



# Análise de Viabilidade do Uso de Biogás nas Frotas de Caminhões de Coleta de Lixo Urbano no Rio de Janeiro

Filipe Dottori de Oliveira

Monografia em Engenharia Química

Orientadora

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

Fevereiro de 2022

# **ANÁLISE DE VIABILIDADE DO USO DE BIOGÁS NAS FROTAS DE CAMINHÕES DE COLETA DE LIXO URBANO NO RIO DE JANEIRO**

*Filipe Dottori de Oliveira*

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 Colomer Ferraro, D.Sc.

---

Marcelo Mendes Viana, D.Sc.

Orientado por:

---

Clarice Campelo de Melo Ferraz, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Fevereiro de 2022

Dottori, Filipe de Oliveira.

Análise de viabilidade do uso de biogás nas frotas de caminhões de coleta de lixo urbano no Rio de Janeiro/ Filipe Dottori de Oliveira – Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2022.

vii, 56 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2022.

Orientadora: Clarice Campelo de Melo Ferraz

1. Biometano. 2. RSU. 4. Rio de Janeiro. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ).  
5. Clarice Campelo de Melo Ferraz. I. Análise de Viabilidade do Uso de Biogás nas Frotas de Caminhões de Coleta de Lixo Urbano no Rio De Janeiro

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a minha família, pelo apoio e paciência em aguentar meu mau humor durante os anos de faculdade (e nos anteriores também). Amo vocês e sem vocês eu não estaria aonde estou.

Aos meus amigos, por todas as risadas e discussões madrugadas dentro sobre política e animes, e também pelos puxões de orelha necessários para que eu continuasse a seguir o meu caminho.

A todos os meus amigos e companheiros de UFRJ, por todo o incentivo e ajuda durante os momentos de dificuldades compartilhadas, sem os quais eu provavelmente não teria conseguido finalizar essa jornada.

A professora Clarice por toda a paciência e encorajamento durante o período em que escrevi esse trabalho. Foi graças ao seu apoio que pude finalizar esse texto e por isso serei sempre muito grato.

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

## **ANÁLISE DE VIABILIDADE DO USO DE BIOGÁS NAS FROTAS DE CAMINHÕES DE COLETA DE LIXO URBANO NO RIO DE JANEIRO**

Filipe Dottori de Oliveira

Fevereiro, 2022

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

A busca por combustíveis renováveis tem aumentado cada vez mais ao redor do mundo, sobretudo devido a crescente preocupação trazida pela crise climática. Em particular, a substituição de combustíveis fósseis, devido ao seu elevado potencial poluidor, é de grande interesse. A produção de resíduos sólidos é outro fator de preocupação, que contribui para propagar os problemas climáticos devido a produção de gases do efeito estufa. Nesse contexto, o biogás e o biometano se apresentam como uma fonte de estudo de grande interesse, por se apresentarem como possível solução para ambos os problemas.

O presente estudo teve como objetivo determinar o potencial de se produzir biometano no município do Rio de Janeiro, para a substituição do combustível diesel utilizado pelos caminhões de coleta de lixo, utilizando os resíduos sólidos como fonte de matéria prima.

Os resultados obtidos demonstram a viabilidade técnica do projeto, observando que o potencial de produção de tais combustíveis é suficiente para atender a demanda necessária para a operação atual na cidade. Além disso, foi proposto um modelo de financiamento para o projeto para analisar sua viabilidade econômica. O modelo proposto inclui alguns aspectos técnicos baseados em outras operações similares no estado e no país.

Desse modo, o projeto criado demonstrou ter potencial para reduzir os problemas ambientais associados a operação atual, além de oferecer vantagem financeira, reduzindo os gastos dispendidos com a mesma.

# ÍNDICE

<b>Capítulo I – Introdução .....</b>	<b>8</b>
I.1 – Contexto e Motivação.....	8
I.2 – Objetivos.....	9
<b>Capítulo II – Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>9</b>
II.1 – Biogás.....	9
II.2 – Biometano .....	12
II.3 – Rotas de Produção .....	14
II.4 – Mercado Global de Biogás e Biometano.....	18
II.5 – Mercado Brasileiro de Biogás e Biometano.....	24
II.6 – Resíduos Sólidos Urbanos.....	28
<b>Capítulo III – Metodologia.....</b>	<b>35</b>
III.1 – Avaliação da Utilização de Biometano em Veículos de Carga.....	35
III.2 – Avaliação do Potencial de Produção de Biometano a Partir de RSU .....	36
III.3 – Cálculo de Equivalência Energética Entre Biogás e Diesel.....	37
III.4 – Cálculo de Emissões de CO <sub>2</sub> .....	38
III.5 – Estimativa de Viabilidade Econômica .....	39
<b>Capítulo IV – Resultados e Discussão .....</b>	<b>40</b>
IV.1 – Produção de Biometano a Partir de RSU.....	40
IV.2 – Capacidade de Substituição de Diesel por Biometano no Município do Rio de Janeiro.....	42
IV.3 – Emissões Evitadas de CO <sub>2</sub> .....	43
IV.4 – Estimativa de Viabilidade Econômica.....	44
<b>Capítulo V – Conclusão .....</b>	<b>46</b>
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>47</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II.1: Comparação entre a produção de biogás por diferentes fontes de matéria prima (IEA, 2020). .....	10
Figura II.2: Resumo do ciclo do biogás (EBA, 2021).....	11
Figura II.3: Reatores para digestão anaeróbica: A) CSTR, B) leito fixo, C) UASB, D) leito fluidizado (NÁTHIA-NEVES, 2020). ....	17
Figura II.4: Capacidade instalada de biogás (IRENA, 2021).....	19
Figura II.5: Potencial energético de biogás por fonte de biomassa (WBA, 2021).....	20
Figura II.6: Tendência para produção de biogás até 2022, por região (KKONAPHAPDEELERT, 2020).21	
Figura II.7: Produção de biogás por fonte de biomassa, 2018 (IEA, 2020).....	22
Figura II.8: Consumo de biogás por aplicação final, 2018 (IEA, 2020).....	23
Figura II.9: Custos médios para produção de biogás, por fonte de biomassa (IEA, 2020).....	24
Figura II.10: Capacidade instalada de biogás por insumo (EPE, 2020).....	25
Figura II.11: Produção de biogás no Brasil por região (ABIOGÁS, 2021) .....	26
Figura II.12: Plantas de biogás no Brasil por região (EPE, 2020). ....	27
Figura II.13: Geração de resíduos em 2016, por região (KAZA, 2018). ....	29
Figura II.14: Projeção de geração de resíduos por região (KAZA, 2018). ....	30
Figura II.15: Composição de resíduos sólidos por região em 2016 (KAZA, 2018). ....	31
Figura II.16: Disposição final por região, 2016 (KAZA, 2018). ....	32
Figura II.17: Coleta de RSU no Brasil, por região (ABRELPE, 2020). ....	33
Figura II.18: Composição de RSU no Brasil (MASSUKADO, 2013).....	34
Figura II.19: Destinação final de resíduos sólidos no Brasil, por região (ABRELPE, 2020).....	34
Figura IV.1: Composição da coleta de RSU no Rio de Janeiro. ....	41
Figura IV.2: Ponto de equilíbrio para o empreendimento.....	44

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela II.1: Especificações para biometano comercial (ANP, 2017). .....	12
Tabela II.2: Plantas em operação no Brasil, em 2019, que tem biometano como aplicação principal (CIBiogás, 2020). .....	26
Tabela III.1: Fração de carbono orgânico capaz de se decompor, por tipo de resíduo (IPCC, 2019). .....	37
Tabela III.2: Carbono orgânico degradável total, por tipo de resíduo (IPCC, 2019). .....	37
Tabela III.3: Propriedades para cálculo de equivalência quantitativa (ANP, 2018). .....	38
Tabela III.4: Propriedades para cálculo de equivalência quantitativa, convertidas para a fórmula III.3. ...	38
Tabela III.5: Conteúdo de carbono (IPCC, 2019). .....	39
Tabela III.6: Parâmetros para operação de planta de biometano (ROCHA, 2021). .....	39
Tabela III.7: Preço médio de revenda do diesel no município do Rio de Janeiro em 2021 (ANP, 2021). .	40
Tabela IV.1: Total de RSU coletado no município do Rio de Janeiro entre 2010 e 2019 (IPP, 2021). .....	40
Tabela IV.2: Composição gravimétrica de RSU coletado no município do Rio de Janeiro entre 2010 e 2019 (IPP, 2020). .....	41
Tabela IV.3: Potencial de produção de biometano a partir de RSU no Rio de Janeiro. ....	42
Tabela IV.4: Comparação entre operação com diesel e biometano. ....	42
Tabela IV.5: Emissões diárias de CO <sub>2</sub> por combustão. ....	43
Tabela IV.6: Parâmetros operacionais para produção de biometano. ....	44

# Capítulo I – Introdução

## I.1 – Contexto e Motivação

As mudanças climáticas estão se aproximando de um ponto crítico para a vida humana no planeta. Associadas às emissões de poluentes, cresce a pressão sobre os modos como produzimos e consumimos energia, pois é do setor energético que são oriundas cerca de 80% das emissões de gases do efeito estufa (EEA, 2008). Nas décadas mais recentes da civilização, a principal fonte de energia utilizada foram os combustíveis de origem fóssil, tanto no âmbito industrial quanto para consumo da população geral. Segundo HÖÖK *et al.* (2014), o consumo de energia global deve triplicar ao longo dos próximos 30 anos.

As emissões de CO<sub>2</sub> oriundas desta fonte de energia são consideradas o principal motivo do aquecimento global antropogênico, que é fonte de grande preocupação atualmente. Além disso, o esgotamento de fontes de energia fóssil também é um fator de preocupação para o desenvolvimento futuro da humanidade.

Assim, surge a necessidade de se buscar por fontes alternativas de energia, que sejam capazes de não apenas suprir a crescente demanda esperada no futuro, mas também de eliminar os problemas trazidos pelas mudanças climáticas. Nesse contexto, as energias derivadas de biomassa, a segunda maior fonte de carbono disponível no planeta, atrás apenas do petróleo, se apresenta como uma importante frente para desenvolvimentos futuros (WBA, 2019).

Associado a isso, o crescimento populacional cada vez maior traz consigo também cada vez maiores índices de produção de lixo. Segundo o Banco Mundial (2021), foram geradas mais de 2 bilhões de toneladas de lixo no mundo em 2016, e a expectativa é que este número ultrapasse a casa dos 3 bilhões até 2050. Além de contribuir para a poluição de florestas e do solo, corpos hídricos e proliferação de doenças, a fração orgânica do lixo passa espontaneamente pelo processo de digestão anaeróbica, através do qual são gerados CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> (metano). Ambos são gases do efeito estufa, que contribuem para agravar a crise climática. Segundo MARKGRAF e KAZA (2016), o metano de aterros sanitários corresponde a 4% das emissões totais mundiais de GEE e é a terceira maior fonte de emissão de metano antropogênico.

Neste contexto, tecnologias de aproveitamento dessas emissões possuem alta importância para a contenção do agravamento da crise climática e ecológica que enfrenta o planeta. O biogás e o biometano surgem como importantes formas de sanar as dificuldades elencadas acima. O biogás é uma fonte de energia já bem estabelecida, capaz de produzir energia e calor, além de fertilizantes como subproduto. O biometano é obtido através da purificação do biogás, elevando seu potencial energético, sendo utilizado principalmente como substituto ao GNV. Ambos são considerados fontes de energia renováveis e contribuem significativamente para a redução dos resíduos gerados pela população.

Por estes motivos, tais combustíveis são de grande interesse, aplicados como alternativa aos combustíveis fósseis tradicionais. Projetos dessa natureza tem o potencial não apenas de

eliminar passivos ambientais, como também de fornecer soluções para problemas de graves consequências no modo de vida das sociedades modernas. Assim sendo, os mesmos configurariam não só uma fonte de economia nas operações descritas, como também contribuiriam para mitigar os desafios climáticos já citados.

## I.2 – Objetivos

O presente estudo tem como objetivo demonstrar a viabilidade técnica e econômica para a produção de biometano a partir dos resíduos sólidos urbanos produzidos na cidade do Rio de Janeiro, e sua utilização como fonte de energia para uma frota de veículos dedicada a um serviço com rotas pré-estabelecidas. Selecionamos analisar seu aproveitamento como combustível para abastecer os caminhões de coleta de lixo atuando na mesma região, configurando, portanto, um projeto de autogeração.

Os objetivos específicos são:

- Determinar o potencial de produção de biometano através do total de RSU gerado no município do Rio de Janeiro.
- Calcular o dispêndio energético na operação de coleta utilizando diesel e estimar o equivalente necessário em biometano.
- Estimar as emissões evitadas de gases do efeito estufa na substituição do diesel por biometano como fonte de combustível em caminhões.
- Propor uma planta para produção de biometano a partir de RSU e determinar a viabilidade econômica da mesma dentro dos parâmetros propostos.

## Capítulo II – Revisão Bibliográfica

### II.1 – Biogás

A Resolução Nº 8 de 30 de janeiro de 2015 emitida pela ANP, define biogás como: “gás bruto obtido da decomposição biológica de produtos ou resíduos orgânicos” (ANP, 2015). É uma fonte de energia renovável, e dentre estas, uma das mais desenvolvidas em termos tecnológicos, com aplicações à nível industrial. Possui aplicações comerciais na geração de energia, como substituto do combustível diesel em veículos, e na geração de eletricidade. Também pode sofrer processamento adicional e ser utilizado como substituo do gás natural.

A técnica de produção de biogás já é conhecida desde o século XIX, porém seu ressurgimento nos dias atuais está relacionado ao esgotamento das reservas de gás natural, além da crescente emissão de gases do efeito estufa (ACHINAS, 2017). Assim, possui uma vasta literatura disponível quanto a suas aplicações e operações.

A indústria de biogás é umas das principais frentes na redução de emissões de GEE, capturando metano que seria normalmente emitido a atmosfera pela decomposição de resíduos agrícolas, alimentícios e de efluentes. Essa captura e conversão em energia, combustível e eletricidade já é uma realidade, em diferentes escalas, em diversos países do mundo (WBA, 2019).

Sua composição química varia de acordo com o substrato que foi utilizado no processo de produção, além de ser influenciado pelas condições físico-químicas da reação, como temperatura, pH e concentração de reagentes. É composto principalmente por metano e CO<sub>2</sub>, com uma composição típica sendo de 50 a 60% de metano, 35 a 40% de CO<sub>2</sub>, e 5% de outros gases, dentre eles amônia, gás sulfídrico, nitrogênio e monóxido de carbono (GARCILASSO, 2018).

A principal forma de produção do biogás se dá pela digestão anaeróbica, que ocorre em quatro etapas. Na fase inicial, bactérias atuam liberando enzimas que causam a hidrólise dos compostos orgânicos presentes na matéria-prima, fazendo com que macromoléculas complexas sejam reduzidas a seus monômeros. Os produtos desta hidrólise são então fermentados, produzindo principalmente hidrogênio e ácido acético (FARIA, 2012).

Na acidogênese, os compostos intermediários são consumidos para gerar principalmente ácidos graxos, enquanto na acetogênese, estes são degradados para gerar como produto principal hidrogênio, ácido acético e dióxido de carbono. Por fim, na metanogênese, estas substâncias são combinadas para produzir metano. (BNDES, 2018).

Dentre as fontes de matéria prima mais empregadas em sua produção, temos os gêneros agrícolas, como a cana de açúcar, o milho e a soja; dejetos animais, resíduos sólidos urbanos e esgoto sanitário (EBA, 2021).



Figura II.1: Comparação entre a produção de biogás por diferentes fontes de matéria prima (IEA, 2020).

Os usos domésticos de biogás envolvem a combustão em fornos para uso culinário, ou a queima em lâmpadas a gás, para iluminação, e no geral requerem pouco ou nenhum tratamento. O uso em escala industrial inclui a queima em *boilers* para geração de calor, combustão interna ou externa em turbinas para produção de eletricidade, ou a combinação de ambos, num sistema de tri geração que fornece também resfriamento por absorção (ADNAN, 2019).

Pode passar por purificação para obtenção de biometano, que pode ser utilizado em veículos movidos a gás, na substituição de gás natural em suas aplicações domésticas e industriais, ou distribuído pelo *grid* de distribuição de GN. Também pode ser utilizado na síntese de produtos químicos, como metanol e bioplásticos, dentre outros (WBA, 2019).

As aplicações do biogás variam de acordo com a região, mas uma característica recorrente em muitas delas é a possibilidade de garantir acesso a energia em pequenas comunidades, onde o acesso a rede de distribuição é difícil, ou a demanda é muito alta para ser suprida. Em países em desenvolvimento, auxilia a substituir fontes sólidas de biomassa para aplicações culinárias (IEA, 2020).



Figura II.2: Resumo do ciclo do biogás (EBA, 2021).

O biogás ocorre naturalmente como consequência da degradação de substâncias orgânicas, sendo muito comum a sua produção em aterros sanitários. Ao ser lançado diretamente na atmosfera, o metano tem alto potencial como poluente, sendo considerado um dos gases do efeito estufa. Logo, sua utilização como fonte de energia não só fornece uma disposição mais adequada para resíduos sólidos, como também evita a poluição.

A produção de biogás ocorre diretamente pelo uso de biomassa, utilizando resíduos agrícolas, ou indiretamente, utilizando esterco, resíduos sólidos, efluentes, etc. Durante o desenvolvimento da biomassa, ocorre a captura do carbono da atmosfera, na forma de CO<sub>2</sub>, através da fotossíntese. Ao passar pelo processo de combustão para gerar energia, este CO<sub>2</sub> capturado retorna ao ambiente, de onde será novamente capturado. Assim, não ocorre geração de novo carbono como poluente (EBA, 2020).

Outros benéficos incluem a contribuição para uma economia mais circular, possibilitando que industriais se tornem mais auto suficientes, utilizando seus resíduos como fonte de energia, além de retorná-los ao solo, na forma de fertilizantes. Estes, por sua vez, reduzem a dependência de fertilizantes inorgânicos, e contribuem para a preservação do solo (WBA, 2019).

Estima-se que seu potencial poluidor seja cerca de 21 vezes superior ao do CO<sub>2</sub>. Além disso, as emissões evitadas de metano podem ser utilizadas para obtenção de créditos de carbono, fornecendo assim mais uma fonte de receita na sua utilização sustentável. Diversas simulações demonstram a viabilidade econômica e o impacto positivo de projetos baseados na comercialização de créditos de carbono (MARTINS, 2018).

