 milhões, a nova unidade terá capacidade de produção de até 60 mil m³/dia durante a safra. Usando equipamentos nacionais, o biogás será gerado a partir de vinhaça e torta de filtro – resíduos da industrialização da cana-de-açúcar – e outras matérias-primas. A distribuição do biometano produzido pela nova planta ocorrerá por meio de GNC (Gás Natural Comprimido), utilizando cilindros transportados em carretas. Isso possibilita o fornecimento do combustível a clientes industriais ou comerciais em qualquer região, sem restrições geográficas. A expectativa é que as operações se iniciem em abril de 2025. (DESCONHECIDO, 2023)

Os exemplos de Lille, Gotemburgo e Berna demonstraram que é viável e lucrativo injetar biometano nas redes de gás natural já existentes (BIOGASMAX, 2010).

4.4.3 Combustível para veículos

A infraestrutura para utilização do biometano como combustível de veículos não exige uma infraestrutura robusta e complexa: apenas faz-se necessário que o veículo possua um motor adaptado para funcionar utilizando-se gás natural e que o tanque de armazenamento suporte a pressão do combustível (que varia entre 200 e 250 bar) - entretanto, é necessário que o biogás seja limpo e purificado, numa etapa anterior, para aumentar seu poder calorífico.

Os requisitos para utilização estão presentes na norma ISO/DIS 15403, que estabelece a qualidade do GN para uso comprimido como combustível para veículos, presente na tabela 2 abaixo:

Parâmetro	ISO/DIS 15403-2006
Índice de Wobbe (kW/m ³)	N/a
Metano (%volume)	>96
Número de Metano	N/a
Oxigênio (%volume)	<0,5
Dióxido de Carbono (% volume)	<3
CO ₂ + O ₂ + N ₂ (%volume)	N/a
H ₂ S (mg/m ³)	<5
H ₂ O (mg/m ³)	N/a

Tabela 2 – Qualidade do GN para uso comprimido como combustvel para veculos de acordo com a ISO CD 15403

Um ponto de crucial importância é a infraestrutura necessária para disponibilizar estações de abastecimento de biometano, que envolve a criação ou adaptações de novas estações, sendo necessário inspeção e certificação periódica. (HUGUEN, 2010)

4.5 ASPECTOS AMBIENTAIS

A utilização do biogás, ou biometano, emerge como uma opção promissora particularmente para utilização como combustível para transporte.

Através de uma Life Cycle Impact Assesment (LCA, sigla em inglês para avaliação do ciclo de vida), provou-se que o biogás proveniente tanto de resíduos alimentares quanto de esterco apresenta impactos ambientais significativamente menores em várias categorias em comparação com alternativas como diesel fóssil, biodiesel e gás natural (LYNG; BREKKE, 2019).

A análise mostrou que os combustíveis fósseis (diesel, eletricidade de carvão e gás natural) e o biodiesel de óleo de palma têm os maiores impactos ambientais. As alternativas de combustíveis renováveis, como o biogás e o HVO produzido a partir de óleo de cozinha usado, apresentaram impactos menores, especialmente em termos de emissões de gases do efeito estufa.

Especificamente, o biogás de resíduos alimentares possui uma contribuição comparativamente baixa para o aquecimento global, com emissões de apenas 0,28 kg CO_2 -eq/km, substancialmente inferior aos 1,1 kg CO_2 -eq/km do diesel fóssil e 1,09 kg CO_2 -eq/km do óleo de palma e eletricidade por carvão - perdendo apenas para a geração de energia das hidrelétricas (0,11 kg CO_2 -eq/km).

Além disso, o biogás proveniente de resíduos alimentares e esterco minimiza a formação de oxidantes fotoquímicos (POCP), com valores tão baixos quanto 0,11 e 0,13 g C_2H_4 -eq/km respectivamente. Quando comparado ao biodiesel de óleo de palma (com 0,73 g C_2H_4 -eq/km), o biogás destaca-se por sua capacidade de contribuir para uma qualidade do ar superior, dentre outros parâmetros promissores considerados na comparação da análise de LCA.

4.5.1 Processos de Purificação do Biogás

Atender às especificações da Resolução nº 8, de 30 de janeiro de 2015, e da Resolução nº 685 de julho de 2017 da ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis é fundamental para que o biometano possa ser utilizado em fins veiculares, instalações residenciais, industriais e comerciais. Estas normativas estabelecem a composição, tolerâncias e o poder calorífico superior (PCS) exigidos para o biometano, garantindo sua qualidade e viabilidade para comercialização.

Para garantir que o biometano atenda às especificações exigidas, é essencial submetê-lo a dois processos de purificação distintos. O primeiro processo visa remover os contaminantes em excesso, enquanto o segundo tem o propósito de elevar o poder calorífico. Assim, diversas técnicas podem ser empregadas para cada etapa do processo de purificação.

Segundo (TABATABAEI et al., 2020) Dependendo da natureza dos materiais brutos utilizados, o biogás (contendo de 55% a 75% de biometano) que sai do sistema de digestão

anaeróbica inclui algumas impurezas, como CO_2 , água e H_2S . Essas impurezas podem representar ameaças à saúde humana e exercer impactos adversos (por exemplo, menor teor energético, corrosão e aumento das emissões) nos sistemas de utilização, como geradores de calor e energia. Além disso, essas impurezas reduzem o índice de Wobbe, o valor calorífico e a eficiência energética do biogás.

Portanto, o biogás precisa ser melhorado para obter um produto final que atenda aos padrões de qualidade exigidos é uma parte crucial de qualquer sistema de produção de biogás. Muitas tecnologias de melhoria de biogás foram propostas, algumas das quais estão disponíveis comercialmente.

Essas tecnologias incluem lavagem úmida, separação criogênica, absorção física e química, adsorção por variação de pressão, separação por membrana, melhoria in situ e métodos de melhoria biológica.

Em linha com o escopo do presente trabalho, são apresentadas e discutidas aqui as técnicas de melhoria biológica utilizadas para remover algumas impurezas.

4.5.1.1 Remoção de CO_2

Há várias razões para a necessidade de remover o dióxido de carbono do biogás. Em primeiro lugar, essa remoção pode resultar em um aumento de cerca de 30% no valor calorífico do biogás, ao reduzir seu teor de CO_2 (5300 vs. 6800 kcal/m³). Em segundo lugar, a eliminação do CO_2 pode levar a uma redução nos custos de compressão e transporte.

Por fim, ao remover o CO_2 , as propriedades do biometano se equiparam às do gás natural purificado, permitindo que o produto final da digestão anaeróbica seja usado de forma intercambiável em várias indústrias como uma alternativa biogênica ao gás natural de origem fóssil.

A aplicação de micróbios vivos em células de eletrólise microbiana (CEM) para aprimorar o biogás através da conversão de CO_2 em metano ou captura de CO_2 desperta interesse devido à utilização de catalisadores auto-sustentáveis (isto é, micróbios).

4.5.1.2 Sistemas bioeletroquímicos

Dentre alguns métodos, especificamos nessa seção a remoção bioeletroquímica de CO_2 , onde este é transformado em metano, é alcançada por meio de processos denominados eletrometanogênese e metanogênese hidrogenotrófica. Nessas etapas, eletricidade e água/hidrogênio são as únicas fontes de energia e elétrons, respectivamente, enquanto os metabólitos podem diretamente aceitar elétrons formados no cátodo para a redução de CO_2 ($CO_2 + 8H^+ + 8e^- / CH_4 + 2H_2O$).

