

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA
ESCOLA POLITÉCNICA DA USP
ESPECIALIZAÇÃO ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

LUIS FERNANDO GASPARINI LOPES

**POTENCIAL TÉCNICO DE GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO MUSGO A PARTIR DA
FRAÇÃO ORGÂNICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DA REGIÃO
METROPOLITANA DE GOIÂNIA**

SÃO PAULO

2024

LUIS FERNANDO GASPARINI LOPES

**POTENCIAL TÉCNICO DE GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO MUSGO A PARTIR DA
FRAÇÃO ORGÂNICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DA REGIÃO
METROPOLITANA DE GOIÂNIA**

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^a. Dr^a. Marilin Mariano dos Santos

SÃO PAULO

2024

Dedico este trabalho à minha esposa Claudia.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar o meu mais profundo agradecimento à minha esposa Claudia Heloisa Curatolo Coelho Lopes por toda compreensão durante às minhas ausências e dedicação exigida a este curso. Seus conselhos, apoio e amor foram essenciais para a conclusão deste trabalho.

Desejo dedicar o meu agradecimento aos meus tios, Francisco José Barbosa e Helena Tavares de Souza. Os seus conselhos e ajuda intelectual no momento certo foram fundamentais para o meu crescimento, compreensão e conclusão deste trabalho. O meu mais profundo agradecimento a vocês.

O meu agradecimento ao meu amigo Cleidinaldo de Jesus Barbosa, amizade essa que se iniciou durante as primeiras aulas do curso e que vou levar para vida toda. A sua dedicação, companheirismo, inspiração, conselhos, sugestões e das incansáveis discussões, análises e apoio mútuo durante estes dois árduos anos foram essenciais para fortalecer a nossa amizade. Muitas ideias de projetos virarão realidade no futuro próximo. O meu sincero agradecimento a você.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Marilin Mariano dos Santos, o meu especial agradecimento pela sua paciência, suporte e valiosas contribuições durante a execução deste trabalho. Todo aprendizado que tive ao longo destes quase seis meses de trabalho foram essenciais para me inspirar mesmo quando achei que não fosse possível.

RESUMO

LOPES, L. F. G. Potencial técnico de geração de hidrogênio musgo a partir da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos da região metropolitana de Goiânia. 75 p. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso - Programa de Educação Continuada (PECE/USP) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

Frente ao desafio mundial na busca de novas fontes energéticas visando reduções de emissões atmosféricas, o hidrogênio tem obtido um papel importante como vetor energético de baixo carbono na transição energética. Este estudo tem como objetivo de verificar o potencial técnico de geração de hidrogênio musgo, a partir do biogás/biometano resultante dos resíduos sólidos urbanos na região metropolitana de Goiânia. O trabalho parte da premissa que os resíduos sólidos urbanos, que são destinados à aterros sanitários, aterros controlados e lixões, podem produzir hidrogênio de baixo carbono e assim contribuir para uma matriz energética mais limpa. Este trabalho se utiliza da análise gravimétrica e do quantitativo dos resíduos sólidos urbanos característicos da região metropolitana de Goiânia para determinação da fração orgânica útil na produção de biogás/biometano. Assim, se utilizando do processo da reforma a vapor do biometano, estima-se o potencial técnico de geração de hidrogênio musgo. O trabalho valida a hipótese de que a geração de hidrogênio musgo para a região metropolitana de Goiânia se apresenta como uma alternativa promissora, contribuindo assim para a sua inserção na matriz energética, bem como suprimir externalidades negativas que a disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos.

Palavras chaves: Hidrogênio musgo. Descarbonização. Energias renováveis. Resíduos Sólidos Urbanos. Biometano.

ABSTRACT

LOPES, L. F. G. *Technical potential for generating green hydrogen from the organic fraction of urban solid waste in the Goiânia metropolitan area.* 75 p. 2024. *Final Year Project - Continuing Education Program (PECE/USP) – University of São Paulo, São Paulo, 2024.*

Faced with the global challenge of finding new energy sources to reduce atmospheric emissions, hydrogen plays an important role as a low-carbon energy vector in the energy transition. This study aims to verify the technical potential for green hydrogen production from biogas/biomethane derived from urban solid waste in the metropolitan area of Goiânia. The work is based on the premise that urban solid waste, which is destined to landfills, can produce low-carbon hydrogen and thus contribute to a cleaner energy base. This work uses gravimetric and quantitative analysis of urban solid waste from the metropolitan area of Goiânia to determine the organic fraction useful for production of biogas/biomethane. Thus, the technical potential to produce green hydrogen is estimated using the biomethane steam reforming process, the technical potential for generating green hydrogen is estimated. The work validates the hypothesis of the production of green hydrogen is a promising alternative for the Goiânia metropolitan area is a promising alternative, contributing to its inclusion in the Brazilian energy base, as well as suppressing the negative externalities caused by the inadequate disposal of the urban solid waste.

Key words: Green hydrogen. Decarbonization. Renewable energy. Urban solid waste. Biomethane.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cadeia de valor do hidrogênio, 2019	17
Figura 2: Produção de hidrogênio por tecnologia (2020-2022)	17
Figura 3: Demanda de uso final de hidrogênio por setor, em Mt.....	18
Figura 4: Demanda de uso final de hidrogênio por região, em Mt.....	18
Figura 5: Geração de hidrogênio por método de produção, em Mt.....	19
Figura 6: Produção de hidrogênio no Brasil	20
Figura 7: Produção de hidrogênio por aplicação no Brasil	21
Figura 8: Produção e comercialização de hidrogênio para fins comerciais no Brasil.....	21
Figura 9: Iniciativas do governo brasileiro para a economia do hidrogênio	22
Figura 10: Mapa global do desenvolvimento estratégico do hidrogênio	25
Figura 11: Acordos e parcerias bilaterais entre países	26
Figura 12: Número de projetos de hidrogênio anunciados globalmente em 2023	27
Figura 13: Rotas tecnológicas para obtenção de hidrogênio	28
Figura 14: Classificação do hidrogênio em escalas de cores.....	29
Figura 15: Rotas tecnológicas para produção de hidrogênio dividido por cores	30
Figura 16: Quantidade de CO ₂ emitido por kg de hidrogênio produzido.....	31
Figura 17: Tecnologias de captura de CO ₂ nos processos de geração de hidrogênio	32
Figura 18: Uso global de hidrogênio por região e por fonte para refino de petróleo	35
Figura 19: Consumo energético no setor siderúrgico.....	37
Figura 20: Consumo de hidrogênio no transporte rodoviário por segmento e por país	38
Figura 21: Participações das regiões na geração de RSU em 2022, em %.....	40
Figura 22: Geração total (t/ano) e per capita (kg/hab/dia) de RSU em 2022	41
Figura 23: Regiões com coleta seletiva no Brasil (%), em 2021.....	42
Figura 24: Disposição final de RSU no Brasil e por região (t/ano e %), em 2022.....	43
Figura 25: Identificação de aterros sanitários, controlados e lixões na RMG, em 2019	45
Figura 26: Panorama das destinações de RSU na RMG, 2019	46
Figura 27: Gravimetria típica dos RSU, em %	48
Figura 28: Possíveis rotas do processo de digestão anaeróbia	51

Figura 29: Fluxograma simplificado de uma UTMB	54
Figura 30: Processos de pós-tratamento do material digerido.....	55
Figura 31: Etapas de purificação do biogás.....	56
Figura 32: Processo simplificado do processo PSA para remoção de CO ₂	57
Figura 33: Fluxograma básico para obtenção do hidrogênio musgo.....	59
Figura 34: Cadeia produtiva de fertilizantes NPK	64
Figura 35: Importação de fertilizantes nitrogenados e suas participações (2008 e 2018).....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Região Metropolitana de Goiânia: população e taxa de crescimento demográfico (2022)	44
Tabela 2.2: Gravimetria estimada, dos RSU, de cada região brasileira em 2020	48
Tabela 2.3: Geração de RSU na RMG em 2019.....	49
Tabela 2.4: Composição típica do biogás em comparação com o gás natural	51
Tabela 2.5: Comparativo das tecnologias de biodigestores anaeróbios para RSU.....	52
Tabela 2.6: Composição típica do biometano em comparação com o biogás.....	56
Tabela 3.1: Parâmetros para estimativa do potencial de geração de biogás, biometano e hidrogênio musgo	61
Tabela 4.1: Potencial técnico de geração de hidrogênio musgo, em Nm ³ /ano.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANDA	Associação Nacional para Difusão de Adubos
BEV	<i>Battery Electric Vehicles</i>
CCUS	<i>Carbon Capture, Utilization and Storage</i>
CDR	Combustível Derivado de Resíduos
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CH ₄	Metano
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CO ₂	Dióxido de Carbono
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FCEV	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i>
FER	Frente Parlamentar das Energias Renováveis
GEE	Gases de Efeito Estufa
GO	Goiás
H ₂	Hidrogênio
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio ou Gás Sulfídrico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPCC	Painel Governamental sobre Mudanças Climáticas
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MoU	<i>Memorandum of Understanding</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PROCaC	Programa Brasileiro de Hidrogênio e Sistemas de Células a Combustível
PROH ₂	Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio
PNE	Plano Nacional de Energia
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB	Política Nacional sobre Saneamento
PSA	<i>Pressure Swing Adsorption</i>

RC	Reforma Catalítica
RMG	Região Metropolitana de Goiânia
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SINIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos
TMB	Tratamento Mecânico-Biológico
UTMB	Unidade de Tratamento Mecânico-Biológico
SMR	<i>Steam Methane Reforming</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo do trabalho.....	14
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	Panorama geral do hidrogênio no mundo	16
2.2	Panorama geral do hidrogênio no Brasil.....	20
2.2.1	 Mercado de hidrogênio no Brasil	20
2.2.2	 Histórico e políticas públicas no Brasil	21
2.2.3	 Cooperações internacionais e principais projetos	24
2.3	ROTAS TECNOLÓGICAS PARA GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO	27
2.4	IMPORTÂNCIA DO HIDROGÊNIO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA	33
2.4.1	 Setor de fertilizantes	34
2.4.2	 Setor óleo & gás – refino do petróleo	35
2.4.1	 Setor do cimento	36
2.4.2	 Setor siderúrgico	36
2.4.3	 Mobilidade urbana e setor de transportes	38
2.5	PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL	39
2.6	PANORAMA DOS RSU NA REGIÃO METROPOLITANA DE GOIÂNIA.....	44
2.6.1	 Composição gravimétrica dos RSU	47
2.7	GERAÇÃO DO BIOGÁS A PARTIR DOS RSU.....	50
2.7.1	 Processo de digestão anaeróbia de RSU e geração de biogás	50
2.7.2	 Tratamento mecânico-biológico como gestão de resíduos	52
2.7.3	 Geração de biometano	55
3	METODOLOGIA	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

1 INTRODUÇÃO

A geração de resíduos está intimamente conectada ao aumento do consumo da população e da produção e ao desenvolvimento social e industrial, onde têm contribuído para o maior desafio ambiental ao longo dos anos: a gestão dos resíduos. A partir de meados do século XX, a geração de resíduos se intensificou em decorrência da aceleração do processo de urbanização, do crescimento populacional, das mudanças dos padrões de consumo e a industrialização, trazendo desafios quanto ao seu gerenciamento e principalmente aos impactos ambientais da sua disposição no meio ambiente.

A geração de resíduos como resultado secundário das atividades econômicas traz consigo efeitos ambientais negativos, como a poluição dos solos e dos recursos hídricos e propagação de doenças, quando disposto inadequadamente. Ademais, conforme Calderoni (2003) ponderou, os impactos adversos das atividades econômicas e o consumo podem comprometer parte da receita orçamentária dos gestores públicos responsáveis pela coleta e destinação apropriada dos resíduos urbanos.