Portanto, o biogás se apresenta como uma importante solução para dois problemas distintos que se apresentam no cenário global atual: o da destinação final adequada para a crescente quantidade de resíduos e rejeitos produzidos pela população, e como uma forma de reduzir os danos causados pelo efeito estufa.

## II.2 – Biometano

O biogás pode passar por processo de purificação e *upgrade* para remover substâncias secundárias oriundas do processo produtivo, além de reduzir o conteúdo de CO<sub>2</sub>, aumentando seu poder calorífico. Ao passar pelo processo de upgrade, o biometano pode ser usado de maneira intercambiável com o gás natural e seu derivado, GNV, possibilitando seu uso das mesmas formas, além de transporte e armazenamento correspondente, com a vantagem adicional de ser neutro em carbono (KKONAPHAPDEELERT, 2020).

Segundo a ANP, pela Resolução Nº 8 de 30 de janeiro de 2015, entende-se biogás como sendo: “biocombustível gasoso constituído essencialmente de metano, derivado da purificação do biogás. É produzido a partir do biogás oriundo da digestão anaeróbica de resíduos orgânicos de origem vegetal, animal ou de processamento da agroindústria, que contém principalmente metano e dióxido de carbono, podendo ainda apresentar componentes inertes do ponto de vista da aplicação, tais como nitrogênio, oxigênio e dióxido de carbono, bem como traços de outros constituintes. É intercambiável como gás natural entregue à distribuição nas regiões nordeste, centro-oeste, sudeste e sul. Requer os mesmos cuidados, na compressão, distribuição e revenda, dispensados ao gás natural”.

Ainda, a Resolução Nº 685, de 29 de junho de 2017 define as especificações necessárias para o biometano a ser comercializado, oriundo de resíduos sólidos para uso veicular:

<b>Propriedade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite</b>
Metano, mín.	% mol	90,0
Oxigênio, máx.	% mol	0,8
CO <sub>2</sub> , máx.	% mol	3,0
CO <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> +N <sub>2</sub> , máx.	% mol	10

Enxofre Total, máx.	mg/m <sup>3</sup>	70
Gás Sulfídrico (H <sub>2</sub> S), máx.	mg/m <sup>3</sup>	10
Poder Calorífico Superior	kJ/m <sup>3</sup>	35.000 – 43.000
Índice de Wobbe	kJ/m <sup>3</sup>	46.500 – 53.500

Tabela II.1: Especificações para biometano comercial (ANP, 2017).

Em termos energéticos, o biogás tem poder calorífico inferior variando entre 16 e 28 MJ/m<sup>3</sup>, dependendo do percentual de metano na mistura. Por sua vez, o biometano tem um PCI médio de 36 MJ/m<sup>3</sup> (IEA, 2020).

Dentre as tecnologias disponíveis atualmente para upgrade do biogás, cabe citar a remoção de CO<sub>2</sub> por processos físico-químicos, como absorção, adsorção, separação criogênica ou por membranas. Mais recentemente têm sido utilizadas técnicas que buscam a utilização do CO<sub>2</sub> presente no biogás como produto. A mais comum consiste na reação catalítica entre este e o H<sub>2</sub> presente no biogás para produção de CH<sub>4</sub> e água. Também é possível utilizar outros tipos de catalisadores para promover uma reação que produz metanol e água (ADNAN, 2019).

Dentre as principais aplicações, cabe destacar a utilização como combustível veicular, podendo sua produção ser adaptada para atender a requisitos específicos, sendo assim possível seu uso em veículos de passeio, ônibus, veículos de transporte de carga ou marítimos. Essa substituição, somada as características de sua produção, resulta em pegada de carbono extremamente baixa, chegando a ser negativa em certos casos (MAJER, 2016).

Além da utilização como substituto ao GNV, é possível utilizar o biometano diretamente em motores a diesel, desde que seja realizado processo de adaptação destes. Existem 3 métodos principais em uso atualmente: o primeiro consiste em adaptar o motor de compressão para um de ignição, reduzindo também a taxa de compressão (WIERZBICKI, 2011).

O segundo consiste num sistema de combustível misto, aonde o diesel é utilizado como iniciador do processo de combustão por compressão, e uma mistura de biometano com ar é injetada no motor para gerar energia. Este sistema é de fácil adaptação e requer pouca interferência nos motores a diesel já em uso. Por fim, o terceiro sistema consiste numa alimentação independente de diesel e biometano, aonde é possível controlar as quantidades de cada um injetadas no motor (KNIAZIEWICZ, 2012).

Outras aplicações incluem como substituto do gás liquefeito de petróleo (LPG), em seus usos para cozinha, industrial, transporte e agricultura. Para uso doméstico, a concentração de metano pode ser inferior àquela utilizada em substituição ao gás natural, mas em todos os casos são necessárias adaptações quanto ao tamanho do tanque e fluxo de gás. A vantagem nestes casos vem do custo inferior da produção de biometano (TONRANGKLANG, 2017).

Como vantagens, a combustão do biometano é menos poluente do que de combustíveis como diesel ou gasolina. Pode ser produzido de maneira descentralizada, reduzindo custos e gasto energético com transporte, como no caso do GN. Este diferencial na produção também contribui para reduzir a dependência na importação de combustíveis (KONAPHAPDEELERT, 2020).

Além disso, uma das grandes vantagens do biometano é possibilitar a redução de emissões em setores aonde estas são tradicionalmente difíceis de realizar, como a operação de máquinas pesadas e o transporte de bens de consumo. Além disso, a possibilidade de utilizar a infraestrutura já existente para GN, permite uma transição para fontes limpas de energia com custo menor (IEA, 2020).

Em particular, a produção de biometano a partir de RSU especificamente resulta num chamado biocombustível avançado, referindo-se ao fato de não competir por matéria prima com a produção de alimentos, culminando numa produção mais ética e sustentável.

## II.3 – Rotas de Produção

A obtenção de biogás se dá através do processo de digestão anaeróbica, pelo qual microrganismos realizam a decomposição de matéria orgânica numa mistura de gases, composta por metano, CO<sub>2</sub> e outros. O material sólido restante, conhecido como digestato, é rico em nutrientes, como nitrogênio, fósforo e potássio, tendo grande aplicação como fertilizantes (WBA, 2019). Este é um processo que ocorre naturalmente em regiões com muita sedimentação ou de solos úmidos, bem como em acúmulos de resíduos de diversas espécies, sejam eles industriais, municipais ou alimentícios (KYTHREOTOU, 2014).

Dentre as muitas vantagens do processo de digestão anaeróbica, temos a possibilidade de utilizar diversas fontes diferentes de biomassa, o que diminui efeitos de sazonalidade e permite a adaptação as necessidades de produção locais. Apresenta também flexibilidade de escala, não havendo uma escala mínima para operação, podendo, portanto, ser implementado num nível residencial, indo até níveis industriais ou municipais. Por fim, as diversas aplicações de biogás já mencionados, além da produção de fertilizantes, fazem com que o processo possibilite diversas frentes de geração de receita (WBA, 2019).

O processo pode ser classificado de acordo com as características físicas da biomassa: quando menos de 10% desta é sólida, o processo é via úmida; quando é superior a 20%, é via seca; e, para valores entre 10 e 20%, é classificado como semi-seco (GKAMARAZI, 2015). Os processos via úmida foram desenvolvidos para aplicação em tratamentos de lodos ou outros tipos de resíduos de efluentes, enquanto os processos via seca surgiram especificamente para atender RSU ou outros resíduos orgânicos com baixa diluição (CHENG, 2021).

Na primeira fase da digestão, ocorre o processo de hidrólise, por parte de bactérias fermentativas, que realizam, por meio de enzimas, a quebra de moléculas orgânicas complexas (proteínas, aminoácidos e carboidratos), em seus monômeros constituintes (MERLIN CHISTY, 2014).

Esta é a etapa mais demorada do processo, mas pode ser acelerada através de processos de pré-tratamento. Estes podem ser de origem química, física ou biológica, e atuam ao facilitar a desintegração ou lise da biomassa, tornando mais acessível o conteúdo intracelular desta, e

tornando-o mais acessível aos microrganismos, reduzindo o tempo de retenção no reator (FERRER, 2008).

Na segunda etapa ocorre a acidogênese, na qual os compostos solúveis obtidos na hidrólise são convertidos em ácidos graxos, álcoois, ácido láctico, CO<sub>2</sub>, hidrogênio e amônia (MERLIN CHISTY, 2014). A produção de substâncias ácidas faz com que o pH do meio diminua, favorecendo a ação de microrganismos acidogênicos e acetogênicos. Nesta etapa, são produzidos ácido butírico e ácido acético, que são precursores de metano, e serão importantes na etapa final do processo (HWANG, 2001).

A terceira etapa é a acetogênese, na qual são produzidos hidrogênio, CO<sub>2</sub> e acetato, a partir dos compostos ácidos obtidos na acidogênese. Esta etapa tem um pH ainda mais baixo que a anterior (GKAMARAZI, 2015). Os microrganismos que atuam nesta fase possuem crescimento lento, e sua atividade varia muito com a carga de matéria orgânica fornecida (MERLIN CHISTY, 2014).

Por fim, na última etapa, a metanogênese, arqueas metanogênicas realizam a produção de metano. Esta produção pode ser dividida em dois tipos, de acordo com o tipo de arque envolvida. As acetoclásticas degradam ácido acético ou metanol, produzindo metano, e as hidrogenotróficas, que produzem metano utilizando hidrogênio e CO<sub>2</sub> (GKAMARAZI, 2015). Estes microrganismos tendem a preferir meios reacionais com pH mais alcalino.

Frequentemente, para garantir a eficiência do processo, é utilizado um processo de pré-tratamento, para garantir uma degradação inicial da biomassa utilizada, tornando-a de mais fácil acesso pelas bactérias envolvidas na fermentação. Os processos utilizados podem ser químicos, térmicos, mecânicos ou enzimáticos, de acordo com as características do projeto. No entanto, a utilização de um pré-tratamento nem sempre implica num ganho na quantidade de biogás produzido, mas apenas em um processo mais rápido (MSHANDETE, 2006).

Dentre os parâmetros operacionais mais importantes, temos a temperatura, que influencia na velocidade de crescimento de bactérias, a velocidade de consumo de reagentes e de produção de biogás. A faixa ótima para o metabolismo das bactérias envolvidas é entre 50-65 °C, porém tendem a elevar os custos do processo, além de tornarem o controle do processo mais difícil e o meio mais ácido, desfavorecendo a produção de biogás (KWIETNIEWSKA, 2014).

A faixa mais utilizada fica entre 20-45 °C, fornecendo um equilíbrio entre um processo de digestão satisfatório e custos mais baixos. Além disso, fornecem um processo mais estável. Inicialmente, esta faixa de temperatura apresenta uma taxa de produção de biogás reduzida, mas esta se torna mais elevada conforme as colônias bacterianas se ajustam ao meio (MAO, 2015).

Outro parâmetro importante é o pH, com cada uma das espécies envolvidas na fermentação apresentando faixas de pH ótimo diferentes. Apesar disso, a faixa de pH ideal usual é bem restrita, variando entre 6.8-7.2, de acordo com a fonte biomassa e o tipo de fermentação (WARD, 2008). Valores abaixo desta faixa reduzem o crescimento de bactérias metanogênicas, levando a produção de ácido acético e hidrogênio, enquanto valores mais elevados levam a produção de ácidos propiônico e acético (STAVROPOULOS, 2016).

O tempo de retenção é definido como o tempo que a matéria orgânica leva até ser totalmente digerida ou o tempo que esta permanece no reator. É diretamente proporcional ao volume reacional e inversamente proporcional ao fluxo volumétrico. Este tempo varia de acordo com a temperatura do meio e o substrato utilizado. Para as temperaturas entre 20-45 °C citadas anteriormente, o tempo de retenção ideal varia na faixa entre 10-40 dias. Baixos tempos de retenção também tendem a tornar o processo mais instável (KOTHARI, 2014).

A carga orgânica volumétrica (COV) é outro fator importante a ser considerado. É a quantidade de sólidos voláteis que alimenta a fermentação por dia, por volume do digestor. Embora um aumento de COV leve a aumento na produção de biogás, a partir de determinado ponto, a atividade de bactérias hidrolíticas e acidogênicas começa a acidificar o meio, que por sua vez inibe a atividade de bactérias metanogênicas, levando a redução da síntese de metano (KWIETNIEWSKA, 2014).

Outros fatores importantes incluem o teor de umidade do meio, já que a água atua como solvente e facilita a transferência de massa. A faixa ideal fica entre 60-80% (KWIETNIEWSKA, 2014). Além disso, a razão entre carbono e nitrogênio, C/N, também é determinante. Uma razão muito elevada leva rapidamente ao consumo de todo o nitrogênio disponível, reduzindo a taxa de reação; porém uma razão baixa leva ao acúmulo de amônia no meio, que torna o pH alcalino e inibe a produção de metano. A faixa ideal tende a ficar entre 20-30 (YONG, 2015).

É possível combinar múltiplas fontes de biomassa distintas, num processo conhecido como co-digestão. Este modo de operação facilita atender as demandas nutricionais das bactérias envolvidas, tornando mais fácil atingir uma razão C/N ótima, além de evitar o acúmulo de substâncias indesejadas no meio (KHALID, 2011). Além disso, existem diversos estudos que demonstram a viabilidade e possível ganho de eficiência na produção de biogás por co-digestão.

Quanto a operação do processo, podem ser classificadas em fase única ou fases múltiplas. No caso de fase única, as etapas de acidogênese e metanogênese ocorrem no mesmo reator, enquanto reações em múltiplas fases utilizam pelo menos dois reatores diferentes para separar essas etapas (KOTHARI, 2014). Em particular, o processo em múltiplas etapas é bastante utilizado para o tratamento de resíduos orgânicos, podendo-se atingir os parâmetros ideais para cada uma das etapas e aumentar a eficiência na produção de metano. Nestes casos, o primeiro reator tende a priorizar a hidrólise e acidogênese, com baixo pH; e o segundo reator favorece a metanogênese, com pH entre 7-8,5 (KHALID, 2011). Por este motivo, apesar dos custos mais elevados, os reatores em múltiplas fases são os mais utilizados.

Em termos de reatores, o processo em batelada é de simples operação e reduzido tempo de reação, porém apresenta perdas na hora da recuperação do biogás produzido, além de grandes variações no volume e qualidade do produto. Reatores contínuos oferecem uma taxa de produção constante, porém apresentam a possibilidade de remoção de matéria orgânica ainda parcialmente digerida, reduzindo o aproveitamento da biomassa (KOTHARI, 2014). Os tipos mais comuns utilizados são CSTR, leito fixo, UASB (upflow anaerobic sludge blanket) e leito fluidizado (WARD, 2008).

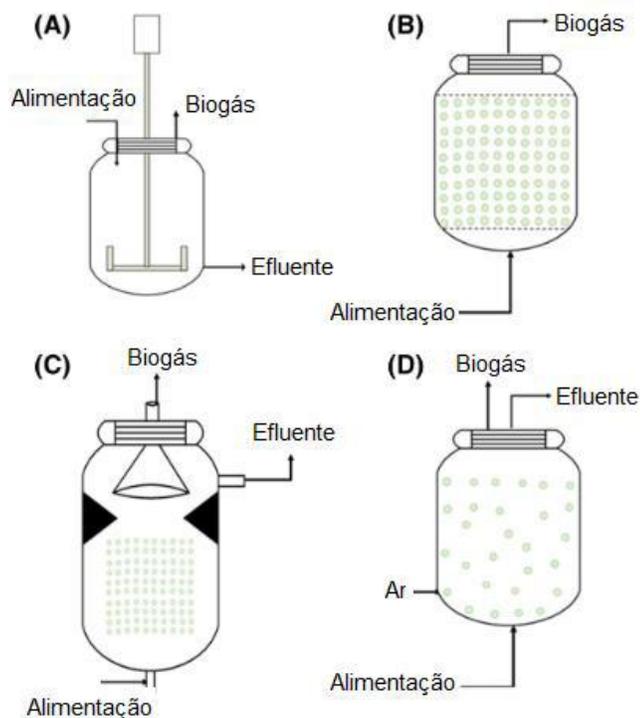


Figura II.3: Reatores para digestão anaeróbica: A) CSTR, B) leito fixo, C) UASB, D) leito fluidizado (NÁTHIA-NEVES, 2020).

Reatores CSTR impedem a sedimentação e facilitam a transferência de massa, porém não permitem o acumulo de grandes volumes de biomassa, o que restringe a produção de biogás. Além disso, possuem custo elevado para manter a agitação (SHOW, 2011). Um parâmetro importante para esta operação é a velocidade de agitação, com o ideal sendo em torno de 50 rpm. Acima disso, ocorre desestabilização das colônias microbianas, que acumulam no reator e acidificam o meio, inibindo o processo (RI, 2017).

Os reatores de leito fixo possuem em seu interior uma camada de suporte para as bactérias, que pode ser feita de diferentes materiais como cerâmica ou carvão ativado. A porosidade deste material vai definir a fluidez do meio de reação. O regime de fluxo normalmente é de baixa turbulência, o que dificulta o controle de pH e transferência de massa, tornando a atividade microbiana heterogênea ao longo do reator. Para evitar estes problemas, a operação é feita com recirculação da biomassa (SHOW, 2011).

Já os reatores UASB utilizam uma camada de lodo ao fundo por onde a corrente de alimentação passa, promovendo a interação com a biomassa, permitindo assim manter grandes quantidades de matéria prima dentro do reator. Tem baixo custo e são muito comuns no tratamento de efluentes e esgoto. Além disso, são sistemas estáveis, que mantêm uma produção de biogás constante ao longo do tempo. Porém, o início do processo é demorado, e apresentam longos tempos de retenção para sólidos (ARIMI, 2015).

Por fim, reatores de leito fluidizado utilizam algum material particulado, geralmente óxido de alumínio ou areia, permitindo um rápido crescimento microbiano, além de mistura mais eficiente, facilitando a transferência de massa. Também permitem trabalhar com volumes de reação reduzidos, acarretando em menores custos. É principalmente aplicado em situações aonde a biomassa é solúvel ou se encontra em suspensão (MAO, 2015).

Em termos de aplicações, existem biodigestores domésticos, capazes de produzir em média 1 m<sup>3</sup>/dia. Existem também os biodigestores centralizados, que podem ser pequenos (100 m<sup>3</sup>/h), médios (250 m<sup>3</sup>/h) ou grandes (750 m<sup>3</sup>/h), dependendo da vazão ofertada. Normalmente trabalham em regime de co-digestão. Além disso, temos plantas de tratamento de esgoto, que podem processar lodo por DA, com vazão típica de 1.000 m<sup>3</sup>/h. Por fim, existem sistemas de recuperação de metano em aterros sanitários, que são capazes de recuperar vazões de 2.000 m<sup>3</sup>/h (IEA, 2020).