Em 2015, Bassani et al. propuseram uma configuração de dois reatores ex situ para integrar MEC e AD. Neste sistema, o biogás produzido no primeiro reator era transferido

para o segundo (ou seja, reator enriquecido com H_2), onde o hidrogênio era adicionado para reduzir o CO_2 através da metanogênese hidrogenotrófica.

Uma limitação significativa dessa abordagem é a menor transferência de massa gás-líquido do hidrogênio. Em condições mesofílicas e termofílicas, foram obtidos teores médios de metano de 89% e 85%, respectivamente. A análise da dinâmica microbiana no reator enriquecido com H_2 revelou que essa estratégia de aprimoramento do biogás segue a via hidrogenotrófica, devido ao aumento das populações de metanogênios hidrogenotróficos e desulfobáctero sintrófico, às custas da população de metanogênios acetoclásticos.

4.5.1.3 Fotossíntese de células microalgais

Temos também o método por fotossíntese de células microalgais: Sua habilidade de absorver CO_2 por meio da fotossíntese pode ser aproveitada para melhorar o biogás. Devido à sua rápida taxa de crescimento e alta capacidade de adaptação a diferentes ambientes, as microalgas podem capturar uma quantidade significativa de dióxido de carbono.

A biomassa microalgal resultante da utilização do CO_2 presente no biogás pode ser usada como matéria-prima para a produção de outros biocombustíveis ou subprodutos de alto valor agregado. Em um pedido de patente, *Kampanatsanyakorn et al.* conseguiram reduzir 97% do CO_2 presente no biogás bruto usando uma alga suplementada com bicarbonato de sódio.

A estratégia de aprimoramento do biogás com base em algas também pode contribuir, em certa medida, para a descontaminação do digestato. No entanto, é importante observar que a aplicação direta do digestato não é recomendada para o cultivo comercial de microalgas.

Em um estudo conduzido por Yan et al., um sistema baseado em microalgas foi capaz de simultaneamente aprimorar o biogás (com uma remoção de cerca de 85% de CO_2) e remover contaminações (com reduções de 85,5% de DQO, 87,1% de nitrogênio e 92,4% de fósforo total) do digestato, sob um sistema de controle de iluminação otimizado, utilizando uma mistura de LED vermelho:azul na proporção de 5:5, durante 144 horas.

As intensidades de luz ótimas foram de 300 mmol/m²/s (com fotoperíodo de 16 horas de luz para 8 horas de escuridão), 600 mmol/m²/s (com fotoperíodo de 14 horas de luz para 10 horas de escuridão) e 900 mmol/m²/s (com fotoperíodo de 12 horas de luz para 12 horas de escuridão), respectivamente, para os períodos de tempo de 0 a 48, 48 a 96 e 96 a 144 horas.

4.5.1.4 Remoção de H_2S

O H_2S é considerado o contaminante mais prejudicial para os equipamentos de conversão de energia, como geradores de eletricidade, entre os presentes no biogás, devido à sua

natureza altamente corrosiva. Os tratamentos químicos tradicionais para remover o H_2S geralmente não são ambientalmente sustentáveis devido aos altos requisitos de produtos químicos, energia e considerações de descarte. Como alternativa, os métodos biológicos de remoção de H_2S podem ser aplicados com alta segurança ambiental.

Em particular, ao contrário do tratamento químico, os produtos finais da dessulfurização biológica, como o sulfato e o enxofre elementar, não representam mais riscos. No entanto, o processo biológico é mais caro do que o tratamento químico de oxidação (52.000 vs. 8.700 USD). Os principais custos da remoção biológica de H_2S (filtração biotrickling) variam de 500 a 1000 USD por metro cúbico.

O principal motivo desse custo é o investimento em material de enchimento, onde esforços adicionais direcionados para o desenvolvimento de novos filtros biotrickling utilizando compostos mais acessíveis, como o plástico reforçado com fibra de vidro, podem contribuir para a redução do custo de construção. No entanto, os lavadores químicos feitos com os mesmos compostos ainda são mais econômicos, custando 17.090 USD em comparação com 5.224 USD.

4.5.1.5 Remoção das demais impurezas

Além das impurezas principais mencionadas anteriormente no biogás (CO_2 e H_2S), também é crucial remover impurezas menores, como siloxanos, compostos halogenados, O_2S/N_2 e água, para evitar possíveis danos às instalações de distribuição e utilização. Por exemplo, compostos halogenados, como 1,1,1-tricloroetano, 1,1-dicloroetano, 1,2-dicloroetano, tetracloroetileno, 1,1,1-tricloroetano, tetraclorometano, diclorometano, diclorodifluorometano e 1,1,2-triclorotrifluoroetano, podem ser eliminados por sistemas biológicos aeróbios e anaeróbios.

Embora os siloxanos, como os metilsiloxanos, sejam resistentes à decomposição biológica, relatórios experimentais indicaram que o gênero *Pseudomonas* é capaz de degradar hexametilciclotrisiloxano e octametilciclotetrasiloxano.

Popat e Deshusses utilizaram um filtro biotrickling preenchido com porcelana de osso bovino, com um tempo de retenção de gás de 30 a 40 minutos, para melhorar um fluxo de gás contendo 45 mg/m³ de octametilciclotetrasiloxano, alcançando eficiências de remoção tão altas quanto 50-60%.

Até o momento, nenhum método biológico capaz de remover água do fluxo de biogás foi relatado, portanto, métodos físicos e químicos, como adsorção, absorção e condensação, permanecem as opções mais viáveis.

4.6 PANORAMA ATUAL DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO BRASIL E NO MUNDO

4.6.1 Panorama da produção no Brasil

A busca por fontes energéticas menos agressivas ao meio ambiente vem ganhando cada vez mais relevância nos últimos anos, e o biogás não foge dessa tendência. Segundo o CI-Biogás, uma instituição de ciência e tecnologia com inovação dedicada ao desenvolvimento do biogás, o volume produzido cresceu cerca de 87% nos últimos 10 anos.

Quando as plantas que atualmente estão em fase de implementação e reformulação entrarem em operação, espera-se que ocorra um aumento de quase 600 milhões Nm^3/ano de biogás, o que equivale a um aumento de aproximadamente 20% da produção nacional.

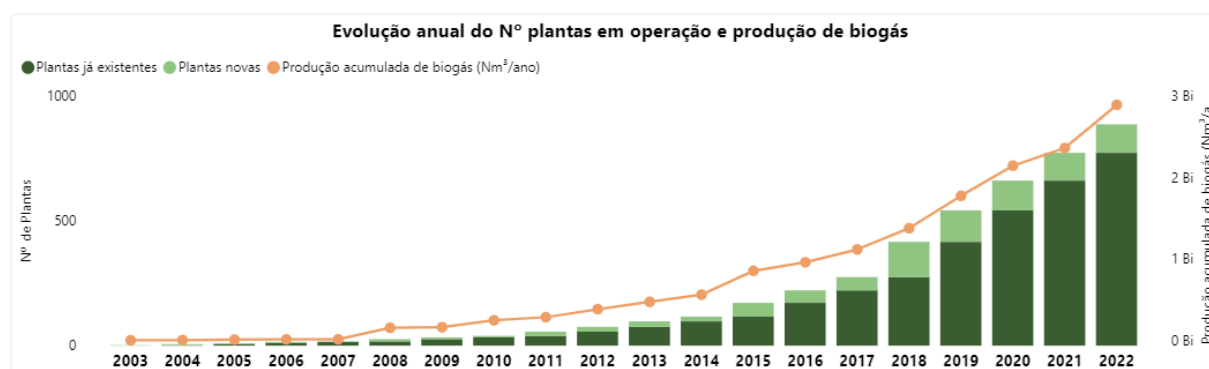


Figura 6 – Evolução do setor de Biogás no Brasil

Embora o maior número de plantas de biogás em operação no país esteja no setor agropecuário (77%), a maior produção em volume de biogás está associada ao setor de saneamento (74%), com destaque para os aterros sanitários, que são responsáveis por 96% da produção de biogás nesta categoria (estes dados podem ser melhor visualizados na figura 7).