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), a geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil em 2022 foi de aproximadamente 81,8 milhões de toneladas. A maior parte do resíduo sólido urbano gerado, 61% foram coletados e encaminhados para aterros sanitários, porém os 39% restantes, representando 29,7 milhões de toneladas, foram destinados inadequadamente (ABRELPE, 2022).

Diante deste cenário, entrou em vigor a Lei nº 12.305/2010, que estabeleceu a Política Nacional de Resíduos Sólidos através do Decreto 7.404/2010. Esta política estabelece diretrizes e características alinhadas com iniciativas globais, possibilitando que haja uma reorganização das prioridades na gestão e disposição de resíduos seguindo uma estruturação para a reutilização, reciclagem, reaproveitamento energético, tratamento e disposição final adequada (BRASIL, 2010). Neste contexto, ao transmitir a ideia de que a falta de ações de gestão de resíduos não apenas aumenta o prejuízo ambiental, mas também representa um desperdício de recursos, visto que os resíduos poderiam contribuir como fonte energética através de seu devido tratamento.

O prejuízo ambiental e o desperdício energético dos resíduos, somado com a utilização em larga escala de combustíveis fósseis, geram impactos ambientais relevantes, tais como emissão de gases de efeito estufa. Contudo, tem-se notado um movimento em direção a diversas transformações de natureza técnica, econômica e ambiental em escala mundial. Esta mudança

engloba a expansão de energias renováveis para atender às necessidades de segurança energética e suprimento contínuo de energia limpa e sustentável.

Neste cenário, tem-se observado um amplo esforço do mercado mundial em buscar novas fontes de energia que reduzam as emissões de gases de efeito estufa, com o objetivo principal de reduzir o aquecimento global atual. Diante disso, no Acordo de Paris de 2015, diversas nações se comprometeram a mitigar os impactos das mudanças climáticas através do fortalecimento do desenvolvimento sustentável como principal medida efetiva para combater o aquecimento global (CASTRO *et al.*, 2023). Através da transição para sistemas energéticos mais limpos e da ampliação do uso de fontes de energia renováveis, será viável alcançar reduções significativas nas emissões atmosféricas ao mesmo tempo que novas fontes energéticas sejam incorporadas na matriz energética global (IRENA, 2019).

Frente a este desafio, o hidrogênio tem ganhado destaque na pauta da transição energética. Além da sua grande relevância econômica, uma vez que é amplamente utilizado em diversos setores da economia, novas oportunidades de aplicação do hidrogênio podem surgir em segmentos como transporte, geração e armazenamento de energia e processos industriais (EPE, 2021).

O hidrogênio tem se apresentado como um agente viável na descarbonização da economia, uma vez que é um combustível com emissão nula de carbono decorrente da sua queima, desempenhando, portanto, um papel fundamental na transição energética e como fonte de energia limpa e sustentável (NAZIR *et al.*, 2020).

1.1 OBJETIVO DO TRABALHO

Considerando o cenário da geração de resíduos sólidos urbanos bem como a importância do hidrogênio no cenário da transição energética mundial, a questão que norteia a presente investigação é a seguinte: qual o potencial de geração de hidrogênio a partir do biogás/biometano resultante dos resíduos sólidos urbanos da região metropolitana de Goiânia/GO? Assim, para responder o questionamento anterior, este trabalho tem como objetivo de analisar o potencial técnico de geração de hidrogênio a partir do vapor do biometano, obtida a partir da fração orgânica da totalidade dos resíduos sólidos urbanos gerados na região metropolitana de Goiânia/GO.

Com os resultados obtidos, almeja-se evidenciar o reaproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos, ao considerar que todo o resíduo gerado não seja destinado para os aterros sanitários, aterros controlados e lixões na região metropolitana de Goiânia/GO. Além

disso, ponderar que a adoção de práticas sustentáveis do reaproveitamento energético e de materiais dos resíduos, podem contribuir para a inserção do hidrogênio musgo na matriz energética, convergindo, portanto, para a descarbonização da economia.

Este trabalho será dividido em cinco seções, além desta introdução. Na seção 2 será apresentada uma revisão da literatura do panorama geral do hidrogênio no mundo e no Brasil, as principais rotas tecnológicas para produção de hidrogênio e a sua importância na transição energética. Além disso, será apresentado o panorama dos resíduos sólidos urbanos no Brasil e na região metropolitana de Goiânia e discussões teóricas a respeito do tratamento mecânico-biológico como gestão de resíduos, bem como sobre a geração de biometano através da parcela orgânica dos resíduos sólidos urbanos. Já na seção 3, será apresentada a metodologia considerada para a estimativa de hidrogênio musgo, a partir dos dados de geração de resíduos para a região metropolitana de Goiânia/GO. Na seção 4, apresenta os resultados obtidos da geração de hidrogênio musgo e, finalmente, a seção 5 traz as considerações finais referente a discussão abordada neste trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PANORAMA GERAL DO HIDROGÊNIO NO MUNDO

Conforme assinalado no relatório da Agência Internacional de Energia apresentado durante a reunião do G20 (IEA, 2019), a demanda por hidrogênio no mundo na sua forma pura totaliza cerca de 70 milhões de toneladas (Mt), evidenciando um crescimento superior a três vezes desde 1975.

As tecnologias de baixo carbono tem ganhado destaque no âmbito global, visando majoritariamente promover um controle eficaz do aquecimento global. Acordos firmados entre os países signatários do Acordo de Paris de 2015 estabeleceram metas desafiadoras, visando alcançar a neutralidade das emissões dos gases de efeito estufa (GEE) em todos os setores (IEA, 2019). Em 2018, o Painel Governamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), alertou que as emissões antropogênicas líquidas globais de CO₂ precisariam ser zeradas até 2050 para limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C (IPCC, 2018).

O crescente interesse em incorporar e adaptar o hidrogênio na matriz energética existente se justifica, em grande parte, pela ausência de emissões diretas de CO₂ durante a sua combustão, por exemplo. Ademais, o hidrogênio pode ser produzido através de várias fontes de energéticas de baixo carbono, incluindo a utilização de biomassa e combustíveis fósseis, desde que o processo de produção seja associado à captura, uso e armazenamento do carbono, CCUS¹ (IEA, 2019).

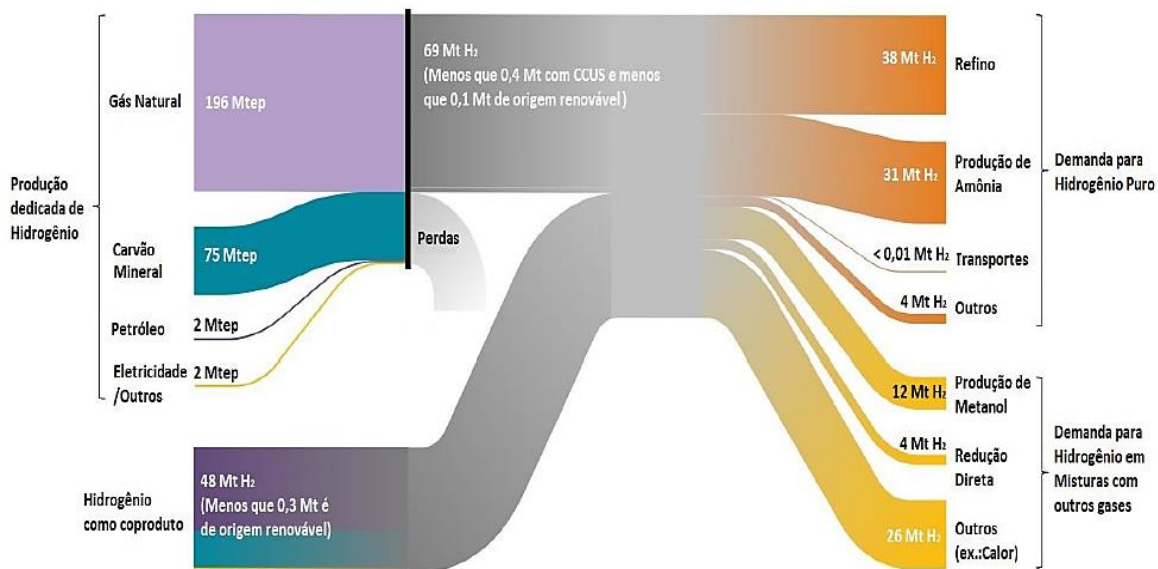
Neste contexto, o relatório da IEA de 2019 destaca o hidrogênio como uma fonte energética importante para a redução das emissões de carbono, quando produzido por métodos alternativos e com baixa emissão. A versatilidade do hidrogênio permite a sua utilização tanto na forma pura, quanto convertido em combustíveis a base de hidrogênio, viabilizando seu emprego em indústrias com alta demanda energética, nos setores de transportes marítimo e aéreo, indústrias siderúrgica e química, e na produção de amônia.

Observa-se que cerca de 70 Mt de hidrogênio são demandados anualmente para as cadeias de refino de petróleo e produção de amônia, especialmente para produção de fertilizantes, conforme representado pela Figura 1. A demanda adicional de 45 Mt de hidrogênio

¹ O CCUS é a sigla para *Carbon Capture, Utilization and Storage* que são tecnologias de redução de emissões que podem ser aplicadas em todo o sistema de energia.

utilizado em misturas com outros gases, são majoritariamente para a produção de metanol e aço.

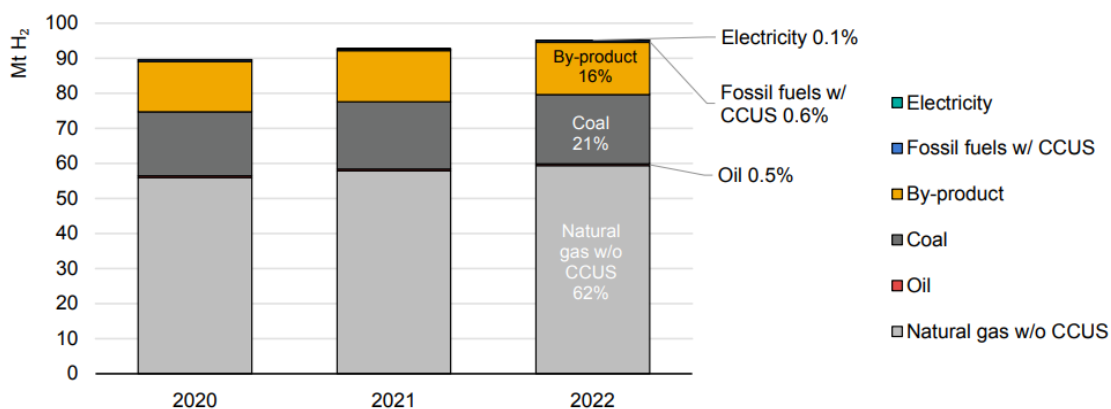
Figura 1: Cadeia de valor do hidrogênio, 2019



Fonte: IEA, 2019 (modificado pelo autor).

A produção global de hidrogênio atingiu quase 95 Mt em 2022, conforme apresentado na Figura 2, com utilização somente de combustíveis fósseis para tal. O gás natural sem CCUS foi responsável por 62% da produção global, enquanto o carvão foi responsável por 21%. O hidrogênio subproduto em refinarias de petróleo representa 16% da produção global (IEA, 2023).

