

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
PECE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

**ESTIMATIVA DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE PROVENIENTES DO USO DE GN
E PERSPECTIVAS DO CENÁRIO FUTURO TENDO EM VISTA A INCLUSÃO DE
BIOMETANO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO.**

JÚLIA LAÍS SOUSA RIBEIRO

São Paulo
2023

JÚLIA LAÍS SOUSA RIBEIRO

**ESTIMATIVA DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE PROVENIENTES DO USO DE GN
E PERSPECTIVAS DO CENÁRIO FUTURO TENDO EM VISTA A INCLUSÃO DE
BIOMETANO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO.**

Monografia apresentada ao PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para conclusão do curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

São Paulo

2023

JÚLIA LAÍS SOUSA RIBEIRO

**ESTIMATIVA DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE PROVENIENTES DO USO DE GN
E PERSPECTIVAS DO CENÁRIO FUTURO TENDO EM VISTA A INCLUSÃO DE
BIOMETANO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO.**

Monografia apresentada ao PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para conclusão do curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Orientadora: Prof. Dra. Vanessa Pecora Garcilasso

São Paulo

2023

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

Catalogação-na-publicação

Ribeiro, Júlia

Estimativa de redução das emissões de GEE provenientes do uso de GN e perspectivas do cenário futuro tendo em vista a inclusão de biometano na rede de distribuição / J.Ribeiro -- São Paulo, 2023. 70 p. Orientadora: Profa. Dra. Vanessa Pecora Garcilasso

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Energia 2.Gases de Efeito Estufa 3.Gás Natural 4.Biometano
5.Sustentabilidade I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

AGRADECIMENTOS

Dedico esse trabalho à minha família que sempre me apoiou e me mostra que sempre há algo para ser aprendido, à minha mãe Marta e meu pai Marcos meus grandes exemplos de amor.

Ao meu irmão Pedro que me incentiva a sempre buscar a dar o melhor de mim, independente das adversidades da vida.

Dedico também ao meu noivo Rodrigo, meu companheiro de vida, por toda a paciência e suporte mesmo nos dias mais cansativos.

Agradeço a Deus por abençoar meus dias e me dar força para perseverar e atingir meus objetivos.

A todos os colegas e professores da turma 22, por compartilhar inúmeros desafios, incluindo uma pandemia, a fim de concluirmos esse curso e nos tornamos profissionais mais capacitados, e também à Universidade de São Paulo e todo o seu corpo docente pela oportunidade de todo aprendizado.

Um agradecimento especial à minha orientadora Prof. Vanessa Garcilasso, e por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa, e fazê-lo de forma dedicada e comprometida.

RESUMO

As preocupações com as mudanças climáticas e a necessidade de transição para fontes de energia mais sustentáveis têm impulsionado a busca por alternativas de baixo carbono no setor energético. O gás natural tem sido considerado uma opção relativamente mais limpa em comparação com combustíveis fósseis mais poluentes, como carvão e petróleo. No entanto, ainda é um combustível fóssil e contribui para as emissões de GEE quando queimado para geração de energia e aquecimento. Portanto, é fundamental estimar a magnitude das emissões provenientes do uso de GN e identificar estratégias para reduzi-las. Nesse contexto, o biometano surge como uma alternativa promissora, combustível produzido a partir da decomposição de resíduos orgânicos, como biomassa e resíduos agrícolas, por meio de processos de digestão anaeróbica, e pode ser purificado e injetado na rede de distribuição de gás natural, substituindo parcial ou totalmente o GN convencional. Além disso, a inclusão do biometano na rede de distribuição também oferece oportunidades para o desenvolvimento de um sistema energético mais descentralizado e sustentável. A produção local de biometano a partir de resíduos permite aproveitar recursos renováveis e reduzir a dependência de combustíveis fósseis importados. Tendo em vista o cenário urgente de redução de emissões de carbono este estudo aborda a alternativa de substituição de combustíveis fósseis mais poluentes pelo gás natural, e cenários a médio prazo de inclusão de biometano na rede de distribuição, como ponto de partida para alcançar reduzir de forma definitiva a emissão de gases de efeito estufa. Ao explorar as perspectivas futuras do uso do gás natural e do biometano, este estudo contribui para a compreensão das implicações ambientais, tecnológicas e econômicas envolvidas na transição para uma matriz energética mais sustentável, abordagem que visa não apenas mitigar os impactos ambientais, mas também promover a transição para um sistema energético de forma sustentável e perene, alinhado às preocupações globais com as mudanças climáticas e a necessidade de fontes de energia de baixo carbono.

ABSTRACT

Concerns about climate change and the need to transition to more sustainable energy sources have driven the search for low-carbon alternatives in the energy sector. Natural gas has been considered a relatively cleaner option compared to more polluting fossil fuels such as coal and oil. However, it is still a fossil fuel and contributes to greenhouse gas emissions when burned for energy generation and heating. Therefore, it is crucial to estimate the magnitude of emissions from natural gas use and identify strategies to reduce them. In this context, biomethane emerges as a promising alternative. It is produced from the decomposition of organic waste, such as biomass and agricultural residues, through anaerobic digestion processes, and can be purified and injected into the natural gas distribution network, partially or completely replacing conventional natural gas. Furthermore, the inclusion of biomethane in the distribution network also offers opportunities for the development of a more decentralized and sustainable energy system. Local biomethane production from waste enables the utilization of renewable resources and reduces dependence on imported fossil fuels. Given the urgent need to reduce carbon emissions, this study addresses the alternative of substituting more polluting fossil fuels with natural gas, as well as medium-term scenarios for the inclusion of biomethane in the distribution network, as a starting point to achieve a definitive reduction in greenhouse gas emissions. By exploring the future prospects of natural gas and biomethane use, this study contributes to understanding the environmental, technological, and economic implications involved in transitioning to a more sustainable energy matrix. This approach aims not only to mitigate environmental impacts but also to promote a sustainable and enduring energy system, aligning with global concerns about climate change and the need for low-carbon energy sources.

Keywords: Energy, Natural Gas, Biomethane, Fossil Fuels, Greenhouse Gas Emissions
Brazil, Carbon Emissions.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Evolução do suprimento de energia no mundo. FONTE: IEA,2013	14
Figura 1.2: Evolução do suprimento de energia no Brasil. FONTE: IEA, 2013	14
Figura 2.1: Maiores produtores de petróleo em 2021. Fonte: IBP, 2020	21
Figura 2.2: Fontes fósseis vs fontes renováveis (2019) (Em %). FONTE: CEPAL, 2018	22
Figura 2.3: Parcela estimada de energias renováveis no consumo total de energia no mundo. FONTE: REN21, 2021	23
Figura 2.4: Parcela de energias renováveis no consumo total de energia, por setor. FONTE: REN21, 2021.....	24
Figura 2.5: Emissão de CO2 por unidade de energia (Kg de Co2/ milhão de BTU). FONTE: Miranda, 2012	25
Figura 2.6: Potencial de produção de biometano por setor. Abiogas, 2016	31
Figura 2.7: Produção combinada de biogás e biometano na Europa. Fonte: EBA, 2022.	32
Figura 2.8: Produção potencial de biometano em 2030 por tecnologia e país europeu. Fonte: EBA, 2022.....	33
Figura 3.1: Consumo de energia no brasil por setor. BEN,2022	41
Figura 3.2: Participação por energético no setor de transportes. BEN 2022.....	41
Figura 3.3: Emissões de CO2 dos principais energéticos no setor de transportes. BEN, 2022	42
Figura 3.4: Participação por energético no setor industrial. BEN, 2022	42
Figura 3.5: Emissões de CO2 dos principais energéticos no setor industrial. BEN, 2022	43
Figura 3.6: Participação por energético no setor residencial (BEN, 2022)	43
Figura 3.7: Emissões de CO2 dos principais energéticos no setor de residencial. IPCC,2006.....	44
Figura 3.8: Participação por energético no setor elétrico, comparativo entre 2020 e 2021. BEN, 2022	44
Figura 3.9: Emissões de CO2 do carvão e gás natural para produção de energia. BEN, 2022	45
Figura 3.10: Evolução do total das emissões de CO2 associadas a matriz energética. BEN, 2022	46
Figura 3.11: Cenário de substituição da gasolina por gás natural. Fonte: elaborado pela autora	53
Figura 3.12: Cenário de substituição da gasolina por gás natural com 5% de biometano. Fonte: elaborado pela autora.....	53
Figura 3.13: Cenário de substituição da gasolina por gás natural com 15% de biometano. Fonte: elaborado pela autora.....	54
Figura 3.14: Substituição do Óleo Diesel por gás natural. Fonte: elaborado pela autora.....	56
Figura 3.15: Substituição do Óleo Diesel por gás natural e 5% de biometano. Fonte: elaborado pela autora.....	56
Figura 3.16: Substituição do Óleo Diesel por gás natural e 15% de biometano. Fonte: elaborado pela autora.....	57
Figura 3.17: Substituição do GLP por gás natural. Fonte: elaborado pela autora.	58

Figura 3.18: Substituição do GLP por gás natural e 5% de biometano. Fonte: elaborado pela autora.....	59
Figura 3.19: Substituição do GLP por gás natural e 15% de biometano. Fonte: elaborado pela autora.....	59
Figura 3.20: Substituição do Carvão Mineral por gás natural. Fonte: elaborado pela autora.....	61
Figura 3.21: Substituição do Carvão Mineral por gás natural e 5% de biometano. Fonte: elaborado pela autora.....	61
Figura 3.22: Substituição do Carvão Mineral por gás natural e 15% de biometano. Fonte: elaborado pela autora.....	62
Figura 3.23: Fatores de emissão de N ₂ O e CH ₄ . (BEN, 2022).....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Energia consumida por fonte no Brasil (BEN, 2022).....	48
Tabela 3.2: Fatores de emissão por energético (IPCC, 2006 e MCTI, 2020)	50
Tabela 3.3: Descrição de cenários. Fonte: elaborado pela autora.....	50
Tabela 3.4: GWP dos principais GEE.(Miranda, 2013)	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ACV – Análise do Ciclo de Vida
- ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
- BCM - Billion cubic meters of natural gas (Bilhões de metros cúbicos de gás natural)
- BRICS - Brasil, Rússia, Índia, China e South África (África do Sul)
- CAC - Captura e Armazenamento de Carbono
- CNPE - Conselho Nacional de Política Energética
- EIA – Energy Information Administration
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética
- ESG – Environmental, social, and corporate governance
- FE - Fator de Emissão
- GEE – Gases de efeito estufa
- GLP – Gás Liquefeito de petróleo
- GN – Gás Natural
- GWP - Global Warming Potencial (Potencial de aquecimento global)
- IEA - Agência Internacional de Energia
- IPCC - Painel Intergovernamental das Ações Climáticas
- ONU - Organizações das Nações Unidas
- PCS – Poder Calorífico Superior
- PIB – Produto Interno Bruto
- Proinfa - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
- RDC - Remoção de dióxido de carbono
- REN21 - Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (Rede de Políticas de Energia Renovável para o Século XXI)
- RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
- TEP - Tonelada equivalente de petróleo
- UNFCCC - Convenção-Quadro das Nações Unidas Sobre Mudanças Climáticas

SUMÁRIO

1. Introdução.....	13
1.1. Motivação	15
1.2. Objetivos	16
1.3. Metodologia.....	17
1.4. Estrutura do trabalho	17
2. Revisão Bibliográfica	18
2.1. Gases de efeito estufa (GEE) no cenário do aquecimento global	18
2.2. Matriz energética e movimento de transição em busca de energias mais limpas ..	19
2.3. Gás natural, expansão da rede de distribuição e perspectivas de médio/longo prazo do mercado de gás.....	24
2.3.1. Gás natural, conceitos básicos e aplicações.....	24
2.3.2. Gás natural como energético de transição.....	26
2.3.3. Cenário brasileiro e a publicação da nova lei do gás	27
2.4. Biometano	29
2.4.1. Conceitos básicos e meios de produção.....	29
2.4.2. Legislação aplicável e medidas de incentivo de produção e uso do biometano.	
30	
2.4.3. Potencial de produção de biometano no Brasil.....	30
2.4.4. Iniciativas de transição do gás natural e biometano.....	32
2.5. Desafios tecnológicos.....	36
3. Estudo de caso – Estimativa de redução das emissões de GEE	39
3.1. Metodologias de Cálculo de emissão de GEE	39
3.2. Comparativo da emissão de GEE entre os principais energéticos usados no Brasil.	
40	
3.3. Ações para descarbonização e transição da matriz energética no Brasil.....	45
3.4. Proposição de cenários de redução de CO ₂	47
3.4.1 Gasolina	52
3.4.2 Óleo Diesel.....	54
3.4.3 Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)	57
3.4.4 Coque de carvão Mineral.....	59
3.5. Comparativo de redução de CH ₄ e NO _x e N ₂ O.....	62
4 Considerações finais	64
5 Referências bibliográficas	67

1. Introdução

Tendo em vista o cenário de aumento de emissões de gases de efeito estufa, a busca por energias renováveis para a substituição de fontes fósseis, tem se tornado uma realidade. A emissão de GEE tem crescido de forma contínua, dado principalmente a demanda crescente de energia, uso do solo, padrões de consumo e modo de produção.

O Efeito Estufa é um fenômeno natural que vem atuando na atmosfera da Terra há bilhões de anos devido aos gases de efeito estufa que são formados espontaneamente, entretanto, esse efeito vem se intensificando dado o aumento da concentração desses gases, causado pela atividade humana e resultando no aumento da temperatura da terra. As mudanças climáticas provenientes do aumento da temperatura têm o potencial de afetar toda a fauna e flora, além da sustentabilidade da vida humana.

Visando interromper o aumento da temperatura na terra a comunidade internacional vem se reunindo através das Organizações das Nações Unidas (ONU) para definir metas de redução de poluentes, além de diversas medidas para entender as mudanças climáticas.

Desde a década de 1970 são realizadas discussões em âmbito global para discussão de temas relacionados ao clima, como as Conferências Mundiais do Clima, o Painel Intergovernamental das Ações Climáticas, a Convenção-Quadro das Nações Unidas Sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), entre outros. O Brasil é um país signatário da Convenção e mantém e se comprometeu com a redução de GEE, instituindo, inclusive, a Política Nacional sobre a mudança Climática no ano de 2009.

No cenário mundial, em 2019, cerca de 79% da produção de GEE foi proveniente dos setores de energia, indústria, transportes e construção (IPCC, 2021), por isso são esses os setores que mais tem procurado alternativas para reduzir os impactos no clima global. Observando a matriz energética global, indicado na Figura 1.1 a seguir, cerca de 85% é advinda de fontes não renováveis, com predominância do Petróleo e derivados (29,5%), Carvão mineral (26,8%) e o Gás Natural (23,7%) (IEA, 2023).

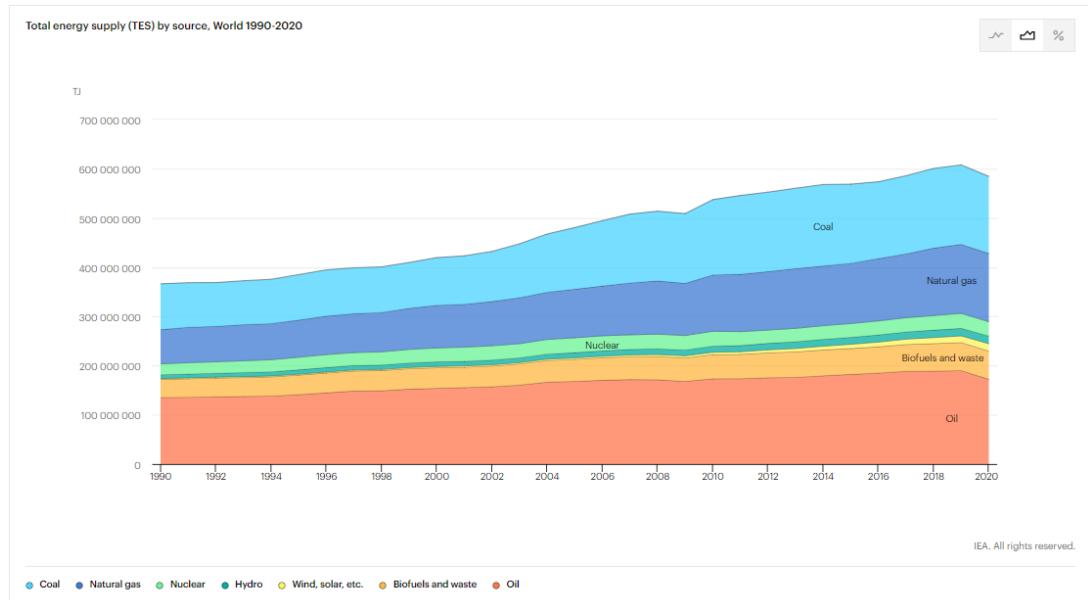


Figura 1.1: Evolução do suprimento de energia no mundo. FONTE: IEA, 2013

No Brasil o cenário mostra-se diferente, como é ilustrado na Figura 1.2, há maior presença das energias de fontes renováveis, mas com predominância do petróleo e derivados (34,4%), derivados de cana açúcar (16,4%) e gás natural (13,3%), além da presença significativa da energia Hidráulica (11%), esta que representa 56,8% da fonte de produção elétrica no país. (EPE, 2019)

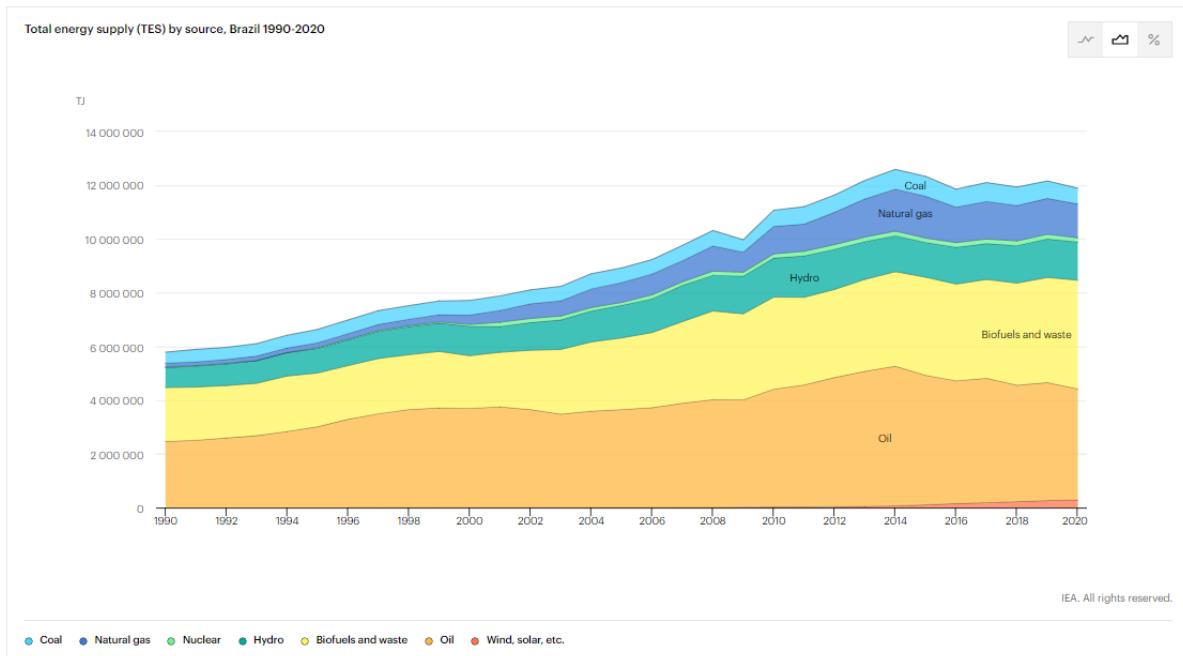


Figura 1.2: Evolução do suprimento de energia no Brasil. FONTE: IEA, 2013

Além da representatividade da matriz energética no cenário mundial e brasileiro, é possível observar o aumento da demanda de energia. No cenário global, a população aumentou de 5,29 Bi em 1990, para 7,87 Bi em 2020, aumento de 49%, enquanto a demanda de energia aumentou em 60% no mesmo período. Já no Brasil, a população aumentou de 151MM em 1990 para 213 MM em 2020, o que representa um aumento de 41%, e considerando o mesmo período, o consumo de energia aumentou em 105% (UN Population Division, 2023).

A comparação entre população e demanda de energia são importantes para constatar que a demanda de energia cresceu em ritmo mais acelerado do que o crescimento populacional, indicado que cada indivíduo demanda mais energia do sistema hoje do que em 1990. A reflexão sobre esse tema se dá também porque é preciso considerar que a transição de uma matriz energética mais limpa, ou seja, que emita em menores quantidades os gases de efeito estufa, deve acontecer de forma gradual, tendo em vista o modelo de consumo da atualidade.

Dessa forma, considerando a segurança e estabilidade energética necessárias para o desenvolvimento dos países, surge a alternativa do Gás Natural, que apesar de ser um energético proveniente de combustíveis fósseis, emite consideravelmente menos poluentes, sobretudo CO₂ e materiais particulados se comparado aos demais combustíveis de origem fóssil, além de proporcionar confiabilidade energética e viabilizar a infraestrutura necessária para a distribuição do biometano, este que é uma matéria prima renovável (BNDES, 2019).

1.1. Motivação

Pretende-se com essa pesquisa avaliar o impacto do uso do Gás Natural tendo em vista os GEE, além de trazer a perspectiva da análise do ciclo de vida e investimentos necessários para realizar a transição, resultando em um estudo sobre o GN no cenário de transição energética na corrida contra o aquecimento global. Sabe-se que a rede de distribuição usada pelo GN também é de grande importância para viabilizar a distribuição do biometano, que é um combustível renovável que pode ser usado em substituição ao GN, então pretende-se também trazer perspectivas sobre esse cenário de transição, apresentando cases globais e perspectivas do mercado.