Apesar de contribuir com uma quantidade menor de biogás em comparação ao setor de saneamento, o setor industrial apresenta um alto potencial de crescimento, especialmente as usinas de açúcar e etanol. De acordo com estimativas da EPE (2022), o setor sucroenergético possui uma capacidade de produção de biogás de aproximadamente 5,2 bilhões de Nm^3/ano , considerando a utilização de vinhaça e torta de filtro, principais resíduos utilizados para a produção de biogás nas usinas.

Atualmente, o setor sucroenergético é responsável por mais da metade do volume de biogás gerado nas plantas do setor industrial, totalizando 269 milhões de Nm^3/ano . No entanto, essa produção atual representa apenas 5% do potencial de aproveitamento da vinhaça e torta de filtro gerada no país.

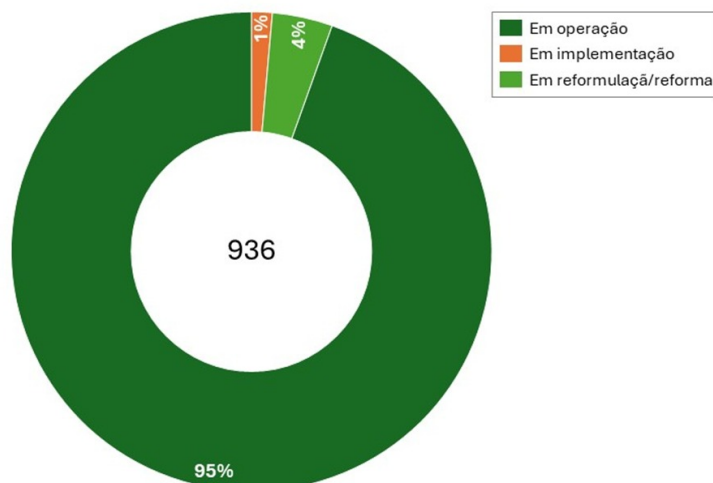


Figura 7 – Número de plantas de biogás do Brasil

4.6.2 Panorama da produção nos Estados Unidos e Europa

Nos EUA, o nome dado ao biometano é gás natural renovável (renewable natural gas, em inglês) e está em rápida expansão devido estímulos através de incentivos - principalmente voltados ao setor de transporte.

No contexto federal, o Renewable Fuel Standard (RFS) reconhece o biometano como biocombustível avançado ou lignocelulósico, sendo que os créditos gerados nesta última categoria têm apresentado um valor maior no mercado. Além disso, a Lei de Redução de Inflação (IRA) oferece incentivos fiscais para investimentos em biometano.

Em nível estadual, destaca-se o Low Carbon Fuel Standard (LCFS) da Califórnia. De acordo com a metodologia de avaliação de ciclo de vida do programa, o biometano pode alcançar uma intensidade de carbono negativa, dependendo da matéria-prima e do processo de produção. Nessas circunstâncias, os produtores certificados geram uma quantidade significativa de créditos por unidade de energia em comparação com outros biocombustíveis.

É necessário que os incentivos continuem para a manutenção do desenvolvimento do biogás como fonte de energia estadunidense, o que inclui uma crescente participação de empresas locais de distribuição do gás natural, pautadas por pressões regulatórias.

Já na Europa, segundo a Associação Europeia de Biogás (EBA), o continente passou de mil plantas de biometano em operação em 2021, atingindo pouco mais de 1200 plantas em 2022. A Alemanha lidera o ranking de produção de biometano, com 1,28 bilhão de m³, considerando 10 kWh/m³ de biometano.

A União Europeia definiu uma meta de 35 bilhões de m³ de biometano sustentável por ano até 2030, meta esta diretamente ligada aos objetivos de diminuição da dependência de importação de gás natural russo.

4.6.3 Tecnologias de produção de biogás

A escolha da tecnologia de produção do biogás é uma etapa de extrema importância para o resultado final do processo. A escolha do biodigestor (local onde ocorrem as reações) é influenciada por diversos fatores, como por exemplo a qualidade/quantidade de matéria prima disponível, a demanda de biogás e as condições do local onde esse reator será implantado.

4.6.3.1 Biodigestor Lagoa Coberta (BLC)

Esse tipo de biodigestor é comumente encontrado em áreas rurais, devido a produção animal. Ele é instalado como um tanque escavado no solo, similar a uma piscina, impermeabilizado e coberto com um material geossintético como PVC (policloreto de vinila), PEAD (polietileno de alta densidade), entre outros polímeros (naturais ou sintéticos) e são feitos em forma de manta ou tira.

Este é um modelo de biodigestor que é considerado de baixa tecnologia, além disso, uma de suas principais características é a baixa permeabilidade para fluídos e gases que ele apresenta. Normalmente, o BLC tem um formato retangular, porém sua inclinação e a maneira como vai ser instalado depende do solo do local de instalação. Um detalhe importante sobre esse modelo é que ele normalmente não apresenta um mecanismo de controle de temperatura, logo a produção de biogás onde a temperatura ambiente é mais baixa vai ser prejudicada. Em relação a matéria prima, a Lagoa é apropriada para o tratamento de efluentes que contém baixa carga volumétrica e baixa concentração de sólidos.

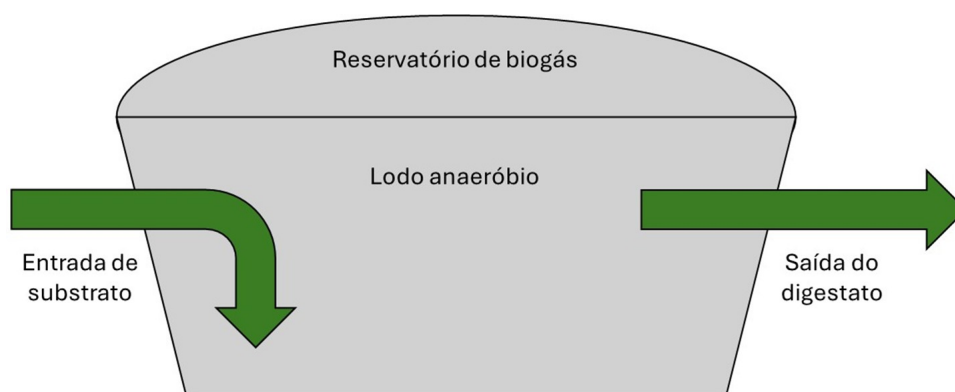


Figura 8 – Esquema representativo do corte de um reator do modelo BLC

4.6.3.2 Tanque de Agitação Contínua - ou CSTR

Como diz o nome, o reator CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*) é caracterizado por seu sistema de agitação, que tem o intuito de manter o conteúdo homogenizado. Além

disso, nesse tipo de biodigestor há mecanismos de controle de parâmetros de processo, como temperatura, pH e nível de biomassa.

Esse tipo de reator aceita grandes cargas volumétricas e uma alta concentração de sólidos na alimentação. O seu modelo de operação possibilita a codigestão, que é o processo de misturar dois tipos diferentes de substrato na alimentação, por conta da agitação no interior do tanque. Outro ponto positivo desse mecanismo é que não há acúmulo de lodo no biodigestor.