Figura 2: Produção de hidrogênio por tecnologia (2020-2022)

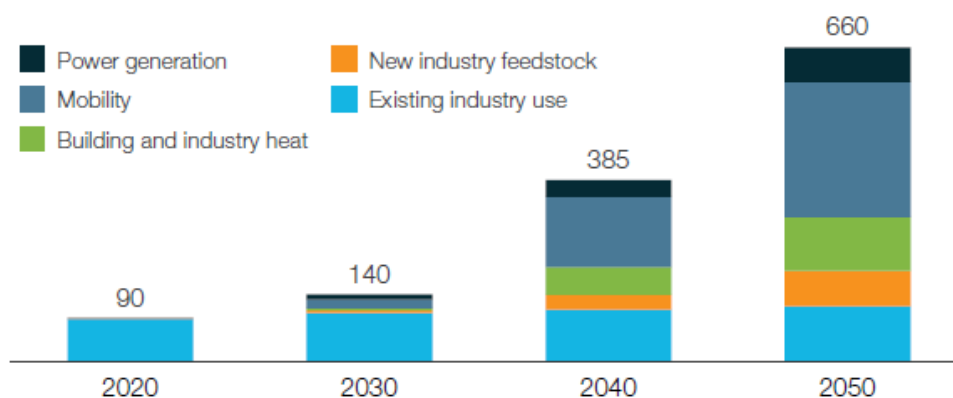


Fonte: IEA, 2023.

O hidrogênio pode desempenhar um papel essencial na transição energética limpa de países e setores industriais de difícil descarbonização, visando atingir metas de emissões

líquidas zero até 2050. Esta importância é devido a possibilidade do uso de diferentes rotas e matérias-primas para a sua produção, à exemplo da biodigestão anaeróbica de biomassa. Embora não seja a única solução para redução das emissões dos diversos setores econômico, o hidrogênio viabiliza de forma uniforme outras vias de descarbonização, como eletrificação direta, medidas de eficiência energética e biocombustíveis (HYDROGEN COUNCIL, 2021).

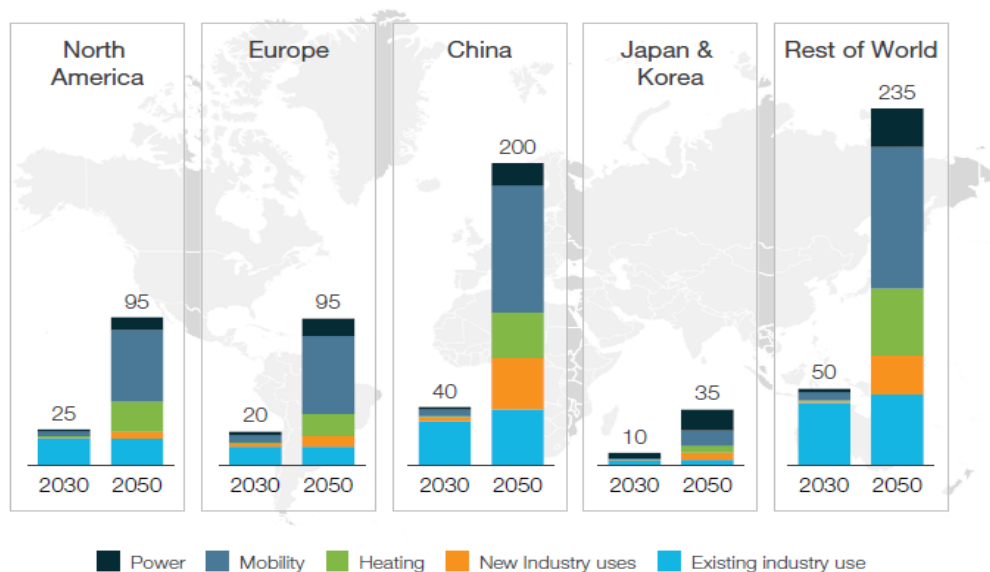
Figura 3: Demanda de uso final de hidrogênio por setor, em Mt



Fonte: HYDROGEN COUNCIL, 2021.

No cenário de emissões líquidas zero, representado na Figura 3, a demanda por hidrogênio de baixo carbono poderá atingir 660 Mt em 2050 para suprir as cadeias de valor de energia, mobilidade, aquecimento, novas matérias-primas para a indústria.

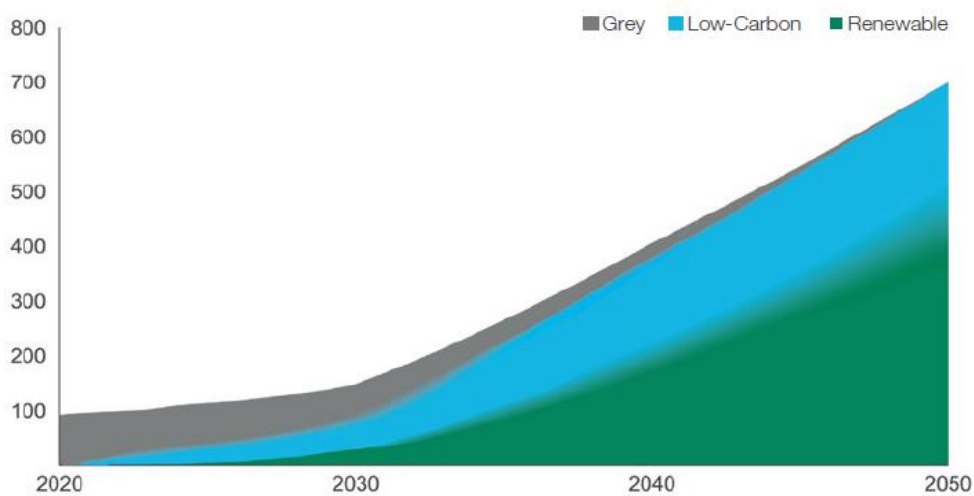
Figura 4: Demanda de uso final de hidrogênio por região, em Mt



Fonte: HYDROGEN COUNCIL, 2021.

Nesta demanda global, os maiores consumidores de hidrogênio serão China, com demanda de 200 Mt de H₂, Europa e Estados Unidos, com demanda de 95 Mt cada, conforme representado na Figura 4. Até 2050, o hidrogênio assumirá um papel fundamental nos mercados de energia global, possibilitando que países aproveitem seus recursos naturais renováveis e diminuam a dependência de petróleo e gás, ao passo que promovam a transição energética de baixo carbono para vários setores da economia (IEA, 2019).

Figura 5: Geração de hidrogênio por método de produção, em Mt



Fonte: HYDROGEN COUNCIL, 2021.

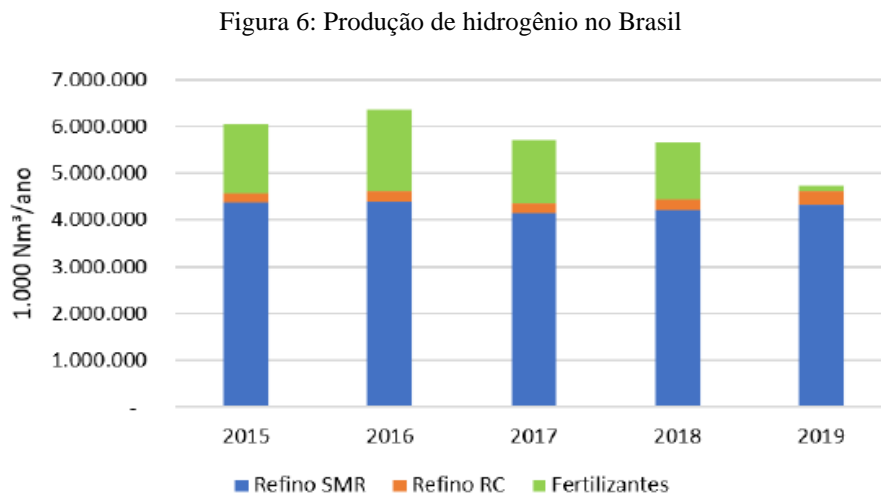
Diante do cenário de demanda global e descarbonização, será imprescindível o aumento na produção de hidrogênio de baixo carbono. Como ilustrado na Figura 5, atualmente a maior parte do hidrogênio provém de fontes fósseis (hidrogênio cinza). Entretanto, a longo prazo prevê-se que essa demanda será gradativamente substituída por hidrogênio renovável ou de baixo carbono. Em 2050, prevê-se que o hidrogênio de baixo carbono represente de 140 a 280 Mt da sua produção, cerca de 3 vezes da capacidade atual do hidrogênio cinza. Da mesma forma, o hidrogênio obtido a partir de fontes renováveis deverá abranger uma produção entre 400 e 550 Mt (HYDROGEN COUNCIL, 2021).

O hidrogênio renovável e o de baixo carbono são complementares, sendo que a combinação das duas fontes resultará em custos mais baixos para o sistema de energia em geral e em uma transição energética mais rápida (HYDROGEN COUNCIL, 2021).

2.2 PANORAMA GERAL DO HIDROGÊNIO NO BRASIL

2.2.1 Mercado de hidrogênio no Brasil

No Brasil, o consumo de hidrogênio ocorre em fábricas de fertilizantes e em refinarias. Neste caso, a geração e o uso de hidrogênio ocorrem localmente nas indústrias de refino de petróleo e fertilizantes², não havendo, portanto, a sua comercialização (EPE, 2022d).



Fonte: MME, 2021.

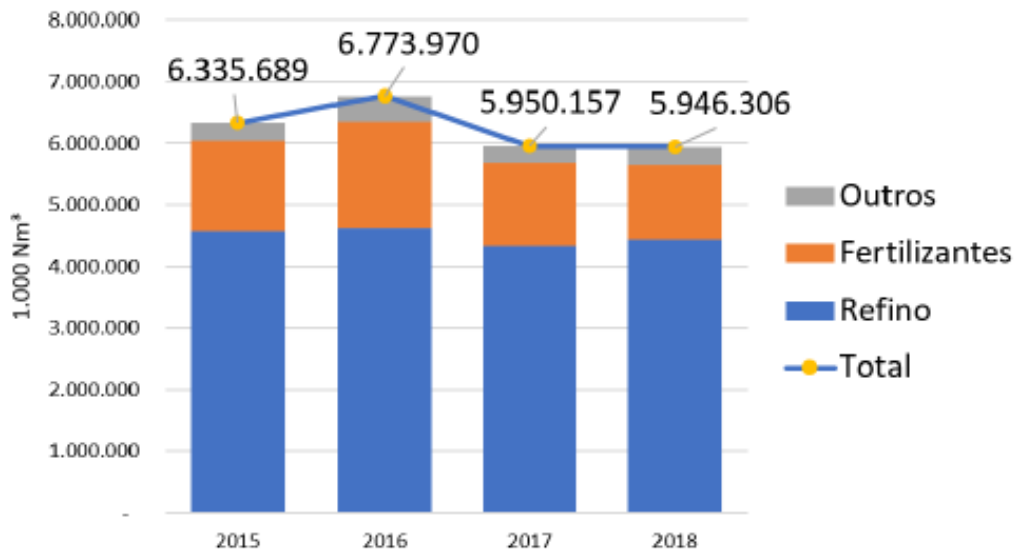
Conforme apresentado na Figura 6, aproximadamente 87% do hidrogênio produzido no Brasil é através da reforma a vapor do gás natural (SMR), e outra parcela da sua produção provém do uso de nafta³ e reforma catalítica (RC) (MME, 2021). Vale ressaltar que a reforma catalítica não tem como objetivo a produção de hidrogênio, mas sim para produção de gasolina através da obtenção de nafta com maior octanagem (EPE, 2022d).

Aproximadamente 5 bilhões de normal metro cúbico (Nm³) de hidrogênio foram produzidos no Brasil em 2019, conforme representado pela Figura 7. Apenas o setor de refino de petróleo, corresponde a cerca de 95% da produção total de hidrogênio no país nesse ano.

² Até 2018, a Petrobrás utilizava o hidrogênio na produção de fertilizantes, no entanto a empresa encerrou essa atividade naquele ano. Segundo o plano da empresa intitulado “Plano de Negócios e Gestão 2017-2021”, houve a paralisação da produção de fertilizantes e venda de todas as fábricas de produção de fertilizantes (MME, 2021).

³ Substância química derivada da parcela líquida do petróleo, sendo uma matéria-prima amplamente utilizada na indústria petroquímica.