Sob esta perspectiva, formulam-se questões centrais que nortearão essa pesquisa: O gás natural pode ser considerado um energético de transição, tendo em vista uma matriz energética mais limpa? Qual o impacto do gás natural na emissão de gases de efeito estufa,

e em comparação a outros energéticos usados atualmente? O que é necessário para realizar a transição do uso de gás natural para o biometano, e qual a viabilidade desse cenário? O que pode se esperar em termos de emissão de gases de efeito estufa com a transição citada, qual a taxa de redução pode-se esperar?

1.2. Objetivos

O estudo tem como objetivo principal avaliar o uso do gás natural como um combustível menos poluente em comparação a outros de fonte não renováveis, e como energético de transição que viabiliza o uso do biometano, tendo em vista os cenários de geração de gases do efeito estufa e desafios tecnológicos e econômicos.

Dessa forma, é possível observar todo o cenário de transição energética, desde combustíveis mais poluentes até combustíveis de fontes renováveis, tendo em vista um cenário a médio/curto prazo e o a longo prazo, que é o que se espera alcançar, tendo em vista as metas definidas no cenário mundial para frear o aquecimento global.

O estudo também deve abordar questões relacionadas à segurança energética e investimentos necessário do setor, tendo em vista cenários propostos observando os principais movimentos que acontecem atualmente e a necessidade global de redução de emissão de poluentes na atmosfera.

Ainda, esta pesquisa possui como objetivos complementares:

- Analisar a composição do gás natural e compará-la com outros combustíveis não renováveis em termos de emissões de dióxido de carbono, metano e outros poluentes atmosféricos.
- Investigar a produção e uso de biometano como fonte renovável de energia, avaliando sua viabilidade técnica e econômica em relação a outros combustíveis.
- Investigar os investimentos necessários no setor de energia para viabilizar a transição para combustíveis mais limpos, assegurando a segurança energética, avaliando a rentabilidade dos investimentos e os desafios tecnológicos e econômicos envolvidos.
- Comparar diferentes cenários de transição energética a curto, médio e longo prazo, avaliando seus impactos ambientais, sociais e econômicos.

1.3. Metodologia

Primeiramente, o estudo é conduzido por meio de uma revisão bibliográfica, onde são analisadas e consideradas diversas fontes de informações já disponíveis sobre o assunto em questão. Essa revisão bibliográfica é essencial para embasar a pesquisa, compreender o estado da arte, identificar lacunas de conhecimento e fundamentar a proposta do estudo.

A seguir, a pesquisa tem como objetivo propor cenários, o que significa que pretende estabelecer possíveis configurações ou situações futuras com base nos dados coletados e nas informações obtidas na revisão bibliográfica. Esses cenários podem representar diferentes contextos, circunstâncias ou tendências relacionadas ao tema em análise.

O foco central da análise é avaliar a geração de GEE (Gases de Efeito Estufa). Isso significa que o estudo busca compreender e mensurar a quantidade de gases que contribuem para o aquecimento global e as mudanças climáticas. A avaliação da geração de GEE é fundamental para compreender os impactos ambientais de determinadas atividades ou processos.

Além disso, o estudo também leva em consideração os desafios tecnológicos e econômicos. Isso implica que o objetivo é identificar e analisar as dificuldades e obstáculos relacionados à adoção de tecnologias ou práticas mais sustentáveis e de baixa emissão de GEE. Além disso, são considerados os aspectos econômicos, como custos associados às medidas de redução de emissões e viabilidade de sua implementação.

Em resumo, o estudo é baseado em revisão bibliográfica, busca propor cenários futuros com base nos dados coletados, avalia a geração de GEE e aborda os desafios tecnológicos e econômicos relacionados ao tema em análise.

1.4. Estrutura do trabalho

Após a introdução, contextualização do trabalho, objetivos e metodologia, o Capítulo 2 refere-se à revisão bibliográfica. Este capítulo abrangeu estudos que abordam as características, origem e utilização do gás natural e biometano, bem como as emissões de GEE associadas a seus usos em diferentes setores econômicos. Foram também explorados trabalhos que destacam os desafios ambientais atuais e a necessidade de adotar medidas para reduzir as emissões de GEE. Além disso, a pesquisa abrangeu a definição, os métodos de produção e os benefícios ambientais do biometano, assim como exemplos de sua inclusão bem-sucedida em redes de distribuição de GN em diversos países.

O Capítulo 3 refere-se à estimativa de redução das emissões de GEE por meio de estudo de caso. Nessa etapa do trabalho foi realizado um comparativo tendo em vista a energia gerada por cada combustível fóssil em um determinado ano, e o quanto de GEE foi gerado a partir dessa atividade. Posteriormente foi feito o mesmo exercício simulando como seria se a mesma energia fosse gerada por GN em uma substituição parcial e total, e, por fim, como seria o cenário de emissões se também fosse considerando biometano na substituição.

Os combustíveis fósseis foram analisados em particular e de acordo com sua representatividade no setor de energia. Por fim, foi feito um comparativo geral dado as substituições propostas pelo estudo.

O último capítulo (Capítulo 4) apresenta as considerações finais deste trabalho, que permitiu estimar o potencial de redução das emissões de GEE provenientes do uso de GN e analisar as perspectivas futuras com a inclusão de biometano na rede de distribuição. Os resultados indicam que a substituição de outros combustíveis por GN pelo biometano é uma estratégia viável para mitigar os impactos das mudanças climáticas e avançar em direção a uma economia mais sustentável.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Gases de efeito estufa (GEE) no cenário do aquecimento global

A radiação proveniente do sol é a fonte de energia que rege o sistema climático no planeta terra. De toda a radiação que é emitida pelo sol na superfície da terra, cerca de 31% é imediatamente refletida de volta para o espaço, o restante é parcialmente absorvido pela atmosfera, e a maior parte (49%) absorvidos pela superfície da Terra, que por sua vez devolve o calor para a atmosfera, nas formas de radiação infravermelho, calor sensível e calor latente, a partir do vapor de água condensado na alta atmosfera. Os chamados gases de efeito estufa, dispersos na atmosfera e nas nuvens, são responsáveis por absorver a maior parte da radiação infravermelha, na sequência, a radiação é reemitida em todas as direções, inclusive de volta a superfície da terra. Esse sistema descrito é o chamado efeito estufa natural, que tem papel importante para a manutenção de parte do calor emitido pelo sol na superfície do planeta, mantendo a atmosfera em condições que proporcionam uma temperatura média global em torno dos 14°C, ideal à existência de vida no planeta. (Ribeiro, 2014)

Apesar do efeito estufa acontecer de forma natural, ele pode ser intensificado, seja por fatores que alterem o ciclo citado anteriormente, com variação da radiação recebida do sol ou enviada ao espaço, ou por alterações na distribuição de energia dentro da atmosfera e entre os diversos meios. Dessa forma, quando é alterado esse equilíbrio de gases, aumentando a

concentração dos gases de efeito estufa, o resultado é que é provável que a eficiência de resfriamento da terra fique prejudicado, dependendo da concentração de determinados gases, das propriedades radioativas e da interação dos gases presentes na atmosfera.

Segundo IPCC (2019) o CO₂ é o gás que tem maior contribuição para o aquecimento global, sendo o gás que permanece por mais tempo na superfície terrestre, cerca de 200 anos. Outro gás que também tem papel importante nesse cenário é o metano (CH₄), que apesar de apresentar tempo de permanência na terra relativamente curto, cerca de 12 anos, é 28 vezes mais potente que o CO₂ em promover o efeito estufa, e também o óxido nitroso (N₂O), que é 265 vezes mais potente que o CO₂. Sendo assim, a redução da emissão de carbono e metano são fundamentais para frear o aquecimento causado pelo efeito estufa (IPCC, 2013)

Nesse cenário também é trazido à tona as tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CAC) e Remoção de dióxido de carbono (RDC), essas que visam retirar os gases de efeito estufa dispersos na atmosfera, entretanto são tecnologias pouco desenvolvidas com necessidade de alto investimento e que representam papel pouco significativo se comparado as emissões (IPCC, 2023).

No cenário global, 45% das emissões de gases de efeito estufa são provenientes dos países 10% mais ricos do mundo, e o aumento dessas emissões está associado a ações humanas, sobretudo a queima de combustíveis fósseis, a alterações no uso do solo e aos processos industriais, resultando em aumento de 47,3% dos níveis de dióxido de carbono (CO₂) e 157,8% nos níveis de metano (CH₄) (IPCC, 2023).

Segundo dados do IPCC 2018, é estimado que as atividades humanas causaram o aumento da temperatura global em aproximadamente 1,0°C, e definem em 1,5°C o máximo de aumento possível para manutenção dos sistemas naturais e humanos. Alguns impactos relativos ao aumento da temperatura já vêm sendo observados em ecossistemas terrestres e aquáticos. Os modelos climáticos e dados históricos sugerem que o mundo atingirá este limite de aumento da temperatura média global em 1,5°C entre 2030 e 2035, mas para manter esse número em 1,5°C é necessário reduzir as emissões até 2025, e alcançar um cenário de zero emissões em meados do século.

2.2. Matriz energética e movimento de transição em busca de energias mais limpas

Segundo a EPE – Empresa de Pesquisa Energética, é considerado a matriz energética o conjunto de fontes para suprir a demanda de energia, e que, tanto no cenário mundial quanto no cenário brasileiro é composta majoritariamente por fontes não renováveis, porém, é importante destacar que em comparação a outros países, o Brasil apresenta uma matriz energética considerada 'limpa', tendo em vista o uso intenso de recursos hidráulicos (15% da oferta interna) e do aproveitamento energético da cana, através da biomassa (14%) (EPE, 2019).

No cenário mundial, o uso do petróleo e derivados, carvão natural e gás natural são os que apresentam maior representatividade nas matrizes energéticas, são os chamados de combustíveis fósseis, pois derivam de restos de plantas e animais que viveram na superfície terrestre, são a energia do sol capturada pelas plantas através da fotossíntese e aprisionada em compostos de carbono. Esses combustíveis apresentam alta densidade energética, ou seja, mais energia por cada unidade de massa, por isso desde os seus descobrimentos os combustíveis fósseis veem sendo usados para produção de energia, além de uso para aquecimento, transporte e na indústria.

O primeiro uso de combustíveis fósseis foi a partir do uso do petróleo, no século XIX, como alternativa ao uso do óleo de baleia para iluminação. Em seguida foi descoberto o uso de seus derivados, como gasolina e óleo, para uso em motores de combustão interna amplamente usados nos meios de transporte.

Segundo dados da EIA – Energy Information Administration, o carvão é o combustível mais utilizado no mundo para geração de eletricidade e também a maior fonte de emissões de CO₂ no mundo, além de grande responsável por emitir outros poluentes danosos a saúde humana (EIA, 2023).

De acordo com o IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, o carvão é o principal combustível a ser substituído para atingir o cenário de redução do aumento da temperatura da terra, mas que apresenta um desafio importante pois são amplamente utilizados nas indústrias de aço e cimento para alimentar os processos de produção, já que esses requerem a manutenção de temperaturas muito elevadas (IPCC, 2023).

Como citado anteriormente, os países desenvolvidos são grandes responsáveis pelas emissões de gases do efeito estufa na atmosfera, e é importante destacar que esses países dependem significativamente dos países não desenvolvidos em relação a sua matriz energética, uma vez que apresentam um alto consumo de energia, mas recursos limitados para suprir essa demanda e por isso precisam importar combustíveis fósseis de países produtores, que muitas vezes são países em desenvolvimento.

No cenário da produção de petróleo, por exemplo, como pode ser visto na Figura 1.3, entre os 10 maiores produtores no ano de 2021 apenas os EUA e Canadá figuram na lista como países desenvolvidos, entretanto, apesar de ser o maior produtor do mundo, os EUA ainda precisam importar cerca de 37% da demanda interna, esta que é proveniente do excedente de produção do Canadá e de países em desenvolvimento como México e Arábia Saudita (IBP, 2020)

Destaca-se ainda que a exploração de recursos naturais em países não desenvolvidos muitas vezes é realizada por empresas de países desenvolvidos, significando que há beneficiamento também na extração de petróleo, gás e minerais em países em desenvolvimento.

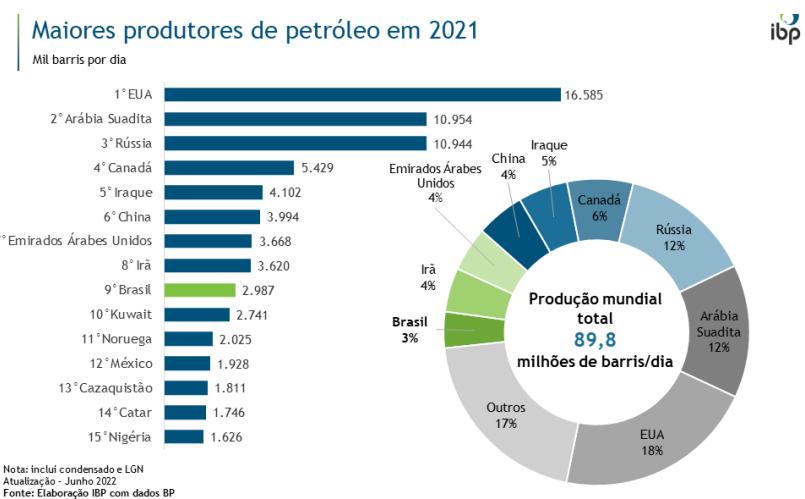


Figura 1.3: Maiores produtores de petróleo em 2021. Fonte: IBP, 2020.

A disponibilidade dos recursos não renováveis é um fator importante a ser considerado na busca da descarbonização da matriz energética, principalmente nos países em desenvolvimento, que além de produzirem a energia para o seu mercado interno, também são responsáveis por fornecer matéria prima para produção de energia de outros países. A exemplo do BRICS, bloco conhecido pelo agrupamento das principais economias de mercado emergentes do mundo, onde fazem parte o Brasil, China, Rússia, África do Sul e Índia, apenas o Brasil se descarta com grande porcentagem da sua matriz energética fundamentada em fontes renováveis, como citado anteriormente e ser observado no quadro comparativo apresentado a seguir (Figura 2.2). Apenas considerando esses países, o BRICS compreende quase 3,2 bilhões de pessoas e são responsáveis por aproximadamente 40% do consumo mundial de energia (CEPAL, 2018)

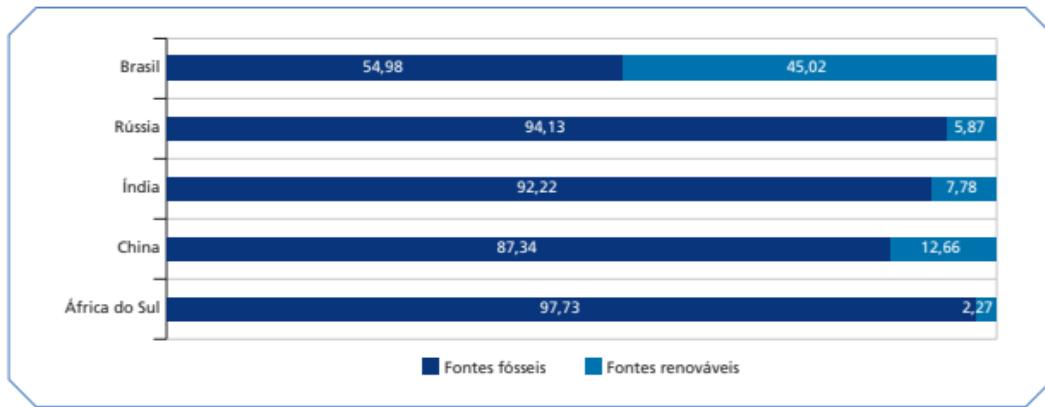
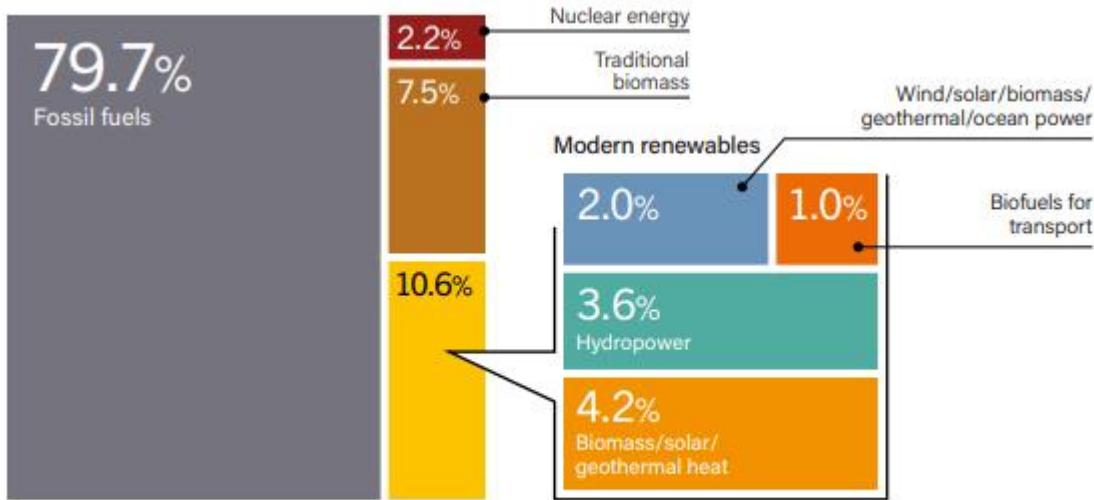


Figura 1.4: Fontes fósseis vs fontes renováveis (2019) (Em %). FONTE: CEPAL, 2018

Nesse cenário, surge a necessidade de descarbonização da matriz energética, esta que é uma meta importante para quase todo o mundo, e a partir disso pode-se destacar duas tendências que direcionam esse movimento: a ampliação da participação de fontes renováveis em relação as fontes não renováveis, onde se destaca o aumento do uso e incentivo de energias eólicas e solares, e a alteração da composição das fontes não renováveis na geração de energia, a exemplo da substituição do carvão pelo gás natural.

Dados do REN21 indicam que cerca de 18,1% de toda a energia consumida no mundo é proveniente de fontes renovável, como indicado na Figura 2.3, número que vem crescendo de forma constante dado a políticas públicas que incentivam o crescimento do setor, associado com a redução de custos e desenvolvimentos tecnológicos. Entretanto dessa porcentagem, cerca de 7,5% referem-se as tradicionais biomassas, como são chamadas, onde a maioria é relativo a queima de biomassa para cozinhar ou gerar calor.



Note: Data should not be compared with previous years because of revisions due to improved or adjusted data or methodology. Totals may not add up due to rounding.

Source: Based on OECD/IEA and IEA SHC. See endnote 54 for this chapter.

Figura 1.5: Parcela estimada de energias renováveis no consumo total de energia no mundo. FONTE: REN21, 2021

A parcela de energias renováveis presente na matriz energética global tem aumentado a uma taxa média de 0,8% anualmente no período entre 2006 e 2016 (REN21, 2021). Houve também um aumento global no consumo do gás natural, dado ao aumento da demanda e do movimento de substituição do carvão pelo gás, sendo os EUA o principal impulsionador desse aumento de demanda.

Apesar do aumento dos subsídios relacionados a geração de energia por fontes renováveis, ainda há muitos subsídios voltados aos combustíveis fósseis. O REN21 (2021) estima que os subsídios relacionados a combustíveis fósseis é o dobro do suporte dado a energias renováveis.

De forma geral, dado a disponibilidade e vasta tecnologia já desenvolvida para extração, os baixos preços dos combustíveis fósseis incentivam uma maior demanda por esse energético e desafiam o mercado de energias renováveis, especialmente nos setores de aquecimento/resfriamento e transportes, que juntos somam 83% do consumo total de energia no planeta, sendo apenas 9,8% e 3,3% respectivamente a representação das energias renováveis na matriz energética desses setores, como indicado na Figura 2.4.

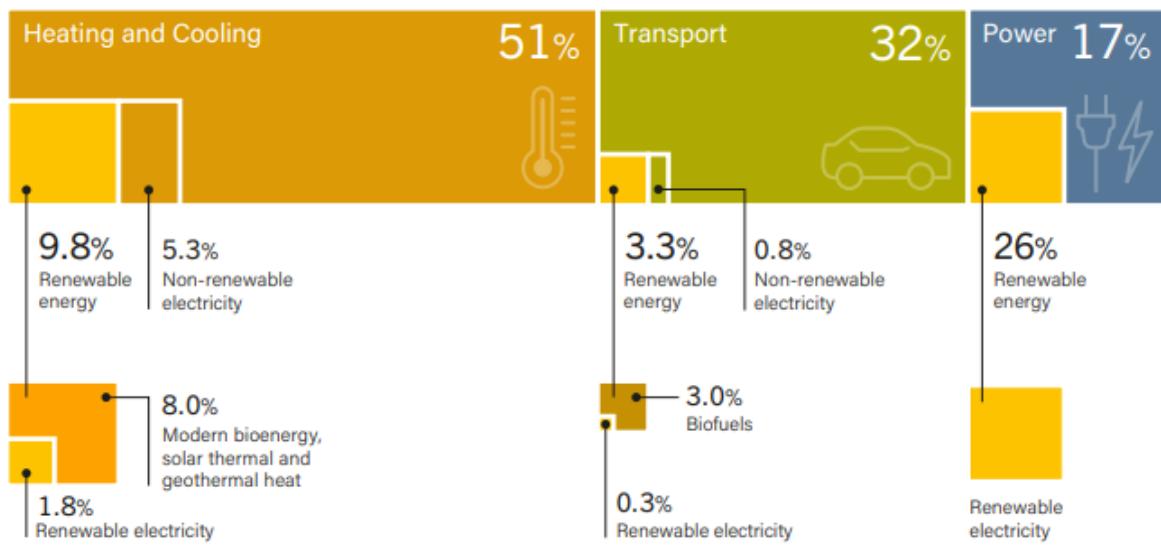


Figura 1.6: Parcia de energias renováveis no consumo total de energia, por setor. FONTE: REN21, 2021

2.3. Gás natural, expansão da rede de distribuição e perspectivas de médio/longo prazo do mercado de gás.

2.3.1. Gás natural, conceitos básicos e aplicações.

O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos gasosos, e na sua composição é predominante o metano. Sua extração é feita através de poços de petróleo, poços de gás e poços condensados. O Brasil teve papel importante no cenário do gás natural dentro e fora do país, segundo Martins et al. (2017) a reserva localizada na camada Pré-sal é uma das maiores descobertas associada ao gás natural nos últimos anos, pois, além da produção de petróleo, a região apresenta alto potencial de produção de GN, somado a isso, 13% do PIB brasileiro atual são por conta do setor de petróleo e GN (Martins et al., 2017).