## II.4 – Mercado Global de Biogás e Biometano

Embora sejam, até certo ponto, produtos diferentes com aplicações distintas, o biogás e o biometano tem em comum sua origem em matérias primas orgânicas, cujo potencial atual é ainda pouco utilizado. Assim, oferecem um caminho para uma economia mais circular, levando a menores taxas de emissão, uso mais eficiente dos recursos energéticos, e gestão mais adequada de resíduos.

Estima-se que em 2018 a produção total de biogás e biometano foi de cerca de 35 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep). A estimativa para o potencial total do biogás no mesmo período é de 570 milhões tep, enquanto a do biometano fica em 730 milhões tep (IEA, 2020). Em termos de valores totais de mercado, o biogás atingiu U\$ 8 bilhões em 2020, com o biometano ficando em U\$ 1,7 bilhão. A expectativa é que até 2027, atinjam U\$ 13,8 bilhões e U\$ 2,4 bilhões, respectivamente (GLOBE NEWSWIRE, 2020).

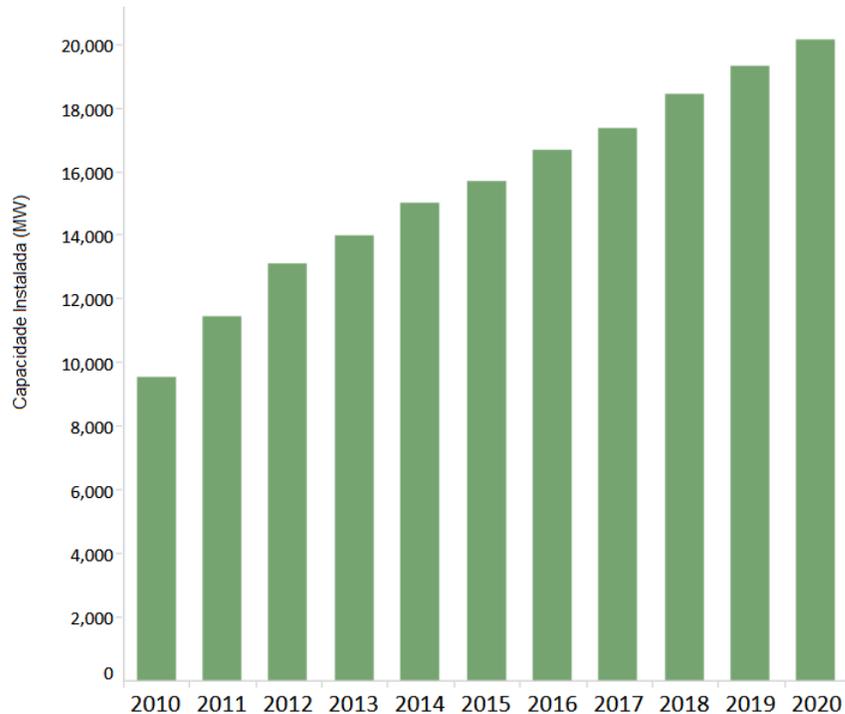


Figura II.4: Capacidade instalada de biogás (IRENA, 2021).

É possível dividir a indústria de biogás atual em 3 categorias principais: o uso de micro digestores para produção de biogás, digestores de larga escala para geração de eletricidade e digestores de larga escala para produção de biometano (WBA, 2021). O uso de micro digestores é o mais antigo. Estima-se que existem cerca de 50 milhões em uso ao redor do mundo, com a maior parte concentrada na China, seguida da Índia, com 42 milhões e 4,9 milhões, respectivamente. A principal aplicação nestes casos é geração de calor para cozimento, com uma estimativa de 125 milhões de usuários em 2018 (REN21, 2020).

No caso de geração de eletricidade, utiliza-se um motor CHP (*combined heat and power*), que produz também calor, com novas tecnologias em desenvolvimento para gerar também potencial de resfriamento (WBA, 2021). O total de plantas em operação foi de 132.000 ao final de 2019, com mais de 100.000 concentradas na China, seguida de 18.000 na Europa e 2.200 nos EUA. Além disso, o número total ao redor do mundo aumentou em relação a anos anteriores, com destaque para África, América do Sul e Oriente Médio (REN21, 2020).

Por fim, a produção de biometano por *upgrade* consiste na tecnologia mais recente, mas já bastante utilizada, com as principais aplicações na geração de calor ou como combustível. O total de plantas na Europa era de cerca de 660 em 2018, seguido de 50 nos EUA, 25 na China e 20 no Canadá, com outras na Ásia e no Brasil (REN21, 2020).

Apesar disso, o potencial redutor de emissões do biogás é ainda muito maior do que o desenvolvido atualmente, além de possibilitar a redução da dependência em combustíveis fósseis. Estima-se que, em 2019, apenas 2% do potencial global de captura do biometano em biogás foi alcançado (WBA, 2019).

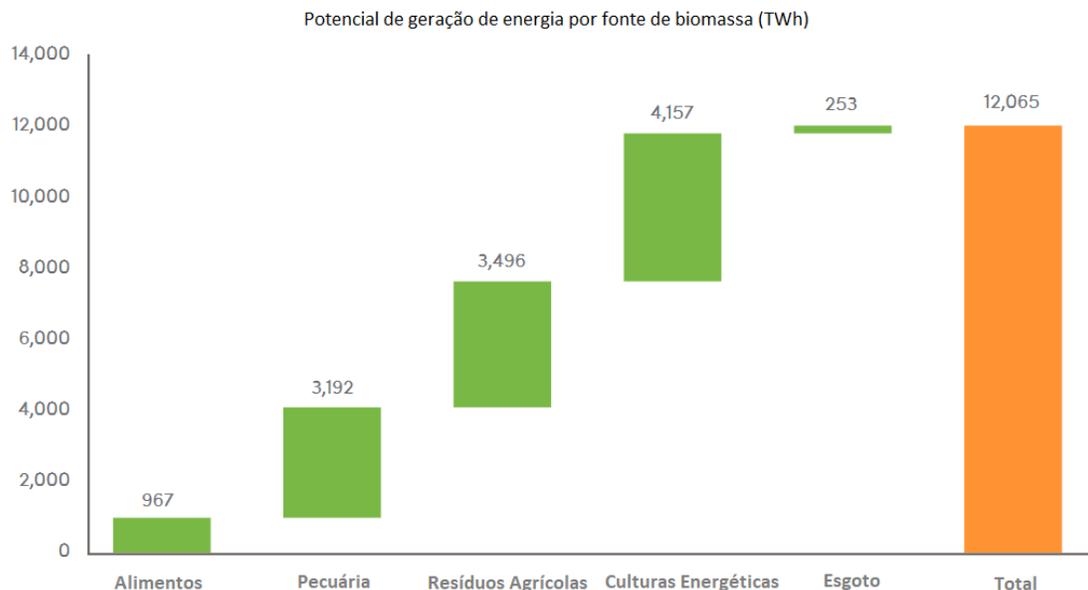


Figura II.5: Potencial energético de biogás por fonte de biomassa, baseado em três cenários de estimativa, caso intermediário (WBA, 2021).

Fontes de biomassa para produção de biogás e biometano se encontram relativamente disponíveis ao redor do mundo, com a região da Ásia sendo de particular destaque em consumo e exportação. Estima-se que até 2040 a disponibilidade de biomassa aumente em até 40% (IEA, 2020).

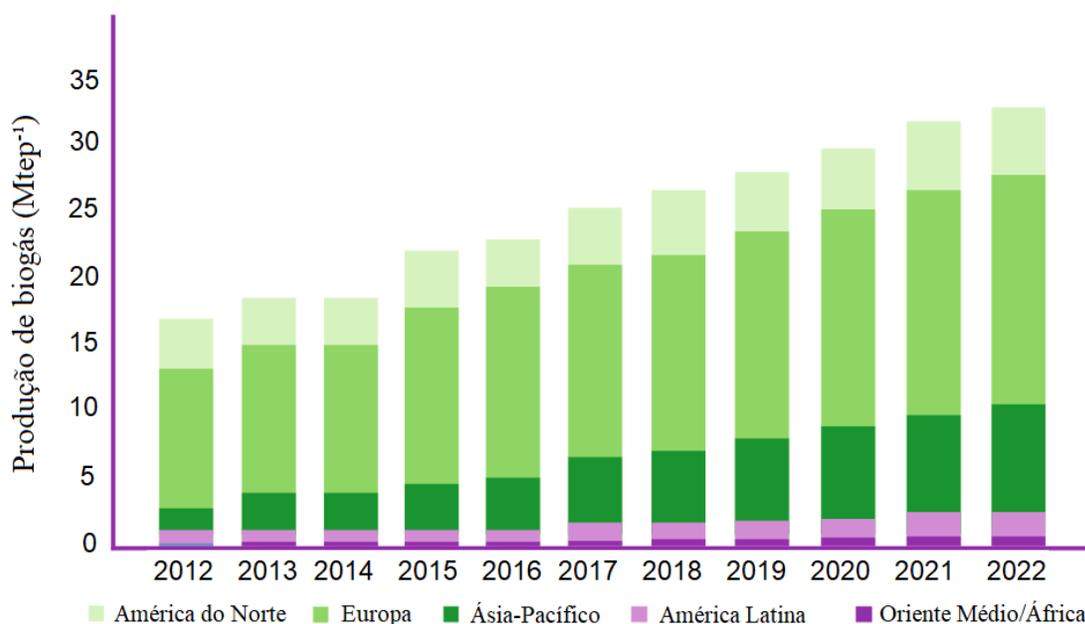


Figura II.6: Tendência para produção de biogás até 2022, por região (KKONAPHAPDEELERT, 2020).

A Europa é a região de maior produção global de biogás. A produção total na região passou de aproximadamente 8 mil tep para mais de 14 mil tep, entre 2009 e 2016. Os principais produtores

na região são a Alemanha, Reino Unido, Itália, França e Holanda. A principal fonte de biomassa são plantações dedicadas, com novas políticas buscando incentivar o uso de resíduos agrícolas, dejetos animais e biogás de aterro (ACHINAS, 2017; IEA, 2020).

Em outubro de 2020, a União Europeia publicou documento delineando sua estratégia para reduzir as emissões de metano, aonde aponta o biogás oriundo de resíduos humanos e agrícolas como “uma fonte altamente sustentável de energia, com múltiplas aplicações, contribuindo para melhorar a qualidade do solo, reciclagem de resíduos e descarbonização da matriz energética” (EUROPEAN COMMISSION, 2020). Espera-se que até 2025, o total de investimentos na área ultrapasse a marca de U\$ 1 trilhão, incluindo investimentos públicos, privados e subsídios (WBA, 2021).

Em termos de biometano, o consumo teve um crescimento de 20% em 2018, alcançando a marca de 8,2 PJ, sendo o maior consumidor a Suécia, aonde mais de 91% dos veículos movidos a gás utilizam biometano (BIOENERGY INTERNATIONAL, 2019), seguida de Alemanha, Noruega e Reino Unido. Cabe notar o uso em veículos comerciais, com uma rede pública nacional de postos sendo implantada no Reino Unido para caminhões pesados, com projetos similares na Finlândia e Suécia. Na França uma aplicação notável é a operação de ônibus movidos a biometano, com cerca de 410 circulando na região de Paris. Na Noruega também há situação similar, com 189 ônibus circulando, e 77 na região de Bristol, no Reino Unido (REN21, 2020).

A Ásia é a segunda região com maior produção de biogás, composta principalmente de digestores menores e espalhados, muito utilizados para suprir a necessidade por eletricidade em regiões aonde a oferta é precária (JIANG, 2011). O principal produtor da região é a China, com mais de 13 bilhões de m<sup>3</sup> em 2016, seguida da Índia com 1,8 bilhões (IRENA, 2018).

Na China, o uso mais comum é a produção doméstica em pequenos digestores, equivalente a cerca de 70% da capacidade instalada, embora o desenvolvimento de plantas em maior escala esteja em crescimento. Apesar da existência de políticas para financiar a produção por um aspecto financeiro, a falta de políticas ambientais ainda é um impedimento para o desenvolvimento. Além disso, existe pouco acompanhamento das plantas já em operação, como também falta de treinamento e suporte aos usuários, o que prejudica a utilização do equipamento existente (JIANG, 2011).

Desde os anos 80 a Índia possui programas para incentivar a instalação de plantas domésticas de produção de biogás, de modo que atualmente o número total ultrapassa os 5 milhões. É importante notar, no entanto, que o tempo de vida médio desse tipo de planta não ultrapassa 20 anos, de modo que muitas destas podem não estar mais em uso (IRENA, 2018).

Nos EUA, desde 2009, a Agência de Proteção Ambiental exige que todo combustível veicular comercializado seja misturado com combustíveis renováveis pelo Programa de Combustíveis Renováveis (*Renewable Fuel Standard*, RFS), e o biogás, tanto na forma comprimida como líquida, tem se tornado cada vez mais importante (BIOCYCLE, 2017). Em 2015 o biometano foi incluso no programa, o que levou a um aumento de 20% no consumo total em 2019, chegando a total de 30 pentajoules (PJ) (REN21, 2020).

Atualmente, a principal forma de produção é por digestão anaeróbia em aterros sanitários. O desenvolvimento tem sido acelerado, principalmente por conta das políticas de incentivo. Na Califórnia, em particular, cresceu muito a produção de biometano por esterco, visando descarbonizar o setor de transportes (WBA, 2021). Estimativas indicam potencial para quase 15.000 novas plantas para produção de biogás no país, distribuídas entre diferentes fontes de biomassa, com potencial para gerar o equivalente a até 103 trilhões de kW/h em energia (AMERICAN BIOGAS COUNCIL, 2018).

Nas demais regiões do mundo, a produção é mais dispersa, havendo poucos focos de produção, sendo o Brasil uma das regiões mais notáveis (WBA, 2021). Em 2016, a produção total na América do Sul foi de aproximadamente 200 milhões m<sup>3</sup>, com mais de 90% no Brasil, seguida da África, com 50 milhões m<sup>3</sup> e da América Central, com 21 milhões m<sup>3</sup> (IRENA, 2018).

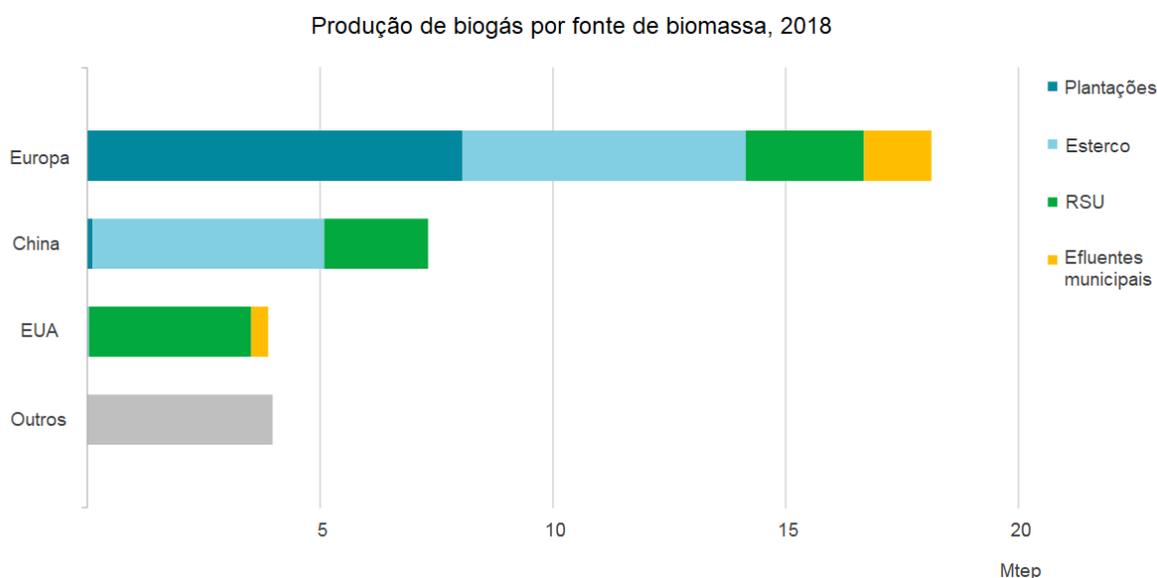


Figura II.7: Produção de biogás por fonte de biomassa, 2018 (IEA, 2020)

Em 2018, a maior fonte de consumo de biogás foi para geração de energia, totalizando 22 milhões tep, seguido de aplicações agrícolas, com 9 milhões de tep e purificação para biometano, com 3 milhões de tep. Estima-se que até 2040, a principal aplicação será o biometano, variando entre 78 e 206 milhões de tep, enquanto a geração de energia pode variar entre 62 e 102 milhões de tep, e o uso agrícola se mantém relativamente estável, variando entre 10 e 16 milhões de tep (IEA, 2020).

### Consumo de biogás por aplicação final, 2018

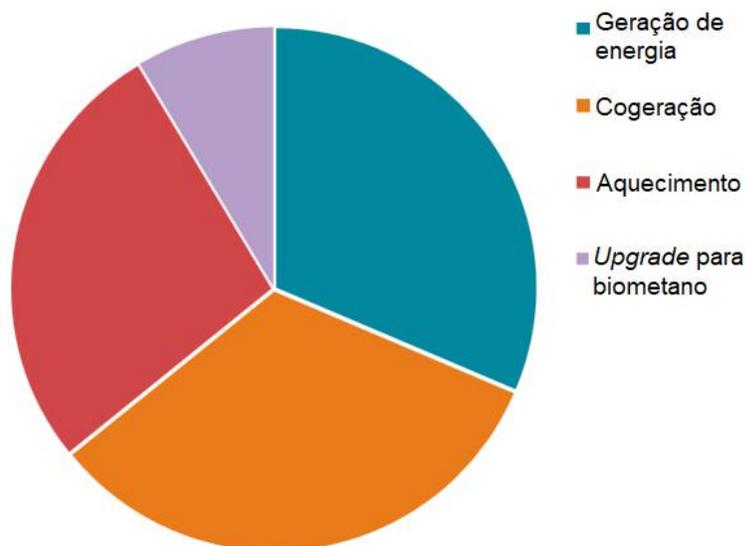


Figura II.8: Consumo de biogás por aplicação final, 2018 (IEA, 2020)

As regiões que apresentaram maior consumo de biometano em 2018 foram a Europa, com 2 milhões de tep, e a América do Norte, com 1 milhão de tep. Aproximadamente 15% do biogás produzido na América do Norte passa por upgrade a biometano, enquanto na América do Sul o percentual é de 35%, com a Europa apresentando 10% e a Ásia, 2%. Estima-se que até 2040, a região de maior consumo seja a China, com potencial entre 30 e 77 milhões de tep, seguida da Índia, variando entre 15 e 30 milhões, da Europa com 12 a 36 milhões, da América do Norte, entre 9 e 31 milhões, e demais regiões variando entre 9 e 24 milhões de tep (IEA, 2020).