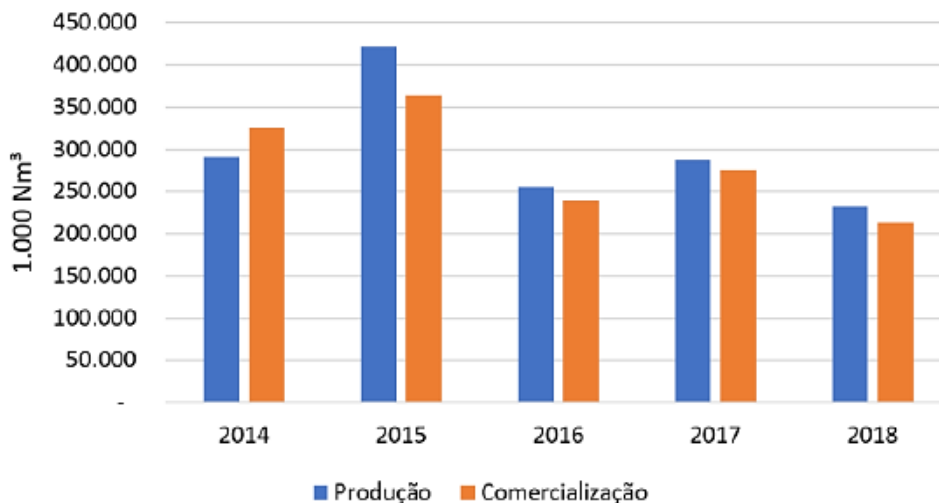
Figura 7: Produção de hidrogênio por aplicação no Brasil



Fonte: MME, 2021.

As indústrias do setor de gases industriais são as responsáveis pela geração restante de hidrogênio no país. Em 2018, a produção comercial de hidrogênio no Brasil atingiu cerca de 230 mil Nm³, com uma comercialização de 213 mil Nm³ no mesmo período, como indicado na Figura 8 (MME, 2021).

Figura 8: Produção e comercialização de hidrogênio para fins comerciais no Brasil

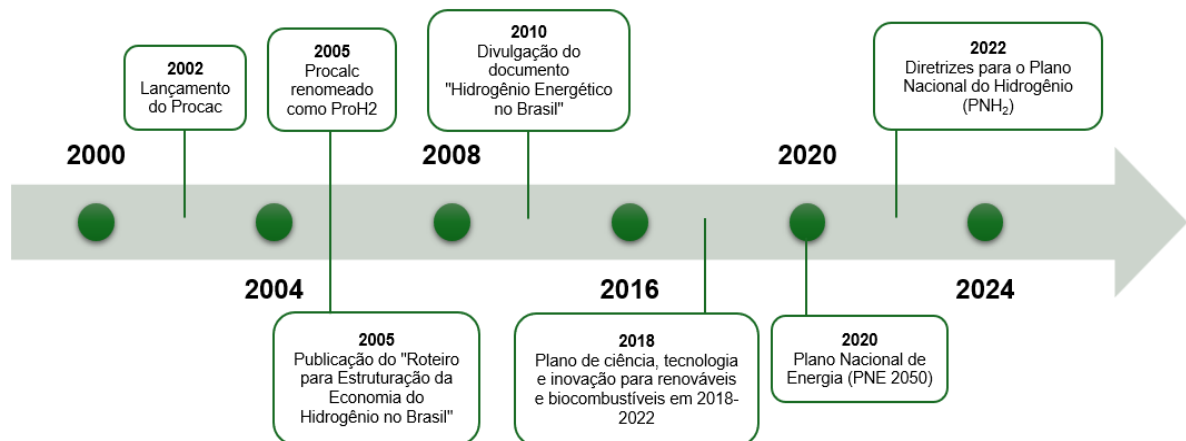


Fonte: MME, 2021.

2.2.2 Histórico e políticas públicas no Brasil

O interesse em promover o apoio a iniciativas voltadas para o desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio no Brasil começou em 2002 quando o Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT) lançou o Programa Brasileiro de Hidrogênio e Sistemas de Células a Combustível (PROCAC). Posteriormente, em 2005, o programa foi renomeado para Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (ProH2) (EPE, 2021).

Figura 9: Iniciativas do governo brasileiro para a economia do hidrogênio



Fonte: CASTRO *et al.*, 2023; MME, 2021 (adaptado e modificado pelo autor).

O ProH2 teve como propósito estabelecer as diretrizes para a rentabilidade técnica, incentivando a criação de padrões técnicos para a economia do hidrogênio. Em 2005, o Ministério de Minas e Energia (MME) liderou o "Roteiro para o Desenvolvimento da Economia do Hidrogênio no Brasil". Este roteiro fomentava uma diversificação da matriz energética com maior presença de combustíveis sustentáveis ao mesmo tempo que promovia o desenvolvimento da indústria brasileira (MME, 2021).

O Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) divulgou em 2010 o documento técnico intitulado "Hidrogênio Energético no Brasil". Este material apresenta sugestões de políticas e medidas institucionais, visando a contribuição na implantação e continuidade das tecnologias de hidrogênio no mercado brasileiro. O documento apresenta diretrizes para promover e impulsionar a produção de hidrogênio, além fomentar o desenvolvimento logístico e promover sistemas para utilização do hidrogênio. As orientações apontam para uma agenda de pesquisa e desenvolvimento (P&D) tecnológico com o principal objetivo de promover o desenvolvimento industrial das tecnologias de hidrogênio para um cenário de até 15 anos (CGEE, 2010).

Em continuidade às iniciativas do governo para o hidrogênio, em 2018, o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) divulga o “plano de ciência, tecnologia e inovação para energias renováveis e biocombustíveis: 2018 - 2022”. Este documento aborda a ampliação da diversidade de fontes de energia por meio do avanço tecnológico e de inovações nas cadeias de produção energética. O MCTIC incentiva o inserimento do hidrogênio como opção de diversificação da matriz energética renovável, além de agregar novas tecnologias para a mobilidade urbana. Além disso, o MCTIC recomenda ações voltadas para a P&D para a produção de hidrogênio a partir do biometano como um plano estratégico de incentivo à novas aplicações para o biogás/biometano.

O governo brasileiro apresentou em 2020, através da publicação do “Plano Nacional de Energia 2050 – PNE 2050”, uma compilação de pesquisas e orientações visando a elaboração de uma estratégia de longo prazo para o setor de energia brasileiro.

Dentre as diversas ações abordadas, o documento destaca a proposta de implementação de políticas públicas, alinhadas com compromissos ambientais, visando promover o uso de tecnologias de hidrogênio no plano de transição energética, tendo como exemplo a integração com a mobilidade urbana, oferecendo flexibilidade aos sistemas energéticos. Não obstante, tais políticas devem priorizar investimentos em capacidades tecnológicas e de P&D, contando com a participação ativa de universidades e instituições de pesquisa (MME/EPE, 2020). A intenção do governo brasileiro é de estabelecer uma estratégia nacional para o hidrogênio através de planos de ações específicos do governo federal nesta área (MME, 2021).

Apesar de terem sido implementadas iniciativas governamentais de inclusão do hidrogênio na matriz energética brasileira, somente em 2021 que se iniciaram debates sobre a elaboração de uma estratégia nacional para o hidrogênio, através de uma nota técnica elaborada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Este documento contempla uma variedade de métodos para a obtenção do hidrogênio, explorando principalmente os seus recursos e demandas (CASTRO *et al.*, 2023). Ademais, em março de 2021, foi anunciada pela Câmara dos Deputados em Brasília, o lançamento da Frente Parlamentar de Energia Renovável (FER), que conta com a adesão de mais de 200 parlamentares, tem como principal objetivo ampliar a exploração do hidrogênio e aumentar o percentual de geração de energia renovável com o uso de diferentes e novas tecnologias disponíveis. A FER visa ainda realizar mudanças legislativas para atender os principais pleitos do setor energético, visando principalmente a expansão e utilização de mais energias limpas na sua matriz energética (MME, 2021a).

Neste contexto, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), sob coordenação do MME, através da Resolução nº 6, de 23 de junho de 2022, instituiu o Programa Nacional do

Hidrogênio (PNH₂), objetivando o fortalecimento do mercado e da indústria do hidrogênio (MME, 2022). Ressalta-se os princípios do PNH₂, através do seu Art. 3º (MME, 2022, p.1):

- I - a valorização do potencial nacional de recursos energéticos;
- II - o reconhecimento da diversidade de fontes energéticas e alternativas tecnológicas disponíveis ou potenciais;
- III - a descarbonização da economia;
- IV - a valorização e incentivo ao desenvolvimento tecnológico nacional;
- V - o desenvolvimento de um mercado competitivo;
- VI - a busca de sinergias e articulação com outros Países; e
- VII - o reconhecimento da contribuição da indústria nacional.

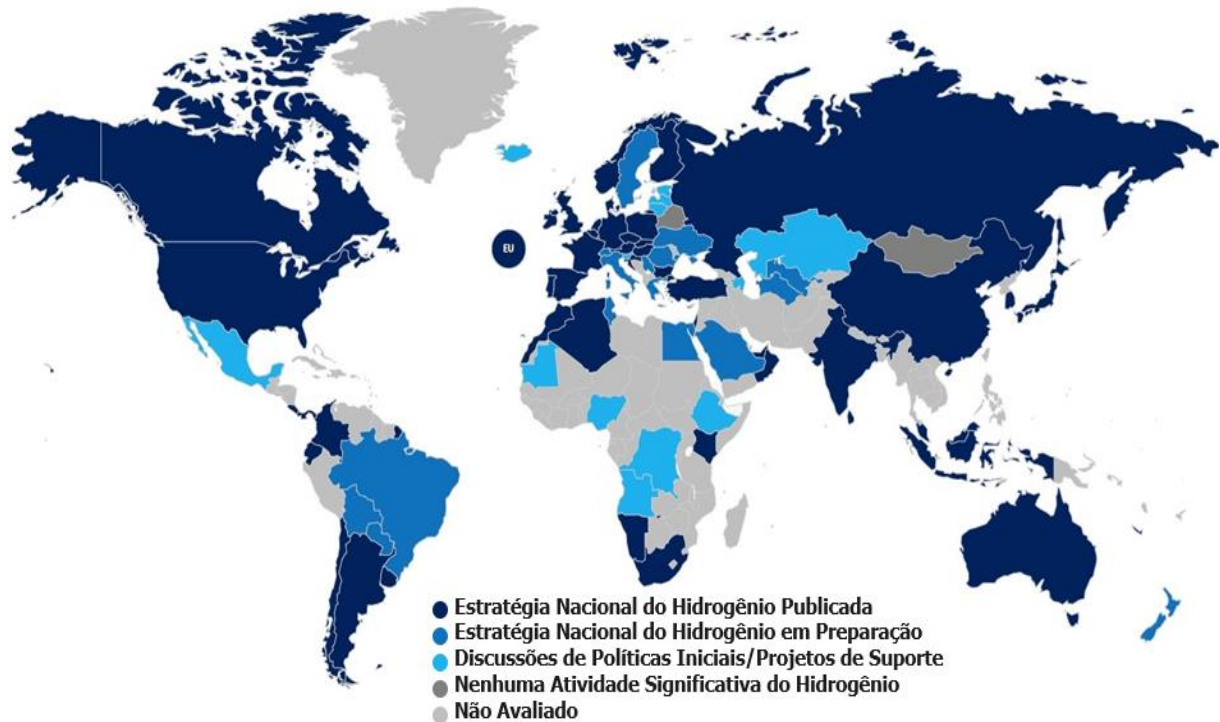
O PNH₂ tem o objetivo de estabelecer a evolução conjunta das políticas públicas, tecnologia e mercado afim de se obter êxito no desenvolvimento da economia do hidrogênio no país, devendo progredir simultaneamente para obtenção dos resultados desejados para o Brasil (MME, 2021b).