Por se tratar de um combustível fóssil, o gás natural é um hidrocarboneto, e sua formação se dá a partir da ação de bactérias anaeróbias que decompõem a matéria orgânica por ao longo de milhares de anos (BNDES, 2019). Os registros do uso desse combustível são antigos e datam dos anos 500 antes de Cristo pelos Chineses que o aproveitavam para a produção de calor. Nos anos 1800 começou a ser usado um gás que surgia de forma espontânea da terra, substituindo o gás produzido a partir no carvão para iluminação, foi por isso a ele foi dado o nome de gás natural, este que era menos poluente e mais eficiente. No Brasil o gás

natural foi visto pela primeira vez em 1854 quando passou a ser importado da Inglaterra, pelo barão de Mauá, para iluminar as ruas do Rio de Janeiro.

Nos dias de hoje é um combustível amplamente utilizado, ele representa 23% da demanda mundial de energia primária, além de ter sido, na última década, o energético que apresentou maior crescimento de participação na matriz energética, em 2019, 23% da demanda mundial de energia primária, os países que apresentaram maior aumento de consumo do GN. Na matriz energética atual o GN pode atuar como substitutivo do carvão, da hidroeletricidade ou do óleo combustível. Quando se trata de geração de energia e transportes, pode substituir a gasolina, diesel e outros. Dado ao uso amplo se faz necessário regulamentações que comprovem a qualidade do combustível, as especificações do gás natural no Brasil são regulamentadas pela resolução ANP nº 16/2008, que especifica parâmetros para observados o poder calorífico superior (PCS), o índice de Wobbe e os teores mínimos e máximos de metano e etano, e o controle de contaminantes, que são importantes para atender a política energética do país. (BNDES, 2019).

O aumento observado do consumo de GN em escala mundial é um dos responsáveis pelo decréscimo da intensidade de carbono na energia, este que é um indicador que relaciona a quantidade de átomos de carbono e dos átomos de hidrogênio. O GN apresenta diversas vantagens se comparado aos outros combustíveis fósseis, tem poder calorífico bem mais alto que o do carvão e próximo do petróleo e emite em torno de 27% menos CO₂ que o petróleo e 44% menos que o carvão. Outras comparações também são feitas em relação a derivados de petróleo mais nobres e como é exemplificado na Figura 2.5, onde emite 33% menos CO₂ que o óleo combustível e 17% menos que o gás liquefeito de petróleo (GLP), amplamente usado para cozimento nas cozinhas brasileiras, 26% menos que a gasolina e 27% a menos que o óleo diesel, mostrando o seu potencial também no setor de transportes (BNDES, 2019).

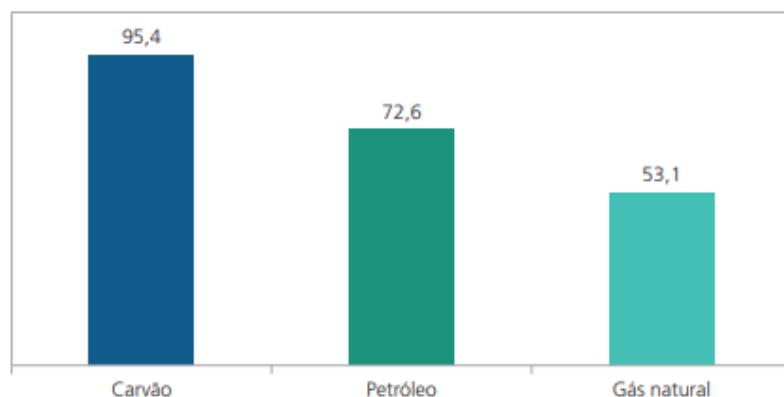


Figura 1.7: Emissão de CO₂ por unidade de energia (Kg de CO₂/milhão de BTU). FONTE: Miranda, 2012.

Além dos benefícios observados na redução de CO₂, o GN também impacta positivamente com a redução, quase que totalmente, de poluentes tóxicos e particulados cancerígenos. Por conta do modelo de produção também promove a confiabilidade energética, uma vez que sua produção é constante e não depende de intermitências da natureza, como é o caso das energias renováveis. Diante desse contexto altamente propício, a Agência Internacional de Energia (IEA) aponta para um aumento na participação do gás natural na matriz energética global, sugerindo a possibilidade de que nos próximos 20 anos o gás natural possa competir com o petróleo como a principal fonte de energia primária mundial (IEA, 2023).

Destaca-se que os países mais industrializados ou desenvolvidos já possuem grande infraestrutura de distribuição de gás natural estabelecida, exercendo papel importante em suas economias. Por outro lado, os países em fase de desenvolvimento têm a escolha entre adotar tecnologias mais atualizadas, com o objetivo de incorporar energias renováveis, ou aplicar conhecimentos já estabelecidos para seguir trajetórias de desenvolvimento mais sustentáveis. No Brasil, como exemplo, existe um considerável potencial de gás natural ainda não explorado ao longo de sua costa, juntamente com a geração isolada de biogás em áreas internas. Essa realidade impulsiona a estratégia de criar uma rede de distribuição que se origina nas regiões costeiras e se expande pelo consumo de gás natural, avançando para as áreas internas e se conectando com a geração isolada de biogás (IEA, 2023).

2.3.2. Gás natural como energético de transição.

Segundo dados da IEA (2023) a transição observada de carvão para o gás natural foi responsável por evitar a emissão de cerca de 500 milhões de toneladas de CO₂ na atmosfera. Essa mudança tem se tornado possível por conta do uso de infraestrutura existente e disponível que entrega os mesmos serviços energéticos, mas reduzindo a emissão de CO₂ e poluentes, principalmente quando comparado os desenvolvimentos necessários associados as energias renováveis e o esforço para implementação de projetos de eficiência energética.

Dessa forma ainda há potencial de redução de 1,2 gigatoneladas de CO₂ com a substituição de carvão natural para gás natural, reduzindo o total de emissões globais em 4%, reduzindo a emissão de poluentes em 50% no cenário de produção de energia e em 33% no cenário de aquecimento, além de reduções estimadas de 98% quando analisado as emissões relacionadas ao ciclo de vida do gás natural em comparação ao carvão. Todo esse potencial está concentrado principalmente na Europa e nos Estados Unidos (Miranda et al., 2012).

Um dos principais problemas relacionados ao gás natural são os chamados vazamentos fugitivos, onde há liberação de gás natural na atmosfera através de vazamentos nas redes de distribuição e transporte, por isso a indústria do gás tem direcionado esforços para aplicar as melhores práticas em toda a cadeia do suprimento, esforços que são de grande importância para maximizar os benefícios e o uso do gás natural dado o cenário das mudanças climáticas. A mudança para o gás natural tem se mostrado particularmente importante em áreas urbanas, visando melhorar a qualidade do ar.

A construção da uma infraestrutura de gás robusta pode vir a substituir o uso de combustíveis mais poluentes, e fornece serviços que talvez possam não ser fornecidos pelas energias renováveis, ou de baixo carbono, como aquecimento em situações de picos de temperatura, armazenamento sazonal ou fornecimento de calor em alta temperatura para a indústria. Também é importante destacar que os investimentos hoje vistos para a expansão da rede de gás, podem ser aproveitados futuramente para a distribuição de gases descarbonizados, como o metano ou hidrogênio renovável, além de fornecer benefícios para a segurança energética.

2.3.3. Cenário brasileiro e a publicação da nova lei do gás

No Brasil, em 2019, foi observado o aumento de 9,8% nas emissões de gases de efeito estufa, aponta-se como principais motivos do aumento do desmatamento e da mudança no uso da terra e florestas. Em seguida está a agropecuária e em terceiro lugar o setor de energia, seguido por fim pelos processos industriais e os resíduos (SEEG, 2020). Quando se trata do setor energético, a atividade de transporte é a que possui o maior impacto, seguida pelo consumo energético industrial, a produção de combustíveis e, por último, a geração de eletricidade.

Diante dessa situação, tanto a Petrobrás quanto outras empresas do setor estão empenhadas em maximizar a utilização do gás natural no transporte de mercadorias e pessoas, bem como na geração de eletricidade através de usinas termoelétricas. Isso ocorre porque o gás natural oferece uma quantidade comparável de energia, ao mesmo tempo em que gera emissões de CO₂ e poluentes atmosféricos inferiores, além de evitar desafios tecnológicos associados à substituição de equipamentos e processos que atualmente dependem de outros tipos de combustíveis.

No cenário elétrico brasileiro, a energia hidráulica assume um papel proeminente como fonte primária, sendo uma energia renovável que se alinha de forma altamente vantajosa com

o contexto do Brasil. Nos últimos anos, as energias solar e eólica também têm ganhado importância, proporcionando benefícios ambientais bem estabelecidos. No entanto, o sistema elétrico enfrenta desafios devido à natureza intermitente e sazonal das fontes renováveis. Nesse contexto, o gás natural emerge como um complemento às fontes renováveis, trazendo confiabilidade e estabilidade ao sistema elétrico nacional (BNDES, 2019).

Além disso, é notável que cerca de 9% da matriz energética do país ainda depende de combustíveis mais poluentes, como diesel e óleo combustível, em termoelétricas que precisam ser desativadas e substituídas por usinas termoelétricas movidas a gás natural. Isso não apenas reduzirá as emissões prejudiciais, mas também contribuirá para uma transição mais limpa e sustentável no setor energético do Brasil (BNDES, 2019).

Entre 1953 e 2010, as atividades de produção, escoamento até as unidades de processamento e transporte do gás natural ficaram concentradas na Petrobrás, e essa centralização resultou no desincentivo à entrada de investidores no mercado, impactando diretamente em preços não competitivos. Após diversas movimentações no cenário legislativo e político do Brasil, buscando melhorar a competitividade do mercado, em 2019 foi publicada a Lei do Gás (Lei nº11.099) que assegurou o acesso a terceiros à rede da Petrobrás, visando atrair novos investidores, apesar de ter entrado em vigor, a legislação não atendeu de forma ampla as necessidades do mercado (BNDES, 2019).

Em abril de 2021, a nova lei do gás foi sancionada, esta que tem como objetivo modernizar o mercado de gás natural no Brasil, aumentando a concorrência, reduzindo o preço e estimulando investimentos no setor.

Os principais benefícios esperados são: o fim do monopólio da Petrobras na atividade de transporte do gás natural, possibilidade de terceiros utilizarem as infraestruturas de transporte e de escoamento de gás natural já existentes, criação de um mercado livre de gás natural, onde consumidores de grande porte poderão escolher seus fornecedores, previsão de leilões para a contratação de capacidade de transporte de gás natural, e criação do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) como órgão responsável pela definição da política energética do país (Miranda, 2012).

A expectativa é que a nova lei atraia investimentos privados para o setor de gás natural, aumentando a oferta e reduzindo os preços do produto no mercado. Além disso, espera-se que a competição no mercado estimule a inovação e a busca por fontes de energia mais limpas e sustentáveis.

2.4. Biometano

2.4.1. Conceitos básicos e meios de produção.

O biometano é um gás produzido a partir do processamento do biogás, este que é produzido pela digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, e que apresenta em sua composição cerca de 50% de metano (CH_4) e 50% de dióxido de carbono (CO_2) em volume, além de traços de outros gases, desde que atendam a legislação vigente, podendo ser produzido a partir de resíduos urbanos (resíduos sólidos e esgoto sanitário) e resíduos da produção agropecuária (como resíduos da indústria sucroenergética – vinhaça, palha ou bagaço de cana, resíduos de criação e abate de animais, entre outros). No processo de digestão anaeróbia, substâncias orgânicas complexas são convertidas em compostos mais simples, incluindo metano e dióxido de carbono. Além disso, outras substâncias estão presentes em quantidades menores, como amônia, sulfeto de hidrogênio e fosfatos. (BNDES, 2019).

De forma resumida, o processo acontece em quatro etapas: hidrolise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Na hidrólise há a liberação de enzimas por bactérias que decompõem componentes orgânicos complexos em compostos como aminoácidos, açucares e ácidos graxos para que possam ser processados pelas células. Em seguida, na acidogênese, são produzidos compostos intermediários formados a partir da hidrólise. Na acetogênese os produtos gerados na acidogênese são oxidados gerando substratos adequados para a etapa de metanogênese e, finalmente na fase metenogênica é que acontece a formação do metano, onde as bactérias exclusivamente anaeróbias convertem os compostos orgânicos da fase anterior em metano, que é o principal componente do biogás. O biogás resultante desse processo pode ser aproveitado de três maneiras: principalmente na geração de energia térmica, que é a utilização mais comum; na produção de energia elétrica; e na produção de biometano (Coelho et al., 2022).

Mais especificamente quando se trata do biogás produzido em aterros sanitários, este é responsável por 4% do total de emissões mundiais de gases de efeito estufa e é a terceira maior fonte de emissões antropogênicas de metano (Markgraf e Kaza, 2016).

Para converter o biogás em biometano, é necessário submetê-lo a um processo de purificação, no qual o metano (CH_4) é separado das outras substâncias, resíduos e impurezas presentes. Os métodos comuns de purificação incluem o uso de membranas, purificação criogênica, absorção, processos biológicos e lavagem com água. Após a etapa de purificação e cumprindo os requisitos de qualidade regulamentares, o biometano pode ser utilizado de

maneira intercambiável com o gás natural em todas as suas aplicações, como será discutido a seguir.

2.4.2. Legislação aplicável e medidas de incentivo de produção e uso do biometano.

No Brasil, a produção e uso do biometano é regulamentada pela Resolução Normativa nº 689/2015 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Esta resolução estabelece as condições técnicas e de segurança para a produção e distribuição do biometano, incluindo requisitos para a qualidade do gás, sua medição e faturamento, além de determinar as obrigações e responsabilidades das partes envolvidas.

O governo brasileiro tem implementado medidas de incentivo para a produção e uso do biometano, como a isenção de impostos sobre o combustível (tributos como PIS/COFINS e ICMS), a inclusão do biometano na matriz energética do país e a criação de linhas de crédito específicas para investimentos em biogás e biometano, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa).

Com o olhar voltado para os países onde há maior consumo e produção de biometano no mundo, podemos citar a Alemanha tem uma das políticas mais progressivas em relação ao biometano. Eles têm um sistema que incentiva a produção de biogás e biometano, juntamente com uma série de outros incentivos fiscais e regulatórios, como isenções fiscais para biocombustíveis, empréstimos a juros baixos e subsídios. A Suécia tem uma taxa reduzida de imposto sobre o biometano, o que o torna competitivo em relação ao gás natural. A Suíça tem uma política de biocombustíveis que incentiva a produção de biometano, onde oferece incentivos fiscais para o uso de biocombustíveis, juntamente com um sistema de certificação que garante a qualidade e sustentabilidade do biometano.

2.4.3. Potencial de produção de biometano no Brasil

Para considerar o biometano como alternativa viável na substituição do gás natural é importante entender se há produção suficiente para não causar impactos nos sistemas de distribuição.

No Brasil, três setores econômicos desempenham um papel fundamental no potencial de produção de biometano: o setor sucroenergético, a produção de alimentos e o setor de saneamento, incluindo resíduos sólidos urbanos (RSU) e efluentes sanitários. Já existem

projetos de grande escala em operação no setor sucroenergético e no saneamento, e vários outros estão em diferentes estágios de planejamento e implementação.

Já no setor de alimentos as escalas observadas são variadas, podendo ser entre mini e microescala, para pequenos produtores ou grande, se consideradas as agroindústrias. A seguir a figura 2.6 ilustra os principais setores citados e seus potenciais de produção de biometano.

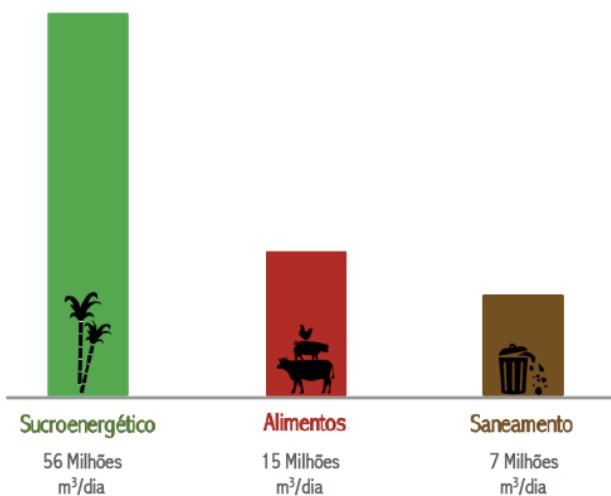


Figura 1.8: Potencial de produção de biometano por setor. Abiogás, 2016

Tendo em vista o cenário tecnológico específico para produção em larga escala do biometano, as indústrias de base se mostram prontas e capacitadas para oferecer ao mercado as ferramentas necessárias para produção, purificação e distribuição, este último alavancado principalmente pela malha de distribuição de gás natural já existente e que pode ser usada para a distribuição também do biometano.

Em um estudo conduzido em 2015 pela ABiogás, o objetivo era avaliar o volume de biometano desperdiçado no Brasil. O estudo concluiu que esse volume corresponde a aproximadamente 50 milhões de metros cúbicos por dia de biometano no setor sucroenergético, 15 milhões de metros cúbicos por dia no setor de alimentos e 6 milhões de metros cúbicos por dia no setor de saneamento. Isso totaliza cerca de 71 milhões de metros cúbicos de biometano diariamente, distribuídos por todo o país. Esse potencial desperdiçado de volume é equivalente ao consumo de 44% do diesel ou poderia substituir cerca de 73% do consumo de gás natural no Brasil (ABILOGÁS, 2016).

2.4.4. Iniciativas de transição do gás natural e biometano.

A Europa é o local onde mais se concentram as plantas produtoras de biogás e biometano, dados de 2021 indicavam uma produção combinada de cerca de 18,4 bcm no ano (Bilhões de metros cúbicos). (EBA, 2022).

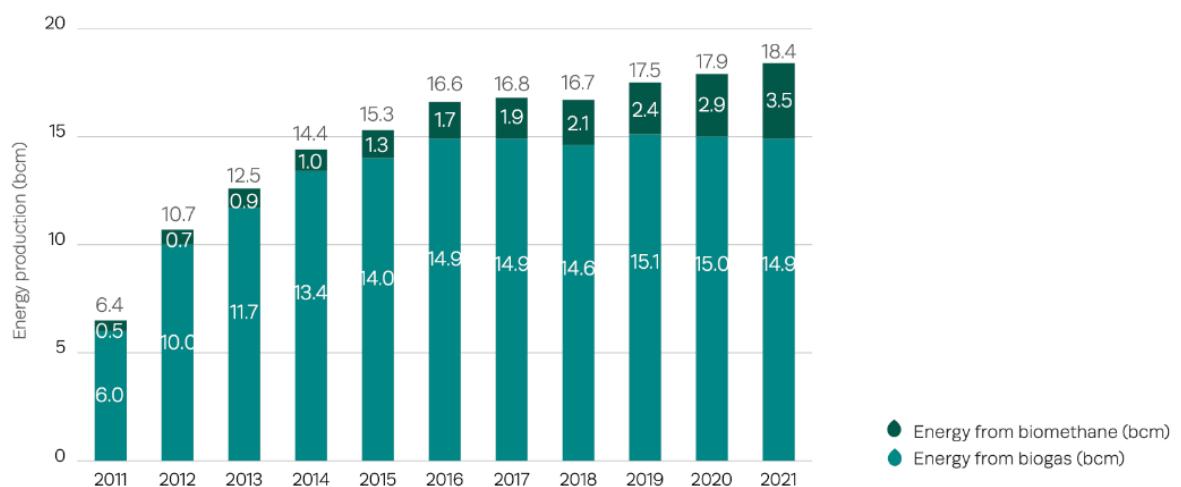


Figura 1.9: Produção combinada de biogás e biometano na Europa. Fonte: EBA, 2022.

Na figura 2.7 é possível observar que a maior parte do biogás produzido é usado para geração direta de energia elétrica e calor, e apenas 19% para a produção de biometano, entretanto, projeções da Associação Europeia de Biogás (EBA) indicam que a produção de biometano pode chegar a 42 bcm por ano em 2030 como ilustrado na figura 2.8, considerando as diversas políticas de incentivo vigentes, ou propostas. (EBA, 2022).