Estima-se que em 2020 o total de plantas produzindo biometano ultrapassou o total de 1000. Cerca de 60% destas realizam a injeção do mesmo na rede de distribuição de gás natural, enquanto 20% provêm combustível veicular, com o restante da distribuição sendo para usuários a nível local (IEA, 2020).

A principal barreira para o desenvolvimento do mercado de biogás ainda é o custo. Para uma planta com capacidade de gerar 1,0 MW, o custo de implantação pode chegar a U\$ 8.600.000, com a operação anual ficando em torno de U\$ 500.000 (WBA, 2019). De modo geral, a produção de biometano ainda é mais cara do que o gás natural, com exceção de alguns casos de produção em aterros sanitários. Para geração de eletricidade, estima-se um custo entre U\$ 50/MWh e U\$ 190/MWh, dependendo da fonte de biomassa. Já o custo estimado para produzir 1000 Btus (MBtu) de biometano em 2020 foi de U\$ 19,00. No entanto, projeções indicam que a diferença de custos na produção deve cair conforme as tecnologias se desenvolverem e as taxas sobre emissões de carbono se tornarem mais frequentes (IEA, 2020).

Também valem destacar como possíveis barreiras a sazonalidade ou intermitência de certas fontes de biomassa, sendo importante estabelecer acordos com governos ou fazendeiros, por exemplo, para garantir um fluxo constante desta. Legislações ambientais mais antigas por vezes não contemplam particularidades do biogás em relação ao GN ou de biofertilizantes e fertilizantes inorgânicos, quando produzidos, o que pode ser uma fonte de problemas. A falta de infraestrutura em lugares aonde o gás natural não é comum também pode ser um empecilho, principalmente no que diz respeito ao transporte (WBA, 2019).

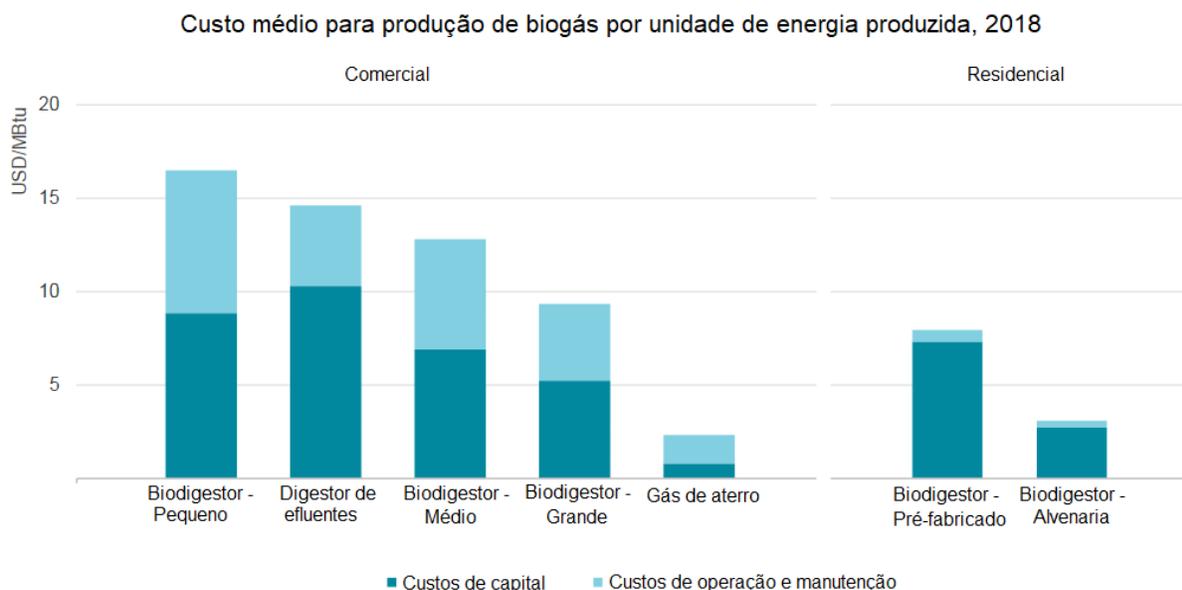


Figura II.9: Custos médios para produção de biogás, por fonte de biomassa (IEA, 2020)

## II.5 – Mercado Brasileiro de Biogás e Biometano

No Brasil, segundo a Abiogás, o potencial total de geração de biogás é de 117,1 milhões  $\text{Nm}^3/\text{d}$ , sendo destes 57,6 milhões  $\text{Nm}^3/\text{d}$  por parte do setor sucroenergético, 35,3 milhões  $\text{Nm}^3/\text{d}$  por proteína animal, 18,1 milhões  $\text{Nm}^3/\text{d}$  no setor agrícola e 6,1 milhões  $\text{Nm}^3/\text{d}$  por saneamento. Para biometano, o potencial total é de 45,3 milhões  $\text{Nm}^3/\text{d}$ . Além disso, o potencial de biogás é capaz de gerar 166,2 TWh de eletricidade, equivalente a 34,5% da demanda energética do país; ou ainda, produzir 39 milhões de litros de biometano, equivalente a 70% da demanda de diesel (ABIOGÁS, 2021).

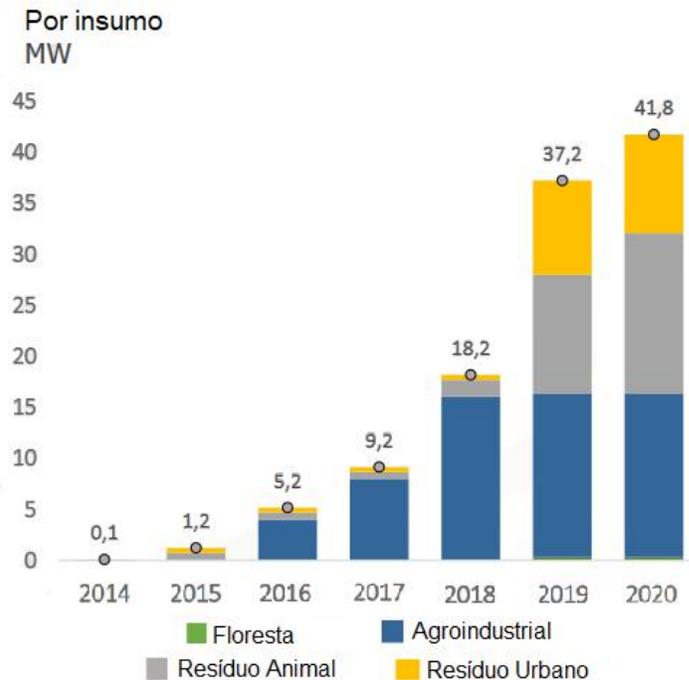


Figura II.10: Capacidade instalada de biogás por insumo (EPE, 2020)

Quanto a aplicação, 86% de todo o biogás produzido em 2019 foi destinado a geração de energia elétrica, enquanto 10% foi utilizado para produzir energia térmica. A produção de gás natural renovável/biometano consumiu cerca de 3% do total de biogás produzido, e 1% foi utilizado para geração de energia mecânica (CIBiogás, 2020).

Em 2019, a oferta interna de biogás foi de aproximadamente 270 mil tep, quase o triplo do que foi em 2015. No entanto, ainda é uma parcela extremamente pequena da oferta de energia interna no país, correspondendo a apenas 0,09%. No total, o número de plantas no país é de aproximadamente 550, com cerca de 260 na região Sul, 180 na região Sudeste, 90 no Centro-Oeste, 12 no Nordeste e 4 no Norte, sendo Minas Gerais o estado com maior número de plantas, 121. Em termos de micro e minigeração, ou seja, plantas de menor escala, o número total é de 225, crescimento de mais de 20% em relação a 2019. A capacidade instalada total é de 42,8 MW (ABIOGÁS, 2021).

Quanto a escala, a maior parte das plantas em operação é de pequena escala (até 1 milhão  $\text{Nm}^3/\text{a}$ ), consistindo de 78% das plantas em 2019. Apesar disso, produziram apenas 9% do volume total de biogás. Plantas de médio porte (entre 1 e 5 milhões  $\text{Nm}^3/\text{a}$ ) correspondiam a 14% das plantas em operação, e produziram 14% do biogás no período. Por fim, as plantas de grande porte (mais de 5 milhões  $\text{Nm}^3/\text{a}$ ) equivaleram a 6% do total, porém foram responsáveis por 77% de toda a produção nacional em volume (CIBiogás, 2020).

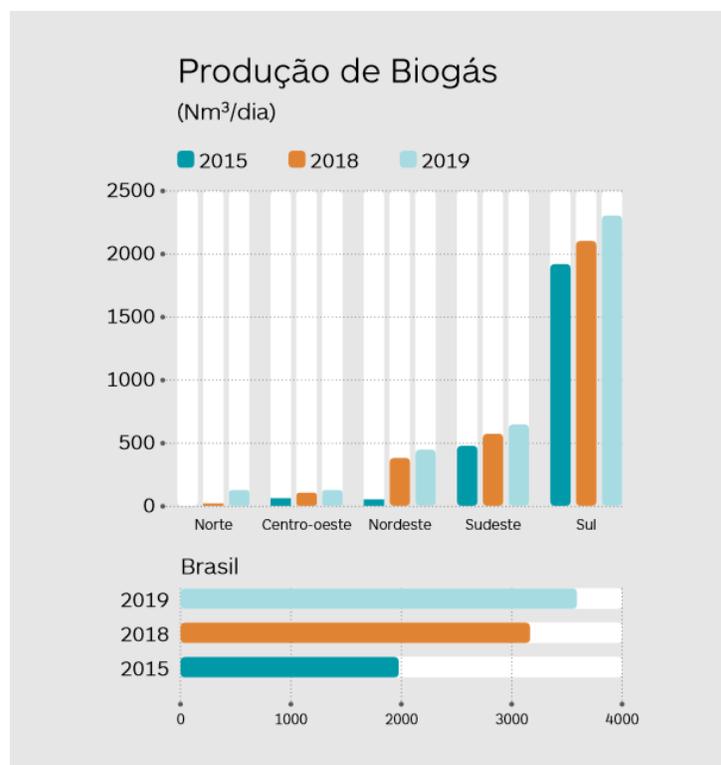


Figura II.11: Produção de biogás no Brasil por região (ABILOGÁS, 2021)

Dentre as usinas em operação em 2019, 6 tinham o biometano como aplicação principal, sendo a mais antiga a de São Pedro da Aldeia, no Rio de Janeiro. Além disso, 3 outras plantas também produzem biometano, porém como aplicação secundária, sendo a produção de energia térmica e/ou elétrica o principal foco. Estas ficam localizadas em Montenegro, no Rio Grande do Sul; Castro, no Paraná; e Seropédica, no Rio de Janeiro, e utilizam resíduos industriais, agropecuários e RSU, respectivamente, como fonte de biomassa (CIBiogás, 2020).

Município	Estado	Fonte do substrato	Ano de início da operação
São Pedro da Aldeia	RJ	RSU	2015
Patos de Minas	MG	Agropecuária	2016
Foz do Iguaçu	PR	RSU	2017
Fortaleza	CE	RSU	2017
Concórdia	SC	Agropecuária	2018
Franca	SP	ETE	2018

Tabela II.2: Plantas em operação no Brasil, em 2019, que tem biometano como aplicação principal (CIBiogás, 2020).

Cabem destacar a unidade de Dois Arcos, situada em São Pedro da Aldeia, RJ, que opera produzindo biometano a partir de RSU, com capacidade instalada de 15 mil m<sup>3</sup>/dia; a Ambient, em Ribeirão Preto, SP, com capacidade de gerar 1,5 MW a partir de co-geração de esgoto sanitário; e a Estação de Transferência do Caju, no Rio de Janeiro, que gera eletricidade e biometano a partir de RSU, com potencial de 250 kW (PROBIOGÁS, 2017).

Além destas, em 2017, entrou em funcionamento a usina de Caieiras, SP, a maior geradora de biogás de aterro com motogeradores do mundo, aonde são produzidos 17 mil m<sup>3</sup> de biogás/h, vendidos a um preço de R\$ 250 por MW/h (BNDES, 2018). No segmento de ETE, destaca-se projeto da CS Bioenergia em Curitiba, com capacidade de processar 900 m<sup>3</sup>/dia de lodo e 120 t/dia de RSU, gerando 20 mil m<sup>3</sup>/dia de biogás (POSSETTI, 2017).

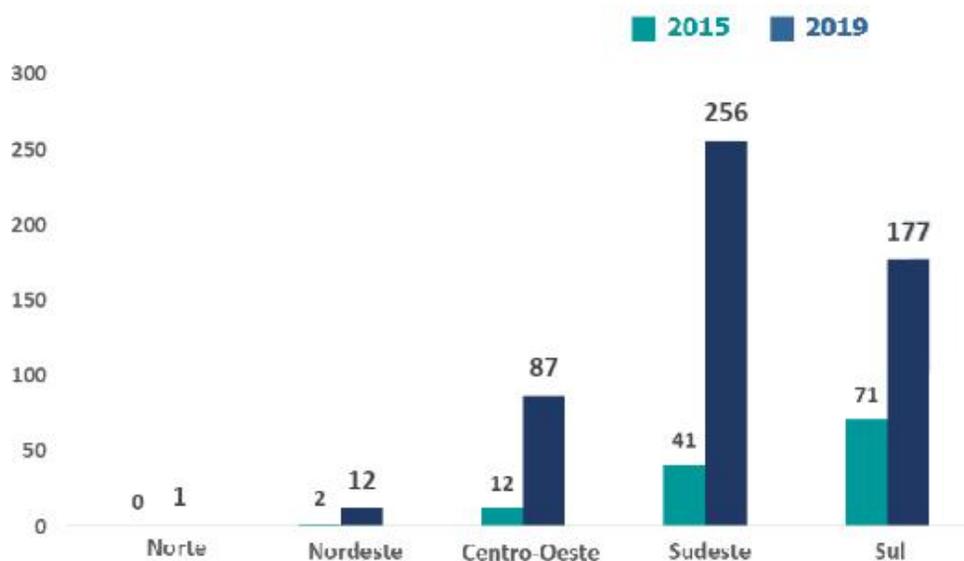


Figura II.12: Plantas de biogás no Brasil por região (EPE, 2020).

Em termos de programas governamentais e legislação, em 2017 foi criado o RenovaBio, a política nacional de biocombustíveis, cujo objetivo é ampliar a participação dos mesmos na matriz energética brasileira e diminuir a emissão de gases do efeito estufa. Para tanto, estabelece metas de descarbonização, para incentivar a produção e participação dos biocombustíveis no mercado (Lei nº 13.576). Os produtores ganham créditos de descarbonização (CBIO) que são então comercializados na bolsa, sendo as distribuidoras obrigadas a realizar a compra de acordo com seus índices de emissão (MME, 2021).

Na esfera estadual, temos como exemplo o Programa Paulista de Biogás, para ampliar a participação do biogás na matriz energética; a Lei nº 6.361 no Rio de Janeiro que oferece incentivo fiscal para as distribuidoras adquirirem até 10% do GN de fontes renováveis; o RS-GÁS no Rio Grande do Sul, para incentivar a produção de biometano; além de redução ou isenção do ICMS nas saídas de biogás e biometano em diversos estados (ABIOGÁS, 2021).

Segundo a revista Valor Econômico, o investimento total no setor de biogás em 2019 foi de R\$ 700 milhões, e estabelece um potencial de até R\$ 50 bilhões em 2030, considerando não

apenas o potencial teórico, mas também a perspectiva real de aporte de energia (RAMOS, 2019). O BNDES é um dos maiores investidores em projetos no setor, contabilizando mais de R\$ 140 milhões em investimentos desde 2011, distribuídos em 7 plantas em diferentes escalas (BNDES, 2017). Ainda, estima-se que o investimento médio para uma nova planta varia entre R\$ 50 milhões e R\$ 200 milhões para plantas sucroalcooleiras, e cerca de R\$ 10 milhões para o uso de dejetos animais (RAMOS, 2021).

Dentre as principais barreiras para o desenvolvimento do mercado brasileiro, destacam-se o custo dos equipamentos e o difícil acesso ao financiamento; a variedade de substratos, que dificulta a padronização e regulamentação; inconsistências entre marcos regulatórios nas esferas estadual e federal; e o desconhecimento sobre as vantagens e viabilidade técnico-econômica da produção do mesmo. Assim, medidas que busquem contemplar essas barreiras serão determinantes no desenvolvimento do setor (BNDES, 2017).

## II.6 – Resíduos Sólidos Urbanos

A geração de resíduos é consequência inevitável de qualquer processo produtivo. Estima-se que, globalmente, sejam geradas entre 7 e 9 bilhões de toneladas de resíduos anualmente. Dentre estes, os resíduos sólidos urbanos (RSU) são uma classe específica, que merece atenção especial devido a seus impactos ambientais, proximidade das populações e potencial valor para a economia circular (WILSON, 2015).

A ABTN NBR 10004:2004 define resíduos sólidos como sendo: “Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”. Define ainda subclassificações em resíduos classe I - Perigosos; resíduos classe II – Não perigosos; resíduos classe II A – Não inertes; resíduos classe II B – Inertes.

Com a tendência a uma economia circular se ampliando nos anos recentes, processos de reciclagem, compostagem e aproveitamento energético dos resíduos tem aumentado. Como exemplo, a União Europeia tem como meta reduzir a um máximo de 10% o total de resíduos com destino final em aterros sanitários, além de buscar ampliar a reciclagem para um mínimo de 65% do total do lixo produzido (EUROPEAN COMMISSION, 2015).

Apesar disso, atualmente a maior parte dos resíduos gerados no mundo ainda tem como disposição final os aterros sanitários e lixões, aonde contribuem para a poluição já citada, e acabam sendo subaproveitados quanto a seu potencial econômico e energético (MANFREDI, 2009).