No campo regulamentar, o Brasil ainda não dispõe de normas específicas para o hidrogênio. Contudo, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) deu início a sua normatização, que contempla produção, armazenamento, transporte e utilização do hidrogênio (CASTRO *et al.*, 2023).

2.2.3 Cooperações internacionais e principais projetos

Os eminentes desafios da descarbonização, segurança e transição energética estão diretamente associados à disponibilidade de recursos energéticos e principalmente capacidades de investimentos. Conseqüentemente, o desenvolvimento de parcerias estratégicas entre países é fundamental para se atingir os objetivos específicos e crescimento do mercado do hidrogênio no mundo (CASTRO *et al.*, 2023; MME, 2021).

Figura 10: Mapa global do desenvolvimento estratégico do hidrogênio



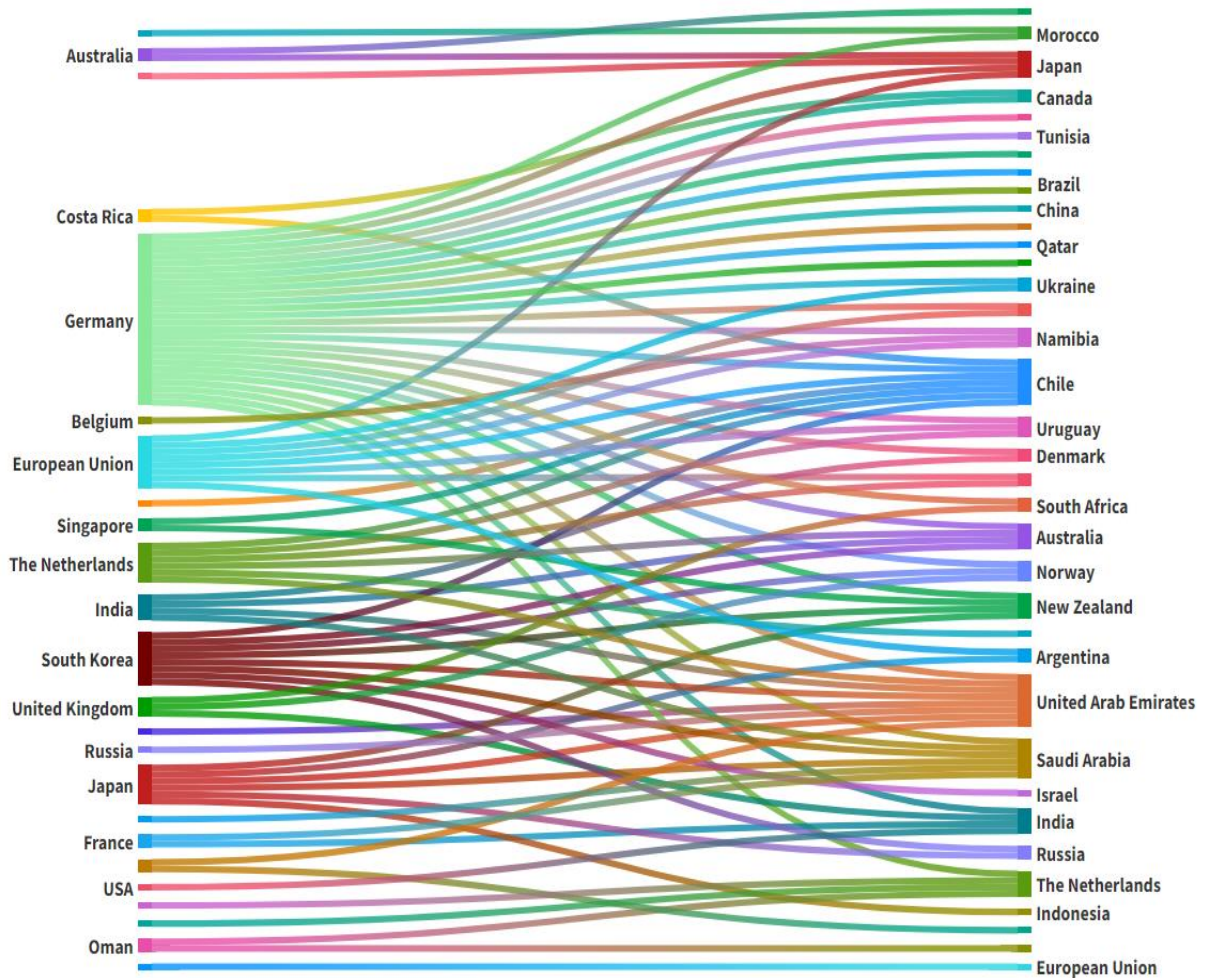
Fonte: WELTENERGIERAT, 2024 (modificado pelo autor).

Conforme apresentado na Figura 10, em 2024, mais de 30 pa\u00edses j\u00e1 publicaram as suas respectivas estrat\u00e9gias nacionais para o hidrog\u00e9nio. Al\u00e9m disso, outros dezesseis pa\u00edses est\u00e3o em elabora\u00e7\u00e3o de suas estrat\u00e9gias em 2024, demonstrando, assim, um grande interesse governamental mundial no desenvolvimento da economia do hidrog\u00e9nio.

De acordo com *Hydrogen Council* (2021), a demanda projetada de hidrog\u00e9nio para 2050 no mundo ser\u00e1 cerca de 660 milh\u00f5es de toneladas. No entanto, muitos pa\u00edses n\u00e3o conseguir\u00e3o atender \u00e0 demanda de hidrog\u00e9nio a partir das suas pr\u00f3prias capacidades, devido principalmente ao potencial limitado de energia renov\u00e1vel dispon\u00edvel (WELTENERGIERAT, 2024).

Desta forma, as particularidades e contextos individuais de cada pa\u00eds s\u00e3o essenciais para determinar a utiliza\u00e7\u00e3o do hidrog\u00e9nio na transi\u00e7\u00e3o energ\u00e9tica, sendo por prioridades setoriais bem como acordos bilaterais entre pa\u00edses exportadores e importadores em potencial (WORLD ENERGY COUNCIL, 2021).

Figura 11: Acordos e parcerias bilaterais entre países

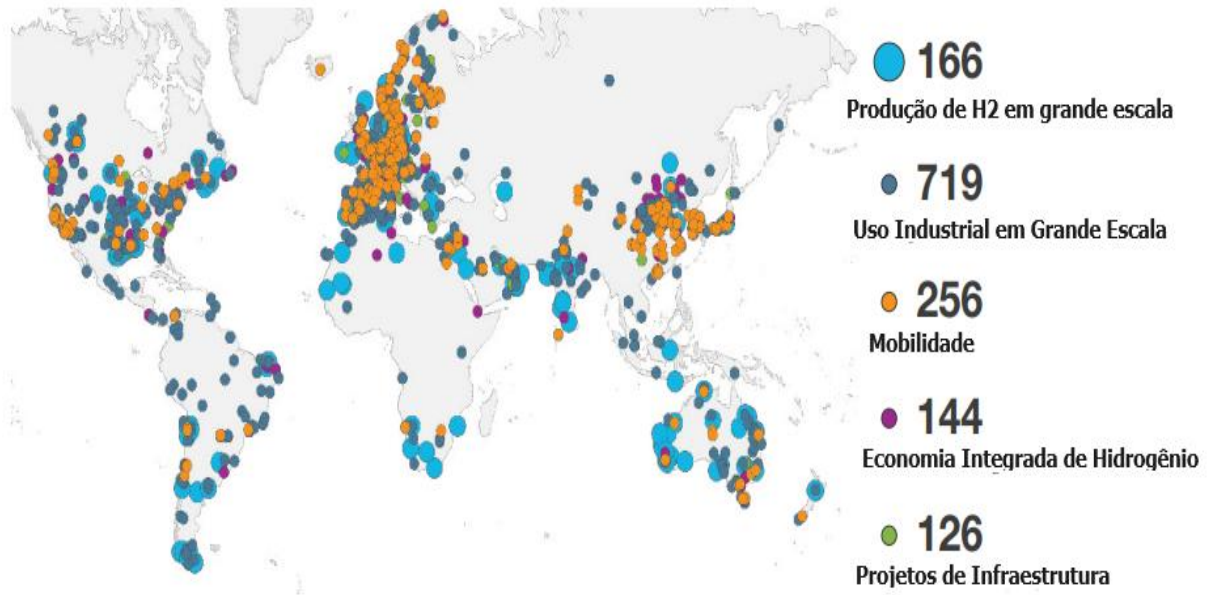


Fonte: WELTENERGIERAT, 2024.

As parcerias bilaterais com Memorandos de Entendimento (MoU), conforme apresentado na Figura 11, tem o intuito no desenvolvimento de tecnologias, financiamento de projetos e de P&D.

Neste contexto, o número de projetos tem aumentado significativamente, visando diversas áreas para o desenvolvimento da economia do hidrogênio. De acordo com o apresentado na Figura 12, em 2023, já foram anunciados 1.418 projetos de hidrogênio de baixo carbono, representando um investimento na ordem de US\$ 570 bilhões (HYDROGEN COUNCIL, 2023).

Figura 12: Número de projetos de hidrogênio anunciados globalmente em 2023



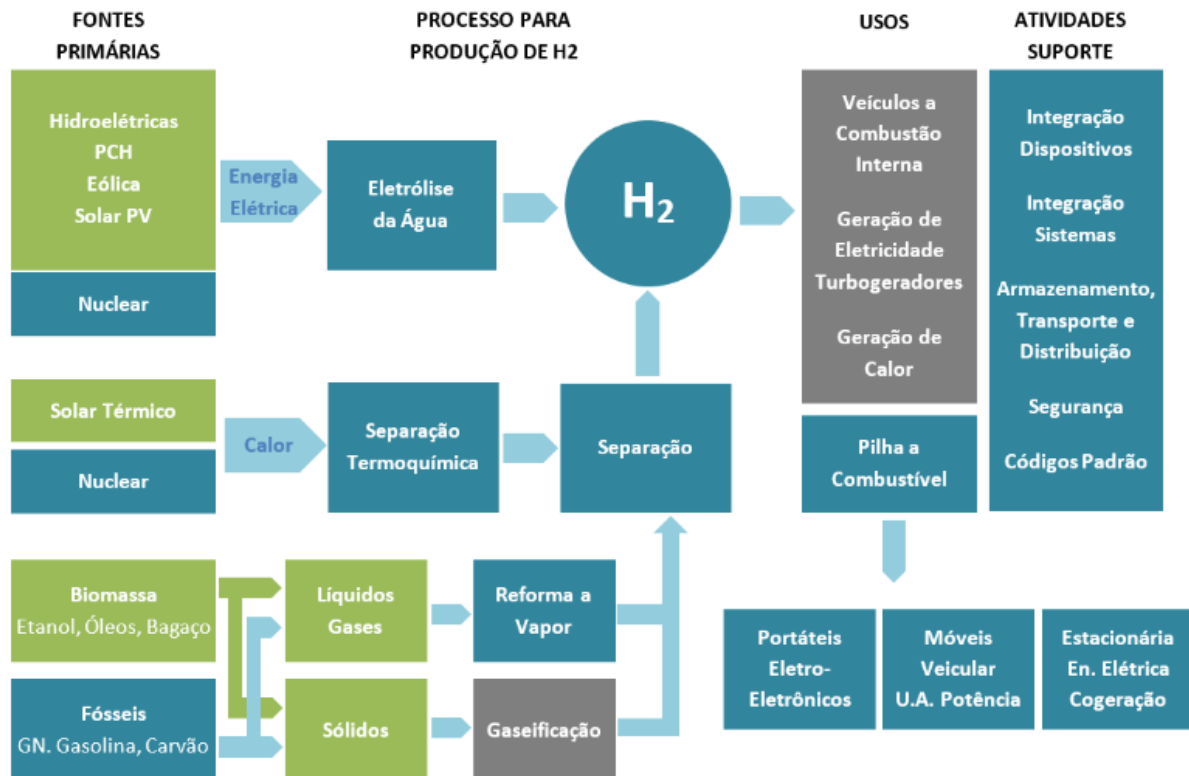
Fonte: HYDROGEN COUNCIL, 2023 (modificado pelo autor).