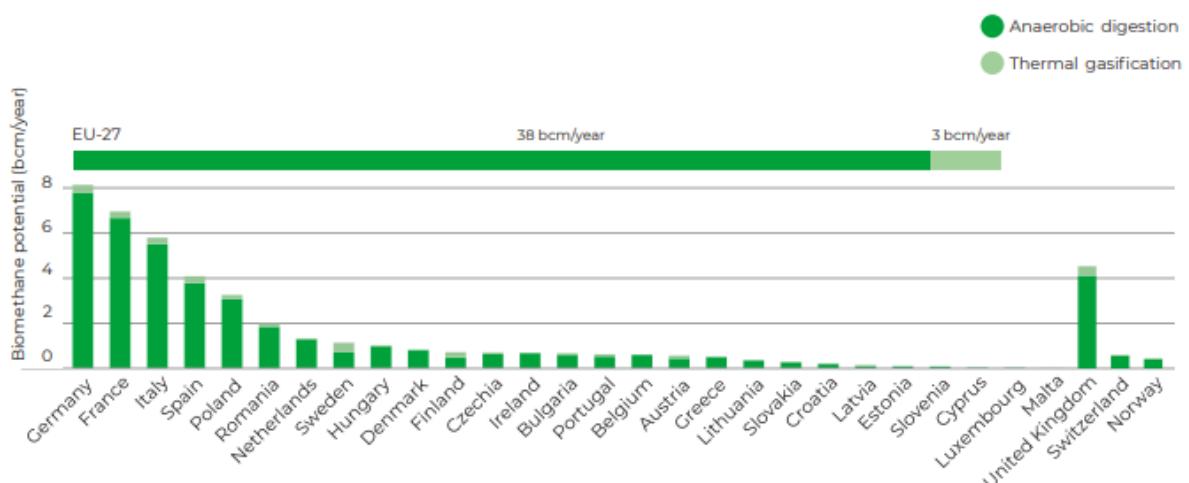


Figura 1.10: Produção potencial de biometano em 2030 por tecnologia e país europeu. Fonte: EBA, 2022.

De acordo com Van Grinsven (2017), a Alemanha, Suécia e Reino Unido são os países que possuem a maior quantidade de instalações de biometano e uma infraestrutura mais desenvolvida para a sua utilização. A Suécia se destaca por dedicar uma proporção significativa do biogás à produção de biometano, com 74% do biogás total sendo utilizado para esse fim. Em contraste, na Holanda, Suíça e Alemanha, as proporções são de 26%, 19% e 15%, respectivamente. Na Áustria e no Reino Unido, essas proporções são de 9% e, na França, 2% (revista DAE, 2018).

Apesar das proporções menores em alguns casos, nos países como Reino Unido, Alemanha, Áustria e França, a maioria das instalações de biometano está conectada à rede de gás natural. Isso ocorre devido às políticas e programas de incentivo existentes nesses países, que promoveram a integração do biometano na rede de gás natural como parte de seus esforços para impulsionar a produção e uso de fontes de energia mais sustentáveis. (revista DAE, 2018).

No setor de transportes, o biometano também pode desempenhar um papel crucial. Segundo dados do BNDES (2021), o uso do biometano nesse contexto está predominantemente concentrado na Europa, com ênfase em países como Alemanha, Suécia, Suíça e Reino Unido, embora também sejam observadas iniciativas nos Estados Unidos. Estima-se que haja cerca de 500 plantas no mundo produzindo biometano de qualidade comparável ao gás natural.

A proporção de metano no biogás pode variar consideravelmente devido à composição dos materiais orgânicos utilizados. Consequentemente, os custos de produção de biometano dependem, em parte, da fonte do biogás empregada, bem como do tamanho e capacidade das unidades de processamento. Uma abordagem vital para expandir a adoção do biometano envolve o emprego de políticas públicas que promovam a redução ou isenção de taxas para o uso veicular de biometano, além de oferecer subsídios e incentivos para a injeção do gás na já existente rede de gás natural.

No Brasil, já podem ser observadas algumas iniciativas relacionadas ao uso de biometano. Projetos apoiados pela Itaipu Binacional, Parque Tecnológico Itaipu (PTI) e Centro Internacional de Energias Renováveis-Biogás (CIBiogás) no Paraná merecem destaque, com foco na produção de biometano através da combinação de esgoto, resíduos orgânicos e poda de grama, bem como seu uso em frotas próprias. Outras experiências incluem o projeto do Aterro Dois Arcos em São Pedro da Aldeia, Rio de Janeiro, que produz biometano para

veículos, e o projeto de beneficiamento de biogás na ETE Franca, pertencente à Sabesp, visando a produção de biometano para uso em veículos.

O biometano no Brasil tem se mostrado uma alternativa promissora e alinhada com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que busca promover a gestão adequada de resíduos, a redução de impactos ambientais e a transição para uma economia mais circular. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), criada por meio da Lei nº 12.305/2010, estabelece orientações para a gestão integrada e o manejo ambientalmente correto dos resíduos sólidos no território nacional. Ela tem como objetivos principais a redução dos resíduos gerados, o incentivo à reciclagem e ao reaproveitamento, a destinação adequada dos rejeitos e a promoção da responsabilidade compartilhada entre os setores público e privado. Destaca-se aqui a produção de biometano do aterro de Caucáia, no Ceará. A GNR Fortaleza, empresa responsável pela produção, foi inaugurada em dezembro de 2017, e a usina capta e trata o biogás das 5.000 toneladas de resíduos sólidos urbanos/dia, oriundas da Região Metropolitana da capital cearense e que chegam ao Aterro Sanitário de Fortaleza, localizado no município vizinho de Caucaia. Atualmente a usina tem capacidade de produzir até 85 mil m³ de biometano por dia, com previsão de aumentar e sua capacidade total para 108 mil m³. Durante o primeiro trimestre de 2022, foram injetados diariamente 77 mil metros cúbicos de biometano na rede da Cegás, a companhia responsável pela distribuição de gás no estado do Ceará. Essa quantidade correspondia a 15% do total de gás vendido pela distribuidora. Esse dado é notável e apresenta uma porcentagem significativa, mesmo quando comparada a países como os Estados Unidos e a França. (Belfort, 2022)

Outra iniciativa importante é da Usina Cocal em parceria com a Gas Brasiliano, empresa responsável pela distribuição de gás natural em parte do interior do estado de São Paulo. Foram construídos cerca de 65 Km de rede de distribuição para escoamento do biometano produzido pela usina, visando atender principalmente ao mercado industrial da região. O projeto, que entrou em operação em fevereiro de 2023, tem a capacidade de produzir até 25 mil metros cúbicos diários de biometano, esse biometano é obtido através do processamento de resíduos da cana-de-açúcar, como vinhaça, palha e torta de filtro. (CNN Brasil, 2023).

Em Caxias do Sul, uma das maiores cidades do Rio Grande do Sul, está em operação um projeto de geração de energia elétrica a partir do biogás gerado no aterro sanitário local. O biogás é coletado e tratado em um sistema específico para a produção de biometano. O biometano produzido em Caxias do Sul é utilizado para abastecer a frota de ônibus municipais. Essa iniciativa contribui para a redução das emissões de poluentes atmosféricos no transporte público e para a diversificação da matriz energética da cidade.

No Rio Grande do Sul, a Sulgás e a SebigasCótica firmaram em 2021 o primeiro contrato de suprimento de biometano do Rio Grande do Sul. As duas empresas firmaram um acordo através de uma chamada pública que possibilitou a aquisição de biometano, lançada pela Sulgás em 2020. A proposta prevê a instalação de uma central de tratamento integrado de resíduos (CTIR) em grande escala, na cidade de Triunfo, com capacidade para receber resíduos da agroindústria, que serão transformados em biocombustível. (SebigasCótica, 2021).

Esses exemplos demonstram que o Brasil tem potencial para aproveitar os resíduos orgânicos como fonte de biometano, alinhando-se aos princípios da economia circular e da sustentabilidade. Projetos como esses mostram que é possível transformar resíduos em energia limpa, reduzindo o impacto ambiental e contribuindo para a transição para uma economia de baixo carbono.

As projeções da Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado (Abegás) e da Associação Brasileira do Biogás (Abiogás) indicam que a produção nacional de biometano deve alcançar a marca de 2,2 milhões de metros cúbicos por dia até o ano de 2027. Dentro dessa estimativa, aproximadamente 1,3 milhão de metros cúbicos por dia serão provenientes do biogás gerado no setor de saneamento, incluindo aterros sanitários. O setor sucroenergético deverá contribuir com 700 mil metros cúbicos por dia, enquanto o segmento agroindustrial contribuirá com mais 200 mil metros cúbicos por dia.

O estado de São Paulo lidera com 15 projetos novos, seguido pelo Rio Grande do Sul com 6 projetos. Outros estados que têm projetos novos mapeados incluem Rio de Janeiro, Pará, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Amazonas. Esses dados refletem a expansão e o crescente interesse na produção e uso de biometano em várias regiões do Brasil. (ABIOGÁS, 2022)

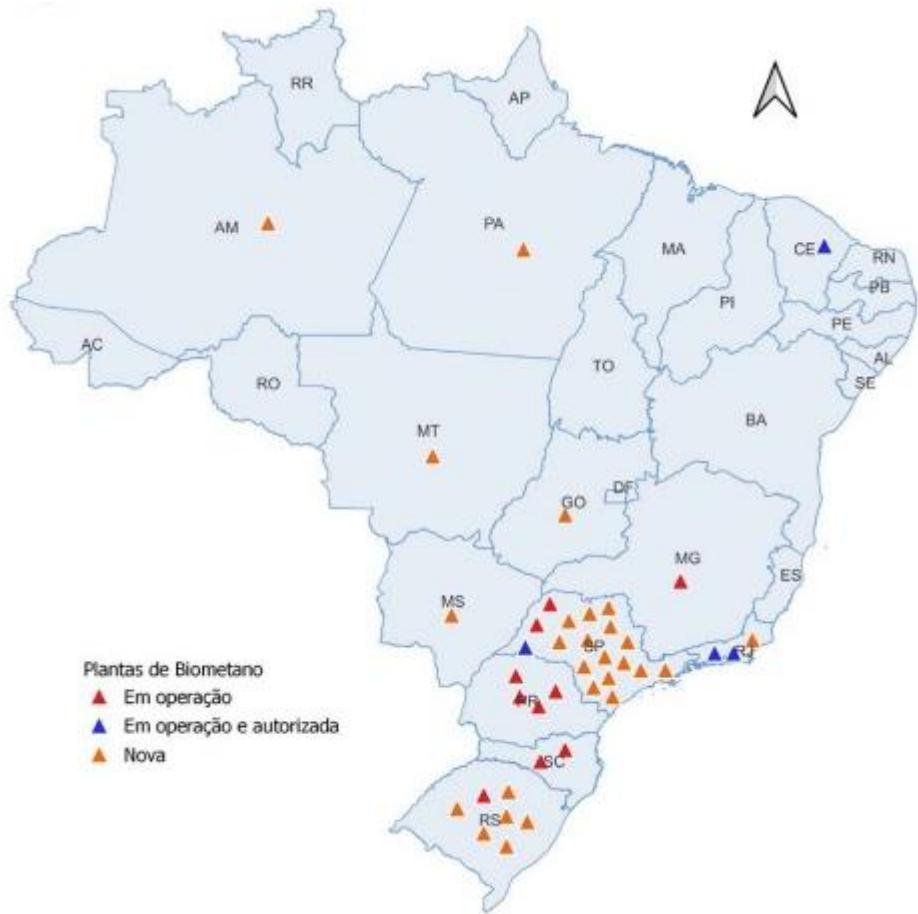


Figura 2.8: Plantas de biometano no Brasil. (ABIOPGÁS, 2022)

2.5. Desafios tecnológicos

A transição para o uso de gás natural e biometano como fontes de energia mais limpas e sustentáveis enfrenta diversos desafios tecnológicos que precisam ser superados para garantir sua adoção em larga escala.

Um dos principais desafios é a necessidade de construir uma infraestrutura adequada para o abastecimento de GN e biometano. Isso inclui a instalação de estações de compressão e distribuição de GN, bem como a criação de redes de distribuição de biometano, para que os veículos e sistemas possam ser abastecidos de forma conveniente e eficiente.

Já a produção de biometano envolve processos de tratamento e purificação do biogás proveniente de diversas fontes, como de resíduos orgânicos, resíduos agrícolas, resíduos sólidos urbanos e lodo de esgoto. Já existem tecnologias disponíveis para a produção de biometano, entretanto, o desafio é desenvolver-las nacionalmente para que se tornem economicamente viáveis no mercado brasileiro. e econômicas para produzir biometano a

partir dessas fontes é um desafio importante para garantir o fornecimento sustentável do combustível. Além disso, o biometano tem requisitos específicos de armazenamento e distribuição devido à sua origem renovável e sazonalidade de produção. Desenvolver sistemas de armazenamento e logística eficientes para garantir a disponibilidade contínua de biometano é um desafio significativo.

A viabilidade econômica é um desafio para a transição para GN e biometano, pois a infraestrutura de abastecimento e as tecnologias de produção ainda podem ser relativamente caras em comparação com as fontes de energia tradicionais. É necessário desenvolver modelos de negócios e incentivos que tornem essas fontes de energia competitivas e atraentes para os consumidores e investidores.

Outro ponto importante é que a transição para o GN e biometano requer a adaptação de veículos e equipamentos para utilização desses combustíveis. Isso pode incluir a instalação de kits de conversão para permitir que veículos a gasolina ou diesel sejam convertidos para o uso de GN ou biometano. Além disso, equipamentos industriais e de geração de energia também podem precisar ser adaptados para operar com esses novos combustíveis.

Entretanto há cenários onde a mudança de tecnologia pode ser favorável, como seria o caso de um motor *flex* que opera a frio com álcool e a quente com GN. Essa configuração tem o potencial de melhorar o rendimento do motor, oferecer maior eficiência energética e reduzir as emissões de gases poluentes (CHIAPINOTTO, 2017).

Durante o período de partida a frio, o álcool seria utilizado como combustível principal, uma vez que esse combustível possui maior facilidade de ignição em baixas temperaturas e, portanto, permitiria a partida suave e rápida do motor mesmo em condições de frio intenso. O álcool também possui uma alta octanagem, o que contribui para uma combustão mais completa e eficiente (CHIAPINOTTO, 2017).

Conforme o motor aquece, o sistema de gerenciamento do veículo poderia alternar automaticamente para o uso de GN como combustível principal. O gás natural é uma fonte de energia limpa e de baixa emissão de GEE, o que o torna uma opção mais sustentável em comparação com combustíveis fósseis como a gasolina.

A utilização de álcool e GN reduziria significativamente as emissões de gases poluentes, como dióxido de carbono (CO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x), contribuindo para a melhoria da qualidade do ar e para a mitigação das mudanças climáticas. Além disso, o alto poder calorífico do GN e a alta octanagem do álcool podem melhorar a eficiência energética do motor, proporcionando um melhor rendimento por litro de combustível.

De qualquer forma, superar esses desafios tecnológicos é fundamental para promover uma transição bem-sucedida para o GN e o Biometano como fontes de energia mais sustentáveis, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e a construção de um futuro mais limpo e ambientalmente responsável. Isso requer esforços coordenados de governos, indústria, instituições de pesquisa e sociedade como um todo para impulsionar a inovação e a implementação dessas soluções tecnológicas.

3. Estudo de caso – Estimativa de redução das emissões de GEE

3.1. Metodologias de Cálculo de emissão de GEE

Tendo em vista os impactos da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, foram desenvolvidos diversos cálculos e metodologias para quantificar a liberação desses gases como resultado das atividades humanas, nos mais diversos contextos. As principais abordagens relacionadas ao tema se dão em três aplicações principais, sendo uma delas a abordagem do inventário nacional de emissões de gases de efeito estufa, que é aplicada quando tem-se o objetivo de estimar as emissões de gases de efeito estufa em um país interior. Nesta abordagem é feito um levantamento completo, incluindo coleta de dados, cálculo de emissões e documentação, visando produzir relatórios anuais de emissões de GEE, que são submetidos à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC).

As emissões também podem ser estimadas por meio do estudo de ACV – Análise do Ciclo de Vida, que tem o objetivo de calcular as emissões de GEE associadas a um produto ou serviço específico, observando todo o ciclo de vida do mesmo, desde a extração de matérias primas até o descarte final.

Há também o método do protocolo de gases de efeito estufa, que é direcionado a calcular as emissões de uma organização específica, onde o GHG Protocol é a ferramenta mais utilizada e amplamente difundida no cenário mundial, tanto por empresas privadas, como pelos governos para quantificar e gerenciar as suas emissões (CETESB, 2014). Portanto, optou-se por utilizar esta metodologia de cálculo neste estudo.

A metodologia do GHG Protocol é dividida em algumas etapas básicas, com objetivos específicos:

- 1) Definir os limites organizacionais do inventário: Iniciar a aplicação da metodologia escolhendo uma abordagem para realização do levantamento e a consolidação das emissões, esta etapa permitirá a empresa registrar e comunicar suas emissões, é necessário o envolvimento das partes societárias e agentes controladores da empresa.
- 2) Definir limites operacionais: Tendo em vista os limites organizacionais definidos previamente, são identificadas as fontes emissoras de GGE associadas as operações. É nessa etapa que as emissões são classificadas como diretas (provenientes de fontes próprias ou controladas pela empresa) ou indiretas (decorrente de atividades da

empresa, mas causadas por outras empresas). Dentro dessa categorização, são aplicados ainda três escopos para registro em relatório:

a. Escopo 1 – Emissões diretas de GEE: Emissões provenientes de fontes que pertencem ou são controladas pela empresa

b. Escopo 2 – Emissões indiretas de GEE de eletricidade: Considera emissões da geração de eletricidade adquirida ou consumida pela empresa.

c. Escopo 3 - Outras emissões indiretas de GEE: Onde são abordadas todas as outras emissões indiretas.

3) Selecionar metodologia de cálculoNessa fase do processo, são aplicadas metodologias e fatores de emissão adicionais para quantificar as emissões provenientes de fontes de combustão estacionária e móvel. Dado que há várias metodologias disponíveis, é fundamental fornecer uma justificação robusta para as escolhas feitas. Essas escolhas devem estar em harmonia com os objetivos do estudo e com o contexto global da avaliação de emissões.

4) Coleta de dados: Considerando só escopos citados na etapa 2, será feito o levantamento dos dados de emissão será realizado considerando as particularidades das operações da empresa e das fontes de gases de efeito estufa (GEE). Isso envolverá a coleta de informações detalhadas sobre as atividades, processos e fontes específicas que contribuem para as emissões de GEE.

5) Aplicação das ferramentas de cálculo: Traduzir os dados levantados anteriormente em unidades específicas de emissão de Gases de GEE, onde podem ser feitos uso de ferramentas (ex.: Programa Brasileiro GHG Protocol, GHG Protocol, entre outros), ou métodos próprios que devem estar em concordância com o GHG Protocol Corporate Standard.

6) Elaboração de relatório: Onde são resumidos e sintetizados os dados.

Para as abordagens citadas, é necessário a definição de fatores de emissão que permitam quantificar os gases de efeito estufa produzidos, e devem ser coerentes com o contexto do que se pretende estudar. No caso desse estudo será usado como referência os fatores de emissão disponibilizados pelo Programa Brasileiro GHG Protocol, que é disponibilizado abertamente e dispõe de ferramentas de cálculo e fatores de emissão coerentes com o cenário brasileiro.

3.2. Comparativo da emissão de GEE entre os principais energéticos usados no Brasil.

Segundo dados do BEN (2022), considerando o ano base de 2021, o total de emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira atingiu 445,4 milhões de toneladas de

dióxido de carbono equivalente (Mt CO₂-eq). As emissões brasileiras estão distribuídas conforme o uso energético total, onde 32,5% da energia consumida no Brasil é direcionada ao setor de transportes, seguido pelo consumo industrial com 23,3% e em terceiro lugar o consumo residencial com 10,9%, como ilustrado na Figura 3.1.

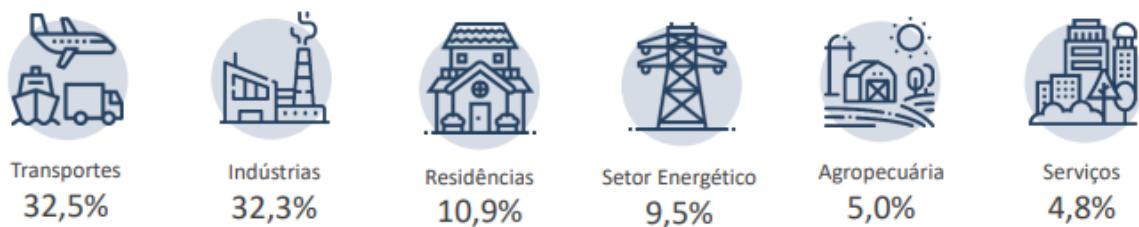


Figura 3.1: Consumo de energia no brasil por setor. BEN,2022.

Tendo em vista os principais consumidores de energia no país por setor, observa-se os principais energéticos usados em cada um, a Figura 3.2 traz a distribuição de energéticos no setor de transportes, que é o mais representativo no cenário brasileiro, onde se destaca o óleo diesel, amplamente usados no transporte de carga e passageiros, seguido pela gasolina e etanol.

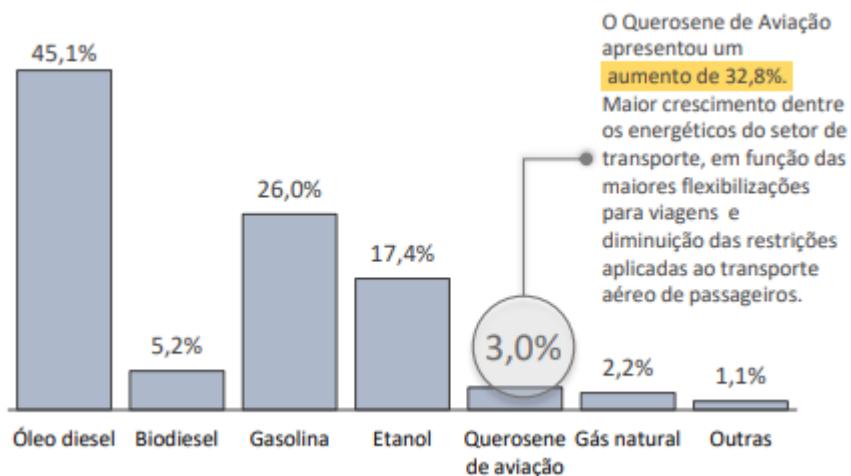


Figura 3.2: Participação por energético no setor de transportes. BEN 2022

Comparando os principais energéticos do setor de transportes, o óleo diesel que é o combustível mais usado no país, representando 45,1%, e é também o que mais emite CO₂ dentre as principais fontes do setor, como indicado na Figura 3.3.