Portanto, seu principal ponto positivo é aumentar a taxa de reação e de produção do biogás, através da mistura, pois ela melhora a distribuição e o contato entre substrato, enzimas, nutrientes e microrganismos. Em contrapartida, dada a maior complexidade desse modelo de reator, ele apresenta um custo mais elevado de instalação e manutenção.

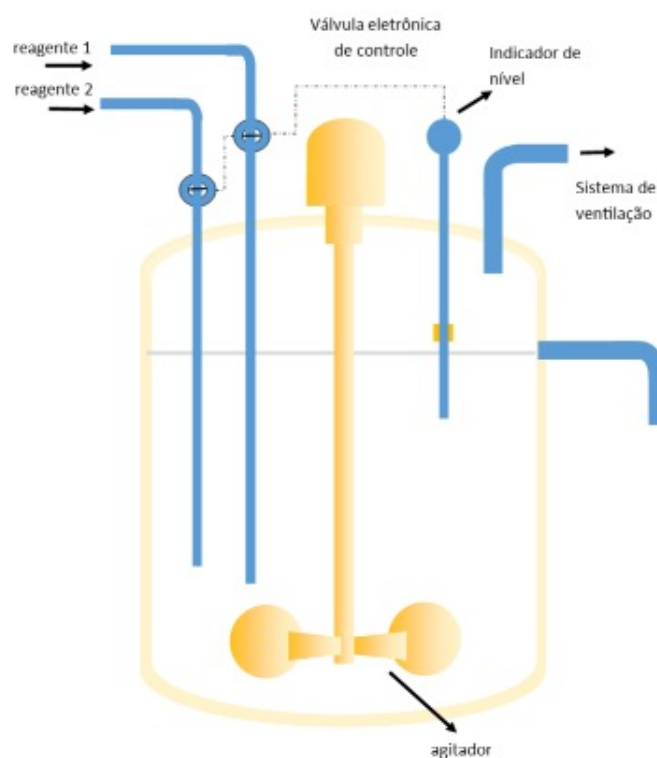


Figura 9 – Modelo de um biodigestor CSTR. Fonte: CIBiogás

4.6.3.3 Biodigestor em fase sólida (*dry digestion*)

Para esse tipo de reator o modelo de operação mais comum é o em batelada, ou seja, é um processo descontínuo e que tem que ser recarregado. A alimentação costuma ter entre 20% - 40% de sólidos em sua composição e é adicionado juntamente com o inóculo no reator. Passa-se um líquido pela fase sólida para que ocorra a produção do biogás, e esse é recirculado pelo reator com o auxílio de uma bomba.

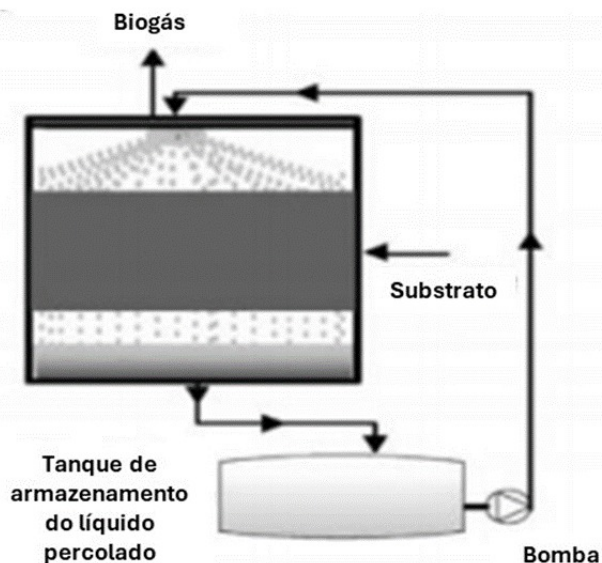


Figura 10 – Modelo de um biodigestor em fase sólida. Fonte: CIBiogás (Traduzido)

4.7 ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE DO PROCESSO PRODUTIVO

4.7.1 Avaliação do impacto ambiental da produção de biometano em comparação com outras fontes de energia

Segundo a Research Centre for Greenhouse and Gas Innovation, o biometano tem uma das menores pegadas de carbono entre os combustíveis conhecidos. Comparando as emissões de CO_2 por megajoule (MJ) de diferentes matrizes energéticas, esse produto apresentou uma emissão negativa de cerca de $-20 \text{ gCO}_2/\text{MJ}$, enquanto o diesel emite mais de $100 \text{ gCO}_2/\text{MJ}$ e o gás natural veicular mais de $80 \text{ gCO}_2/\text{MJ}$.

Dentre as diversas matrizes energéticas, dos combustíveis, o biometano se apresentou como a melhor opção, chegando à patamares sustentáveis de matrizes como eletricidade solar e eólica. A substituição de 47% do diesel consumido atualmente por esse produto teria resultado em uma redução de 74% das emissões provenientes da queima de diesel naquele ano. Essa redução representa aproximadamente 17% das metas de redução estabelecidas pelo Brasil.

4.7.2 Análise da contribuição para a redução de emissões de gases de efeito estufa

Jin Mi Trioli, da University of Southern Denmark, definiu o conceito de Biorefinarias Integradas, onde há a capacidade do biogás de ser produzido a partir do bagaço de diversas culturas. Segundo eles, foram identificados 92 tipos de biomassa de plantas com potencial para gerar metano.

Com esse conceito introduzido, foram destacadas propostas instalações integradas,

com emissões zero, que podem ser especialmente benéficas para o Brasil, onde a produção de etanol gera emissões de metano e o uso da vinhaça como fertilizante emite NO_2 .

A proposta das instalações integradas é a produção sequencial de biocombustíveis e biofertilizantes, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa, sendo capazes de reduzir emissões até mesmo quando comparado com matrizes energéticas mais verdes, como o etanol.

4.8 INCENTIVOS E POLÍTICAS PÚBLICAS

4.8.1 Incentivos e Políticas Públicas no Brasil

Quanto à introdução do biometano no Brasil, existe uma cronologia que foi respeitada até chegarmos nas políticas públicas existentes para sua produção atualmente:

- Em 2015, o biometano foi regulamentado e classificado pela ANP (resolução 08/2015).
- Em 2016, foram estabelecidas, em caráter experimental, as regras de utilização do biometano gerados em aterros e Estrações de Tratamento de Esgoto (ETE) (resolução 21/2016).
- Em 2017, foram definidos os critérios para a validação do controle de qualidade e a descrição do biometano proveniente de aterros sanitários e instalações de tratamento de esgoto (resolução 685/2017), com a implementação da lei Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) (PL número 13.576/2017).
- Em 2018, Foram estabelecidas as diretrizes para a concessão da permissão para operar na produção de biocombustíveis e para a autorização de funcionamento da unidade de produção de biocombustíveis (resolução 734/2018).
- Em 2021, foi estabelecido o decreto número 10712/2021, que decreta a Nova lei do gás, 14134/2021.
- Atualmente, o Brasil tem diversas políticas implementadas, dentre elas destacam-se a Estratégia Federal de incentivo ao uso sustentável de biogás e biometano, e a portaria de inclusão do Biometano no Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura – REIDI.

Seguindo a Agência Câmara de Notícias, portal de imprensa da Câmara dos deputados do Distrito Federal do Brasil, Brasília, podemos também detalhar o Projeto de Lei 2193/2020 propõe a criação da Política Federal do Biogás e do Biometano, visando estimular a produção, pesquisa e consumo de gás derivado de resíduos orgânicos.