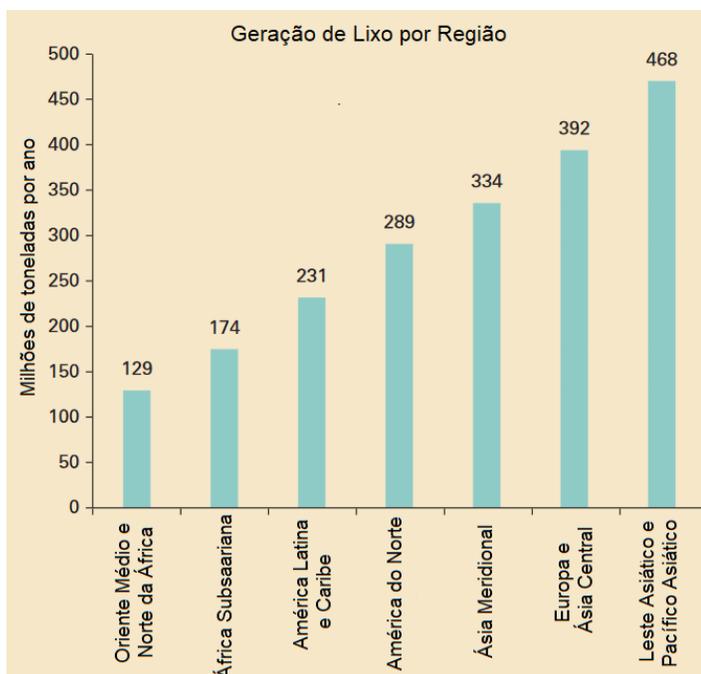


Figura II.13: Geração de resíduos em 2016, por região (KAZA, 2018).

De modo geral, as regiões mais ricas são as que geram a maior quantidade de resíduos, embora muitas vezes correspondam a menores parcelas da população. A Ásia Oriental é a maior produtora, com 23% do total, seguida da Europa e Ásia Central, com 20%, Ásia Meridional, com 17% e América do Norte, com 14%. A América do Sul fica com 11%, e África e Oriente Médio, 9% e 6%, respectivamente (KAZA, 2018).

A média de geração de resíduos é de 0,74 kg/d per capita, mas os valores individuais podem variar entre 0,11 kg/d e 4,54 kg/d. No total, foram gerados 2,01 bilhões de toneladas no mundo em 2016. Além do poder aquisitivo já citado, outro fator que influencia na geração de resíduos é o nível de urbanização, com regiões mais urbanizadas gerando maiores quantidades de resíduos (WORLD BANK GROUP, 2021).

Em contrapartida, espera-se que nas próximas décadas as regiões com maior crescimento na geração de resíduos serão as de menor renda per capita, tendo em vista que a população e o consumo tendem a se estabilizar em regiões de maior desenvolvimento econômico (KAZA, 2018). Além disso, espera-se que a taxa de crescimento da geração de resíduos diminua ao longo dos próximos anos (CHEN, 2020).

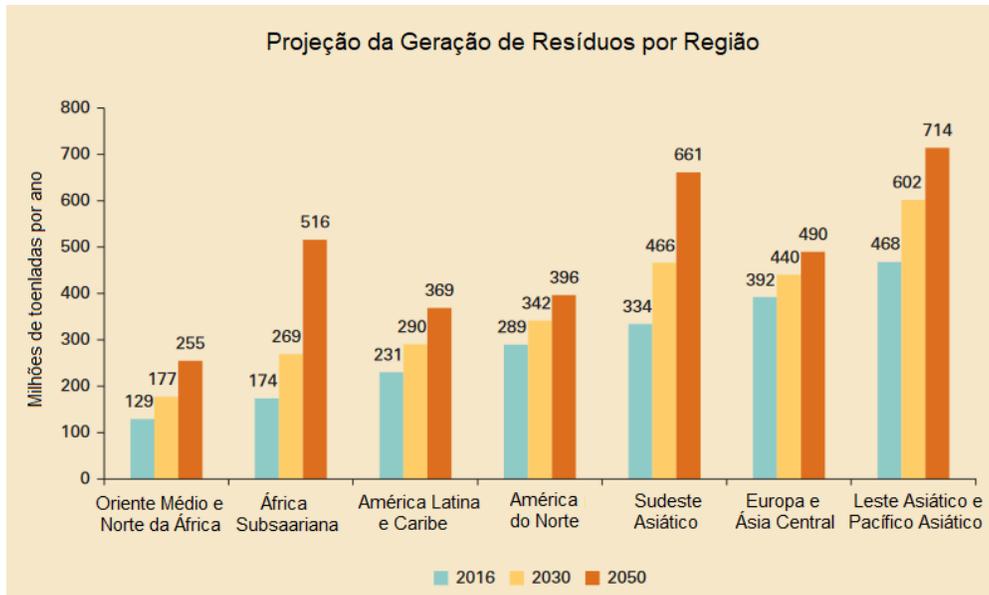


Figura II.14: Projeção de geração de resíduos por região (KAZA, 2018).

A composição pode variar significativamente de acordo com condições socioeconômicas. Regiões de maior renda per capita tendem a gerar menos resíduos orgânicos, correspondendo a 32% do total, enquanto resíduos secos, que podem ser reciclados, como plástico, vidro e metal, equivalem a 51%. Para regiões mais pobres, a fração orgânica equivale a 57% do total, enquanto os recicláveis são 20%. Em linhas gerais, a composição não é muito afetada por outros fatores que não a renda (WORLD BANK GROUP, 2021).

Apesar desta maior proporção de fração orgânica, segundo projeções para os próximos anos, espera-se que esta diminua, passando de um total de 47% em 2015 para 39,8% em 2050. Novamente, esta tendência justifica-se devido a estabilização do consumo de alimentos em populações de crescimento estável. Apesar disso, em termos absolutos, a fração orgânica permanece a mais relevante e, por tanto, a que merece maior atenção (CHEN, 2020).

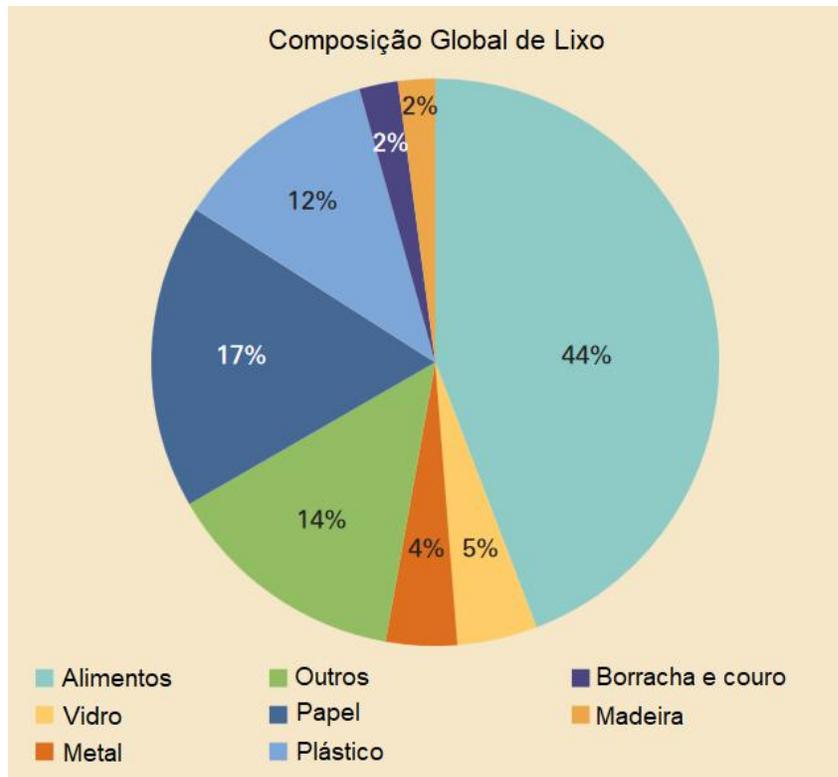


Figura II.15: Composição de resíduos sólidos por região em 2016 (KAZA, 2018).

Quanto a disposição final, 40% dos resíduos sólidos globais são encaminhados a aterros sanitários. Cerca de 33% ainda são dispostos em lixões, enquanto 19% passam por algum tipo de recuperação, seja reciclagem ou compostagem, e 11% são incinerados. O tipo de disposição também varia de acordo com condições econômicas, com países mais pobres favorecendo lixões e incineração, enquanto nos mais ricos prevalecem os aterros sanitários e reciclagem (KAZA, 2018).

Para a projeção de métodos de disposição, embora exista uma tendência na redução do número de lixões, estes acabam sendo substituídos por aterros sanitários como a forma mais comum de destinação final, sobretudo na China, África e América do Sul. Outros tratamentos também aumentam sua participação, como reciclagem, incineração e compostagem (CHEN, 2020).

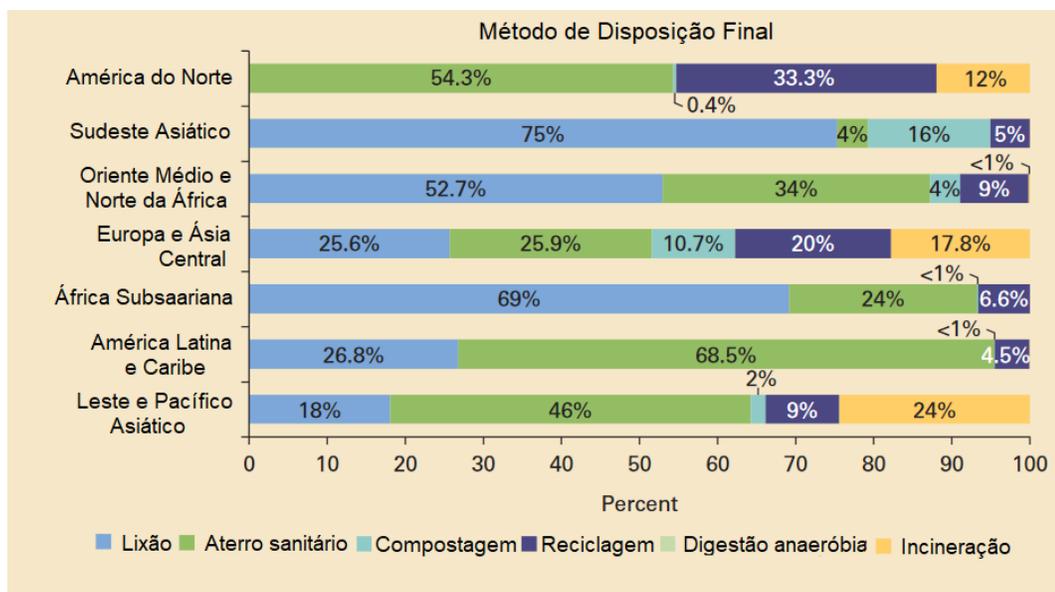


Figura II.16: Disposição final por região, 2016 (KAZA, 2018).

No Brasil, foram geradas aproximadamente 72,7 milhões de toneladas de RSU em 2019, um aumento de 23% em relação a 2015. A média de lixo coletado foi de 348,9 kg por habitante por ano, um aumento de aproximadamente 14% no período já citado. Em termos de cobertura de coleta, as regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste apresentam alto índice, com 95%, 91% e 89%, respectivamente. As regiões Norte e Nordeste tem índices ligeiramente menores, com 80% e 75%, respectivamente. A média brasileira é de 88% (ABRELPE, 2020).

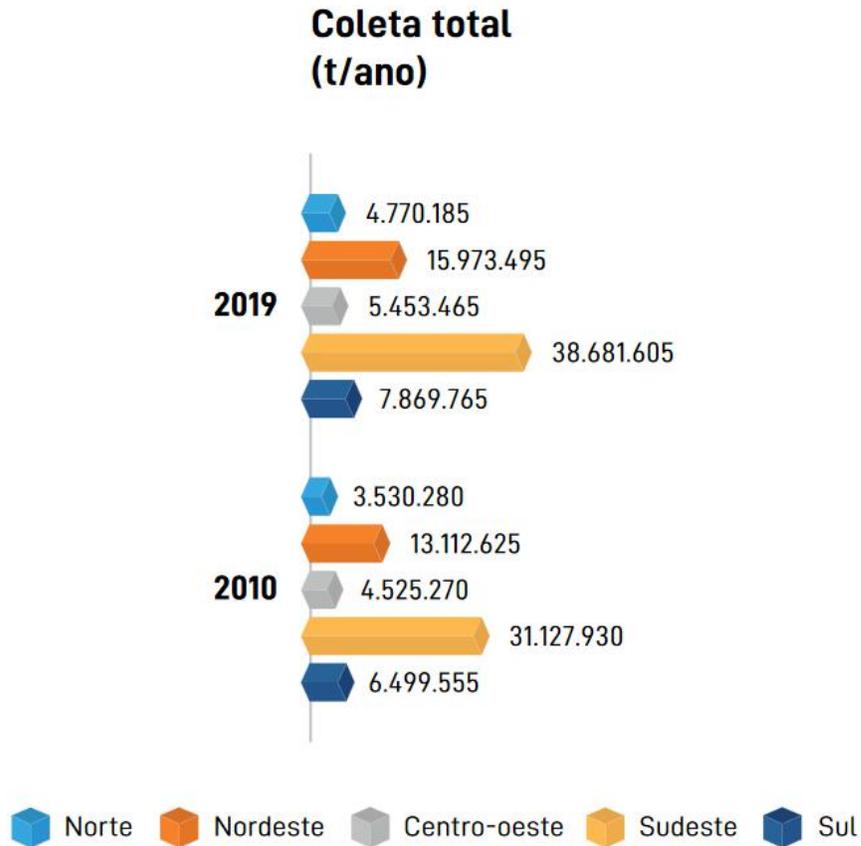


Figura II.17: Coleta de RSU no Brasil, por região (ABRELPE, 2020).

Quanto a composição, a maior parte dos resíduos são de origem orgânica, com aproximadamente 45%. Do restante, 33,6% são de materiais recicláveis, como plástico (16,8%), papel (10,4%) e metais (2,3%) (ABRLEPE, 2020).

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) é uma importante parte do gerenciamento de RSU no Brasil. Estabelecida em 2010, esta tem como objetivo a redução, reutilização e reciclagem dos resíduos produzidos no Brasil, bem como estabelecer as adequadas condições para disposição final e recuperação energética, visando evitar danos ao ambiente e a população (BRASIL, 2010).

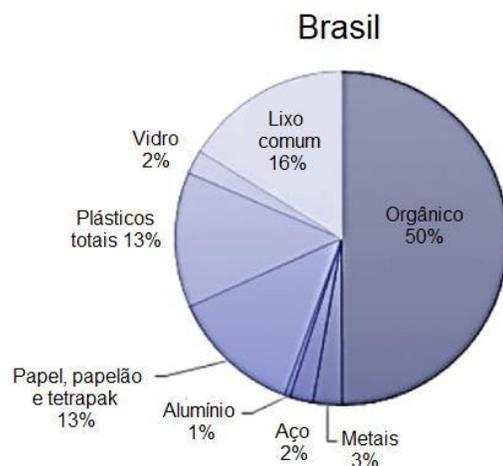


Figura II.18: Composição de RSU no Brasil (MASSUKADO, 2013).

Apesar disso, entre 2010 e 2019, o percentual de resíduos com destinação final no Brasil mudou de 56,8% para 59,5%, uma diferença bastante pequena. Ou seja, 40,5% dos resíduos gerados no país ainda tem disposição final inadequada. O total de RSU com disposição inadequada passou de 25 milhões de toneladas para 29 milhões de toneladas no período, enquanto aqueles com disposição considerada adequada passou de 33 para 43 milhões de toneladas (ABRELPE, 2020).



Figura II.19: Destinação final de resíduos sólidos no Brasil, por região (ABRELPE, 2020).

É importante notar a quantidade de aterros controlados que surgiram para complementar o fechamento de lixões. No entanto, não são considerados como forma satisfatório de disposição final, do ponto de vista ambiental, e tendem a ser substituídos por aterros sanitários. Além disso,

pela PNRS, a data limite para eliminar os lixões era agosto de 2014, de onde se observa que a meta não foi atingida (ALFAIA, 2017).

Com relação a aspectos econômicos, foram investidos R\$ 25 bilhões nos serviços de coleta e limpeza urbana em 2019, ou R\$ 121,80 por habitante ao ano, um aumento de 44% em relação a 2010. Por fim, cabe notar que em 2019 foram emitidas 96 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>eq, um aumento de 23% em relação a 2010. Assim, existe grande potencial para a implantação de processos de recuperação energética como a compostagem e digestão anaeróbica, tanto para obter retorno financeiro sobre o processo, quanto para reduzir os impactos ambientais (ABRELPE, 2020).

## Capítulo III – Metodologia

### III.1 – Avaliação da Utilização de Biometano em Veículos de Carga

Existem três possibilidades para a utilização de gás natural em motores a diesel. O primeiro é a utilização de um motor bicomcombustível, aonde existem dois tanques de armazenamento distintos, um para o diesel e outro para o biogás. Será então utilizada uma mistura de ambos para a combustão (RAY, 2013). Podem ser adquiridos veículos com esse sistema de fábrica ou então optar pela conversão de veículos a diesel, através de kits. Nestes casos, o consumo de biogás depende da carga e da velocidade do veículo. Em casos de cargas leves e velocidades baixas, o consumo tende ao equilíbrio entre diesel e biogás, enquanto cargas ou velocidades mais elevadas podem levar a taxas de substituição de diesel mais elevadas, entre 80% e 85% (PROBIOGAS, 2016).

O sistema de combustível duplo tem como vantagens a baixa necessidade de modificações ao motor e mantém um desempenho muito próximo do motor operando com diesel puro. No entanto, possui taxas de emissões de poluentes elevadas quando comparado às demais alternativas (IEA-AMF), além de proporcionar um nível de substituição do combustível diesel relativamente baixo, principalmente em trajetos urbanos, ficando em média entre 50% e 60% (IRENA, 2018).

Outra possibilidade é a utilização de caminhões com motores movidos exclusivamente pelo uso de gás natural, que pode operar também com biometano sem a necessidade de qualquer adaptação. A Scania possui dois modelos, lançados em 2019, e que venderam até junho de 2020 40 unidades combinadas. Dentre os casos de uso, temos marcas de bastante relevância, como a PepsiCo e a L'Oréal. O principal modelo é o R410, mas há também o P340, com o primeiro custando cerca de R\$ 650 mil e o segundo, R\$ 520 mil. Não existem perdas perceptíveis de desempenho entre os modelos a diesel e GNV, com a vantagem de que as emissões de CO<sub>2</sub> podem ser reduzidas em até 90% nos casos em que se utiliza biometano. (RAMOS, 2020; SODRÉ, 2019).

Além disso, a marca já oferece modelos para serem utilizados na operação de coleta de lixo (SCANIA, 2021). Existem também outras marcas interessadas em produzir modelos utilizando o GNV como combustível, como a Iveco e a Volvo (TAKAR, 2018).