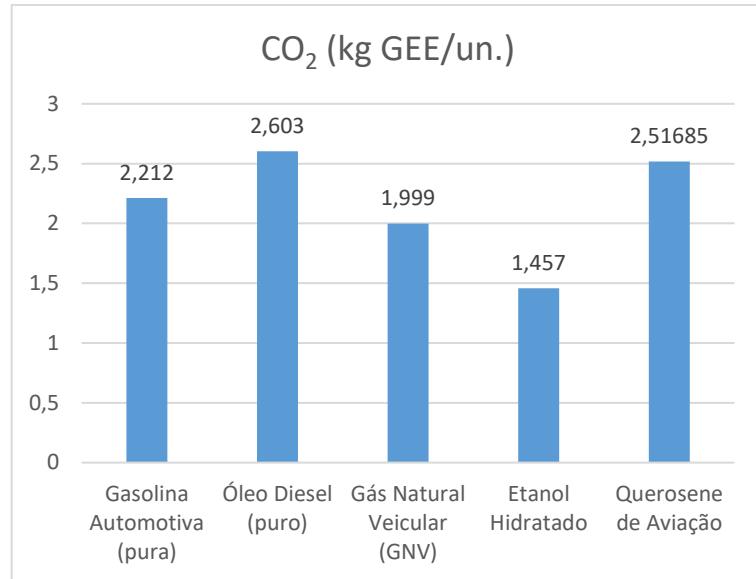


Figura 3.3: Emissões de CO₂ dos principais energéticos no setor de transportes. BEN, 2022

Já no setor industrial, que tem o segundo maior % no consumo de energia por setor no Brasil, a distribuição por energético é apresentada na Figura 3.4.

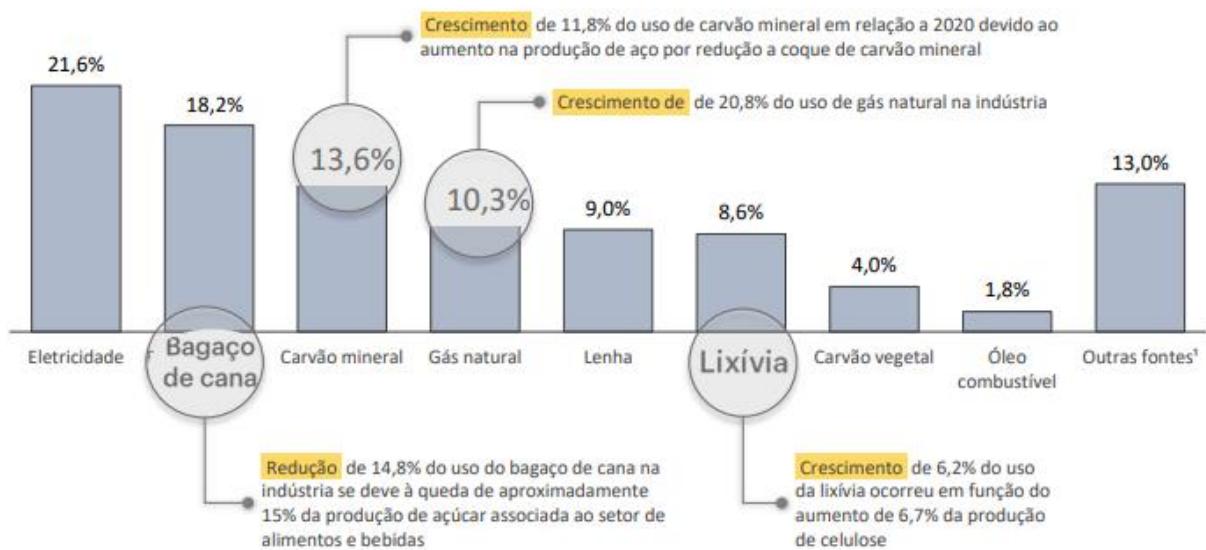


Figura 3.4: Participação por energético no setor industrial. BEN, 2022

O quadro comparativo de emissões de CO₂ na indústria é apresentado na Figura 12, onde o energético com maior representatividade no setor é o da eletricidade, conforme apresentado na Figura 3.5. Dessa forma, tem-se o gráfico abaixo com o comparativo das emissões de CO₂ considerando os principais energéticos do setor industrial, com exceção da eletricidade, que apresenta outros energéticos para sua geração (BEN, 2022).

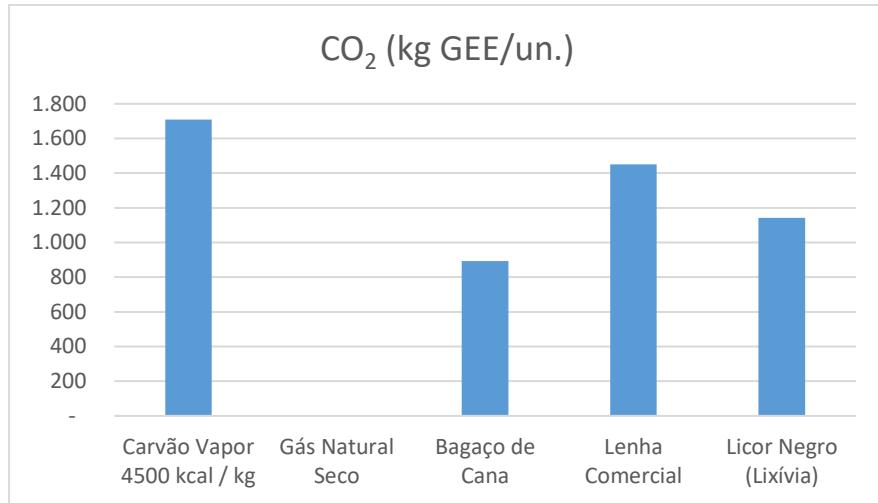


Figura 3.5: Emissões de CO₂ dos principais energéticos no setor industrial. BEN, 2022

O residencial é o terceiro setor mais representativo no cenário brasileiro, e também apresenta a eletricidade como principal fonte de energia, como ilustrado na Figura 3.6, que é usada na iluminação, refrigeração de ambientes e uso de eletrodomésticos em geral. Em seguida surge a lenha e o GLP, representando 26,1% e 22,9% respectivamente. Já o gás natural representa apenas 1,6% no setor residencial, sendo usado principalmente para a cocção. A comparação dos principais enérgicos do setor residencial pode ser observada na Figura 3.7.

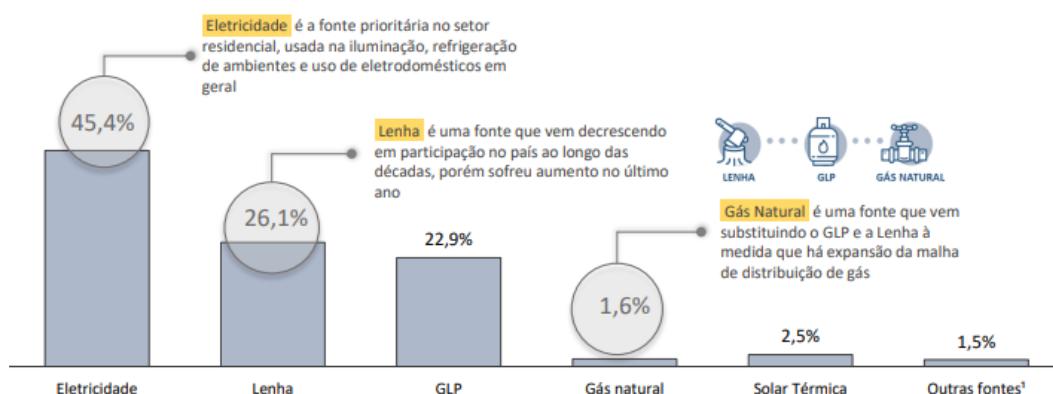


Figura 3.6: Participação por energético no setor residencial (BEN, 2022)

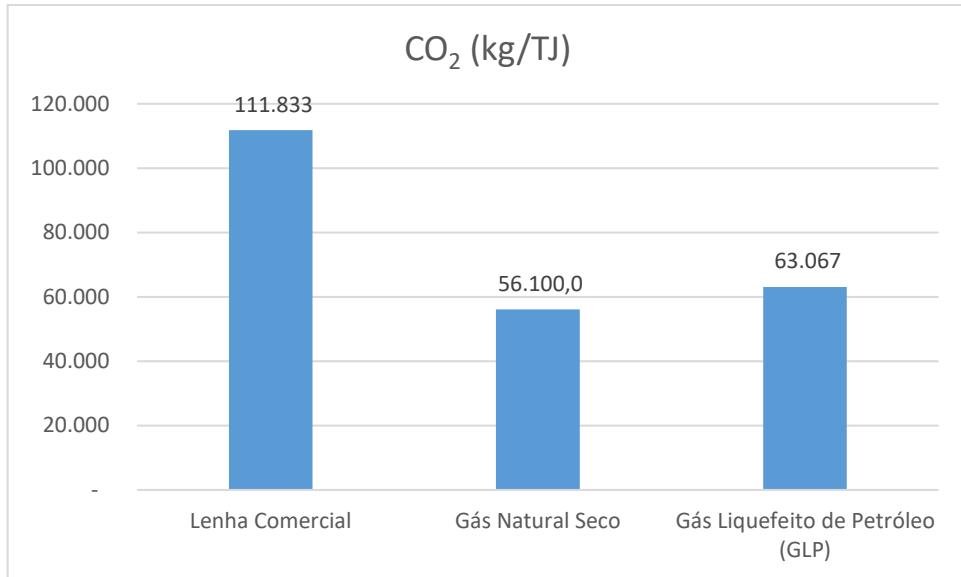


Figura 3.7: Emissões de CO₂ dos principais energéticos no setor de residencial. IPCC, 2006

Já a matriz elétrica brasileira, apresenta cenário muito positivo nas emissões de CO₂, uma vez que apresenta grande participação de fontes renovável, com predominância da fonte hidráulica, e aumentos recentes da participação das energias eólica e solar. Entretanto ainda há participação de energia proveniente de carvão, voltado para as usinas termoelétricas, que vêm sendo substituídas por usinas termoelétricas movidas a gás natural, o que explica o aumento do percentual de participação do mesmo, associado ainda com períodos climáticos que prejudicaram a produção de energia proveniente das hidroelétricas, demandando mais produção das temeoelétricas movidas a gás natural, cenário que é ilustrado na Figura 3.8, com o comparativo das participações por energéticos no setor elétrico entre 2020 e 2021.

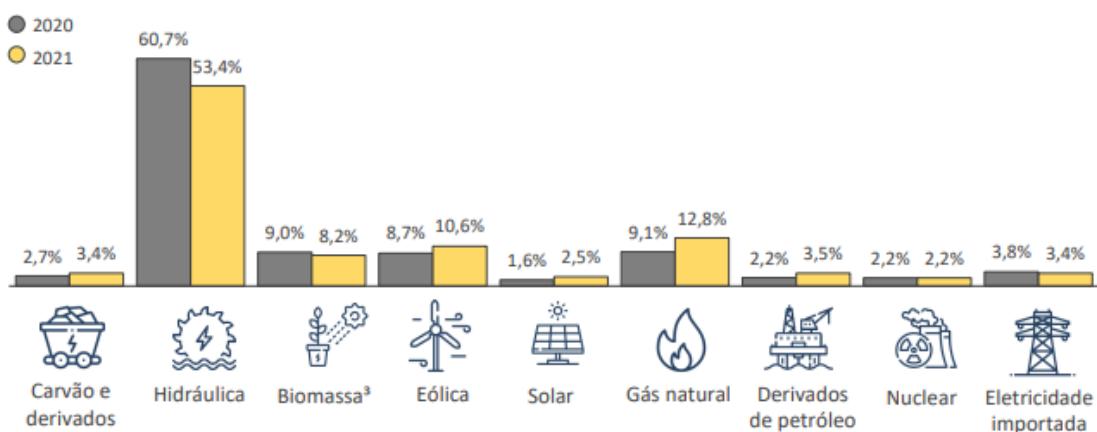


Figura 3.8: Participação por energético no setor elétrico, comparativo entre 2020 e 2021. BEN, 2022

Nesse cenário, a comparação entre os energéticos renováveis não se faz necessário, tendo em vista que são energias limpas. Observando apenas como oportunidade a substituição do carvão pelo gás natural, a diferença entre a emissão de CO₂ dos dois energéticos é apresentada na Figura 3.9.

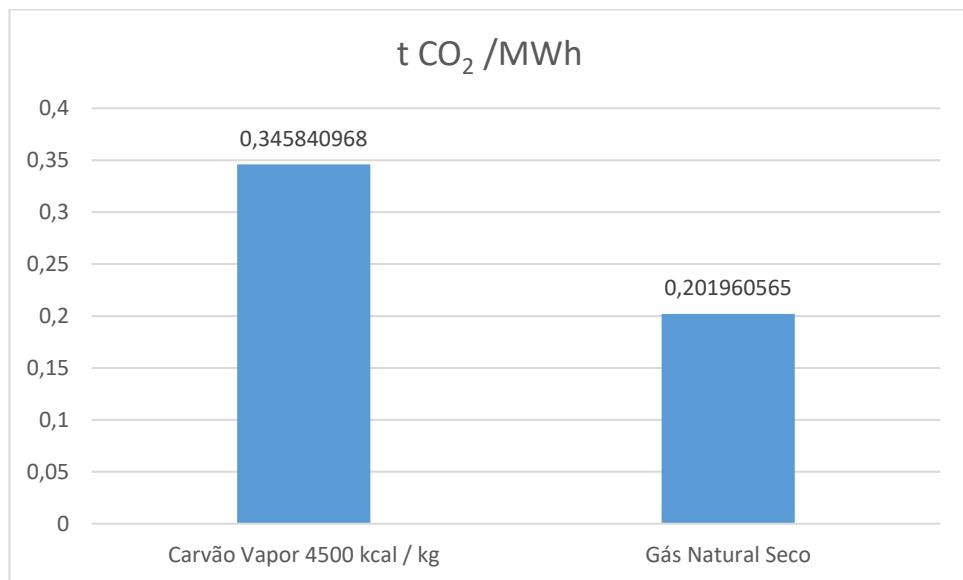


Figura 3.9: Emissões de CO₂ do carvão e gás natural para produção de energia. BEN, 2022

3.3. Ações para descarbonização e transição da matriz energética no Brasil.

Em 2015 o Brasil assinou o Acordo de Paris que, dentre outros itens, tem como objetivo manter a temperatura mundial abaixo do aumento médio de 1,5°C até o final do século 21. Ao Brasil foram atribuídas metas de redução de emissão dos GEE, chamadas de Contribuição Nacionalmente Determinada, que indicam que o país deve reduzir as suas emissões em 37% até 2025 e em 43% até 2030, em relação as emissões de 2005. Além disso, em 2021, o Brasil ainda se comprometeu a sua meta de redução para 50% até 2030 e alcançar emissões líquidas neutras até 2050, onde tudo que o país viria a emitir deveria ser compensado com fontes de captura de carbono, como plantio de florestas, recuperação de biomas ou outras tecnologias (BNDES, 2023).

Tendo em vista o acordo de Paris, onde a primeira meta foi estabelecida para ser alcançada em 2025 e dado a proximidade da data, as quantidades de emissão de carbono já deveriam estar se aproximando do valor estabelecido. Entretanto, de acordo com o BEN (2022), este não é o cenário observado nem para dados reais, nem para projeções, conforme ilustrado na Figura 3.10. O total de emissões de CO₂ em 2005 foi de 313,4 Mt CO₂, e para ser

alcançada a meta estabelecida, precisaríamos estar nos aproximando de 197,4 Mt CO₂, mas dados de 2021 apontam que foram emitidas 445,4 Mt CO₂. Já para atingir a meta estabelecida em 2030 seriam necessárias emissões de apenas 178,6 Mt CO₂, toda via as projeções apontam para emissões 529 Mt CO₂ em 2031, nos distanciando significativamente das metas estabelecidas no acordo de Paris.

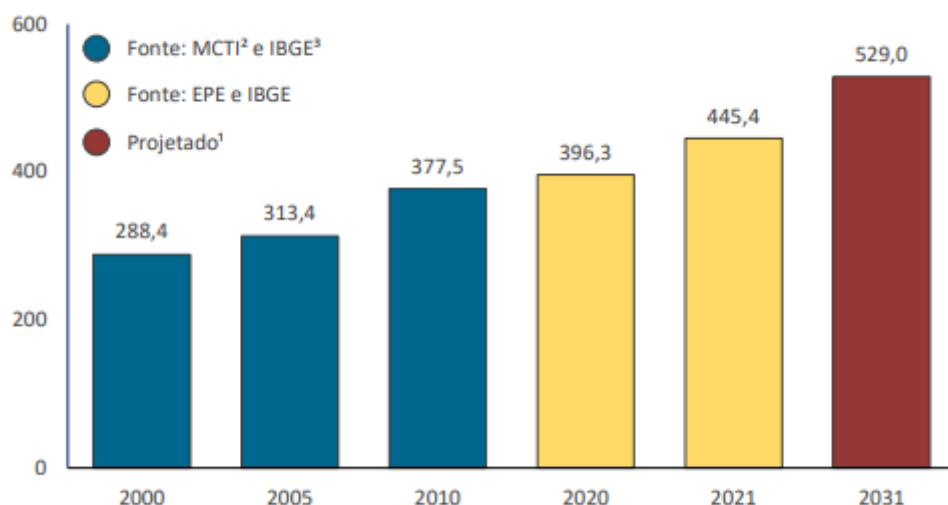


Figura 3.10: Evolução do total das emissões de CO₂ associadas a matriz energética. BEN, 2022

Após diversas revisões das metas de redução do país, em 2010, através do decreto 7.390 que instituiu a Política Nacional sobre Mudança do Clima, foram estabelecidos cinco planos setoriais para redução das emissões de CO₂, são elas:

- I – Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal – PPCDAm;
- II – Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado – PPCerrado;
- III – Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE;
- IV – Plano para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC); e
- V – Plano de Redução de Emissões da Siderurgia.

No Brasil o cenário do desmatamento tem participação importante no aumento das emissões de carbono na atmosfera, por isso dois dos planos foram direcionados para o controle do desmatamento. No que diz respeito ao cenário energético, foi definido o Plano Decenal de expansão da energia, que tem como objetivo o planejamento de longo prazo do setor energético do país e apresenta as principais ações do ponto de vista de política energética.

3.4. Proposição de cenários de redução de CO₂

As diretrizes para manutenção do aquecimento global dentro de 1,5°, segundo o IPCC (2021), indicam que o uso de carvão deveria diminuir 95% até 2050; o de petróleo, 60%; e o de gasolina, cerca de 45%. Nesse cenário as substituições deveriam ser feitas por energias renováveis. Entretanto, dado o cenário de desenvolvimento necessário para implantação das energias renováveis e a diferença entre os valores estabelecidos no acordo de Paris e o observado em 2021, existe um caminho ainda a ser percorrido para o Brasil alcançar esse cenário.

Neste estudo as diretrizes do IPCC serão usadas como referência para definição dos cenários a serem avaliados visando a redução da emissão de carbono, e avaliando o uso do gás natural como energético de transição. Tendo em vista os setores que mais consomem energia no país: transportes, industrial e residencial, serão avaliados os energéticos mais representativos de fontes não renováveis nesses setores, que seriam o óleo diesel e a gasolina presentes no setor de transportes, o carvão mineral presente no setor industrial e o GLP presente no setor residencial.

A Tabela 3.1 apresenta as quantidades de energia consumidas no Brasil por fonte produtora em 10³ tep (Tonelada equivalente de petróleo), e a partir desses valores é possível quantificar as emissões de carbono provenientes de cada energético, utilizando fatores de emissão estabelecidos, que serão explorados em seguida.

Tabela 3.1: Energia consumida por fonte no Brasil (BEN, 2022).