A Política Federal do Biogás e do Biometano visa a ampliação dos investimentos em infraestrutura para produção, distribuição e comercialização desses combustíveis, o

estímulo à pesquisa relacionada e a promoção do uso de biometano no transporte público municipal e de biofertilizantes na agricultura.

A política se fundamenta em dois aspectos principais: oferecimento de incentivos fiscais e disponibilização de financiamento pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) em condições facilitadas.

Dentre os incentivos fiscais propostos, destaca-se a redução de 50% da alíquota do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) para empresas dedicadas à produção de biogás e biometano na aquisição de máquinas e equipamentos, bem como para aquelas que integram o biometano em redes de gasodutos. Adicionalmente, está prevista uma redução de IPI para ônibus movidos a gás adquiridos por empresas de transporte público coletivo.

Todas essas medidas de incentivo serão financiadas por meio de um aumento na Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico (Cide-combustíveis), um tributo sobre a importação e a comercialização de petróleo e derivados.

Quanto aos financiamentos, a proposta inclui descontos nas taxas de juros e encargos cobrados pelo BNDES nos empréstimos destinados aos produtores de biogás e biometano.

4.8.2 Análise de incentivos fiscais e subsídios disponíveis para a produção de biometano

No Brasil, três marcos históricos se destacam na integração dos biocombustíveis no país: o Programa Nacional do Alcool, conhecido como PROALCOOL, lançado em 1975; a tecnologia flex-fuel, implementada em 2003; e o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), estabelecido em 2005. Mais recentemente, em dezembro de 2016, foi lançado o RenovaBio (Política Nacional de Biocombustíveis) pelo Ministério de Minas e Energia. Esse programa tem como objetivo primordial estabelecer metas para a descarbonização, incentivando a expansão dos biocombustíveis na matriz energética nacional, visando uma transição para fontes mais sustentáveis de energia (DUARTE et al., 2022).

4.9 DESAFIOS E OPORTUNIDADES FUTURAS

4.10 IDENTIFICAÇÃO DE DESAFIOS ENFRENTADOS PELA INDÚSTRIA DE BIOMETANO NO BRASIL

Nesta subseção, concentraremos nossa atenção na identificação dos desafios enfrentados pela indústria de biometano no Brasil. Exploraremos fatores como infraestrutura, regulamentação e questões tecnológicas que possam representar obstáculos para o desenvolvimento sustentável desta fonte de energia no contexto brasileiro. A análise desses desafios proporcionará uma compreensão abrangente das barreiras existentes, sendo fun-

damental para propor soluções e estratégias que impulsionem o avanço da indústria de biometano no país.

4.10.1 Exploração de oportunidades futuras e possíveis avanços na área

4.10.1.1 Licenciamento Ambiental

Atualmente, o processo de licenciamento ambiental para plantas de biogás e biometano no Brasil enfrenta desafios significativos devido à ausência de procedimentos específicos adaptados a essas tecnologias. A situação é agravada pela tipificação inadequada dessas plantas, onde normas destinadas a outras rotas tecnológicas são aplicadas de forma inapropriada. Essa falta de diretrizes claras e específicas leva a um desconhecimento generalizado sobre as particularidades do biogás e biometano, resultando em atrasos prolongados no processo de licenciamento. Esse cenário burocrático e demorado não só impede a eficiência operacional, mas também desencoraja investimentos nesse setor emergente e ambientalmente sustentável.

Os objetivos principais para aperfeiçoar o processo de licenciamento ambiental de plantas de biogás no Brasil incluem acelerar o ritmo de aprovação desses licenciamentos, garantindo uma tramitação mais ágil e eficiente. Além disso, é fundamental estabelecer uma norma específica que regule exclusivamente as plantas de biogás, proporcionando diretrizes claras e adaptadas às particularidades dessa tecnologia. Por fim, busca-se harmonizar as normativas estaduais para que haja uma consistência e uniformidade nos processos de licenciamento em todo o território nacional, facilitando assim a implementação e operação dessas instalações de forma sustentável e regulamentada.

Para otimizar o processo de licenciamento ambiental das plantas de biogás e biometano, propõe-se a elaboração de uma normativa federal que estabeleça diretrizes para um licenciamento ambiental simplificado e específico para essas instalações. Essa normativa deverá considerar os benefícios significativos dessas plantas em termos de descarbonização e redução dos impactos ambientais, garantindo um processo mais ágil e focado nas particularidades desse tipo de tecnologia. Adicionalmente, é crucial harmonizar as normativas estaduais, criando um conjunto de regras claras e coerentes que apoiem a expansão do setor de biogás e biometano em todo o país. Por fim, deve-se priorizar o licenciamento dessas plantas, reconhecendo não apenas os ganhos em segurança energética e oferta de combustíveis, mas também os vastos benefícios socioambientais que acompanham o desenvolvimento desse setor energético renovável. (PROPOSTAS... , 2022)

4.10.1.2 Biometano Sucroenergético

A captura e armazenamento de carbono (CCS) é uma tecnologia crucial que visa armazenar dióxido de carbono (CO₂) de forma permanente em reservatórios geológicos, enfrentando o desafio de obter CO₂ em alta pureza para reduzir custos associados à

Biometano (M m³/dia)			
	Brasil	Alternativa	Global
2025	-	-	-
2030	-	-	-
2035	0,1	6,5	-
2040	0,1	13,4	-
2045	0,1	17,6	-
2025	-	17,2	-

Tabela 3 – Programa BID-CEBRI-EPE de Transição Energética. Produção de biometano por cenário em milhões de m³ por dia. De acordo com (PANORAMA. . . , 2023)

Biometano + CCS (M m³/dia)			
	Brasil	Alternativa	Global
2025	-	-	-
2030	-	-	3,9
2035	0,6	-	11,3
2040	6,5	-	17,1
2045	15,2	-	18,2
2025	-	-	17,8

Tabela 4 – Programa BID-CEBRI-EPE de Transição Energética. Produção de biometano por cenário em milhões de m³ por dia. De acordo com (PANORAMA. . . , 2023)

sua captura. Neste contexto, as usinas de biometano emergem como uma oportunidade significativa para se integrarem à cadeia de CCS. Como o CO₂ derivado dessas usinas provém da biomassa, esse processo é denominado Bio-CCS, e possui o potencial para resultar em emissões negativas de carbono.

Estudos do Programa BID-CEBRI-EPE de Transição Energética, que desenvolveram cenários para a neutralidade de carbono, destacam essa oportunidade. Em dois dos três cenários analisados — um focado no Brasil e outro em uma perspectiva global —, quase toda a produção projetada de biometano é vinculada ao uso de tecnologias CCS, evidenciando o papel vital desta integração na estratégia de redução de emissões de carbono. (PANORAMA. . . , 2023)

Conforme as tabelas 3 e 4, o cenário "BRASIL" visa identificar a trajetória mais custo-eficiente para o Brasil atingir a neutralidade de carbono até o ano de 2050. Por outro lado, o cenário "ALTERNATIVA" apresenta uma trajetória diferente do cenário "BRASIL", estabelecendo restrições que limitam ou promovem determinadas rotas tecnológicas, incluindo restrições específicas ao uso da tecnologia de captura e armazenamento de carbono (CCS). O cenário "GLOBAL", por sua vez, é construído com foco no custo mínimo global, enfatizando o papel do Brasil em contribuir para a meta de manter o aquecimento global abaixo de 1,5°C. Neste cenário, o orçamento de carbono atribuído ao Brasil é o menor entre os três cenários propostos.