Por fim, a terceira opção consiste em converter um motor movido a diesel em um movido a gás natural, processo conhecido como “ottonização”. Nestes casos não é possível alterar entre os dois tipos de combustíveis, como no caso dos motores bicombustíveis. Além disso, existem perdas associadas de potência e eficiência, quando comparados ao motor diesel original, com a perda de potência podendo ser superior a 40 % (BERMEJO, 2012). O custo da conversão varia com o modelo do veículo, ficando entre R\$ 37.000 e R\$ 92.500 (TAKAR, 2018). Para este cenário, um dos principais impeditivos é a idade dos veículos, cuja média nacional é de 15,2 anos, o que torna difícil justificar o alto investimento (SODRÉ, 2019).

Baseado nos diversos casos reais já em operação no Brasil, na disponibilidade de aquisição dos veículos já configurados para operação de coleta de lixo urbano e nas taxas de emissões de poluentes consideravelmente inferiores as demais alternativas, o presente estudo considerará o cenário em que serão utilizados veículos com motor de centelha, utilizando biometano como fonte de combustível, baseando se no modelo Scania R410.

### III.2 – Avaliação do Potencial de Produção de Biometano a Partir de RSU

Para estimar o potencial teórico de geração de biogás a partir de RSU, será utilizado um conjunto de equações propostas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2019). Estas equações estimam a quantidade de material orgânico degradável presente nos resíduos e calculam o volume potencial de metano que pode ser gerado a partir desta.

$$L_0 = W * MCF * DOC * DOC_F * F * \frac{16}{12}$$

Fórmula III.1: Potencial de geração de metano por RSU (IPCC, 2019).

$L_0$ : Potencial de geração de CH<sub>4</sub>, Gg

$W$ : Massa total de RSU, Gg

$MCF$ : Fator de correção para digestão aeróbica, adimensional

$DOC$ : Carbono orgânico degradável total, Gg C / Gg resíduo

$DOC_F$ : Fração de carbono orgânico capaz de se decompor, adimensional

$F$ : Fração de CH<sub>4</sub> no gás gerado, adimensional

$\frac{16}{12}$ : Razão de massa molar CH<sub>4</sub>/C, adimensional

$$DOC = \sum_i DOC_i * W_i$$

Fórmula III.2: Fração de carbono degradável total em RSU (IPCC, 2019).

*DOC*: Carbono orgânico degradável médio, Gg C / Gg resíduo

*DOC<sub>i</sub>*: Carbono orgânico degradável por componente, adimensional

*W<sub>i</sub>*: Fração mássica por componente, adimensional

O carbono orgânico capaz de se decompor (*DOC<sub>F</sub>*) varia de acordo com a composição dos resíduos a serem decompostos, com materiais altamente degradáveis como alimentos aumentando o valor, enquanto os menos degradáveis como madeira reduzem o mesmo. Os valores recomendados pelo IPCC são:

Tipo de Resíduo	Valor de <i>DOC<sub>F</sub></i>
Baixa degradabilidade (ex: madeira)	0,1
Média degradabilidade (ex: papel)	0,5
Alta degradabilidade (ex: alimentos)	0,7

Tabela III.1: Fração de carbono orgânico capaz de se decompor, por tipo de resíduo (IPCC, 2019).

Para o carbono orgânico degradável por componente, o IPCC recomenda os seguintes valores:

Componente	DOC
Papel	0,40
Têxteis	0,24
Alimentos	0,15
Madeira	0,43
Resíduo de parques e jardins	0,20
Fraldas	0,24

Tabela III.2: Carbono orgânico degradável total, por tipo de resíduo (IPCC, 2019).

Quanto ao fator de correção para processo aeróbio, por tratar-se de uma digestão anaeróbia controlada, recomenda-se considerar um valor de 1. Por fim, a fração de metano gerada no gás, *F*, varia de acordo com a composição dos resíduos, mas recomenda-se um valor padrão de 0,5.

### III.3 – Cálculo de Equivalência Energética Entre Biogás e Diesel

Para estimar a equivalência quantitativa entre diesel e biometano, para operação em caminhões, será utilizado o poder calorífico inferior de ambos os combustíveis, propriedade que fornece a quantidade de energia liberada na forma de calor durante a oxidação dos combustíveis. Além disso, também deve ser levado em conta a diferença na eficiência entre os motores dos ciclos diesel e ciclo Otto:

$$V_B = V_D * \frac{PCI_D * \eta_D}{PCI_B * \eta_B}$$

Fórmula III.3: Equivalência quantitativa entre diesel e biometano (NADALETI, 2017).

$V_B$ : Consumo médio de biometano, Nm<sup>3</sup>/dia

$V_D$ : Consumo médio de diesel, L/dia

$PCI_B$ : Poder calorífico inferior do biometano, MJ/ Nm<sup>3</sup>

$PCI_D$ : Poder calorífico inferior do diesel, MJ/ L

$\eta_B$ : Eficiência do motor de ignição por centelha, %

$\eta_D$ : Eficiência do motor de ignição por compressão, %

A tabela III.3 indica os valores referentes as propriedades de cada combustível:

	<b>Diesel</b>	<b>Biometano</b>
<b>Massa Específica (t/m<sup>3</sup>)</b>	0,840	0,00076
<b>Poder Calorífico (MJ/kg)</b>	42,29	48,25

Tabela III.3: Propriedades para cálculo de equivalência quantitativa (ANP, 2018).

Convertendo os valores de PCI para as unidades necessárias para a fórmula III.3, e listando também os valores de eficiência térmica para ambos os tipos de motores, temos:

	<b>Diesel</b>	<b>Biometano</b>
<b>Poder Calorífico</b>	35,5 MJ/L	36,67 MJ/m <sup>3</sup>
<b>Eficiência Térmica (%)</b>	40 (XIN, 2014)	30 (SANTOS, 2016)

Tabela III.4: Propriedades para cálculo de equivalência quantitativa, convertidas para a fórmula III.3.

### III.4 – Cálculo de Emissões de CO<sub>2</sub>

O cálculo de emissão de CO<sub>2</sub> será feito baseado na metodologia proposta pelo IPCC no volume 2 do Guia de Inventário Nacional para Gases do Efeito Estufa:

$$E = \sum_i F_i * CC_i * \frac{44}{12}$$

Fórmula III.4: Emissões de CO<sub>2</sub> (IPCC, 2019).

$E$ : Emissão de CO<sub>2</sub>, kg

$F_i$ : Combustível consumido, TJ

$CC_i$ : Conteúdo de carbono, kg/TJ

$\frac{44}{12}$ : Razão mássica entre  $CO_2/C$ , adimensional

Os valores de conteúdo de carbono (CC) providos pelo IPCC se encontram na tabela III.5. Como não são listados valores específicos para biometano, estes serão aproximados através dos valores apresentados para gás natural.

	<b>Diesel</b>	<b>Biometano</b>
<b>Conteúdo de Carbono (kg/TJ)</b>	20.200	15.300
<b>CC x 44/12 (kg/TJ)</b>	74.100	56.100

Tabela III.5: Conteúdo de carbono (IPCC, 2019).

Além disso, o cálculo das emissões evitadas também deverá levar em conta as emissões evitadas pela produção de metano pelo RSU depositado, caso este não fosse convertido para uso como biodiesel. Para tal, será utilizada a equivalência de potencial de aquecimento global:

$$CH_4 = 25 * CO_2$$

Fórmula III.5: Equivalência de potencial de aquecimento global (EPA, 2021).

$CH_4$ : massa de metano, kg

$CO_2$ : massa de dióxido de carbono, kg

### III.5 – Estimativa de Viabilidade Econômica

Para estimar a viabilidade econômica do projeto proposto, será utilizado como base a planta da Gás Verde, localizada em Seropédica, no Rio de Janeiro. Os parâmetros considerados foram analisados e corrigidos por Rocha e Soares (2021) para maio de 2021, e estão listados na tabela III.6:

<b>Aspectos Financeiros</b>	
Tempo de Construção	2 anos
Período de Operação	20 anos
CAPEX	R\$ 346.336.670
Estrutura de Capital	100% capital próprio
OPEX como percentual do CAPEX	17%
OPEX Anual	58.877.234
<b>Aspectos Técnicos</b>	
Capacidade de Produção Diária de Biogás	480.000 m <sup>3</sup> /dia
Capacidade de Produção Diária de Biometano	204.000 m <sup>3</sup> /dia
Fator de Utilização	90%
Produção de Biometano	183.600 m <sup>3</sup> /dia

Tabela III.6: Parâmetros para operação de planta de biometano (ROCHA, 2021).

Para o excedente da produção, será considerada a comercialização com valores médios calculados por Rocha e Soares baseado numa Taxa Interna de Retorno (TIR) entre 10% e 15% para os parâmetros anteriores. Assim, o preço de comercialização será de R\$ 1,95/m<sup>3</sup>.

Além disso, devem ser considerados os custos de aquisição de novos caminhões movidos a gás natural para a utilização com o biometano. Para tal, será considerado o modelo Scania R410, com preço de R\$ 650.000 por unidade (RAMOS, 2020).

Ainda, é preciso levar em conta o valor economizado com combustível diesel, devido a substituição pelo biometano. Para tal, será considerada a média do preço de revenda praticado no município do Rio de Janeiro no período entre janeiro e agosto de 2021 (ANP, 2021).

Mês	Preço (R\$)
Janeiro	3,712
Fevereiro	3,975
Março	4,258
Abril	4,199
Maiο	4,456
Junho	4,468
Julho	4,476
Agosto	4,537
<b>Média</b>	<b>4,260</b>

Tabela III.7: Preço médio de revenda do diesel no município do Rio de Janeiro em 2021 (ANP, 2021).

Por fim, o ponto de equilíbrio do investimento será obtido pelo seguinte cálculo:

$$PE = CAPEX / (Receita - OPEX)$$

Fórmula III.6: Ponto de equilíbrio para o empreendimento.

## Capítulo IV – Resultados e Discussão

### IV.1 – Produção de Biometano a Partir de RSU

Utilizando dados da COMLURB, é possível obter a massa total de lixo coletado no município do Rio de Janeiro no período entre 2010 e 2019:

Ano	Massa de Lixo (t)
2010	2.187.026
2011	2.277.346
2012	3.450.035
2013	3.465.186
2014	3.324.525

2015	3.273.256
2016	3.146.850
2017	3.016.556
2018	3.079.233
2019	3.223.437
<b>Média</b>	<b>3.044.345</b>

Tabela IV.1: Total de RSU coletado no município do Rio de Janeiro entre 2010 e 2019 (IPP, 2021).

Além disso, também é possível obter a composição gravimétrica percentual do lixo domiciliar coletado no mesmo período:

Componente	Percentual por Ano										
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Média
Papel	16,46	16,84	15,99	16,83	15,62	15,14	14,82	14,70	14,31	14,63	<b>15,53</b>
Têxteis	1,57	2,09	1,75	1,94	2,00	2,35	2,08	2,30	2,52	2,67	<b>2,13</b>
Alimentos	55,02	52,68	53,28	52,81	52,00	53,60	53,23	49,21	50,51	47,33	<b>51,97</b>
Madeira	0,36	0,37	0,34	0,50	0,42	0,54	0,46	0,40	0,52	0,54	<b>0,44</b>
Resíduo de parques e jardins	1,06	1,12	1,35	1,37	1,00	1,17	0,97	0,84	0,93	1,21	<b>1,10</b>
Fraldas	-	-	-	-	-	-	-	-	6,71	7,77	<b>7,24</b>
Não degradáveis	25,53	26,9	27,29	26,55	28,96	27,2	28,44	32,55	24,5	25,85	<b>21,59</b>

Tabela IV.2: Composição gravimétrica de RSU coletado no município do Rio de Janeiro entre 2010 e 2019 (IPP, 2020).

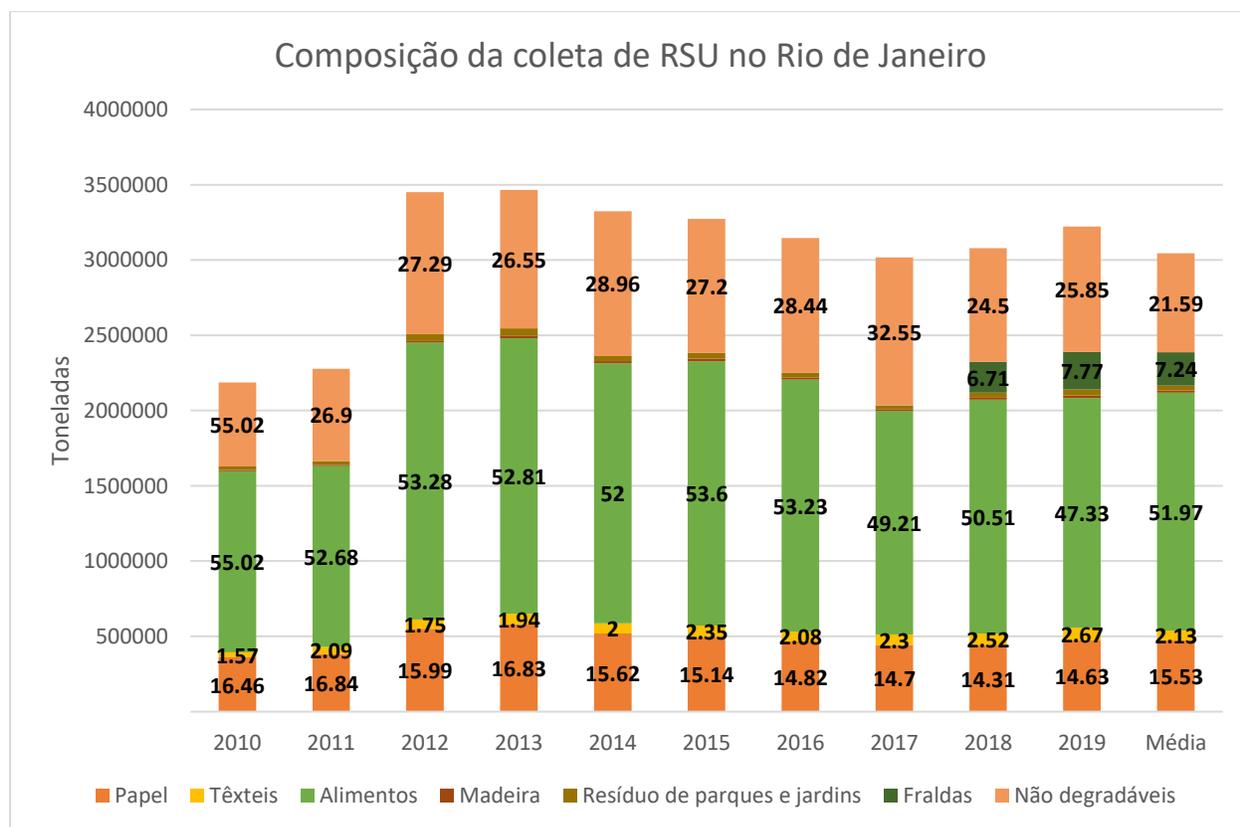


Figura IV.1: Composição da coleta de RSU no Rio de Janeiro.

De posse destes dados, é possível aplicar as fórmulas III.1 e III.2 e obter o potencial total de biometano que pode ser produzido por RSU no município do Rio de Janeiro, utilizando os valores médios para o período. Com isso, seria possível produzir um total de 236.766 t biometano/ano ou 649 t biometano/dia.

Utilizando o valor de massa específica da tabela III.3, é possível converter a massa de biometano para volume. Assim, o volume de biometano potencial a ser produzido é de 311.533.965.949 L/ano ou 853.515.715 L/dia.

<b>Quantidade</b>	<b>Ano</b>	<b>Dia</b>
<b>Toneladas</b>	236.766	649
<b>Litros</b>	311.533.965.949	853.515.715

Tabela IV.3: Potencial de produção de biometano a partir de RSU no Rio de Janeiro.

Aqui cabe comparar o potencial calculado com o total de biometano produzido pelo projeto Gás Verde, localizado em Seropédica, e com o projeto GNR Dois Arcos, em São Pedro da Aldeia, ambos no estado no Rio de Janeiro. A capacidade de produção de ambos é de 204 mil m<sup>3</sup>/dia e 16 mil m<sup>3</sup>/dia de biometano, respectivamente. O potencial total calculado é de aproximadamente 853 mil m<sup>3</sup>/dia, quase quatro vezes superior aos empreendimentos presentes atualmente no estado.

Com isso, é possível concluir que existe grande oportunidade de utilização deste RSU coletado para fornecimento de energia e redução de impactos ambientais, e que os esforços atuais na região podem servir de base na elaboração de novos projetos.

## IV.2 – Capacidade de Substituição de Diesel por Biometano no Município do Rio de Janeiro

Segundo o jornal O Globo, o consumo médio diário para a operação de coleta de RSU no Rio de Janeiro era de 70 mil litros de diesel em 2018 (GLOBO, 2018). Ainda, segunda a prefeitura do Rio de Janeiro, a frota de coleta de lixo contava com um total aproximado de 200 veículos em 2019, dos quais 180 operando com diesel (RIO PREFEITURA, 2019).

Com isso, é possível utilizar a fórmula III.3 e os dados da tabela III.4 para calcular o volume necessário de biometano para a operação diária de coleta no Rio de Janeiro. Ainda, utilizando os volumes calculados e os PCIs, pode ser feito o cálculo da equivalência energética entre ambos:

<b>Combustível</b>	<b>Volume (L)</b>	<b>Excedente (L)</b>	<b>Energia (MJ)</b>
<b>Diesel</b>	70.000	-	2.485.000
<b>Biometano</b>	90.281.562	735.818.142	3.310.625

Tabela IV.4: Comparação entre operação com diesel e biometano.

Observa-se pelos dados que o potencial de produção de biometano no Rio de Janeiro não só é capaz de suprir a demanda da operação atual, como tem o potencial de produzir um excedente de aproximadamente 7 vezes o consumo diário, em volume.

Novamente, é interessante analisar o contexto do mercado de biometano no estado. Atualmente, está em vigor a Política Estadual de Gás Natural Renovável, que estabelece uma quantidade mínima de biometano a ser injetada na rede de distribuição de gás natural. Esta quantidade em 2020 foi de 611 mil m<sup>3</sup>/dia (ROCHA, 2021). Além disso, existe a possibilidade da venda diretamente ao consumidor final, sem a necessidade da inserção na rede de GN. Com isso, o excedente desta produção tem diversas possibilidades de comercialização para gerar receita.

Comparando os valores de demanda energética entre ambos, observa-se que o valor para biometano é 33,22% maior do que o do diesel. Comparando com os estudos de MADHUSUDHANAN *et al.* (2020), que realizaram uma análise comparativa entre diversos tipos de operação para caminhões operando com diesel e biometano, a diferença observada para a operação em ambientes urbanos foi de 36,43%, o que indica uma boa confiabilidade dos resultados obtidos no presente estudo.