FONTES	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
GÁS NATURAL	18.112	18.508	18.674	18.202	18.220	18.475	19.543	16.360	14.619	16.136	
CARVÃO MINERAL	3.589	3.630	3.942	3.855	3.258	3.661	3.796	3.439	3.268	3.653	
LENHA	16.470	16.182	16.672	16.670	15.997	17.058	17.778	17.777	17.723	18.288	
BAGAÇO DE CANA	28.376	29.479	28.612	28.667	29.791	29.126	27.529	28.314	32.116	28.279	
PRIMÁRIAS	5.936	6.349	6.618	7.013	7.418	7.640	8.101	7.677	8.917	9.453	
BIODIESEL	2.069	2.172	2.526	2.985	2.945	3.313	4.174	4.564	4.974	5.239	
GÁS DE COQUERIA	1.430	1.387	1.387	1.336	1.320	1.404	1.449	1.321	1.236	1.440	
COQUE DE CARVÃO MINERAL	7.999	7.807	7.733	7.886	7.114	7.745	7.880	7.228	6.879	7.903	
ELETRICIDADE	42.861	44.391	45.800	45.128	44.838	45.413	46.303	47.503	47.102	49.090	
CARVÃO VEGETAL	4.598	4.161	4.142	4.101	3.529	3.652	3.831	3.944	3.956	3.867	
ÁLCOOL ETÍLICO	10.522	12.566	13.602	15.927	14.332	14.348	16.283	18.064	16.080	15.550	
ALCATRÃO	216	210	238	229	226	245	253	230	211	247	
SUB TOTAL	110.242	112.807	114.984	108.367	105.818	106.835	100.367	101.397	96.350	103.094	
DERIVADOS DE PETRÓLEO	43.976	46.472	47.230	44.941	43.197	43.296	42.744	43.321	42.950	46.300	
Óleo Diesel	3.970	4.043	3.976	3.495	3.452	3.121	2.464	2.300	2.385	2.470	
Óleo Combustível	24.512	24.451	25.740	23.306	24.225	24.856	21.595	21.485	20.166	22.137	
Gasolina	8.023	8.314	8.363	8.258	8.267	8.304	8.189	8.135	8.357	8.298	
Gás Liquefeito De Petróleo	7.424	6.565	6.195	6.802	6.277	7.129	6.217	6.759	4.609	5.550	
Nafta	3.784	3.623	3.661	3.615	3.310	3.301	3.392	3.320	1.899	2.520	
Querosene	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Gás Canalizado	11.153	11.546	11.724	11.219	10.174	10.521	9.429	9.606	9.116	9.199	
OUTRAS SECUNDÁRIAS DE PETRÓLEO	3.695	4.091	4.417	4.339	4.000	4.082	3.778	3.357	3.538	3.261	
Gás De Refinaria	5.582	5.658	5.640	5.124	4.519	4.326	4.167	4.233	4.272	4.274	
Coque Petróleo	1.875	1.797	1.667	1.756	1.656	2.113	1.484	2.015	1.305	1.663	
Out.En.Petróleo	7.400	7400	7.794	8.095	6.731	6.917	6.307	6.338	6.471	6.868	
Produtos Não Energéticos De Petróleo	TOTAL	252.420	259.649	264.929	260.367	254.805	258.914	257.286	257.819	253.432	262.237

Para o cálculo das emissões de carbono, serão utilizadas as referências de Fator de Emissão (FE) disponibilizado no informativo técnico nº 011/2022 da Empresa de Pesquisa

Energética (EPE), que tem como referência os relatórios do IPCC sobre metodologia para inventários nacionais de emissões e remoções de gases de efeito estufa.

O fator de emissão refere-se à quantidade de gases do efeito estufa liberados na atmosfera por unidade de atividade ou por unidade de produção de um determinado setor ou fonte, é uma medida que representa a quantidade de gases de efeito estufa emitidos durante a geração de energia, produção industrial, transporte, agricultura ou qualquer outra atividade humana que contribua para as emissões de gases que causam o aquecimento global, e são expressos geralmente em termos de massa de gases do efeito estufa emitidos por unidade de energia (como por exemplo: toneladas de dióxido de carbono - CO₂ - emitidas por megawatt-hora de eletricidade gerada) ou por unidade de produção (como por exemplo: toneladas de CO₂ emitidas por tonelada de cimento produzida).

Dessa forma, multiplicado o total de energia consumida por cada energético, indicado na tabela 3.2 pelo fator de emissão específico, disponível na Tabela 3.3, é possível quantificar a emissão de CO₂ gerada por cada combustível no período observado de um ano. Já para os gráficos apresentados adiante, será observada a redução das emissões de carbono tendo em vista a substituição dos combustíveis considerando os cenários propostos. Para o cálculo das emissões foi utilizado o modelo matemático apresentado na Equação 1.

$$\text{Emissões de carbono} = \text{Energia produzida por combustível} \times \text{Fator de emissão} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde,

$$\text{Emissões de carbono} = \text{Quantidade de carbono emitido para atmosfera em Kg de CO}_2$$

$$\text{Energia consumida por combustível}$$

$$= \text{Quantidade de energia consumida no ano de 2021 em } 10^3 \text{ tep}$$

$$\text{Fator de emissão} = \text{Quantidade de CO}_2 \text{ emitidos por unidade de energia em tCO}_2/\text{mil tep}$$

Tabela 3.2: Fatores de emissão por energético (IPCC, 2006 e MCTI, 2020)

Combustível	tCO₂/TJ	tCO₂/mil tep
ALCATRÃO	107.000	4.480
ÁLCOOL ANIDRO E HIDRATADO	0	0
CARVÃO METALÚRGICO	94.600	3.961
CARVÃO VAPOR	96.100	4.024
CARVÃO VEGETAL	0	0
COQUE DE CARVÃO MINERAL	107.000	4.480
COQUE DE PETRÓLEO	97.500	4.082
ELETRICIDADE	0	0
ENERGIA HIDRÁULICA	0	0
GÁS DE COQUERIA	44.400	1.859
GÁS DE REFINARIA	57.600	2.412
GÁS NATURAL	56.100	2.349
GASOLINA	69.300	2.901
GLP	63.100	2.642
LENHA	0	0
NAFTA	73.300	3.069
ÓLEO COMBUSTIVEL	77.400	3.241
ÓLEO DIESEL1	74.100	3.102
OUTRAS FONTES PRIMÁRIAS	0	0
OUTRAS SECUNDÁRIAS DE	73.300	3.069
PETRÓLEO	73.300	3.069
PRODUTOS DA CANA	0	0

Para os cenários, foram avaliadas três visões de futuro:

Tabela 3.3: Descrição de cenários. Fonte: elaborado pela autora

Cenários	1 – Pessimista	2 - Realista	3 - Desafiador
<i>Descrição</i>	Substituição do combustível analisado por gás natural puro	Substituição do combustível analisado por gás natural com mistura de biometano	Substituição do combustível analisado por gás natural com mistura de biometano
<i>Percentual de biometano no gás natural</i>	0%	5%	15%

- 1.1. Cenário 1 – Transição energética de combustíveis fósseis mais poluentes para combustíveis fósseis menos poluentes, considerando aqui o gás natural. Esse cenário seria o mais pessimista dos três propostos e que vem acontecendo de forma lenta e gradual, uma vez que se utiliza de tecnologias e infraestruturas já existentes, mas que não é o suficiente para alcançar as metas de redução de emissões de carbono necessárias para frear o aquecimento global.
- 1.2. Cenário 2 – Nessa segunda visão observa-se um cenário um pouco mais otimista, com inclusão discreta do biometano na rede de gás natural. Seria a situação onde os combustíveis fósseis mais poluentes e presentes na matriz energética são substituídos pelo gás natural em uma mistura onde 5% é proveniente do biometano. Este é um cenário que vem se desenhandando tendo em vista as políticas de ESG que vem sendo implementadas pelas empresas, e que retrata as iniciativas ainda discretas do setor de gás natural na procura de se manter competitivo em um momento de mudanças e procura por energias mais sustentáveis.
- 1.3. Cenário 3 – Este seria o cenário mais otimista e que se mostra realista, tendo em vista iniciativas já observadas no setor, inclusive no Brasil. Este cenário refere-se à substituição dos combustíveis fósseis mais poluentes pelo gás natural, em mistura onde 15% é proveniente do biometano. Neste cenário toma-se como exemplo a usina de biometano de Caucaia-CE, onde 15% do gás distribuído pela concessionária local é proveniente da usina de biometano do aterro da cidade de Caucaia, mostrando que apesar de desafiador é um cenário já alcançado em uma localidade brasileira, e que se mostra até mais avançado em relação a outros países mais desenvolvidos.

São avaliados os cenários considerando a substituição do energético de origem fóssil com foco em 50% e 100% de substituição, tendo em vista que por conta de impedimentos tecnológicos nem sempre é possível a substituição total do combustível, entretanto, já é possível observar benefícios significativos com a substituição parcial de 50%.

A escolha para os cenários de adição de biometano à rede de substituição estão relacionados à principal iniciativa de sucesso observada no Brasil, o uso do biometano proveniente do aterro de Caucáia -CE, onde a sua produção substitui 15% do gás distribuído pela concessionária local. Entretanto, o estado o Ceará não é o maior distribuidor de gás natural do Brasil, dessa forma, o volume de biometano para replicar esse mesmo cenário em outros estados pode estar um pouco distante da realidade, sendo necessário valores consideráveis de investimentos. Por isso, em uma perspectiva de curto/médio prazo,

essencial para frear as mudanças climáticas, entende-se o que acontece no estado do Ceará como cenário otimista a ser alcançado em outras localidades.

Os cálculos para estimativa de redução das emissões de CO₂ foram realizados de acordo com a substituição de cada combustível de acordo com os cenários propostos, conforme apresentado a seguir. Será apresentado um breve resumo qualitativo sobre o combustível a ser substituído, seguido pela representação gráfica dos resultados obtidos pelos cálculos realizados.

3.4.1 Gasolina

A gasolina é um dos combustíveis fósseis mais utilizados para a propulsão de veículos movidos a motor de combustão interna. É composta principalmente por hidrocarbonetos derivados do petróleo bruto, e sua queima libera dióxido de carbono (CO₂), um dos principais gases de efeito estufa.

Quando a gasolina é queimada no motor de um veículo, ocorre a reação química entre os hidrocarbonetos presentes no combustível e o oxigênio do ar. Essa reação produz dióxido de carbono, água e outras emissões poluentes, como óxidos de nitrogênio (NOx) e partículas de matéria. Devido ao seu alto teor de carbono, a gasolina é responsável por uma parcela significativa das emissões de gases de efeito estufa do setor de transporte (EPE, 2007).

O consumo da gasolina no Brasil se mostrou relativamente constante se observado o histórico desde 2011 ilustrado na Tabela 1, com variação no ano de 2020, mas que pode estar relacionado com a pandemia do COVID19 e a necessidade de lockdown que restringiu o uso de veículos de pequeno porte.

No ano de 2021, a gasolina foi responsável pela geração de $22,3 \times 10^3$ tep que por sua vez gerou $6,42 \times 10^{13}$ Kg CO₂ que foram liberados na atmosfera. Em um cenário de transição energética, se 50% da energia produzida por gasolina for gerada pelo gás natural, o total de emissões seria reduzido em $5,81 \times 10^{13}$, representando uma redução de 10% do total de emissões de carbono, ou $6,12 \times 10^{12}$ Kg de CO₂. Em um cenário de 100% de substituição, as emissões de carbono seriam reduzidas em 19%. A representação da substituição da gasolina por gás natural pode ser observada na Figura 3.11.

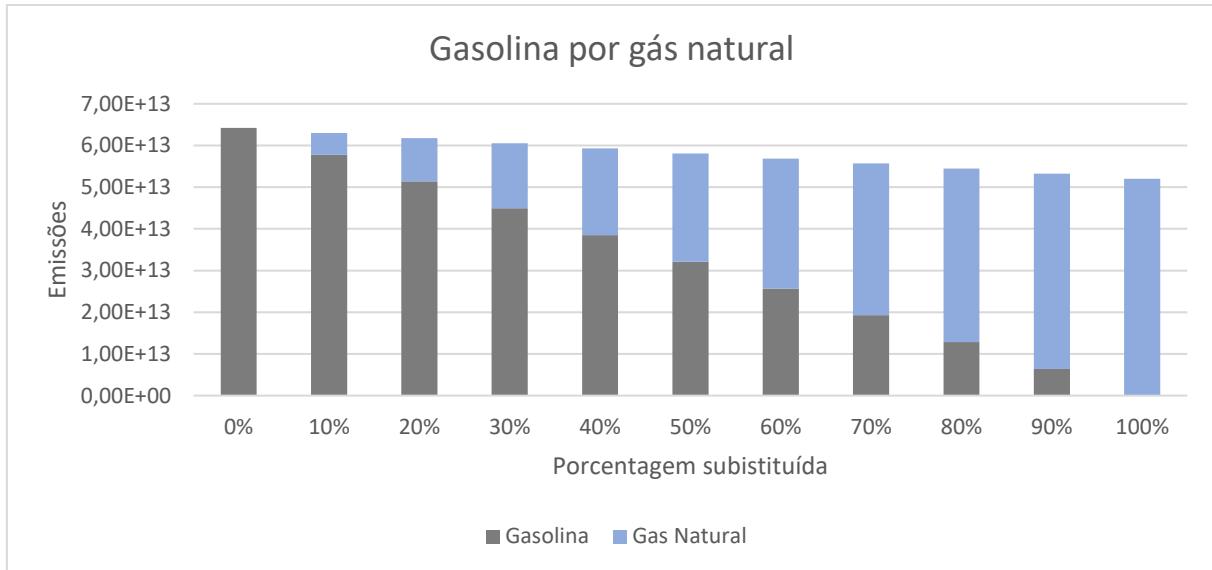


Figura 3.11: Cenário de substituição da gasolina por gás natural. Fonte: elaborado pela autora

Já no cenário com inclusão de 5% de biometano na mistura de gás natural, a redução das emissões de CO₂ são mais representativas, considerando a substituição de 50% da energia gerada pela gasolina passando a ser produzida pela mistura de gás natural e biometano, a redução é de 12%, ou 7,42E+12 Kg de CO₂ que deixam de ser emitidos na atmosfera. Para a substituição total da gasolina por gás natural com 5% de biometano a redução pode chegar a 23%, esse cenário é ilustrado na Figura 3.12, a seguir.

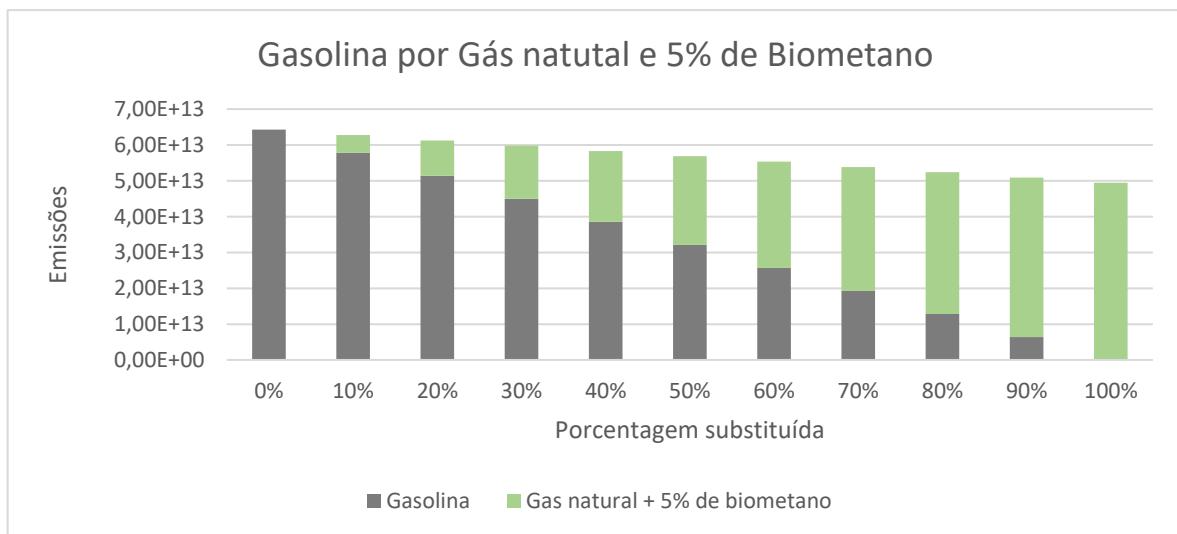


Figura 3.12: Cenário de substituição da gasolina por gás natural com 5% de biometano. Fonte: elaborado pela autora.

No cenário mais positivo, ilustrado na Figura 3.13, onde 15% do gás natural distribuído é composto por biometano, podem ser reduzidas 1,00E+13 Kg de CO₂ na substituição de 50% gasolina pela mistura citada, o que representa redução de 14% em relação ao total gerado só pela gasolina, podendo chegar a 31% se a substituição for de 100%.

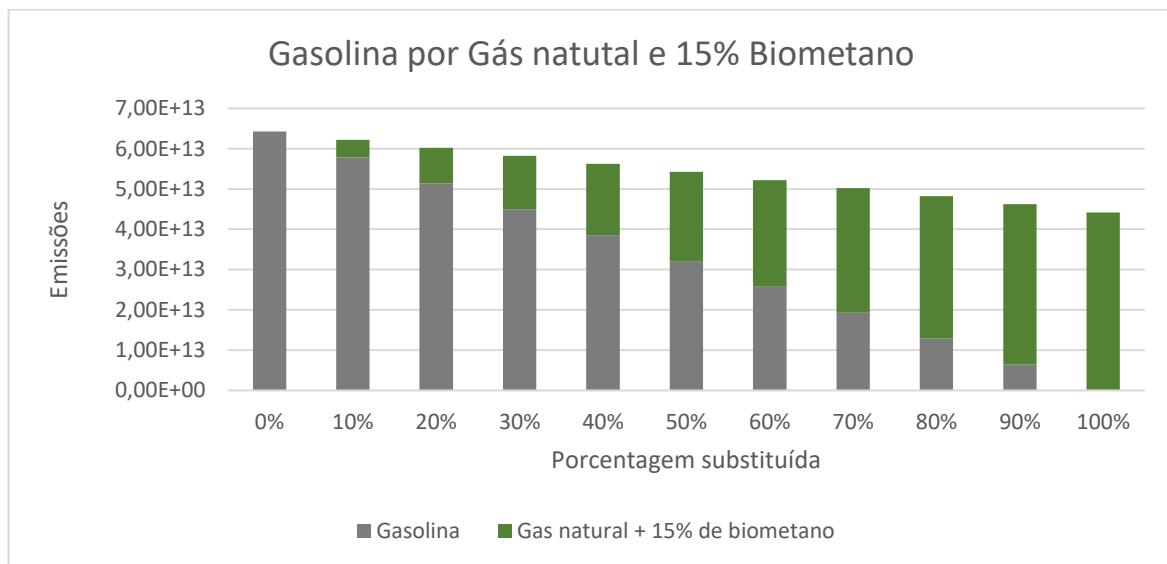


Figura 3.13: Cenário de substituição da gasolina por gás natural com 15% de biometano. Fonte: elaborado pela autora.

3.4.2 Óleo Diesel

O óleo diesel é um combustível fóssil amplamente utilizado no setor de transporte, especialmente em veículos pesados, como caminhões, ônibus e trens. Ele é derivado do petróleo bruto e é composto principalmente por hidrocarbonetos. Assim como a gasolina, a queima do óleo diesel libera dióxido de carbono (CO₂), um dos principais gases de efeito estufa. Durante a combustão do diesel nos motores de combustão interna, ocorre a reação entre os hidrocarbonetos e o oxigênio do ar, resultando na emissão de CO₂, bem como de óxidos de nitrogênio (NOx) e partículas poluentes.

Além das emissões de CO₂, o óleo diesel também é conhecido por suas altas emissões de partículas de matéria e óxidos de nitrogênio. Essas emissões têm impactos negativos na qualidade do ar, podendo causar problemas respiratórios, poluição atmosférica e chuva ácida. Observando o uso do Óleo Diesel nos últimos anos, percebe-se um aumento do uso desse combustível em 2021, sendo o ano com mais uso desde 2014, cenário vai na contramão do que é necessário para reduzir o aquecimento global. (IBP, 2023)

É importante destacar a iniciativa de desenvolvimento dos biocombustíveis, como o biodiesel, que podem ser utilizados como substitutos parciais ou totais do óleo diesel convencional. O biodiesel é produzido a partir de fontes renováveis, como óleos vegetais ou gorduras animais, e tem uma pegada de carbono menor em comparação com o diesel de origem fóssil. (EPE, 2007).

Segundo DeltaCO₂ & CENA (2013), a redução das emissões de GEE do biodiesel produzido a partir do óleo de soja nos estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul é de aproximadamente 70% em relação ao parâmetro de emissões do diesel fóssil europeu. O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) aprovou resolução em março de 2023 que estabelece em 12% o teor de mistura obrigatória do biodiesel no óleo diesel fóssil, a partir do mês de abril, e o aumento para 15% de forma progressiva até 2026. Portanto, tendo em vista a adição de biodiesel definida pelo governo, a mistura de diesel somado a biodiesel distribuído no Brasil emite 92% de GEE se comparado ao diesel puro, e essa relação será usada para comparação.

Tendo em vista que o potencial polidor do óleo diesel é maior que o da gasolina os cenários de substituição pelo gás natural também são mais representativos. Começando pelo cenário onde o óleo diesel é substituído apenas por gás natural, a redução já se equipara com o cenário intermediário da gasolina, com redução de 14% considerando 50% da energia produzida pelo óleo diesel passando a ser produzida pelo gás natural, representando $1,17 \times 10^{13}$ Kg de CO₂, como pode ser visto na Figura 3.14. A redução pode chegar a 18% se a substituição for de 100% do Óleo Diesel.