2.3 ROTAS TECNOLÓGICAS PARA GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO

O hidrogênio tornou-se essencial na transição energética rumo a sistemas de energia limpa e sustentável (NAZIR *et al.*, 2020). Isso fez com que a sua relevância crescesse consideravelmente, especialmente devido a possibilidade de inseri-lo em diferentes setores da economia global.

No que tange a sua produção, diversas fontes primárias podem ser utilizadas, com principal destaque para o uso de recursos renováveis em diferentes rotas tecnológicas.

Figura 13: Rotas tecnológicas para obtenção de hidrogênio












Fonte: BRASIL, 2023.

Ao analisar a Figura 13, pode-se identificar três rotas principais para a produção de hidrogênio: eletrolítica, fotoquímica e térmica.

- No processo eletrolítico, utiliza-se a eletrólise para dissociar a molécula da água em hidrogênio e oxigênio por meio de fluxo contínuo de corrente elétrica passando pelos eletrodos (ânodo e catodo) submersos em uma solução alcalina (CASTRO *et al.*, 2023). Para que o hidrogênio seja considerado de carbono nulo, a fonte de energia elétrica deve ser oriunda de fontes renováveis, tais como solar e/ou eólica;
- O processo fotoquímico ou separação termoquímica ocorre a dissociação da água em hidrogênio e oxigênio através da utilização de semicondutores. A dissociação se dá através da absorção da energia solar concentrada, onde os semicondutores geram uma tensão elétrica suficiente para sua dissociação (CASTRO *et al.*, 2023);
- O processo térmico requer altas temperaturas para a produção de hidrogênio, tais como gaseificação, pirólise, termoquímica, oxidação parcial e reforma a vapor do metano, sendo esta última a mais difundida no mercado para a produção de hidrogênio.

É fundamental destacar que, diante do contexto atual de redução das emissões de carbono, a utilização do hidrogênio como principal fonte energética tem originado debates sobre sua classificação por cores, conforme o tipo de matéria prima e rotas tecnológicas empregadas na sua produção. Isso também envolve a viabilidade de incorporar as tecnologias de CCUS aos processos que utilizam combustíveis fósseis como matéria-prima. A diferenciação entre as cores do hidrogênio, conforme apresentado na Figura 14, está associada ao tipo de matéria prima utilizada bem como a rota tecnológica para produção de hidrogênio (EPE, 2021).

Figura 14: Classificação do hidrogênio em escalas de cores

Cor	Classificação	Descrição
	Hidrogênio Preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem CCUS
	Hidrogênio Marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS
	Hidrogênio Cinza	Produzido por reforma a vapor do gás natural, sem CCUS
	Hidrogênio Azul	Produzido por reforma a vapor do gás natural (eventualmente, também de outros combustíveis fósseis), com CCUS
	Hidrogênio Verde	Produzido via eletrólise da água com energia de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar).
	Hidrogênio Branco	Produzido por extração de hidrogênio natural ou geológico
	Hidrogênio Turquesa	Produzido por pirólise do metano, sem gerar CO ₂
	Hidrogênio Musgo	Produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS
	Hidrogênio Rosa	Produzido com fonte de energia nuclear

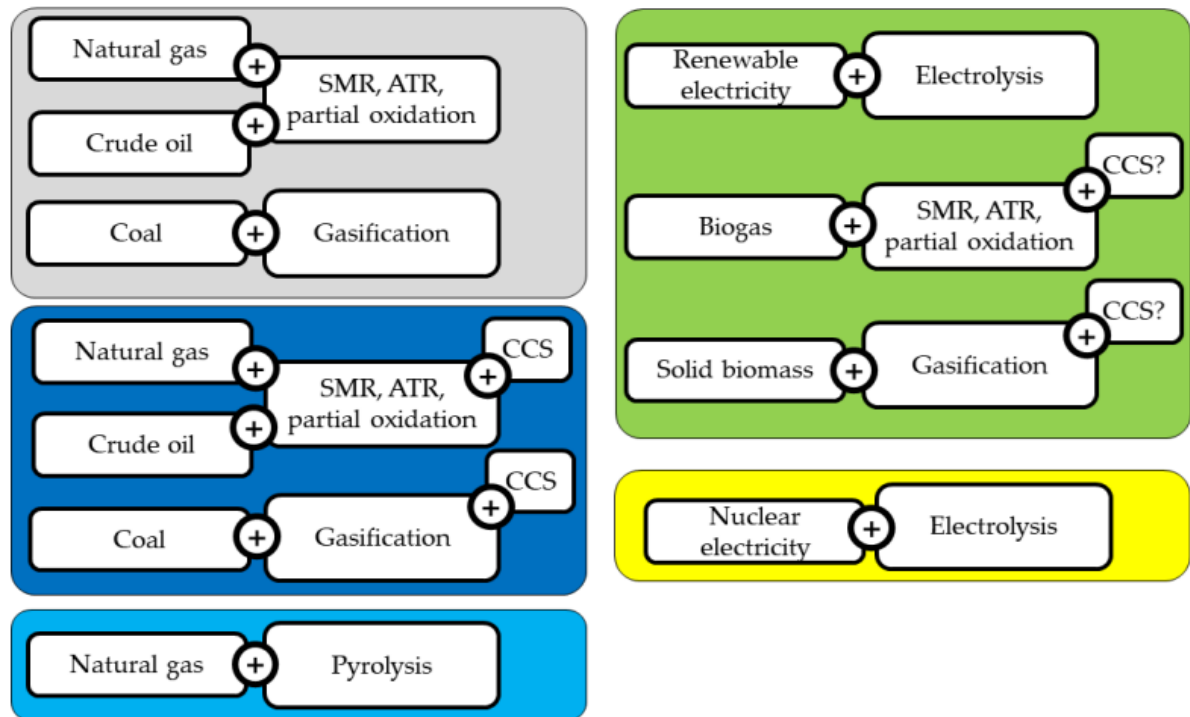
Fonte: EPE, 2021

De acordo com o apresentado na Figura 14, destaca-se que o hidrogênio musgo é oriundo de vias biogênicas, através da reforma do biometano, gaseificação da biomassa ou plásticos residuais e reforma do etanol, com ou sem CCUS. Ao utilizar matérias-primas renováveis, o CO₂ gerado é considerado biogênico, visto que já foi absorvido pelas plantas durante a produção da biomassa (EPE, 2022b).

A diversificação das fontes energéticas para obtenção de hidrogênio, aliada à variedade de rotas tecnológicas disponíveis, abre caminho para a priorização de recursos locais. Assim, estabelece-se um novo modelo econômico para a produção de hidrogênio, atuando como a principal fonte de energia impulsionada pela segurança energética (CASTRO *et al.*, 2023).

Os investimentos em P&D e avanços tecnológicos, juntamente com a idealização de novas tecnologias para a geração de hidrogênio, são em grande parte motivados pela redução de emissões atmosféricas atuais. Contudo, nem todas as rotas de produção estão livres das emissões diretas, ocasionando impactos ambientais (CASTRO *et al.*, 2023). Em alguns casos, o hidrogênio pode ser até mesmo negativo em termos de carbono, através das rotas tecnológicas que envolvem a combinação de bioenergia/biogás e CCUS (NOUSSAN, M. *et al.*, 2021).

Figura 15: Rotas tecnológicas para produção de hidrogênio dividido por cores



Onde:

SMR: Reforma a vapor do metano, ATR: Reforma autotérmica, CCS: Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS)

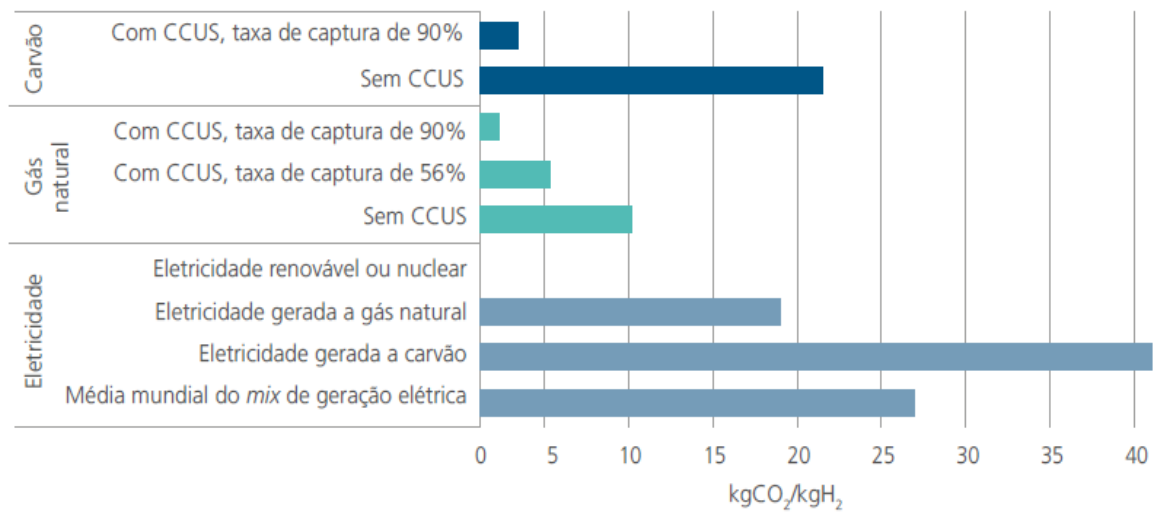
Fonte: NOUSSAN, M. *et al.*, 2021 (modificado pelo autor).

A produção de hidrogênio também é possível através da utilização de tecnologias de reforma do metano a partir do biometano, componente este proveniente do processo da biodigestão anaeróbia. Desta forma, a partir a combinação de diferentes tecnologias, conforme apresentado na Figura 15, aliada a processos já maduros no mercado atual, pode-se contribuir para o avanço da economia do hidrogênio de baixo carbono, obtendo maior flexibilidade de

utilização de diferentes fontes energéticas renováveis em rotas tecnológicas que majoritariamente utilizam o gás natural de origem fóssil (NOUSSAN, M. *et al.*, 2021).

Os níveis de emissões de CO₂ através das diferentes rotas tecnológicas de produção de hidrogênio estão representados na Figura 16. Pode-se notar que utilizando tecnologias CCUS nas rotas que utilizam carvão ou gás natural, a redução na emissão de CO₂ é maior que 85%.

Figura 16: Quantidade de CO₂ emitido por kg de hidrogênio produzido



Fonte: BNDES, 2022.