### IV.3 – Emissões Evitadas de CO<sub>2</sub>

Utilizando a fórmula III.4 e os valores de PCI listados na tabela III.4, em conjunto com os volumes de biometano e diesel obtidos na tabela IV.4, é possível calcular o total de emissões de CO<sub>2</sub> por combustão, para a operação diária com ambos os combustíveis:

<b>Combustível</b>	<b>Emissões CO<sub>2</sub> (t)</b>
<b>Diesel</b>	184,1
<b>Biometano</b>	185,7

Tabela IV.5: Emissões diárias de CO<sub>2</sub> por combustão

É possível observar que ambos os combustíveis apresentam níveis de emissões bastante próximos, de modo que a diferença entre ambos é praticamente desprezível. No entanto, deve ser levado em contato o total de metano que seria emitido por decomposição, caso a matéria orgânica coletada fosse depositada em aterro sanitário, ao invés de utilizada na produção de biometano. Utilizando o volume diário obtido no item IV.2 e o valor de massa específica da tabela III.3, calcula-se que o total de metano produzido diariamente é de aproximadamente 68,6 t/dia. Utilizando a fórmula III.5, chegamos no total de 1.715 t eqCO<sub>2</sub>/dia.

A paridade de emissão de CO<sub>2</sub> entre diesel e biometano pode ser atribuída a diferença entre poder calorífico entre ambos. Ainda que o biometano tenha conteúdo de carbono inferior ao diesel e, portanto, que teoricamente tenha menor potencial de produzir gás carbônico, seu menor poder calorífico acarreta num volume maior necessário para manter a paridade energética com o diesel, de forma que suas emissões acabam por serem equivalentes.

No entanto, quando olhamos para o processo global, e passamos a considerar também as emissões de metano evitadas por sua decomposição em aterro, as emissões evitadas totais pela substituição de diesel por biometano passam para 1899,1 eqCO<sub>2</sub>/dia, valor composto pela soma entre emissões evitadas do consumo do diesel e do biometano produzido por decomposição. Isto gera uma redução percentual de 90,22% quando da substituição. Este valor é bastante expressivo, e aponta não só para um grande ganho do ponto de vista ambiental, como um potencial ganho financeiro, na forma da comercialização de créditos de carbono.

#### IV.4 – Estimativa de Viabilidade Econômica

Conforme mencionado no item III.5, o projeto Gás Verde será utilizado como base para a estimativa econômica do projeto. Aqui, o CAPEX foi acrescido do custo necessário para a substituição dos caminhões a diesel por modelos movidos a gás natural. O custo total da substituição dos 180 caminhões da frota atual é de R\$ 117.000.000.

A receita do projeto por sua vez é composta por duas parcelas: o gasto economizado com aquisição de diesel e a venda do excedente de biometano produzido. O total de diesel consumido, mencionado no item IV.2 é de 70 mil litros/dia que, combinado com o preço médio calculado no item III.5, fornece uma economia de R\$ 298.200/dia ou R\$108.843.000/ano.

Para o excedente de biometano a ser comercializado, subtrai-se o total de biometano necessário para substituir o consumo de diesel calculado no item III.2 da produção de biometano parametrizada no item III.5 para um total de 93.319 m<sup>3</sup>/dia. Multiplicando este valor pelo preço de comercialização para o biometano parametrizado no item III.5, a receita com este excedente será de R\$ 181.972/dia ou R\$ 66.419.780/ano.

Os parâmetros finais do projeto portanto serão:

<b>Parâmetros Operacionais</b>	
CAPEX	R\$ 463.336.670
OPEX	R\$ 58.877.234/ano
Receita	R\$ 175.262.780/ano

Tabela IV.6: Parâmetros operacionais para produção de biometano.

O lucro anual do empreendimento portanto é de R\$ 116.385.546/ano. Além disso, é possível calcular o ponto de equilíbrio entre para o empreendimento, baseado no investimento inicial, sendo de aproximadamente 4 anos.

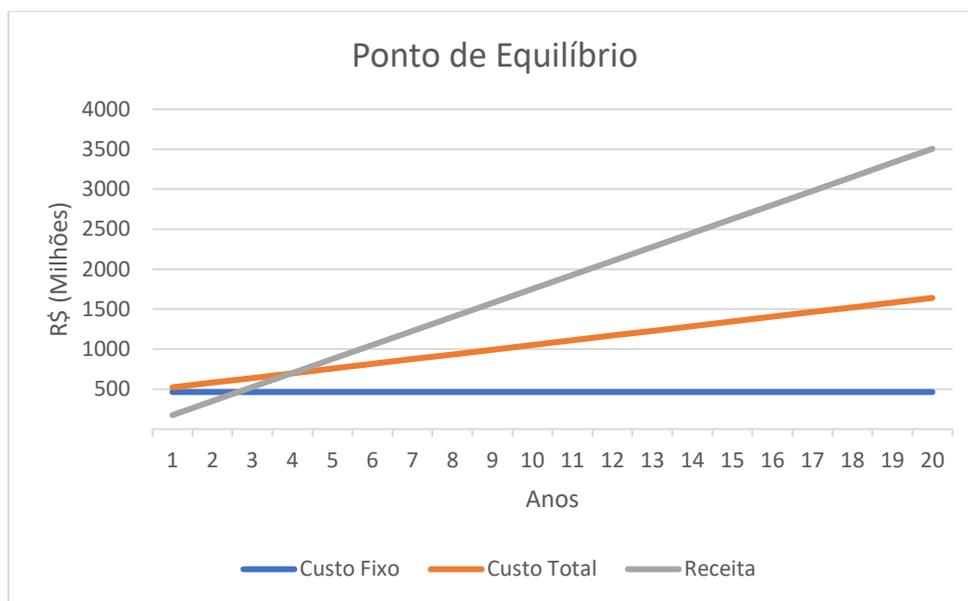


Figura IV.2: Ponto de equilíbrio para o empreendimento.

Comparado com o tempo de operação de 20 anos previsto para a planta, um ponto de equilíbrio de 4 anos é bastante atraente para o projeto proposto. Além disso, cabe destacar que, conforme mencionado anteriormente, existe um grande mercado consumidor para o biometano no Rio de Janeiro, e que o potencial de produção teórico calculado para o uso de RSU comporta entre 4 e 5 vezes a capacidade do empreendimento apresentado. Assim, o mesmo tem margem para alterações que permitam aumentar ainda mais a margem de lucro, principalmente quando consideramos a economia de escala envolvida.

Além disso, existe a possibilidade de considerar a venda de créditos de carbono por conta das emissões de CO<sub>2</sub> evitadas. Embora a prática ainda não seja regulamentada no Brasil, a PL 528/21 tramita atualmente na câmara dos deputados e tem previsão de ser votada até o fim de 2021 (AGÊNCIA CÂMARA DE NOTÍCIAS, 2021). No ano de 2021, o preço da tonelada de carbono atingiu seu recorde histórico no mercado europeu, aonde se concentra a maior parte da comercialização, além de proposta por parte do FMI de estabelecer um piso para a comercialização do mesmo (UDOP, 2021).

Conforme calculado anteriormente, há grande potencial de redução de emissões por parte do projeto, que ao serem comercializados teriam grande impacto na receita e lucro calculados. Ainda, a regulamentação de um mercado, somado as movimentações no mercado internacional, poderiam atrair investidores interessados no presente empreendimento.

## Capítulo V – Conclusão

A crise climática tem trazido ameaças cada vez mais iminentes, que vão desde o aumento das temperaturas ao redor do globo até a recente crise hídrica que afeta atualmente o Brasil e cujo agravamento está previsto no futuro próximo (IPCC, 6th Assessment Report, 2021). Além disso, a crise climática influencia também o preço dos combustíveis que, quando somados a recente crise econômica brasileira, levam a uma alta sem precedentes no preço dos mesmos. Por sua vez, essa alta afeta diversas operações, do transporte à produção industrial, que ocasiona em problemas como o desemprego e a fome. Assim, é de extrema importância que sejam implementadas soluções que possam levar à reversão desse ciclo de deterioração ambiental e social.

O presente estudo teve como objetivo fornecer soluções simultaneamente para os problemas climáticos e energéticos enfrentados. Conforme demonstrado, a quantidade de resíduos sólidos produzidas no município do Rio de Janeiro pode produzir grandes quantidades de biometano. Quando comparado com a energia total utilizada atualmente para manter a operação de coleta de RSU na cidade, tal quantidade equivale a aproximadamente 8 vezes ao total da mesma. Com isso demonstrou-se que é possível substituir completamente o diesel utilizado para tal operação pelo biometano, além de gerar um largo excedente de grande interesse comercial.

A produção deste biocombustível é muito interessante do ponto de vista ambiental. Conforme demonstrado, a substituição do combustível fóssil leva a uma redução de cerca de 90% nas emissões de gases do efeito estufa. Por se tratar de um poluente 25 vezes mais danoso ao meio ambiente do que o gás carbono, as emissões de metano são extremamente perigosas. Ao utilizar um sistema de produção dedicado, é possível reduzir consideravelmente tais efeitos.

Do ponto de vista econômico, foi possível observar uma economia superior a RS 175 milhões por ano quando da substituição do diesel. Conforme a estimativa realizada, também foi possível demonstrar um período de 4 anos para atingir o ponto de equilíbrio, ou seja, o tempo necessário para recuperar os investimentos iniciais do projeto.

O projeto proposto também tem possibilidades de expansão, visto que não considerou a realização do potencial total de biometano teorizado. Tendo em vista a presente situação do mercado no estado do Rio de Janeiro, há forte demanda por esse tipo de combustível, principalmente com respeito a Política Estadual de Gás Renovável.

Além disso, considerando os desenvolvimentos atuais envolvendo créditos de carbono, há ainda a possibilidade de que esse mercado seja regulamentado muito em breve no Brasil, o que aumenta as possibilidades de capitalização do projeto.

Dessa forma, o estudo proposto atingiu seu objetivo, ao demonstrar a viabilidade do projeto proposto, além de demonstrar suas vantagens técnicas e econômicas.

## Referências Bibliográficas

ABIOGÁS – Associação Brasileira do Biogás. **Biogás no Brasil: Conhecendo o Mercado no País.** São Paulo, 2021. Disponível em: [https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2021/01/Infograficos-Abiogas\\_D\\_2021-1.pdf](https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2021/01/Infograficos-Abiogas_D_2021-1.pdf). Acesso em: 10 maio 2021.

ABIOGÁS – Associação Brasileira do Biogás. **Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano.** São Paulo, 80 p., 2021. Disponível em: [https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2021/01/PNBB\\_Versao\\_Final.pdf](https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2021/01/PNBB_Versao_Final.pdf). Acesso em: 11 maio 2021.

ABNT NBR 1004. **Resíduos sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro, 31 maio 2004, p. 77. Disponível em: <https://analiticaqmresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>. Acessado em: 20 maio 2021.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020.** São Paulo, 2020. 52 p. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 27 maio 2021.

ACHINAS, Spyridon; ACHINAS, Vasileios; EUVERINK, Gerrit. **A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste.** Engineering, 2017, vol. 3, ed. 3, p. 299-307.

ADNAN, Amir; ONG, Mei Yin; NOMANBHAY, Saifuddin; CHEW, Kit; SHOW, PAU. **Technologies for Biogas Upgrading to Biomethane: A Review.** Bioengineering, 2019, vol. 6, ed. 4, p. 92.

AGÊNCIA CÂMARA DE NOTÍCIAS. Lira reafirma intenção de votar neste ano a regulamentação do mercado de créditos de carbono. **Câmara dos Deputados**, Brasília, 16 set. 2021. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/806765-lira-reafirma-intencao-de-votar-neste-ano-a-regulamentacao-do-mercado-de-creditos-de-carbono/>. Acesso em: 18 set. 2021.

ALFAIA, Raquel; COSTA, Alyne; CAMPOS, Juacyara. **Municipal solid waste in Brazil: A review.** Waste Management & Research, 2017, vol. 35, ed. 12, p. 1195-1209.

AMERICAN BIOGAS COUNCIL. **Biogas Market Snapshot.** ABC, Washington, 2018. Disponível em: <https://americanbiogascouncil.org/biogas-market-snapshot/>. Acesso em: 29 abril 2021.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. Diretoria-Geral. Resolução Nº 8, de 30 de janeiro de 2015. **Diário Oficial da União:** edição 22, seção 1, p. 100, 2 fev. 2015.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. Diretoria-Geral. Resolução Nº 685, de 29 de junho de 2017. **Diário Oficial da União:** edição 22, seção 1, p. 69-71, 20 jun. 2017.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. Diretoria-Geral. Resolução Nº 758, de 23 de novembro de 2018. **Diário Oficial da União**: edição 227, seção 1, p. 54-63, 27 nov. 2018.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. **Sistema de Levantamento de Preços**. ANP, 2021. Disponível em: [https://preco.anp.gov.br/include/Resumo\\_Mensal\\_Index.asp](https://preco.anp.gov.br/include/Resumo_Mensal_Index.asp). Acesso em: 18 set. 2021.

ARIMI, Milton; KNODEL, Jan; KIPROP, Ambrose; NAMANGO, Saul; ZHANG, Yongjun; GEIßENA, Sven-Uwe. **Strategies for improvement of biohydrogen production from organic-rich wastewater: A review**. Biomass and Bioenergy, 2015, vol. 75, p. 101-118.

BERMEJO, Fabio; OROZCO, Wilman. **Development of a Methodology for the Conversion of Truck Diesel Engines to Biogas Operation for Electricity Generation in Farm Zones of Colombia**. IMECE, 2012, vol. 6, p. 959-966.

BIOENERGY INTERNATIONAL. **Biomethane reaches 91% share in expansive Swedish vehicle gas market**. Estocolmo, 22 de fevereiro de 2019. Disponível em: <https://bioenergyinternational.com/markets-finance/biomethane-reaches-91-share-in-expansive-swedish-vehicle-gas-market>. Acesso em: 29 abril 2021.

BIOCYCLE. **RNG, Cellulosic Fuels and The Renewable Fuel Standard**. Emmaus, EUA, 14 de fevereiro de 2017. Disponível em: <https://www.biocycle.net/rng-cellulosic-fuels-renewable-fuel-standard/>. Acesso em: 28 abril 2021.

BNDES. **BNDES Setorial 47**. Rio de Janeiro: Expressão Editorial, 2018. 482 p. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/15221>. Acesso em: 24 ago. 2020.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 2, 03 ago. 2010.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 4, 27 dez. 2017.

CHEN, David; BORDISKY, Benjamin; KRUEGER, Tobias; MISHRA; ABHIJEET; POPP, Alexander. **The world's growing municipal solid waste: trends and impacts**. Environmental Research Letters, 2020, vol. 15, ed. 7.

CHENG, Hongbin; WANG, Lei. **Lignocelluloses Feedstock Biorefinery as Petrorefinery Substitutes**. Biomass Now: Sustainable Growth and Use. Kingston, Canada, 2013. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/biomass-now-sustainable-growth-and-use/lignocelluloses-feedstock-biorefinery-as-petrorefinery-substitutes>. Acesso em: 07 abril 2021.

CIBiogás. **Nota Técnica: Panorama do Biogás no Brasil em 2019**. Foz do Iguaçu, 2020. 12 p. Disponível em: <https://biblioteca.cibiogas.org/biblioteca/notatecnica/pdf/panorama-do-biogas-no-brasil-em-2019.pdf>. Acesso em: 12 maio 2021.

EBA – European Biogas Association. **About biogas and biomethane**. EBA, Bélgica, 2021. Disponível em: <https://www.europeanbiogas.eu/about-biogas-and-biomethane/>. Acesso em: 20 abril 2021.

EBA – European Biogas Association. **The contribution of the biogas and biomethane industry to medium-term greenhouse gas reduction targets and climate-neutrality by 2050**. EBA, Bélgica, 2020. Disponível em: [https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2020/04/20200419-Background-paper\\_final.pdf](https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2020/04/20200419-Background-paper_final.pdf). Acesso em: 20 abril 2021.

EEA – European Environment Agency. **EN01 Energy related greenhouse gas emissions**. EEA, Copenhagen, 2008. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/en01-energy-related-greenhouse-gas-emissions>. Acesso em: 01 novembro 2021.

EPA – Environmental Protection Agency. **Greenhouse Gas Equivalencies Calculator**. EPA, Washington, 2021. Disponível em: <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>. Acesso em: 06 set. 2021.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Biogás no Brasil: Visão atual**. Rio de Janeiro, 2020. 22 p. Disponível em: <https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2021/01/VII-Forum-Biogas-Heloisa-05-11-2020-1.pdf>. Acesso em: 20 maio 2021.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Biogás no Brasil: Visão atual e futura**. Rio de Janeiro, 2020. 13 p. Disponível em: <https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2021/01/VII-Forum-Biogas-JM-05-11-2020-1.pdf>. Acesso em: 20 maio 2021.

EUROPEAN COMMISSION. **Directive of the European Parliament and of the Council Amending Directive 2008/98/EC on Waste**. Bruxelas, 2015. 25 p. Disponível em: [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:c2b5929d-999e-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0018.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:c2b5929d-999e-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0018.02/DOC_1&format=PDF). Acesso em: 24 maio 2021.

EUROPEAN COMMISSION. **On an EU strategy to reduce methane emissions**. Bruxelas, 2020. 21 p. Disponível em: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/eu\\_methane\\_strategy.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/eu_methane_strategy.pdf). Acesso em: 04 maio 2021.

FARIA, Rui Alexandre Pereira. **Avaliação do potencial de geração de biogás e de produção de energia a partir da remoção da carga orgânica de uma estação de tratamento de esgoto – Estudo de caso**. 2012. 63 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

FERRER, Ivet; PONSÁ, Sergio; VÁZQUEZ, Felicitas; FONT, Xavier **Increasing biogas production by thermal (70 °C) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion**. Biochemical Engineering Journal, 2008, vol. 42, 2ª ed., p. 186-192.

GARCILASSO, Vanessa; FERRAZ, Antônio; DOS SANTOS, Marilin; JOPPERT, Caio. **Tecnologias de Produção e Uso de Biogás e Biometano**. São Paulo: Synergia Editora, 2018.

GKAMARAZI, N. **Implementing Anaerobic Digestion for Municipal Solid Waste Treatment**. CEST2015, 2015, vol. 1, p. 1055-1061.

GLOBE NEWSWIRE. **Global Biogas Plants Industry**. Nova Iorque, 14 de julho de 2020. Disponível em: <https://www.globenewswire.com/news-release/2020/07/14/2062157/0/en/Global-Biogas-Plants-Industry.html>. Acesso em: 28 abril 2021.