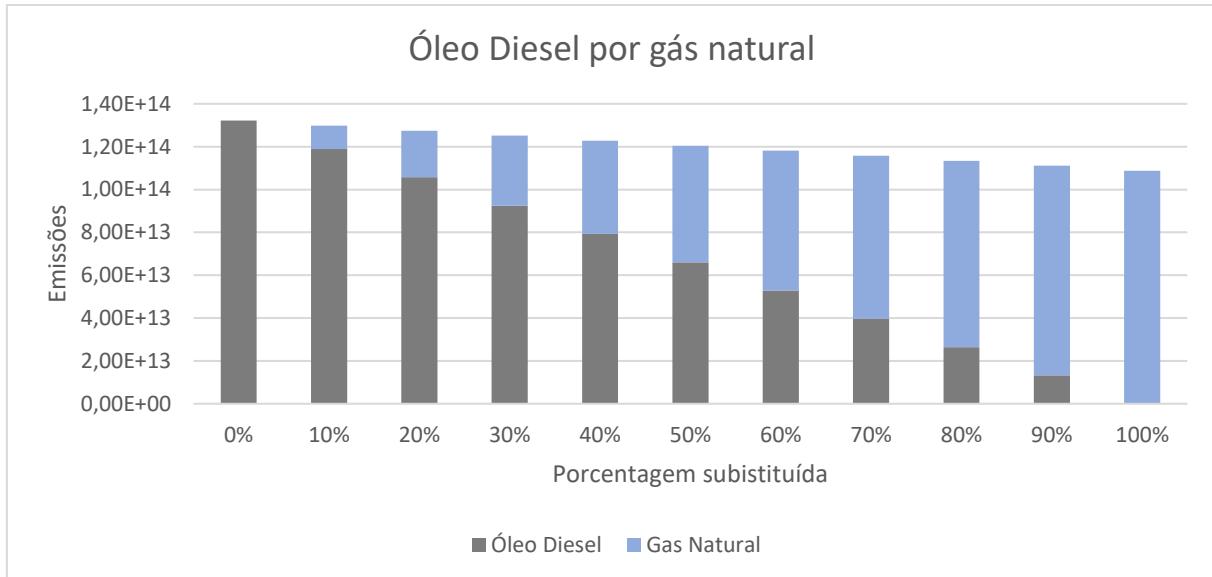


Figura 3.14: Substituição do Óleo Diesel por gás natural. Fonte: elaborado pela autora.

No cenário onde a energia produzida pelo óleo diesel passaria a ser produzida pela mistura de 95% de gás natural e 5% de biometano, a redução considerando 50% de substituição é de 16%, se equiparando ao cenário otimista da gasolina, e podendo chegar a 28% se a substituição for de 100%, como visto na Figura 3.15.

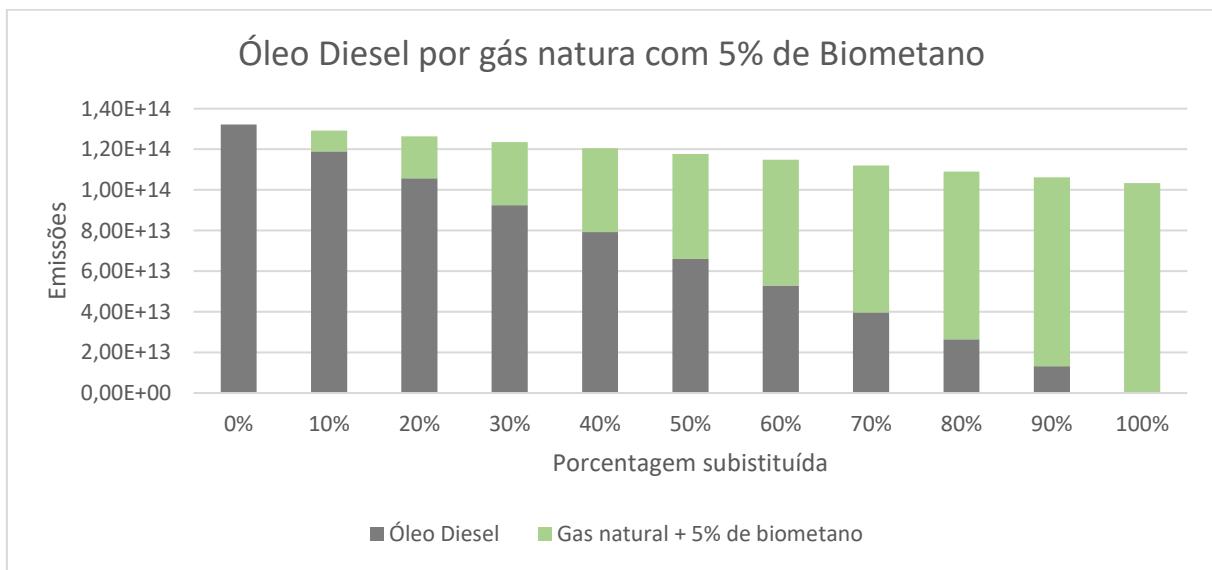


Figura 3.15: Substituição do Óleo Diesel por gás natural e 5% de biometano. Fonte: elaborado pela autora.

Já no cenário otimista, ilustrado na Figura 3.16, onde há a mistura de 85% de gás natural e 15% de biometano substituindo o óleo diesel na produção de energia a redução das emissões de CO₂ são de 22%, ou 1,99E+13 Kg de CO₂ que deixam de ser emitidos na

atmosfera. Caso a substituição seja de 50% e chega a 36% se todo o óleo diesel for substituído pela mistura, como observado no gráfico a seguir.

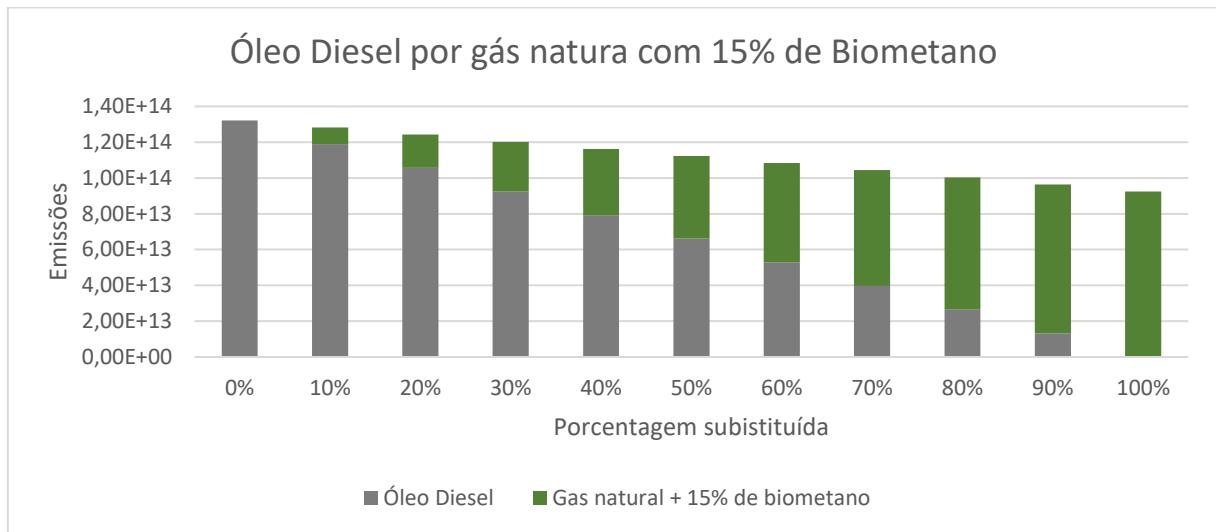


Figura 3.16: Substituição do Óleo Diesel por gás natural e 15% de biometano. Fonte: elaborado pela autora.

3.4.3 Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)

O GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), também conhecido como gás de cozinha, é uma mistura de hidrocarbonetos leves derivados do petróleo ou do processamento de gás natural. Ele é composto principalmente por propano e butano.

Em termos de emissões de gases de efeito estufa, o GLP é considerado uma opção mais limpa em comparação com a gasolina e o óleo diesel. Quando queimado, o GLP libera dióxido de carbono (CO₂), assim como os outros combustíveis fósseis, mas em menor quantidade. Isso se deve ao fato de que o GLP apresenta uma composição química mais simplificada e uma relação carbono-hidrogênio mais otimizada, o que conduz a uma combustão mais eficaz e a uma emissão reduzida de CO₂ por unidade de energia produzida.

Além disso, o GLP tem uma vantagem adicional em relação às emissões de material particulado e óxidos de nitrogênio (NOx). Ele produz menos partículas e emite uma quantidade significativamente menor de NOx em comparação com os combustíveis líquidos, como a gasolina e o diesel. Isso contribui para uma melhor qualidade do ar, reduzindo os impactos negativos na saúde humana e no meio ambiente (EPE, 2007).

Entretanto, embora o impacto do GLP seja menor do que outros combustíveis fósseis, a queima de GLP ainda contribui para o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera. O uso desse energético tem se mostrado constante com o passar dos anos no Brasil e está associado ao uso residencial, principalmente para a cocção de alimentos.

Na Figura 3.17 é ilustrado o cenário de substituição do GLP por gás natural, e percebe-se que a redução não é tão expressiva quanto observado no caso do óleo diesel. Quando a substituição é de 50% o percentual de redução alcança 6%, ou $1,21 \times 10^{12}$ kg de CO₂, podendo alcançar 12% se substituído 100% do GLP por gás natural.

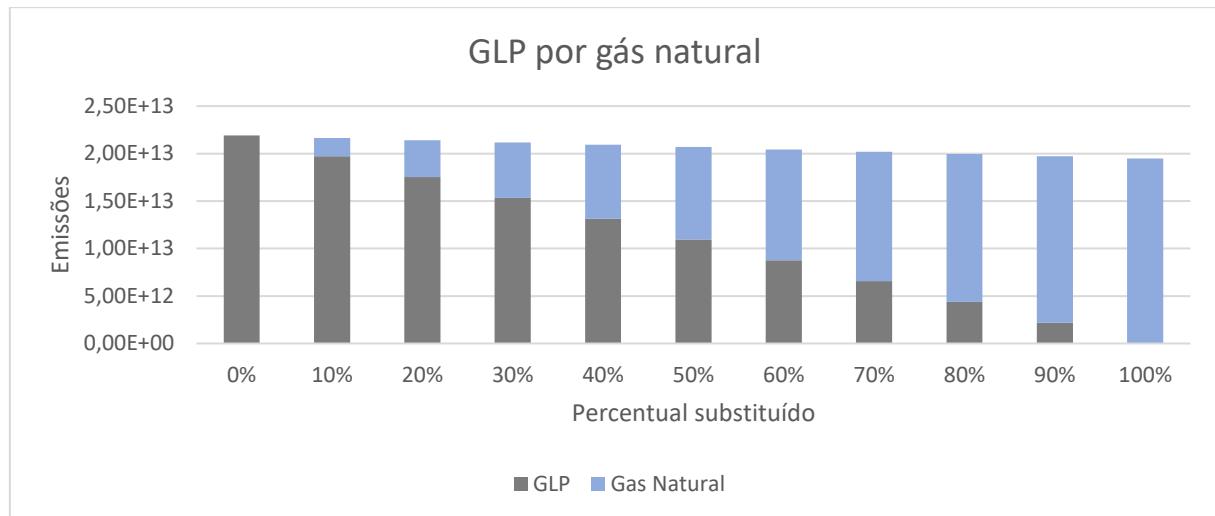


Figura 3.17: Substituição do GLP por gás natural. Fonte: elaborado pela autora.

No cenário intermediário, apresentado na Figura 3.18 onde é ilustrada a substituição do GLP por gás natural com 5% de biometano, o cenário é ligeiramente melhor, alcançando 8% de redução de emissões de carbono para substituição de 50% do GLP, e 18% para substituição de 100%, se aproximando do cenário pessimista observado para a gasolina.

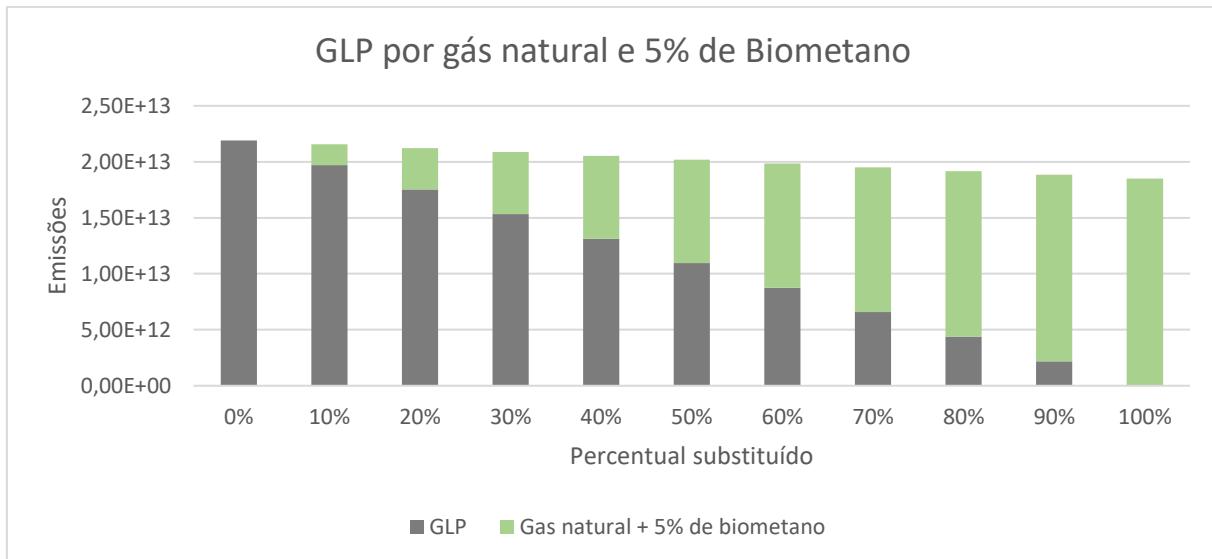


Figura 3.18: Substituição do GLP por gás natural e 5% de biometano. Fonte: elaborado pela autora.

Já considerando o cenário mais otimista, onde a substituição do GLP é pela mistura de gás natural e 15% de biometano, o cenário é mais promissor onde a redução de CO₂ é de 14% para a substituição de 50% do GLP, chegando a 32% quando a substituição é total, como ilustrado na Figura 3.19.

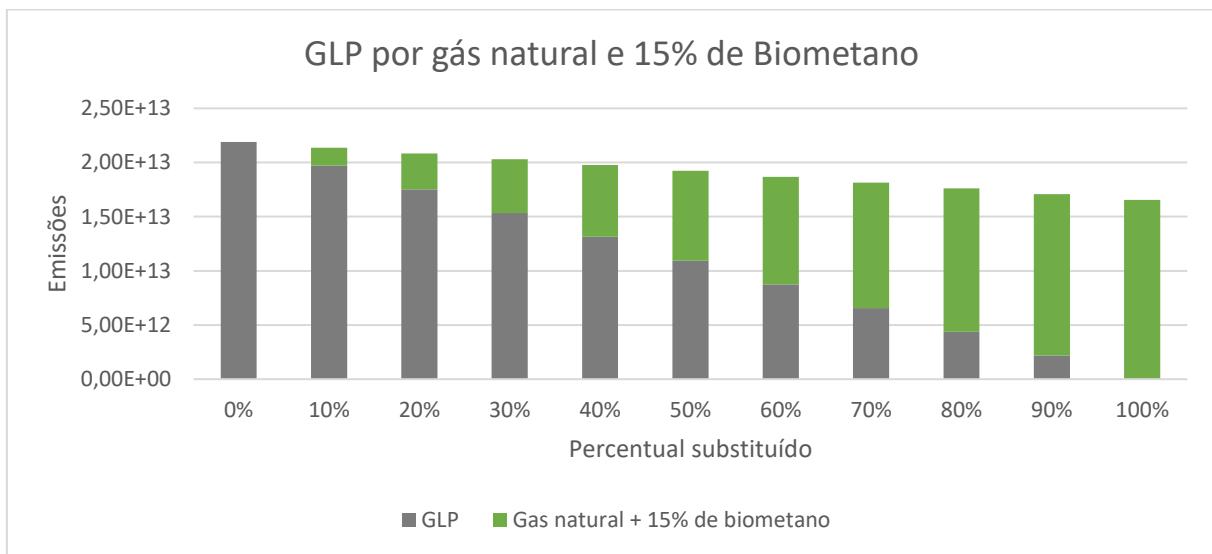


Figura 3.19: Substituição do GLP por gás natural e 15% de biometano. Fonte: elaborado pela autora.

3.4.4 Coque de carvão Mineral

O carvão mineral é uma fonte de energia fóssil amplamente utilizada na geração de eletricidade e na produção industrial em todo o mundo. Ele é formado a partir da decomposição de matéria vegetal ao longo de milhões de anos.

O coque de carvão mineral é um produto resultante do processo de carbonização do carvão, no qual o carvão é aquecido em altas temperaturas na ausência de ar. Esse processo produz um material sólido, poroso e resistente, com alto teor de carbono e baixo teor de impurezas.

No entanto, em relação ao cenário das emissões de carbono, o coque de carvão mineral é um dos principais contribuintes para a emissão de gases de efeito estufa. Durante a carbonização, ocorre a liberação de dióxido de carbono (CO_2) e outros gases, além da formação de subprodutos como o metano (CH_4) e monóxido de carbono (CO). Essas emissões têm um impacto significativo no aumento do efeito estufa e no aquecimento global.

Devido ao seu alto teor de carbono e às emissões poluentes associados, a utilização do carvão mineral como fonte de energia tem sido cada vez mais questionada e substituída por alternativas mais limpas e sustentáveis, como as energias renováveis (solar, eólica, hidrelétrica) e o gás natural.

Embora tecnologias de controle de emissões tenham sido desenvolvidas para reduzir os poluentes liberados pela queima de carvão mineral, essas tecnologias podem não ser totalmente eficientes e podem aumentar os custos e a complexidade das usinas termelétricas.

Para desenvolvimento nesse estudo será feito o comparativo para o coque de carvão mineral, uma vez que seu uso é mais amplo no Brasil, se comparado o próprio carvão mineral.

Iniciando pelo cenário 1, onde o coque de carvão mineral é substituído pelo gás natural apenas, ilustrado na Figura 3.20, a redução de emissão de CO_2 na atmosfera já se mostra bem representativa, onde deixariam de ser emitidos $8,42\text{E+12}$ Kg de CO_2 anualmente, ou 24% inferior do que usando apenas o Coque de Carvão natural. Se a substituição for total, a redução alcança 48%.

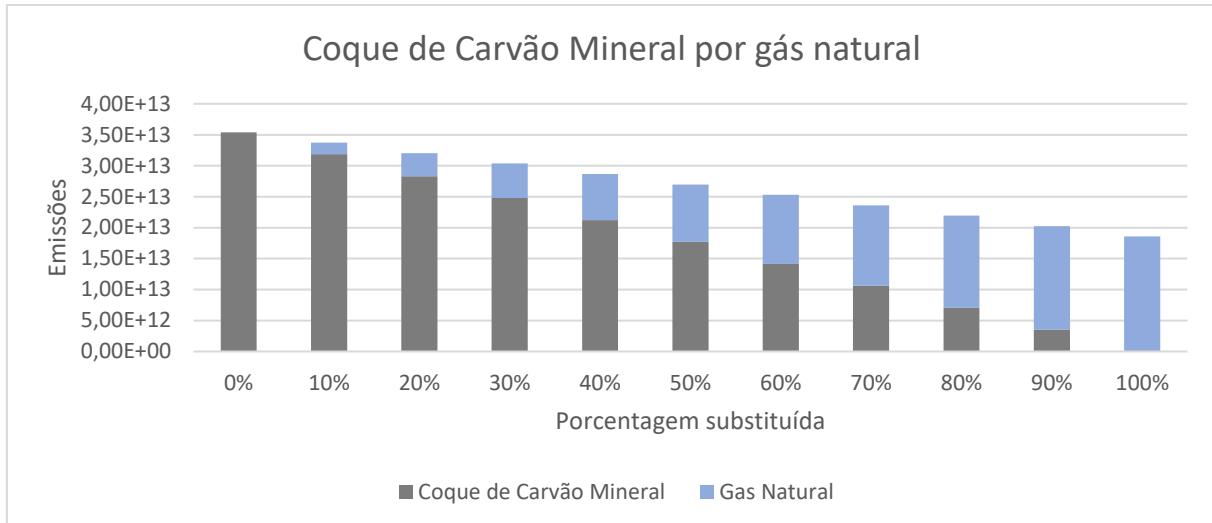


Figura 3.20: Substituição do Carvão Mineral por gás natural. Fonte: elaborado pela autora.

No cenário intermediário, onde há 5% de biometano na mistura de gás natural, a evolução da emissão de CO₂ são observadas na Figura 28, a redução de emissão de CO₂ na atmosfera é de 8,89E+12 Kg de CO₂ anualmente, ou 25% inferior do que usando apenas o Coque de Carvão natural, e no cenário de substituição total, a redução chega aos 50%.

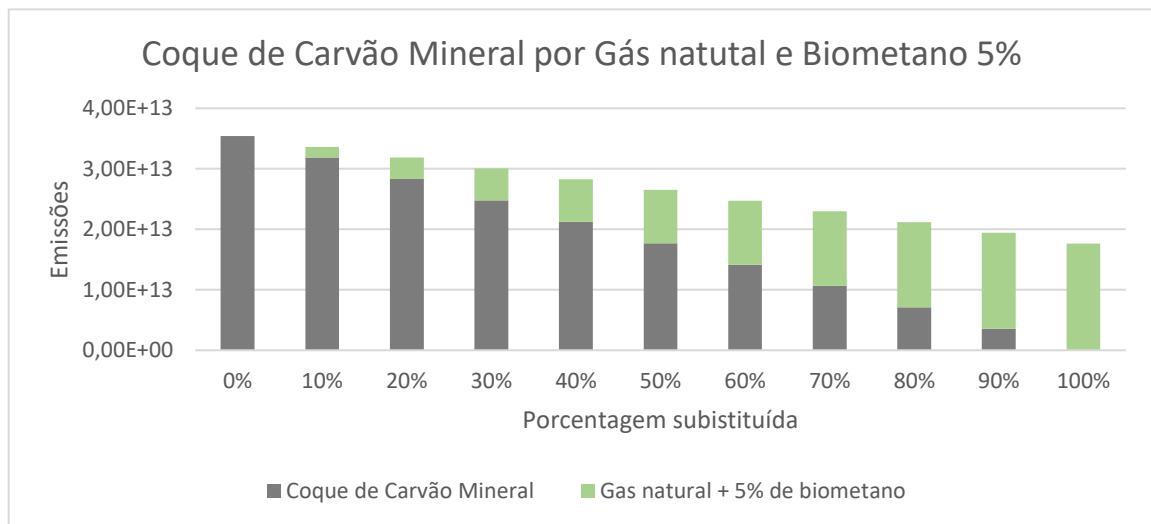


Figura 3.21: Substituição do Carvão Mineral por gás natural e 5% de biometano. Fonte: elaborado pela autora.