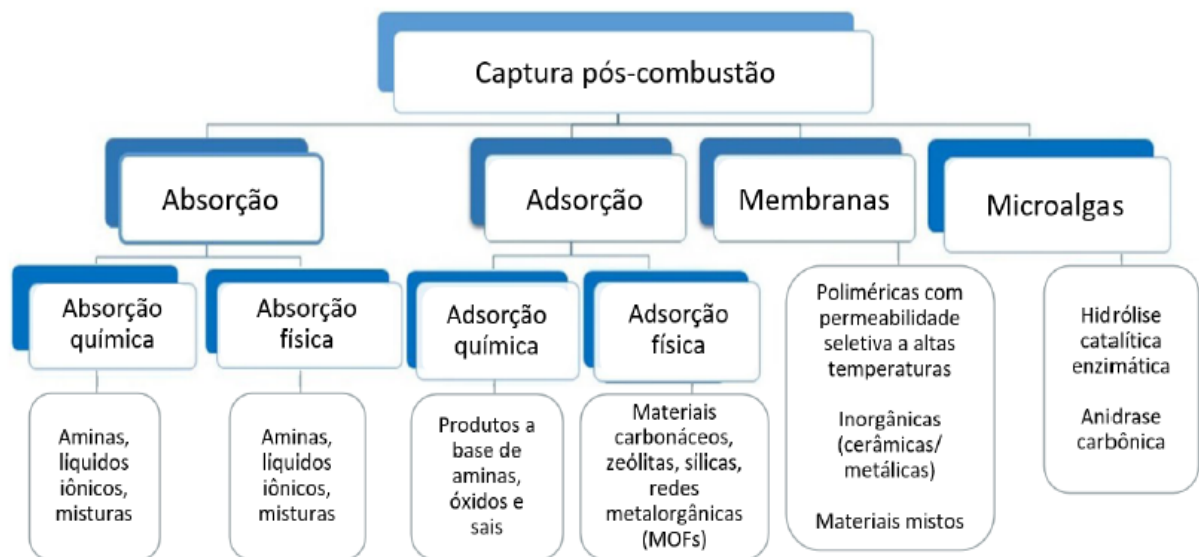
Ao se optar pela produção do hidrogênio azul com CCUS, por exemplo, observa-se que, de acordo com a Figura 16, o índice remanescente de CO₂ é de até 15%, a depender do tipo de combustível utilizado. Dessa maneira, o hidrogênio musgo representa uma alternativa viável para a economia de baixo carbono. Contudo, destaca-se que a sua viabilidade a curto prazo pode ocorrer ao se utilizar o biometano em plantas já existentes, em substituição ao gás natural de origem fóssil. Desta forma, as emissões neutras tornam-se cruciais em contextos em que buscam alcançar metas ambiciosas de redução das emissões (EPE, 2022a; EPE, 2022b).

Na produção de hidrogênio via processo SMR (hidrogênio cinza), o gás natural utilizado nesta rota tecnológica é empregado tanto para o fornecimento de calor ao processo (combustão), quanto matéria-prima para produção de hidrogênio. Desta forma, o processo SMR gera uma emissão de 0,35 a 0,42m³ de CO₂ por m³ de hidrogênio gerado (EPE, 2022b). Do total de geração de CO₂ pelo processo, estima-se que 35% a 40% é proveniente do processo de combustão do combustível e o restante do processo de produção de hidrogênio (EPE, 2022a).

Essa informação de geração de CO₂ pelo processo SMR é significativa pois, em um cenário de baixa emissão de carbono, ao incorporar a tecnologia CCUS a esta rota de produção de hidrogênio, a viabilidade da tecnologia SMR é prolongada a longo prazo (EPE, 2022b).

No processo CCUS, há diversas tecnologias no mercado atual e algumas em estágios iniciais de desenvolvimento para a captura do CO₂ dos processos de produção de hidrogênio, designados como captura pós-combustão. As técnicas mais usuais para a captura do CO₂ incluem a absorção, adsorção, membranas e microalgas (EPE, 2022a), conforme representado pela Figura 17.

Figura 17: Tecnologias de captura de CO₂ nos processos de geração de hidrogênio



Fonte: EPE, 2022a.

A remoção de CO₂ de misturas gasosas pode ser realizada através do processo de absorção, através do uso de soluções de aminas, onde o CO₂ é seletivamente capturado. Já a adsorção é um processo químico onde ocorre a fixação do CO₂ na superfície dos materiais adsorventes, sendo que a escolha do adsorvente com alta capacidade de adsorção e seletividade correta torna-se importante para este processo (EPE, 2022a).

O processo de separação por membrana opera com base na diferença de pressão e/ou concentração entre os lados interno e externo da membrana. Também existe a possibilidade de captura do CO₂ pelas microalgas, que depende da eficiência da fotossíntese e no rápido crescimentos destes organismos (EPE, 2022a).

2.4 IMPORTÂNCIA DO HIDROGÊNIO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Atualmente, o mercado energético tem como base princípios como sustentabilidade, impactos ambientais e avanços tecnológicos. Dessa maneira, a transição energética em curso explora uma série de mudanças a favor de uma economia com menor impacto ambiental e principalmente, redução nas emissões de carbono (MME/EPE, 2020).

Neste cenário, a priorização no uso de fontes mais sustentáveis, busca-se reduzir o uso de combustíveis poluentes na matriz energética global além do desenvolvimento e utilização mais eficiente de recursos energéticos disponíveis. Tais mudanças na descarbonização da matriz energética oferecem oportunidades para o setor energético, através de certificados de energia renovável e precificação do carbono, visando a valorização dos aspectos ambientais dos recursos energéticos (MME/EPE, 2020).

A relevância do hidrogênio em uma economia sustentável está na sua capacidade de contribuir na redução das emissões de diversos setores tidos como de difícil descarbonização (BNDES, 2022). Por conta da sua capacidade de armazenamento energético, é visto como um facilitador na conexão de diferentes mercados, tais como mobilidade e de combustíveis, setor elétrico na geração de energia, indústria, entre outros (EPE, 2020). Assim, os avanços tecnológicos juntamente com a presença de recursos renováveis, o hidrogênio é tido como um recurso estratégico para a transição energética de baixo carbono (CASTRO *et al.*, 2023).

O hidrogênio apresenta potencial para ser utilizado em diversas aplicações, seja como insumo para diferentes setores ou como fonte energética. A sua atual falta de competitividade em comparação com combustíveis fósseis, e de algumas tecnologias ainda não atingiram a maturidade tecnológica desejada, podem explicar que até o presente momento o hidrogênio ainda não foi utilizado em larga escala. Contudo, com as projeções futuras da sua demanda no mercado, bem como esforços globais de descarbonização da economia, acredita-se que a sua produção será ainda mais incentivada, principalmente em setores no qual a redução de emissões é desafiadora (IEA, 2023).

Os setores de fertilizantes nitrogenados e refino de petróleo são os principais consumidores de hidrogênio atualmente. No entanto, outros setores podem se beneficiar com o inserimento do hidrogênio no mercado global, tais como, siderúrgico, cimento, mobilidade urbana e setor de transportes (CASTRO *et al.*, 2023).

O esforço global no desenvolvimento do hidrogênio visa principalmente a sua utilização na economia tanto como um armazenador de energia, quanto como transportador de energia, possibilitando a sua utilização na produção de combustíveis sintéticos, viabilizando a sua

expansão no setor de transportes e em veículos a pilhas de combustível (FCEV⁴) (BNDES, 2022).

2.4.1 Setor de fertilizantes

O produto químico base utilizado nos fertilizantes nitrogenados é a amônia (NH₃), e a sua produção se dá através da combinação do nitrogênio e hidrogênio através do processo conhecido Haber-Bosch. Cerca de 70% da amônia global é utilizada para produção de fertilizantes, enquanto os 30% restantes é usado em produção de plásticos, explosivos e fibras sintéticas (IEA, 2021a).

Estima-se que o Brasil importa cerca de 80% da demanda de fertilizantes nitrogenados (BNDES, 2022). Segundo a Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA), foram entregues 45,82 Mt fertilizantes no mercado brasileiro em 2023 (CAMARGO, 2024). Deste montante entregue ao mercado brasileiro, a importação de fertilizantes, como por exemplo fosfato monoamônico (MAP), cloreto de potássio e ureia, totalizou 39,43 milhões de toneladas em 2023 (HONORATO, 2024).

Para a produção global de amônia, 70% do hidrogênio consumido na sua produção é proveniente através da reforma a vapor utilizando gás natural, quanto a maior parte do restante é feita por meio da gaseificação do carvão (IEA, 2021a).

Atualmente, estão surgindo novos métodos de produção com emissões mínimas, tais como eletrólise, pirólise do metano e rotas baseadas em combustíveis fósseis com CCUS (IEA, 2021a). Vale destacar que além da produção de fertilizantes, a amônia também pode ser utilizada como vetor energético, sendo um carreador do hidrogênio, visando benefícios em relação ao custo de armazenamento e transporte, comparando-se com o hidrogênio na sua forma pura (BNDES, 2022; CASTRO *et al.*, 2023).

O conceito deste tipo de transporte de hidrogênio envolve a utilização de elementos químicos, combinando o hidrogênio com outras substâncias líquidas, que o armazenam, liberando-o na fonte de consumo. Desta forma, em transportes de longas distâncias, a amônia pode ser utilizada tanto como matéria-prima na produção de fertilizantes quanto transportadora de hidrogênio para diferentes localidades (CASTRO *et al.*, 2023).

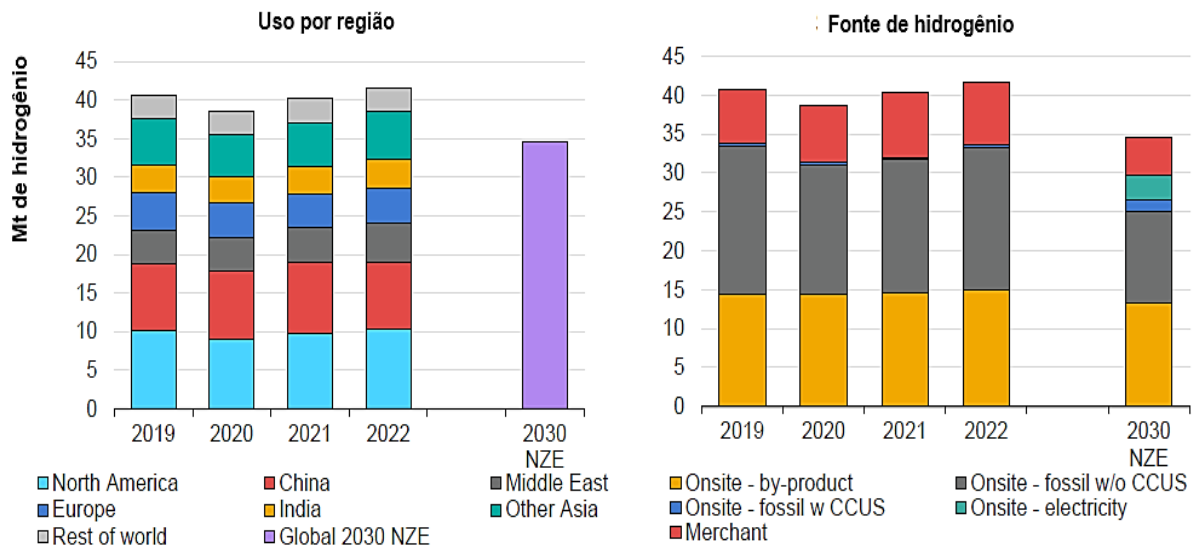
⁴ *Fuel Cell Electric Vehicle* (IEA, 2019).

Neste contexto, o hidrogênio de baixo carbono pode surgir como estratégia no mercado de amônia e fertilizantes, através da produção da amônia verde e principalmente como meio carreador de hidrogênio.

2.4.2 Setor óleo & gás – refino do petróleo

O consumo global de hidrogênio no refino petróleo nas indústrias de óleo & gás foi de mais de 41 Mt em 2022, sendo que cerca de 80% do hidrogênio utilizado nas refinarias foi gerado localmente. Deste montante, 55% da sua produção é proveniente do processo SMR, e o restante foi obtido como subproduto a partir do uso de nafta ou reforma catalítica, por exemplo (IEA, 2023).

Figura 18: Uso global de hidrogênio por região e por fonte para refino de petróleo



Notas: NZE: Cenário de emissões líquidas zero até 2050; Fossil w/o CCUS: utilização de combustíveis fósseis sem CCUS; Fossil w CCUS: utilização de combustível fóssil com CCUS; Onsite: refere-se a produção de hidrogênio dentro das refinarias, incluindo produção dedicada como subproduto de reforma catalítica.