Adicionalmente, existem potenciais oportunidades para a produção de hidrogênio e seus derivados a partir dos subprodutos das usinas de cana, com ênfase nas tecnologias de reforma de etanol e biogás. A reforma do etanol é particularmente atraente devido à possibilidade de utilizar a infraestrutura já estabelecida e de custo relativamente baixo desse biocombustível para produzir hidrogênio diretamente no local de consumo. Por outro lado, o biogás se destaca como um recurso flexível para a produção de hidrogênio, suportando diversas rotas tecnológicas, entre as quais a eletrólise e a reforma a vapor são as mais desenvolvidas.

Além disso, quando o hidrogênio é produzido em conjunto com uma fonte de carbono biogênico, como o gás de síntese, as rotas de reforma a partir do biogás se mostram adequadas para a fabricação de hidrocarbonetos sintéticos renováveis. Esse processo não apenas valoriza o uso de matérias-primas renováveis, mas também contribui para a diversificação da matriz energética com produtos de maior valor agregado e menor impacto ambiental.

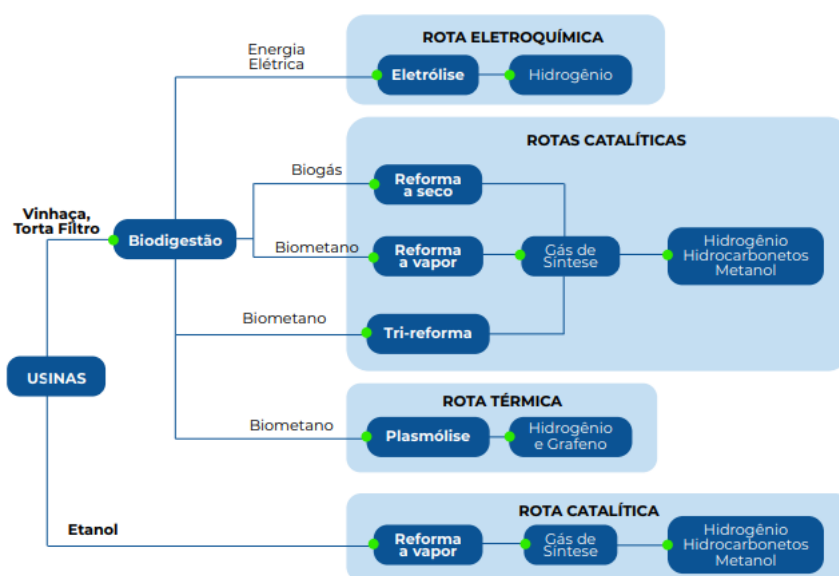


Figura 11 – Rotas tecnológicas para a produção de hidrogênio no setor sucroenergético. Retirado de (PANORAMA..., 2023)

As regiões Sul e Sudeste do Brasil apresentam uma alta disponibilidade de matéria-prima para a produção de biogás e biometano, que são fundamentais para a geração descentralizada de hidrogênio. A utilização desses recursos para a produção de hidrogênio não só propicia uma distribuição mais eficiente, mas também fomenta a criação de um mercado competitivo e de maior escala. Isso, por sua vez, favorece a diversificação dos modelos de negócio, potencializando o desenvolvimento acelerado da indústria de hidrogênio no país e contribuindo para uma matriz energética mais sustentável e inovadora.

Ainda de acordo com a CIBiogás, algumas oportunidades ligadas a produção de biometano no setor sucroenergético são: economia circular, benefício agrícola, redução do

consumo de diesel, receita adicional (CBIO - créditos de Descarbonização), financiamento do BNDES, entre outros. Entretanto, pode-se elencar alguns desafios, como necessidade de reatores maiores, limitação da estrutura de escoamento do gás, adaptação veicular e outros.

4.10.1.3 Energia Elétrica

Atualmente, a capacidade de geração de energia elétrica a partir do biogás é estimada em 19 gigawatts (GW). No momento, somente 2% dessa capacidade, equivalente a 375 megawatts (MW), está sendo utilizada. Existe uma demanda crescente por fontes de energia renováveis e controláveis na composição da matriz elétrica do país. (PROPOSTAS... , 2022)

Os objetivos delineados para o setor energético incluem o aumento da participação de termelétricas renováveis e despacháveis, utilizando o biogás como uma fonte primordial, na matriz elétrica nacional. Com isso, espera-se explorar mais significativamente o potencial de geração de 19 GW. Além disso, busca-se reduzir a dependência nacional de combustíveis fósseis importados, substituindo-os por alternativas renováveis como o biogás, o que contribuirá para fortalecer a segurança energética e diminuir vulnerabilidades externas. Paralelamente, objetiva-se promover a modicidade tarifária, assegurando tarifas de energia elétrica mais acessíveis e estáveis por meio do aumento na produção de energia renovável nacional, o que pode resultar em melhorias na eficiência e redução dos custos associados à geração de energia.

A implementação de novas estratégias para a inclusão do biogás nos leilões de energia elétrica do mercado regulado pode ser viabilizada através de várias propostas concretas. Primeiramente, sugere-se a criação de produtos específicos para o biogás nestes leilões, garantindo assim uma plataforma dedicada para essa fonte energética. Além disso, propõe-se permitir que as usinas de biogás sejam enquadradas como empreendimentos termelétricos a gás natural, o que possibilitaria a sua participação em procedimentos licitatórios do mercado regulado específicos para o gás natural. Outra medida inclui o enquadramento das usinas de biogás proveniente de aterros sanitários como empreendimentos de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos, facilitando a participação destes em leilões específicos para este segmento. Essas ações visam reconhecer os atributos sistêmicos e ambientais do biogás, assim como estabelecer uma previsibilidade de preços, com correções baseadas no IPCA, nos leilões regulados.

Adicionalmente, para fomentar a utilização do biogás como uma fonte de energia renovável, são propostas medidas para incentivar a aquisição de energia elétrica gerada a partir desta fonte. Uma das ações sugeridas é a promoção da compra de energia elétrica de biogás por prédios públicos, bem como o incentivo para que as distribuidoras adquiram energia de geração distribuída proveniente de biogás. Além disso, recomenda-se a criação de linhas de financiamento em bancos públicos específicas para projetos de geração

distribuída e centralizada de biogás, e a redução da carga tributária sobre máquinas e equipamentos utilizados na cadeia de produção do biogás. Essas medidas podem potencializar o desenvolvimento desta fonte energética, contribuindo para a diversificação e a sustentabilidade da matriz energética nacional.

4.10.1.4 Biometano

A capacidade do Brasil para produzir biometano é estimada em 121 milhões de metros cúbicos por dia. No entanto, apenas uma fração mínima dessa capacidade, cerca de 0,2% ou 360 mil metros cúbicos diários, está sendo atualmente aproveitada. Esta situação destaca a necessidade urgente de intensificar a utilização do biometano, especialmente para promover a descarbonização em setores críticos como a indústria e o transporte pesado, onde a redução das emissões de carbono é essencial para atender aos objetivos ambientais e às políticas de sustentabilidade.

Os objetivos focados no desenvolvimento sustentável da matriz energética do país incluem a ampliação significativa da produção de biometano. Com isso, busca-se não apenas aproveitar melhor o potencial nacional, mas também promover a distribuição mais ampla e equitativa de combustíveis renováveis em todo o território, contribuindo para a interiorização dessas fontes energéticas. Paralelamente, essas ações são fundamentais para a descarbonização da matriz energética nacional, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e atendendo aos compromissos ambientais do país para com a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Para integrar e expandir o uso do biometano no Brasil, propõe-se a harmonização e o aperfeiçoamento das normas regulatórias relacionadas à distribuição de gás canalizado, junto com políticas de incentivo à injeção de biometano na rede de distribuição. Estas medidas visam substituir os combustíveis fósseis por biometano, promovendo um recurso energético mais limpo. Além disso, a inclusão de frotas de veículos a gás nos planos de mobilidade urbana, com um foco especial no incentivo ao uso de biometano, pode reduzir significativamente a poluição nas cidades e apoiar a infraestrutura necessária para o crescimento sustentável do uso de gás natural renovável.