Finalizando a comparação de cenários está a situação mais otimista para a substituição do coque de carvão natural por mistura de 15% de biometano no gás natural, projetando uma redução de redução de emissão de CO₂ na atmosfera é de 9,81E+12Kg de CO₂ anualmente,

ou 28% inferior do que usando apenas o Coque de Carvão natural, e no cenário de substituição total, a redução é mais da metade que o cenário inicial, 55% de redução.

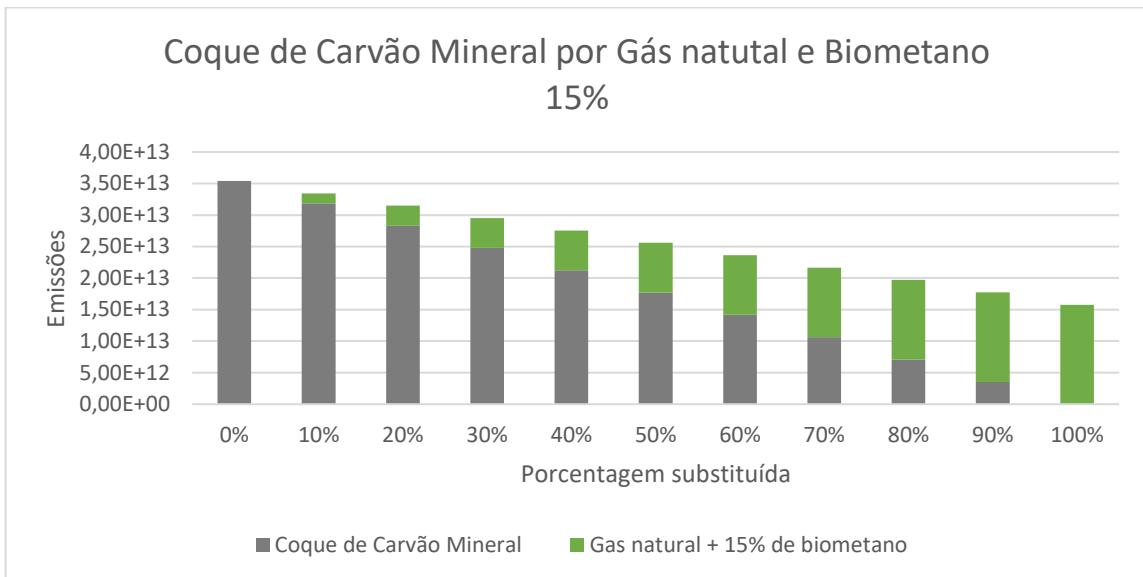


Figura 3.22: Substituição do Carvão Mineral por gás natural e 15% de biometano. Fonte: elaborado pela autora.

3.5 Comparativo de redução de CH₄ e NO_x e N₂O

Apesar do potencial expressivo do CO₂ no aquecimento global, existem outros gases que também apresentam potencial poluidor e que são importantes para a análise comparativa dos combustíveis já citados anteriormente, pois cada gás do efeito estufa influência de maneira diferente o sistema climático, já que possuem sistemas de remoção variados resultando em tempos de permanência na atmosfera diferentes.

Para comparação mais adequada dos gases, foi definida a unidade tCO₂eq (toneladas de dióxido de carbono equivalentes), e para que as emissões dos GEE sejam transformadas na unidade padrão é usado o Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential, GWP), que é um indicador da capacidade do gás em contribuir com o aquecimento global em um determinado intervalo de tempo (IPCC, 2007).

O potencial de aquecimento global (GWP - Global Warming Potential) desempenha um papel importante, pois leva em conta tanto o tempo de vida quanto a capacidade do gás de absorver calor em relação ao CO₂. Isso permite uma comparação direta do impacto de diferentes gases de efeito estufa no aquecimento global. O GWP depende de três fatores: Tempo de vida do GEE na atmosfera, o seu forçamento radioativo e o intervalo de tempo da análise. Na Figura 3.23 são apresentados os GWP's para alguns dos principais gases do efeito estufa, considerando diferentes intervalos de tempo.

Tabela 3.4: GWP dos principais GEE.(Miranda, 2013)

Gás	Fórmula Química	Forçamento radiativo (W/m ²)	Tempo de vida (anos)	GWP		
				20 anos	100 anos	500 anos
Dióxido de carbono	CO ₂	1,66	*	1	1	1
Metano	CH ₄	0,48	12	72	25	7,6
Óxido nitroso	N ₂ O	0,16	114	289	298	153
HFC-23	CHF ₃	0,0033	270	12.000	14.800	12.200
Tetrafluorometano	CF ₄	0,0034	50.000	5.210	7.390	11.200
Hexafluoreto de enxofre	SF ₆	0,0029	3.200	16.300	22.800	32.600

O dióxido de carbono, como explanado nos tópicos anteriores, tem impacto importante no aquecimento global. Entretanto, existem outros gases que também tem importância significativa, como é o caso do metano e do óxido nitroso. O CH₄ e o N₂O possuem tempos de vida maiores que o dióxido de carbono, que se refere à quantidade de tempo que um gás específico permanece na atmosfera antes de ser removido por processos naturais. O metano permanece na atmosfera por cerca de 12 anos, enquanto o óxido nitroso pode durar até 114 anos. No entanto, embora esses gases tenham tempos de vida mais curtos quando comparados a outros gases (conforme Figura 3.23), eles são mais eficientes em absorver calor e contribuem mais intensamente para o aquecimento global em uma escala de tempo de décadas.

Além disso, existem gases de efeito estufa com períodos de vida ainda mais prolongados, como os hidrofluorocarbonetos (HFCs) e o hexafluoreto de enxofre (SF₆), que são amplamente empregados em sistemas de refrigeração, isolamento e eletrônicos. Esses gases têm a capacidade de persistir na atmosfera por muitas décadas, porém, possuem um potencial de aquecimento global muito mais elevado por unidade de massa do que o dióxido de carbono.

Através de dados disponibilizados pelo Programa Brasileiro GHG Protocol, é possível comparar os fatores de emissão dos energéticos analisados anteriormente (gás natural, coque de carvão mineral, Gás liquefeito de Petróleo, Gasolina e óleo diesel), como segue na figura 3.24 a seguir.

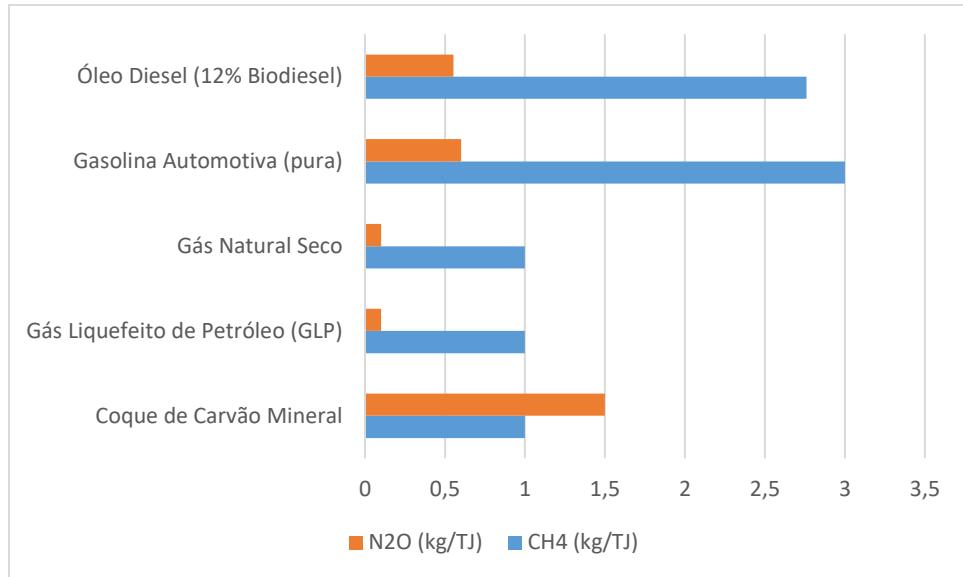


Figura 3.23: Fatores de emissão de N₂O e CH₄. (BEN, 2022)

É importante destacar esses dois gases por conta dos seus altos potenciais danosos no cenário do aquecimento global e porque são gases gerados na produção de energia, diferente dos hidrofluorocarbonetos (HFCs) e o hexafluoreto de enxofre (SF₆), que são emitidos em outras atividades.

No quadro é possível observar que o Gás Natural e o GLP são os dois energéticos que apresentam menores fatores de emissão de metano e óxido nitroso. A gasolina apresenta valores equiparados ao do óleo diesel porque está sendo representada como pura, mas é sabido que a legislação Brasileira permite um teor de álcool de até 27% na gasolina vendida no país, que também tem reflexo nos fatores de emissão.

4 Considerações finais

O mundo está ciente da necessidade de redução dos gases do efeito estufa. Este é um tema urgente e necessário à vida humana, e é sabido que reduzir as emissões implica em repensar a matriz energética atual, tendo em vista a demanda crescente por energia em diversos setores.

Anos se passaram desde as definições de metas de redução de emissões estabelecidas nas convenções internacionais, pouco se tem feito tanto no Brasil como no mundo para que a transição energética aconteça de forma efetiva. Boa parte da energia proveniente de fontes

renováveis vem para suprir o aumento da demanda e não necessariamente para substituir as energias mais poluentes usadas atualmente.

Nesse cenário o gás natural surge como alternativa energética de transição, tendo em vista que o mesmo apresenta emissões de carbono inferiores a outros combustíveis fósseis, como pode ser observado nas Figuras 4.1 e 4.2, que traz o resumo das análises feitas neste estudo. Na comparação considerando as emissões de metano e óxido nitroso, que apresentam grande potencial danoso no cenário do aquecimento global, o GN também se mostra menos danoso na comparação a outros combustíveis fósseis indicados nesse estudo. Além disso, investir na malha de distribuição do gás natural viabiliza, em um cenário a médio prazo, a distribuição do biometano que é um energético renovável e que pode ser uma alternativa definitiva para a redução de emissões de carbono.

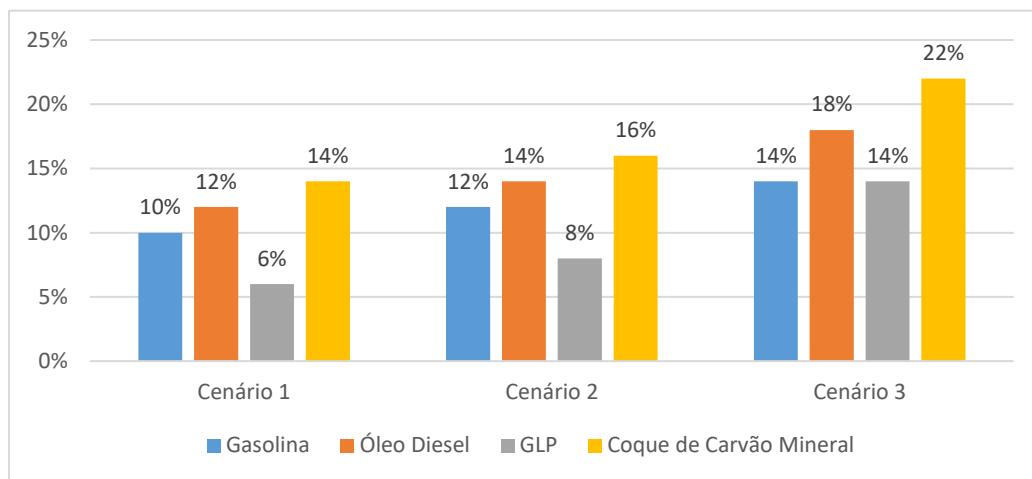


Figura 4.1: Percentuais de redução de emissões de carbono considerando 50% de substituição do energético. Fonte: elaborado pela autora

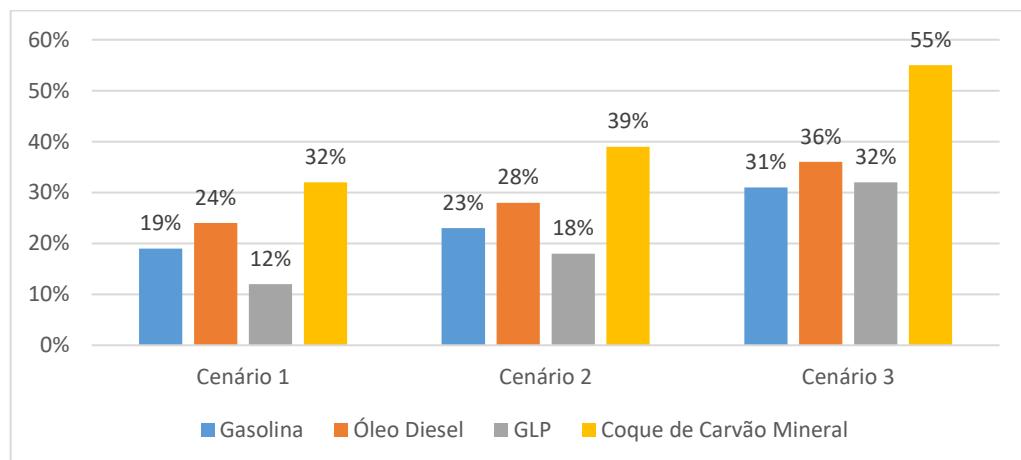


Figura 4.1: Percentuais de redução de emissões de carbono considerando 100% de substituição do energético. Fonte: elaborado pela autora

O Brasil possui um potencial de produção de biometano importante, tendo em vista a produção mundialmente relevante do setor sucroalcoleiro, alimentício e da grande população residente, que reflete nos números relacionados à saneamento, representando os grandes setores produtores de biometano. As quantidades desperdiçadas são relevantes, a indústria de produção está preparada para atender com as tecnologias necessárias, e a malha de distribuição existente pode ser usada como meio de viabilizar o escoamento da produção, sendo necessários investimento no setor para que o cenário possa se concretizar.

Dessa forma, este estudo ressalta a necessidade de repensar as matrizes energéticas a fim de proporcionar um setor que traga confiabilidade e também esteja alinhado às metas de redução de carbono mundiais, apresentando o gás natural como combustível energético de transição afim de viabilizar o uso do biometano de forma duradoura.

5 Referências bibliográficas

- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). Relatório Gás: Desenvolvimento Final. Disponível em: https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/20581/1/Relatorio_Gas_Desenvolvimento%20Final.pdf. Acesso em: 20 de Maio de 2023
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. Biogás. Disponível em: https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/20801/1/PR_Biogas_215276_P_BD.pdf. Acesso em: 17 abr. 2023.
- BNDES. (2019). O mercado de gás natural no Brasil. https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/20802/1/PR_Gas%20natural_215277_P_BD.pdf
- CASTRO, F. R. B. et al. Competitividade do gás natural no mercado elétrico brasileiro: Uma análise da década de 2000. Rio de Janeiro: GESel, 2014. Disponível em: https://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/04_castro226.pdf. Acesso em: 17 abr. 2023.
- CEPAL. Transição energética: potencial de cooperação dos BRICS em energias renováveis e gás natural. Santiago: CEPAL, 2018. Disponível em: <https://www.cepal.org/pt-br/publicaciones/47261-transic平o-energetica-potencial-cooperac平o-brics-energias-renovaveis-gas-natural>. Acesso em: 17 abr. 2023.
- CETESB. (2014). Cartilha de Inventário de Gases de Efeito Estufa - Proclima. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/05/cartilha_ghg_online.pdf.
- CHIAPINOTTO, L. Análise Da Combustão E Das Emissões De Um Motor Flex Usando Misturas Heterogêneas De Combustíveis. Guaratinguetá, SP. 2017. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/152162/chiapinotto_l_me_guara.pdf;jsessionid=7696643D866B3ABD7BDD0D3FECD9E3D4?sequence=3
- Climate Science 2030+. Climate Science 2030+. Disponível em: <https://climatescience2030.com/pt-pt/>. Acesso em: 17 abr. 2023.
- CNN BRASIL. GasBrasiliense e Usina Cocal iniciam operação do 1º gasoduto de biometano do Brasil. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/gasbrasiliense-e-usina-cocal-iniciam-operacao-do-1o-gasoduto-de-biometano-do-brasil/>. Acesso em: 20 de Maio de 2023.
- COELHO, S. T., et al TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO E USO DE BIOGÁS E BIOMETANO : Part. I Biogás; Part. II Biometano. – São Paulo: IEE-USP, 2018.
- DeltaCO2 & CENA. BENEFÍCIOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO E DO USO DO BIODIESEL. Disponível em https://www.bsbios.com/_uploads/adminfiles/relatorio_biodiesel_p_web.pdf . Acesso em 31 de Julho de 2023
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Biometano de Aterro. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-309/NT%20Biometano%20de%20Aterro%20vf%200192018.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2023.

European Biogas Association. (2022). National Biomethane Potentials. Recuperado de https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2022/07/GfC_national-biomethane-potentials_070722.pdf. Acesso em: 17 abr. 2023.

EPE. (2019). Plano Nacional de Energia 2030. <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/Relat%C3%B3rio%20final%20PNE%202030.pdf>

GOMES, R. M. et al. Geração distribuída a gás natural no Brasil. Brasília: IPEA, 2016. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/10712/4/TD_2680.pdf. Acesso em: 17 abr. 2023.

GUERREIRO, E. M. G. Viabilidade técnica e econômica do uso de biogás na indústria de laticínios. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <http://www.peamb.eng.uerj.br/trabalhosconclusao/2020/Dissert-PEAMB-2020-Erica-Machado-Guerreiro.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2023.

HENRIQUES JÚNIOR, M. F. Modelagem de fontes incertas de energia elétrica: impactos sobre o planejamento e a operação do sistema elétrico brasileiro. [Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro], 2019. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/doutorado/Mauricio_Francisco_Henriques_Junior.pdf.

INSTITUTO BRASILEIRO DO PETRÓLEO, GÁS E BIOMASSA. Maiores produtores mundiais de petróleo em 2020. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/snapshots/maiores-produtores-mundiais-de-petroleo-em-2020/>. Acesso em: 17 abr. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Energy Statistics Data Browser. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=BRAZIL&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource>. Acesso em: 17 abr. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. The role of gas in today's energy transitions. Paris: IEA, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-gas-in-todays-energy-transitions>. Acesso em: 17 abr. 2023.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou. Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://zerocarbon-analytics.org/archives/science/ipcc-6th-assessment-report-physical-science-basis>. Acesso em: 17 abr. 2023.

IPCC. Sixth Assessment Report Cycle. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>. Acesso em: 17 abr. 2023.

IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou. Cambridge University

Press, 2021. Disponível em: https://report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf. Acesso em: 17 abr. 2023.

MACHADO, J. A. et al. A Agenda 2030 e o desenvolvimento sustentável no Brasil: O papel do gás natural. Brasília: IPEA, 2019. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/9398/1/Radar_n60_aAgenda2030.pdf. Acesso em: 17 abr. 2023.

MACHADO, J. A. et al. Nova Lei do Gás: desafios e perspectivas. Brasília: IPEA, 2020. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11035/1/radar_68_nova_lei_do_g%C3%A1s.pdf. Acesso em: 17 abr. 2023.

MARKGRAF, C.; KAZA, S. Financing Landfill Gas Projects in Developing Countries. Urban development Series Knowledge papers. 2016. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/26302/AUS106%2085.pdf?sequence=4>.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Plano Decenal de Expansão de Energia 2022-2031. Disponível em: http://antigo.mme.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=87ed2d4e-5a4a-db52-5d0b-737d2662ac9c&groupId=36224. Acesso em: 20 de junho de 2023.

MIRANDA, M. M. Análise do papel do gás natural no planejamento energético de longo prazo do Brasil. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, 2012. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-22012013-112737/publico/DissertacaoMarianaMaiaDeMiranda.pdf>.

MIRANDA, M. M. Análise do papel do gás natural no planejamento energético de longo prazo do Brasil. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, 2012. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-22012013-112737/publico/DissertacaoMarianaMaiaDeMiranda.pdf>.

MOVIMENTO ECONÔMICO. Ceará sai na frente na comercialização de biometano. Disponível em: <https://movimentoeconomico.com.br/economia/combustivel/2022/07/19/ceara-sai-na-frente-na-comercializacao-de-biometano/>. Acesso em: 20 de Maio de 2023

OLIVEIRA, A. J. A. de; FERREIRA, F. F. The Role of Renewable Energies in the Brazilian Energy Matrix. Journal of Energy and Power Technology, v. 9, n. 2, p. 126-132, 2017. Disponível em: <https://downloads.editoracientifica.org/articles/210203413.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2023.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY. Renewables 2021: Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat, 2021. Disponível em: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2021/06/REN21_GSR2021_FullReport_en.pdf. Acesso em: 17 abr. 2023.

REVISTA DAE. Edição 209. Disponível em: <http://revistadae.com.br/downloads/edicoes/Revista-DAE-209.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2023.

RIBEIRO, L. S. Modelagem Computacional Aplicada à Análise de Risco em Sistemas de Gás Natural. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Leonardo_da_Silva_Ribeiro.pdf.

UNITED NATIONS. Cities and Pollution. Disponível em:
<https://www.un.org/en/climatechange/climate-solutions/cities-pollution>. Acesso em: 17 abr. 2023.

ZERO CARBON. IPCC 6th Assessment Report: Physical Science Basis. 2021. Disponível em:
<https://zerocarbon-analytics.org/archives/science/ipcc-6th-assessment-report-physical-science-basis>.