GLOBE NEWSWIRE. **Global Biomethane Industry**. Nova Iorque, 14 de dezembro de 2020. Disponível em: <https://www.globenewswire.com/news-release/2020/12/14/2144651/0/en/Global-Biomethane-Industry.html>. Acesso em: 28 abril 2021.

GLOBO, O. Prefeitura consegue liminar na Justiça garantindo combustível para a Comlurb. **O Globo**, Rio de Janeiro, 26 maio 2018. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/rio/prefeitura-consegue-liminar-na-justica-garantindo-combustivel-para-comlurb-22721595>. Acesso em: 28 ago. 2021.

HÖÖK, Mikael; TANG, Xu. **Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change—A review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 34, p. 167-173.

HWANG, Seokhwan; LEE, Yongse; YANG, Keunyoung. **Maximization of acetic acid production in partial acidogenesis of swine wastewater**. *Energy Policy*, 2013, vol. 52, p. 797-809.

IEA – International Energy Agency. **An introduction to biogas and biomethane**. IEA, Paris, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth/an-introduction-to-biogas-and-biomethane#abstract>. Acesso em: 05 mar. 2021.

IEA – International Energy Agency. **Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth**. IEA, Paris, 2020. Disponível em: [https://www.euneighbours.eu/sites/default/files/publications/2020-03/Outlook\\_for\\_biogas\\_and\\_biomethane.pdf](https://www.euneighbours.eu/sites/default/files/publications/2020-03/Outlook_for_biogas_and_biomethane.pdf). Acesso em: 25 março 2021.

IEA-AMF – Advanced Motor Fuels. **Methane (natural gas, biomethane)**. IEA-AMF, 2018. Disponível em: [https://www.iea-amf.org/content/fuel\\_information/methane](https://www.iea-amf.org/content/fuel_information/methane). Acesso em: 20 ago. 2021.

IRENA – International Renewable Energy Agency. **Biogas for Road Vehicles: Technology Brief**. 2018. Disponível em: [https://www.irena.org/-/media/files/irena/agency/publication/2017/mar/irena\\_biogas\\_for\\_road\\_vehicles\\_2017.pdf](https://www.irena.org/-/media/files/irena/agency/publication/2017/mar/irena_biogas_for_road_vehicles_2017.pdf). Acesso em: 09 jun. 2021.

IRENA – International Renewable Energy Agency. **Bioenergy**. 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/bioenergy>. Acesso em: 28 abril 2021.

IRENA – International Renewable Energy Agency. **Investment Trends**. 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Finance-and-Investment/Investment-Trends>. Acesso em: 03 maio 2021.

IRENA – International Renewable Energy Agency. **Measurement and estimation of off-grid solar, hydro and biogas energy**. Masdar, 2018. 66 p. Disponível em: <https://irena.org/>

/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Dec/IRENA\_Statistics\_Measuring\_offgrid\_energy\_2018.pdf. Acesso em: 01 maio 2021.

IPP – Instituto Pereira Passos. **Principais características do lixo domiciliar: composição gravimétrica percentual, peso específico e teor de umidade segundo as Áreas de Planejamento (AP) do Município do Rio de Janeiro entre 1995-2019.** IPP, 2020. Disponível em: <https://www.data.rio/documents/PCRJ::principais-caracteristicas-do-lixo-domiciliar-composi%C3%A7%C3%A3o-gravim%C3%A9trica-percentual-peso-espec%C3%ADfico-e-teor-de-umidade-segundo-as-%C3%A1reas-de-planejamento-ap-do-munic%C3%ADpio-do-rio-de-janeiro-entre-1995-2019/about>. Acesso em: 28 ago. 2021.

IPP – Instituto Pereira Passos. **Total de resíduos sólidos provenientes dos serviços de coleta e extensão de varrição de sarjeta no Município do Rio de Janeiro entre 2003-2019.** IPP, 2021. Disponível em: <https://www.data.rio/documents/PCRJ::total-de-res%C3%ADduos-s%C3%B3lidos-provenientes-dos-servi%C3%A7os-de-coleta-e-extens%C3%A3o-de-varri%C3%A7%C3%A3o-de-sarjeta-no-munic%C3%ADpio-do-rio-de-janeiro-entre-2003-2019/about>. Acesso em: 28 ago. 2021.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 2 - Energy.** Suíça: IPCC, 2019. 283 p. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>. Acesso em: 04 set. 2021.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 5 - Waste.** Suíça: IPCC, 2019. 194 p. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol5.html>. Acesso em: 18 jun. 2021.

JIANG, Xinyuan; SOMMER, Sven; CHRISTENSEN, Knud. **A review of the biogas industry in China.** Energy Policy, 2011, vol. 39, ed. 10, p. 6073-6081.

KAZA, Silpa; YAO, Lisa; BHADA-TATA, Perinaz; VAN WOERDAN, Frank. **What a Waste 2.0.** Washington: World Bank Group, 2018. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>. Acessado em: 24 maio 2021.

KHALID, Azeem; ARSHAD, Muhammad; ANJUM, Muzammil; MAHMOOD, Tariq; DAWSON, Lorna. **The anaerobic digestion of solid organic waste.** Waste Management, 2011, vol. 31, ed. 8, p. 1737-1744.

KNIAZIEWICZ, Tomasz; PIASECZNY, Leszek. **Selected aspects of application of dual fuel marine engines.** Combustion Engines, 2012, vol. 148, p. 25-34.

KONAPHAPDEELERT, Sirichai; AGGARANGSI, Pruk; MORAN, James. **Biomethane: Production and Applications.** Singapura: Springer, 2020.

KOTHARI, Richa; PANDEY, A. K.; Kumar, S.; TYAGI, V. V.; TYAGI, S. K. **Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, vol. 39, p. 174-195.

- KWIETNIEWSKA, Ewa; TYS, Jerzy. **Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, vol. 14, p. 491-500.
- KYTHREOTOU, Nicoletta; FLORIDES, Georgios; TASSOU, Savvas. **A review of simple to scientific models for anaerobic digestion.** Renewable Energy, 2014, p. 701-704.
- MADHUSUDHANAN, Anil; NA, Xiaoxiang; BOIES, Adam; CEBON, David. **Modelling and evaluation of a biomethane truck for transport performance and cost.** Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020.
- MAJER, Stefan; OEHMICHEN, Katja; KIRCHMEYR, Franz; SCHEIDL, Stefanie. **Methodology for the calculation and certification of GHG emission caused by the production of biomethane.** Biosurf, 2016. 47 p.
- MANFREDI, Simone; TONINI, Davide; CHRISTENSEN, Thomas. **Landfilling of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions.** Waste Management & Research, 2009, vol. 27, ed. 8, p. 825-836.
- MAO, Chunlan; FENG, Yongzhong; WANG, Xiaojiao; REN, Guangxin. **Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, vol. 45, p. 540-555.
- MARKGRAF, Claire; KAZA, Silpa. **Financing Landfill Gas Projects in Developing Countries.** Urban development Series Knowledge papers. 2016. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/26302/AUS10685.pdf?sequence=4>. Acesso em: 17 abril 2021.
- MARTINS, Rafaela Dorigon. **Potencial Energético e Produção de Biometano a Partir de Resíduos Sólidos Urbanos e Resíduos Vitivinícola na Cidade de Bento Gonçalves e Região.** Orientador: Prof. Dr. Willian Cezar Nadaleti. 2018. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.
- MASSUKADO, Luciana; MILANEZ, Bruno; LUEDEMANN, Gustavo; HARGRAVE, Jorge. **Diagnóstico da Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil: Uma análise pós PNSB 2008 - ênfase na destinação final e nos resíduos orgânicos.** Revista DAE, 2013, ed. 192, p. 22-33.
- MME – Ministério de Minas e Energia. **RenovaBio.** 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/renovabio-1#> Acesso em: 12 maio 2021.
- MSHANDETE, Anthony; BJÖRSNSSON, Lovissa; KIVAISI, Amelia; RUBINDAMAYUGI, M. S.; MATTIASSON, Bo. **Effect of particle size on biogas yield from sisal fibre waste.** Renewable Energy, 2006, vol. 31, ed. 14, p. 2385-2392.
- NASCIMENTO, Maria Cândida Barbosa; FREIRE, Elcíres Pimenta; DANTAS, Francisco de Assis Souza; GIANSANTE, Miguel Bortoletto. **Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos**

**urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil.** Eng Sanit Ambient, 2019, vol. 24, ed. 1, p. 143-155.

NADALETI, William César. **Aproveitamento de Biogás, Hidrogênio e Gás de Síntese no Setor de Transporte Público e Agroindustrial de Arroz:** Estudo de Potencial Energético de Resíduos e Emissões de Poluentes. Orientador: Paulo Belli Filho. 2017. 235 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/188088/PGEA0589-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 21 ago. 2021.

NÁTHIA-NEVES, G.; BERNI, M.; DRAGONE, G.; MUSSATTO, S. I.; FORSTER-CARNEIRO, T. **Anaerobic digestion process: technological aspects and recent developments.** International Journal of Environmental Science and Technology, 2018, vol. 15, p. 2033–2046.

PATTERSON, Tim; ESTEVES, Sandra; DINSDALE, Richard; GUWY, Alan. **An evaluation of the policy and techno-economic factors affecting the potential for biogas upgrading for transport fuel use in the UK.** Energy Policy, 2011, vol. 39, ed. 3, p. 1806-1816.

POSSETTI, Gustavo. **Experiências da Sanepar em gestão sustentável de energia.** VI DIÁLOGOS DO SANEAMENTO, 2017, Porto Alegre. Disponível em: [https://www.abes-rs.org.br/novo/\\_materiais/materiais\\_jknhwuuxfj8q.pdf](https://www.abes-rs.org.br/novo/_materiais/materiais_jknhwuuxfj8q.pdf). Acesso em: 18 maio 2021.

PROBIOGÁS. **Biometano Como Combustível Veicular.** Brasília, 76 p., 2021. Disponível em: [https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/giz\\_biogas\\_como\\_combustivel\\_digital\\_simples.pdf](https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/giz_biogas_como_combustivel_digital_simples.pdf) Acesso em: 19 jul. 2021.

PROBIOGÁS. **Exemplos de Usina de Aproveitamento de Biogás no Brasil.** Brasília, 13 p., 2017. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/FolhetoprojetosdereferenciaPROBIOGAS.pdf> Acesso em: 19 maio 2021.

RAMOS, Andrea. Exclusivo: testamos o novo Scania R410 com motor a gás. **Estadão**, São Paulo, 23 mar. 2020. Disponível em: <https://mobilidade.estadao.com.br/mobilidade-para-que/exclusivo-testamos-o-novo-scania-r410-com-motor-a-gas/> Acesso em: 09 jun. 2021.

RAMOS, Andrea. Caminhão Scania a gás começa a acelerar em vendas. **Estadão**, São Paulo, 24 jun. 2020. Disponível em: <https://estradao.estadao.com.br/caminhoes/scania-gnv-desperta-transportadores/>. Acesso em: 09 jun. 2021.

RAMOS, Camila. Cresce investimento em biogás no Brasil. **Valor Econômico**, São Paulo, 15 out. 2019. Disponível em: <https://valor.globo.com/agronegocios/noticia/2019/10/15/cresce-investimento-em-biogas-no-brasil.ghtml>. Acesso em: 17 maio 2021.

RAMOS, Camila. Projetos se multiplicam, e biogás avança no Brasil. **Valor Econômico**, São Paulo, 27 jan. 2021. Disponível em: <https://valor.globo.com/agronegocios/noticia/2021/01/27/projetos-se-multiplicam-e-biogas-avanca-no-brasil.ghtml>. Acesso em: 17 maio 2021.

RAY, N. H. S.; MOHANTY, M. K.; MOHANTY, R. C. **Biogas as Alternate Fuel in Diesel Engines: A Literature Review**. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 2013, vol. 9, ed. 1, p. 23-28.

REN21. **Renewables 2020: Global Status Report**. Paris: REN21 Secretariat, 2020. 367 p. Disponível em: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr\\_2020\\_full\\_report\\_en.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf). Acesso em: 24 abril 2021.

RI, Pong-Choi; REN, Nan-Qi; DING, Jien; KIM, Jong-Su; GUO, Wan-Qian. **CFD optimization of horizontal continuous stirred-tank (HCSTR) reactor for bio-hydrogen production**. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, vol. 42, ed. 15, p. 9630-9640.

RIO PREFEITURA. Comlurb apresenta caminhões de coleta de lixo 100% elétricos e faz do Rio cidade pioneira no Ocidente. **Prefeitura do Rio**, Rio de Janeiro, 25 nov. 2019. Disponível em: <https://prefeitura.rio/comlurb/comlurb-apresenta-caminhoes-de-coleta-de-lixo-100-eletricos-e-faz-do-rio-cidade-pioneira-no-ocidente/>. Acesso em: 28 ago. 2021.

ROCHA, Felipe Freitas da; SOARES, Gustavo. **O preço de equilíbrio do biometano no estado do Rio de Janeiro: A ineficácia da Política Estadual de Gás Natural Renovável**. Ensaio Energético, 19 de julho de 2021. Disponível em: <https://ensaioenergetico.com.br/o-preco-de-equilibrio-do-biometano-no-estado-do-rio-de-janeiro-a-ineficacia-da-politica-estadual-de-gas-natural-renovavel/>. Acesso em: 11 set. 2021.

SANTOS, Ivan Felipe dos; VIEIRA, Nathália Duarte; BARROS, Regina; FILHO, Geraldo Lucio; SOARES, Davi; ALVES, Lucas. **Economic and CO2 avoided emissions analysis of WWTP biogas recovery and its use in a small power plant in Brazil**. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2016, vol. 17, p. 77-84.

SCANIA Tudo sobre os caminhões Scania movidos a gás. 14 fev. 2021. Disponível em: <https://solucoesscania.com.br/tudo-sobre-os-caminhoes-scania-movidos-a-gas/> Acesso em: 07 ago. 2021.

SCARLAT, Nicolae; DALLERMAND, Jean; FAHL, Fernando. **Biogas: Developments and perspectives in Europe**. Renewable Energy, 2018, vol. 129, p. 457-472.

SHOW, Kuan-Yeow, LEE, Duu-Jong; CHANG, Jo-Shu. **Bioreactor and process design for biohydrogen production**. Bioresource Technology, 2011, vol. 102, ed. 18, p. 8524-8533.

SODRÉ, Eduardo. Mudança de diesel por gás é viável, mas exige renovação de frota brasileira. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 23 jul. 2019. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2019/07/mudanca-e-viavel-mas-exige-renovacao-de-frota-brasileira.shtml> Acesso em: 08 ago. 2021.

SODRÉ, Eduardo. Caminhão a gás tem custo maior que diesel. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 12 out. 2019. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2019/10/caminhao-a-gas-tem-custo-maior-que-diesel.shtml> Acesso em: 08 ago. 2021.

STAVROPOULOS, K.P.; KOPSAHELIS, A.; ZAFIRI, C.; KORNAROS, M. **Effect of pH on Continuous Biohydrogen Production from End-of-Life Dairy Products (EoL-DPs) via Dark Fermentation.** Waste and Biomass Valorization, 2016, vol. 7, p. 753–764.

TAKAR, Téo. Gás natural em caminhão economizaria R\$ 1 em vez de R\$ 0,46; o que impede? **UOL**, São Paulo, 04 ago. 2018. Disponível em: <https://economia.uol.com.br/noticias/redacao/2018/08/04/caminhao-gas-natural-mais-economico-diesel.htm> Acesso em: 08 ago. 2021.

TONRANGKLANG, Pennapa; THERDYOTHIN, Apichit; PREECHAWUTTIPONG, Itthichai. **Overview of Biogas Production Potential from Industry Sector to Produce Compressed Bio-methane Gas in Thailand.** Energy Procedia, 2017, vol. 138, p. 919–924.

UDOP - União Nacional da Bioenergia. Mercado de crédito de carbono avança no mundo e Brasil pode ganhar com isso. **UDOP**, São Paulo, 22 jul. 2021. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2021/07/22/mercado-de-credito-de-carbono-avanca-no-mundo-e-brasil-pode-ganhar-com-isso.html>. Acesso em: 18 set. 2021.

WARD, Alastair; HOBBS, Phil; HOLLIMAN, Peter; JONES, David. **Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources.** Bioresource Technology, 2008, vol. 99, ed. 17 p. 7928-7940.

WIERZBICKI, Slawomir. **Effect of the parameters of pilot dose injection in a dual fuel diesel engine on the combustion process.** Journal of KONES Powertrain and Transport, 2011, vol. 1, ed. 3, p. 499-506.

WILSON, David; VELIS, Costas. **Waste management – still a global challenge in the 21st century: An evidence-based call for action.** Waste Management & Research, 2015, vol. 33, ed. 12 p. 1049–1051.

WBA – World Biogas Association. **Biogas: Pathways to 2030.** Londres, Reino Unido, 2021. 128 p. Disponível em: <https://www.worldbiogasassociation.org/biogas-pathways-to-2030-report/>. Acesso em: 01 maio 2021.

WBA – World Biogas Association. **Global Bioenergy Statistics 2019.** Londres, Reino Unido, 2019. 58 p. Disponível em: [https://www.worldbioenergy.org/uploads/191129%20WBA%20GBS%202019\\_HQ.pdf](https://www.worldbioenergy.org/uploads/191129%20WBA%20GBS%202019_HQ.pdf). Acesso em: 01 novembro 2021.

WBA – World Biogas Association. **Global Potential of Biogas.** Londres, Reino Unido, 2019. 56 p. Disponível em: [https://www.worldbiogasassociation.org/wp-content/uploads/2019/07/WBA-globalreport-56ppa4\\_digital.pdf](https://www.worldbiogasassociation.org/wp-content/uploads/2019/07/WBA-globalreport-56ppa4_digital.pdf). Acesso em: 05 abril 2021.

WORLD BANK GROUP. **Trends in Solid Waste Management.** 2021. Disponível em: [https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends\\_in\\_solid\\_waste\\_management.html](https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html). Acesso em: 25 maio 2021.

XIN, Q.; PINZON, C. F. **Improving the environmental performance of heavy-duty vehicles and engines: key issues and system design approaches.** Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance, 2014, p. 225-278.

YONG, Zihan; DONG, Yulin; ZHANG, Xu; TAN, Tianwei. **Anaerobic co-digestion of food waste and straw for biogas production.** Renewable Energy, 2015, vol. 78, p. 527-530.

YOUSUF, Abu; KHAN, Maksudur; PIROZZI, Domenico. **Economic and Market Value of Biogas Technology.** Waste Biomass Management – A Holistic Approach, 2017, p. 137-158.