Por outro lado, a criação de linhas de financiamento específicas em bancos públicos para projetos de biometano e a substituição de frotas por veículos a gás facilitaria a transição para uma matriz energética mais verde. Complementarmente, a implementação do Programa Metano Zero ajudaria a transformar produtores rurais e gestores de aterros sanitários em fornecedores de combustíveis e biofertilizantes renováveis, incentivando práticas sustentáveis que contribuem para a descarbonização da matriz energética e o desenvolvimento agrícola. Essas ações coletivas enfatizam o compromisso com uma energia mais sustentável e um ambiente mais limpo. (PROPOSTAS... , 2022)

4.10.1.5 Saneamento

No Brasil, a gestão de resíduos enfrenta desafios críticos, com cerca de 50% dos resíduos sendo depositados em lixões e aterros irregulares, provocando significativos impactos ambientais, como a contaminação de solo, água e ar. Além disso, o país apresenta um baixo aproveitamento energético dos resíduos, com uma grande parcela de material reciclável ou passível de conversão em energia sendo desperdiçada. Esta situação evidencia a urgência de reformas na política de gestão de resíduos e na adoção de tecnologias para reciclagem e recuperação energética, visando minimizar os danos ambientais e maximizar o uso sustentável dos recursos.

Os objetivos centrais do Brasil em relação à gestão de resíduos sólidos incluem a efetiva implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, visando melhorar significativamente o tratamento e a disposição dos resíduos no país. Além disso, há um esforço para reduzir as emissões oriundas do setor de saneamento, mitigando o impacto ambiental associado ao manejo inadequado de resíduos. Complementarmente, busca-se aumentar a oferta de energia através da valorização energética dos resíduos, transformando-os em fontes alternativas de energia e contribuindo para a diversificação e a sustentabilidade da matriz energética nacional. Estes objetivos são fundamentais para alinhar as práticas de manejo de resíduos com as necessidades ambientais e energéticas do país.

Para impulsionar a sustentabilidade e a eficiência no manejo de resíduos sólidos, propõe-se a promoção da economia circular através da implementação efetiva da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Esta política deve priorizar rotas tecnológicas que minimizem a quantidade de rejeitos destinados a aterros sanitários, optando por soluções que permitam a reutilização e reciclagem de materiais. Adicionalmente, é essencial promover licitações de gestão de resíduos sólidos que priorizem projetos voltados ao aproveitamento energético dos resíduos, incentivando práticas que convertam esses materiais em fontes renováveis de energia, como biogás e biometano.

Em um esforço para estimular a geração de energia renovável a partir de resíduos, sugere-se incentivar os estados a elaborarem estudos sobre o Potencial de Biogás e Biometano. Estes estudos devem servir como base para orientar políticas públicas e atrair investimentos privados voltados para a gestão de resíduos que promovam a produção e uso eficiente de biogás e biometano. Além disso, é proposto o estímulo à implantação de projetos de biogás em pequena e média escala em propriedades rurais, integrando soluções de gestão de resíduos com o aproveitamento energético. Essa abordagem não apenas promove a descentralização e interiorização do biogás como também apoia a autossuficiência energética e a sustentabilidade ambiental no âmbito rural. (PROPOSTAS... , 2022)

4.11 CONSIDERAÇÕES SOBRE INVESTIMENTOS E PERSPECTIVAS PARA OS MODELOS DE NEGÓCIO EM BIOGÁS NO BRASIL

A presente seção se baseia em um estudo do Programa de Energia para o Brasil (BEP) do governo britânico e executado por um consórcio de organizações liderado pela Adam Smith International (ASI) e com a participação do Instituto 17 (i17), Carbon Limiting Technologies (CLT), hubz e Fundação Getúlio Vargas (FGV), de 2022.

Uma estimativa inicial é realizada com base no potencial de produção de biogás a curto prazo (conforme a figura 12) e nos dados de capacidade e custo de capital (CAPEX) dos setores analisados anteriormente (suínos em terminação, bovinos de leite e sucroenergéticos). Essas estimativas consideram os valores mínimo e máximo do número de plantas e dos investimentos, abrangendo projetos de geração de energia elétrica e biometano.

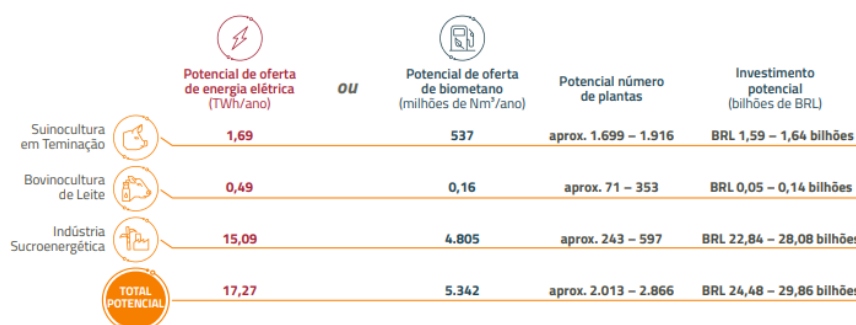


Figura 12 – Potenciais investimentos no setor de biogás no Brasil

Esses volumes de investimento têm o potencial de desenvolver novas cadeias de valor que podem integrar fornecedores locais por todo o país. Estas cadeias seriam formadas por uma variedade de equipamentos e serviços para diferentes indústrias, incluindo biodigestores, geradores de energia, sistemas de atualização de biogás, dutos, veículos movidos a gás, tanto leves quanto pesados, e kits de conversão para motores diesel, entre outros.

Esses investimentos representam uma oportunidade significativa para a transição para energia limpa, gerando impactos notáveis nas economias locais, empresas, indústrias, produtores e investidores que buscam engajar-se com energia limpa e sustentável no Brasil. Por exemplo, o Plano Decenal de Energia 2030 prevê um investimento de aproximadamente BRL 93 bilhões em geração distribuída, cerca de BRL 68 bilhões em biocombustíveis e em torno de BRL 95 bilhões para o fornecimento de gás natural. A importância desses números torna-se ainda mais clara quando se considera que o potencial abordado é iminente para desenvolvimento dentro de cinco anos. Portanto, essa análise sugere que estudos mais aprofundados sobre esses investimentos podem complementar o desenvolvimento do setor e o planejamento energético nacional.

Crucialmente, esses investimentos têm o potencial de impulsionar o desenvolvimento local em várias regiões do país. Dado que a maioria dos investimentos está localizada em

áreas rurais, o avanço desses projetos pode criar oportunidades para o desenvolvimento de competências locais, o aumento da renda regional e a melhoria da qualidade dos empregos para diversas comunidades. A curto prazo, esses investimentos podem contribuir significativamente para a recuperação econômica e a geração de empregos em várias regiões, conforme indicam estudos da IEA.

Naturalmente, a realização desses impactos positivos depende de uma série de fatores, incluindo a implementação de políticas públicas eficazes (abrangendo políticas locais) e o desenvolvimento de modelos de negócios sustentáveis por entidades privadas (como aqueles alinhados com os princípios da agenda ESG). Essa evolução no desenvolvimento local pode influenciar várias das variáveis discutidas anteriormente. Por exemplo, os custos de CAPEX ou OPEX podem variar quando os projetos incluem a capacitação ou a criação de infraestruturas locais para as comunidades envolvidas, promovendo uma inclusão social mais ampla nos benefícios gerados. Portanto, a competitividade e o retorno dos projetos precisam ser avaliados de maneira mais holística. Nesse sentido, ainda é necessário aprimorar a compreensão de quais indicadores são mais relevantes para uma análise econômica mais completa, que possa incorporar questões de gênero, sociais e raciais (por exemplo, análise de salários ou posições ocupadas nos projetos, por gênero, nível de educação formal, etc.).

Os cenários que envolvem a geração de energia elétrica demonstram ser financeiramente viáveis. No entanto, a rentabilidade poderia ser ampliada se os benefícios intangíveis da energia elétrica produzida a partir do biogás, como sustentabilidade, capacidade de armazenamento e disponibilidade imediata, fossem monetizados.

Especificamente, o uso de energia elétrica sob o regime de geração distribuída tende a oferecer uma Taxa Interna de Retorno (TIR) mais atraente em comparação com cenários que utilizam autoconsumo. Isso ocorre devido às tarifas mais altas aplicadas na geração distribuída, representando uma oportunidade significativa para aumentar as receitas.

Os resultados envolvendo a geração de biometano, como substituto de combustíveis convencionais, mostram taxas de retorno de investimento mais atraentes quando comparados aos cenários de geração de energia elétrica, levando em conta as premissas estabelecidas. No entanto, os projetos de geração de energia elétrica a partir do biogás estão mais estabelecidos no setor, devido à clareza das estruturas regulatórias e de mercado já existentes.

A regulamentação do biometano, por outro lado, ainda necessita de desenvolvimentos, especialmente no que tange à sua integração ao Mercado Livre de Gás.

Dentro do setor, a escala de operação pode impactar a TIR tanto positiva quanto negativamente. Na pecuária, especificamente na bovinocultura de leite, concluímos através dos estudos que o aumento da escala tornou os cenários economicamente mais atraentes. Em contraste, na indústria sucroenergética, embora o aumento da escala tenha reduzido a TIR, foi a tarifa de energia aplicada, ou seja, a receita gerada, o fator de maior influência,

não a escala em si. Para projetos de menor porte (até 5 MW), há a possibilidade de se enquadrarem na geração distribuída, onde tarifas mais altas podem ser aplicadas.

Os resultados aqui discutidos provêm de uma análise inicial e estratégica, que visa consolidar dados concretos do setor. No entanto, a inclusão de outros fatores ainda é necessária. Receitas adicionais, como cobranças por serviços de tratamento de resíduos, a venda de fertilizantes derivados do digestato e créditos de carbono, podem tornar viáveis cenários anteriormente inviáveis ou aumentar a atratividade de projetos já viáveis apenas com a produção de energia elétrica e biometano.

Os fertilizantes produzidos a partir do digestato representam uma oportunidade valiosa, aproveitando o resíduo orgânico como um ativo e possibilitando a criação de um produto de alto valor agregado. Tradicionalmente, o uso do digestato se limita à fertirrigação, que adiciona nutrientes ao solo, mas com o foco primário no descarte seguro de acordo com normas ambientais. Portanto, é essencial que o mercado interno evolua na valorização do digestato como insumo para produtos com potencial fertilizante, permitindo uma análise mais aprofundada de sua utilização como fonte de receita.

5 CONCLUSÃO

Esse estudo mostra uma visão abrangente da atual situação da produção de biogás e biometano, apresentando as possibilidades e desafios do setor. Além disso, mostra a importância dessa tecnologia para que os países, em especial o Brasil, atinjam os objetivos de reduzir as emissões de gases poluentes e conseqüentemente consigam mitigar os impactos ambientais causados pela alta demanda energética.

Foram avaliados os aspectos técnicos e econômicos envolvidos na produção do biogás, assim como o potencial ambiental que ele tem em contribuir com os objetivos do *Net Zero*. Entretanto, para que isso seja possível é necessário um planejamento estratégico associado a políticas públicas de incentivo, visando beneficiar quem contribui com essa transição.

Por fim, é necessário ressaltar a importância dos investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento para superar eventuais desafios, adversidades e mudanças na condição de produção, como alterações no perfil de matéria prima disponível. Para isso, as colaborações entre setor público, privado e acadêmico devem se unir, visando escalar a produção de biogás e biometano no Brasil, e também encontrar novas maneiras de integrar esse recurso na matriz energética do país.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. Panora 2022 - abrelpe. 2022.

ARAÚJO, S. **Complementariedade do gás natural e biometano: Uma abordagem sustentável para o futuro energético**. Dissertação (Mestrado) — ANP - Agência Nacional do Petróleo, nov. 2023. 10^o Fórum do Biogás - Apoio: World Biogas Association.

BIOGASMAX. Biogasmax 2006/2010 - the synthesis. 2010.

BROUCHE, M.; LAHOUD, C. Review of cogeneration and trigeneration systems. **African Journal of Engineering Research**, v. 6, p. 39–54, 10 2018.

DESCONHECIDO. **Cocal inicia construção de segunda planta de biometano de resíduos de cana no oeste paulista**. 2023. Disponível online at <https://epbr.com.br/cocal-inicia-construcao-de-segunda-planta-de-biometano-de-residuos-de-cana-no-oeste-paulista/>, acessado em 01/04/2023.

DUARTE, V. H. et al. Biocombustíveis: uma revisão sobre o panorama histórico, produção e aplicações do biogás. **Revista Ambientale**, v. 14, n. 2, p. 22–34, jun. 2022. Disponível em: <https://periodicosuneal.emnuvens.com.br/ambientale/article/view/371>.

FAGERSTRÖM, A. et al. **The Role of Anaerobic Digestion and Biogas in the Circular Economy**. International Energy Agency, 2018. Disponível online at <http://www.iea-biogas.net>.

HUGUEN, P. **Perspectives for a European standard on biomethane: a Biogasmax proposal**. Biogasmax, Lille: [s.n.], 2010.

LYNG, K.-A.; BREKKE, A. Environmental life cycle assessment of biogas as a fuel for transport compared with alternative fuels. **Energies**, v. 12, n. 3, 2019. ISSN 1996-1073. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/3/532>.

MACHADO, G. B. Substratos para usinas de biogas. **Portal do Biogas**, mar. 2023. Disponível em: <https://portaldobiogas.com/substratos-para-usinas-de-biogas/>.

MONTEIRO, S. D. da S. C. **Produção de Biometano: Análise de Mercado e Estudo da Separação por PSA**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Química) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, jul. 2011. Orientador na FEUP: Professor Adélio Mendes; Orientador na empresa: Doutor Patrick Bárcia.

PANORAMA de Biometano - Setor Sucroenergético. **CIBiogas**, dec, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-781/Panorama%20de%20Biometano.pdf>.

PROPOSTAS Para o Setor de Biogás e Biometano. **ABIOGÁS**, 2022. Disponível em: https://assets-global.website-files.com/632ab10950c5e334290bfadf/6390dd3a746e8e47bbe64d3d_propostas_para_setor_de_biogas_e_biometano.pdf.

TABATABAEI, M. et al. A comprehensive review on recent biological innovations to improve biogas production, part 2: Mainstream and downstream strategies. **Renewable Energy**, v. 146, p. 1392–1407, 2020. ISSN 0960-1481. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119310675>.