Fonte: IEA, 2023 (modificado pelo autor).

Menos de 1% do hidrogênio utilizado nas refinarias em 2022 foi gerado por tecnologias de baixa emissão, conforme apresentado na Figura 18. Por outro lado, 20% do hidrogênio utilizado nas refinarias foram adquiridos do mercado, onde em sua grande parte utilizou-se de combustíveis fósseis para a sua produção (IEA, 2023).

No Brasil, a maior da produção de hidrogênio é proveniente da reforma a vapor do gás natural, sendo que a sua utilização nas refinarias é para o processo de hidrocraqueamento

catalítico e hidrotratamento, com o intuito de ajustar o fluxo de hidrocarbonetos para a obtenção de produtos em conformidade com as especificações desejadas (EPE, 2022d).

O setor de refino demanda um grande consumo de hidrogênio, onde acredita-se que o hidrogênio de baixo carbono pode ser uma alternativa viável para impulsionar a necessidade por este tipo de combustível (IEA, 2023). No entanto, os altos custos da produção de hidrogênio de baixo carbono em comparação com o hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis e a falta de políticas para incentivar o seu uso no setor de óleo & gás, a aplicação de hidrogênio de baixo carbono tem sido limitada nas refinarias atualmente (IEA, 2023; CASTRO *et al.*, 2023).

2.4.1 Setor do cimento

O processo de produção de cimento ocorre em fornos de alta temperatura, apresentando grande consumo energético e conseqüentemente emissões de CO₂. Na indústria do cimento no Brasil, 36% das emissões totais são provenientes da queima de combustíveis fósseis, 63% provêm do processo de calcinação⁵ e 1% restante é referente ao consumo de energia elétrica (CASTRO *et al.*, 2023; SNIC, 2019).

A descarbonização do setor de cimento é de grande desafio, devido a reação de calcinação liberar CO₂ no processo de clínquerização. Desta forma, um estudo em andamento para demonstrar a viabilidade da utilização do carbono proveniente de processos de captura de CO₂ obtido da produção de hidrogênio azul, que poderia ser empregado no processo de produção de clínquer. O hidrogênio ainda surge como uma opção para substituir os combustíveis fósseis no fornecimento de energia térmica no processo. Ademais, a utilização de hidrogênio como fonte de calor pode ser considerada, utilizando-o como principal combustível em fornos de clínquerização, mostrando, assim, uma forma de redução das emissões na indústria de cimento (CASTRO *et al.*, 2023).

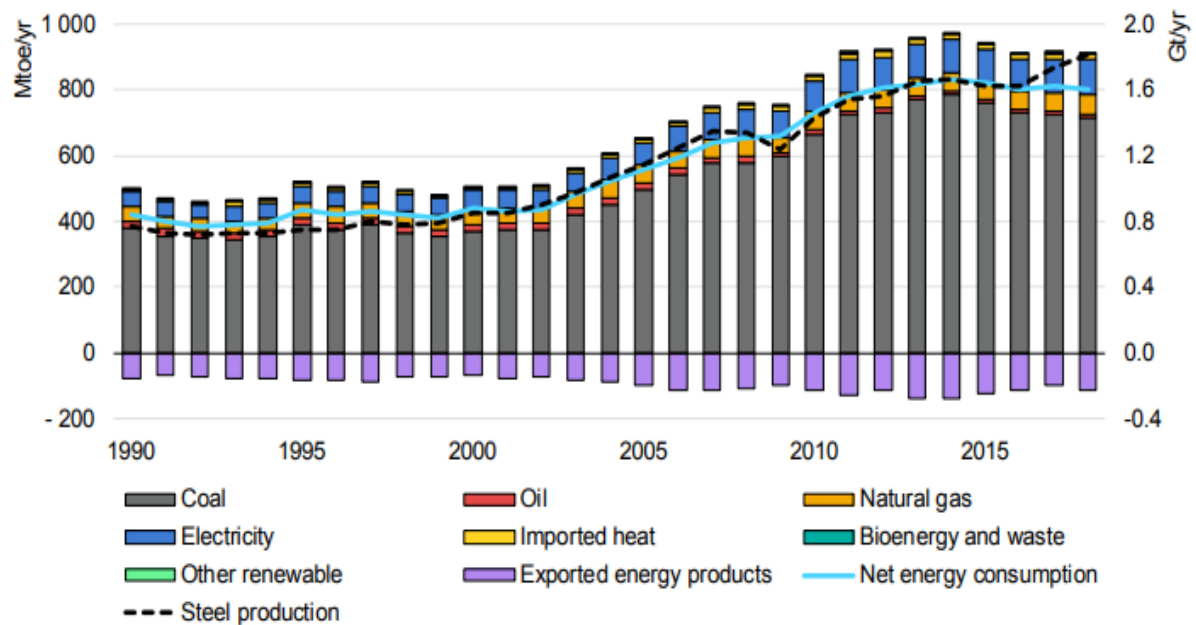
2.4.2 Setor siderúrgico

A fabricação de aço envolve os processos de redução, refino e laminação. A redução ocorre no alto forno onde o minério de ferro e o agente redutor (coque, carvão mineral ou

⁵ A calcinação é um processo de decomposição térmica do calcário, onde através de reação química converte o calcário em óxido de cálcio e liberação de CO₂.

vegetal) são alimentados contracorrente aos gases gerado, resultando na obtenção de ferrogusa. O segundo estágio é o refino do ferrogusa cujo objetivo é remover as impurezas presentes no minério de ferro e mistura de diversos elementos com objetivo de produzir o aço. Na laminação ocorre a conformação mecânica do aço em chapas, tiras ou folhas. Nos três processos, ocorre a formação significativa de CO₂ (MME, 2021; CASTRO *et al.*, 2023). A geração média de CO₂ em todo o processo é de cerca de 1,73 t-CO₂ /t de aço (CASTRO *et al.*, 2023).

Figura 19: Consumo energético no setor siderúrgico



Notas: GJ: Giga-Joule; Mtoe: milhões de toneladas de óleo equivalente; "Exported energy products": produtos energéticos produzidos não utilizados diretamente no setor de ferro e aço, incluindo fornos de coque e altos-fornos.

Fonte: IEA, 2020 (modificado pelo autor).

O setor siderúrgico é altamente dependente de carvão ou gás natural, contribuindo com cerca de 8% do total da energia consumida globalmente (IEA, 2019). Conforme representado na Figura 19, atualmente o consumo total de energia no setor quase dobrou comparado com o ano de 1990, ao passo que a produção cresceu a uma taxa de 2,4 no mesmo período.

Segundo o IEA (2019), estratégias estão sendo implementadas para testar a produção de aço utilizando o hidrogênio como principal agente redutor, sendo que projetos em escala comercial estão previstos a partir de 2030. Além disso, o hidrogênio de baixo carbono pode ser integrado aos processos existentes que atualmente consomem gás natural e carvão, visando reduzir as emissões de CO₂ por este setor.

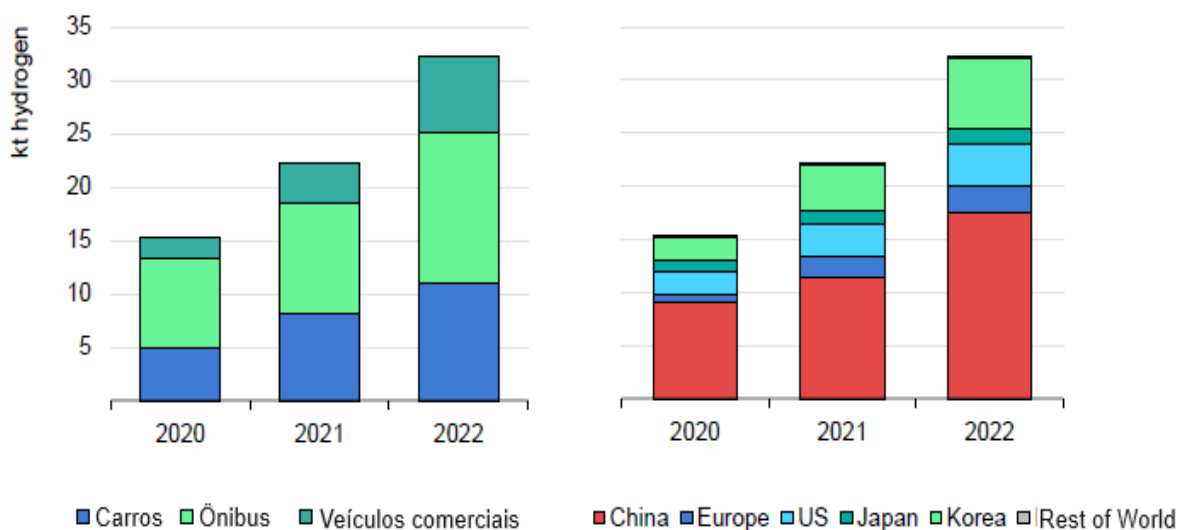
2.4.3 Mobilidade urbana e setor de transportes

O setor de transportes global, emitiu cerca de 7,0 Gt de CO₂ em 2020, sendo um setor altamente dependente de combustíveis fósseis, onde apesar de progressos na implantação de biocombustíveis e eletricidade terem avançado, o setor corresponde cerca de 90% da demanda energética em 2020 (IEA, 2019).

Neste sentido, o hidrogênio tem sido anunciado como um potencial combustível para o setor de transportes e mobilidade urbana, sendo visto como um combustível de baixo carbono frente aos combustíveis fósseis. O hidrogênio pode ser convertido em diferentes tipos de combustível, como metano sintético, metanol e amônia (IEA, 2019). Dentre alternativas, o hidrogênio ainda pode ser utilizado diretamente como combustível, podendo-se citar os veículos híbridos, veículos FCEVs e veículos BEVs⁶.

O número de unidades vendidas dos veículos movidos a célula de combustível tem aumentado nos últimos anos, especialmente para automóveis e ônibus. As vendas de caminhões pesados também estão aumentando a sua presença no mercado mundial (IEA, 2023). Este aumento na presença do hidrogênio na mobilidade, está diretamente correlacionada aos compromissos dos países na diminuição das emissões de GEE (CASTRO *et al.*, 2023).

Figura 20: Consumo de hidrogênio no transporte rodoviário por segmento e por país



Fonte: IEA, 2023 (modificado pelo autor).

⁶ Battery Electric Vehicles (IEA, 2019).

O uso do hidrogênio como combustível, em 2022, no setor de transporte terrestre foi de aproximadamente 45% maior quando comparado com o ano de 2021, conforme representado pela Figura 20.

A maior demanda de energia de célula a combustível é no setor de transporte, especialmente nos automóveis, onde aproximadamente 4000 veículos elétricos com célula a combustível foram comercializados no ano de 2018. Os Estados Unidos contam com quase a metade da produção dos veículos FCEVs, seguidos pelo Japão e União Europeia (IEA, 2019).

Da mesma forma, caminhões e ônibus a célula combustível tem crescido rapidamente, com cerca de 7000 unidades de cada em 2022 (IEA, 2023). O crescimento deste setor tem sido maior em frotas que conseguem realizar carregamentos diários e percorrer distâncias diárias limitadas, de até 350 quilômetros diários.

A maior parte da utilização de hidrogênio no transporte provavelmente continuará sendo no segmento rodoviário nos próximos anos, entretanto o setor ferroviário está gradualmente aumentando o consumo de hidrogênio, com testes e adoção de trens movidos a hidrogênio em mais rotas. A utilização de querosene sintético e até mesmo o emprego direto de hidrogênio como fonte de energia para setor aéreo no futuro resultará em um aumento significativo da utilização do hidrogênio no setor de transporte (IEA, 2023).

2.5 PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, art. 3º inciso XVI define resíduos sólidos como sendo (BRASIL, 2010, p.2):

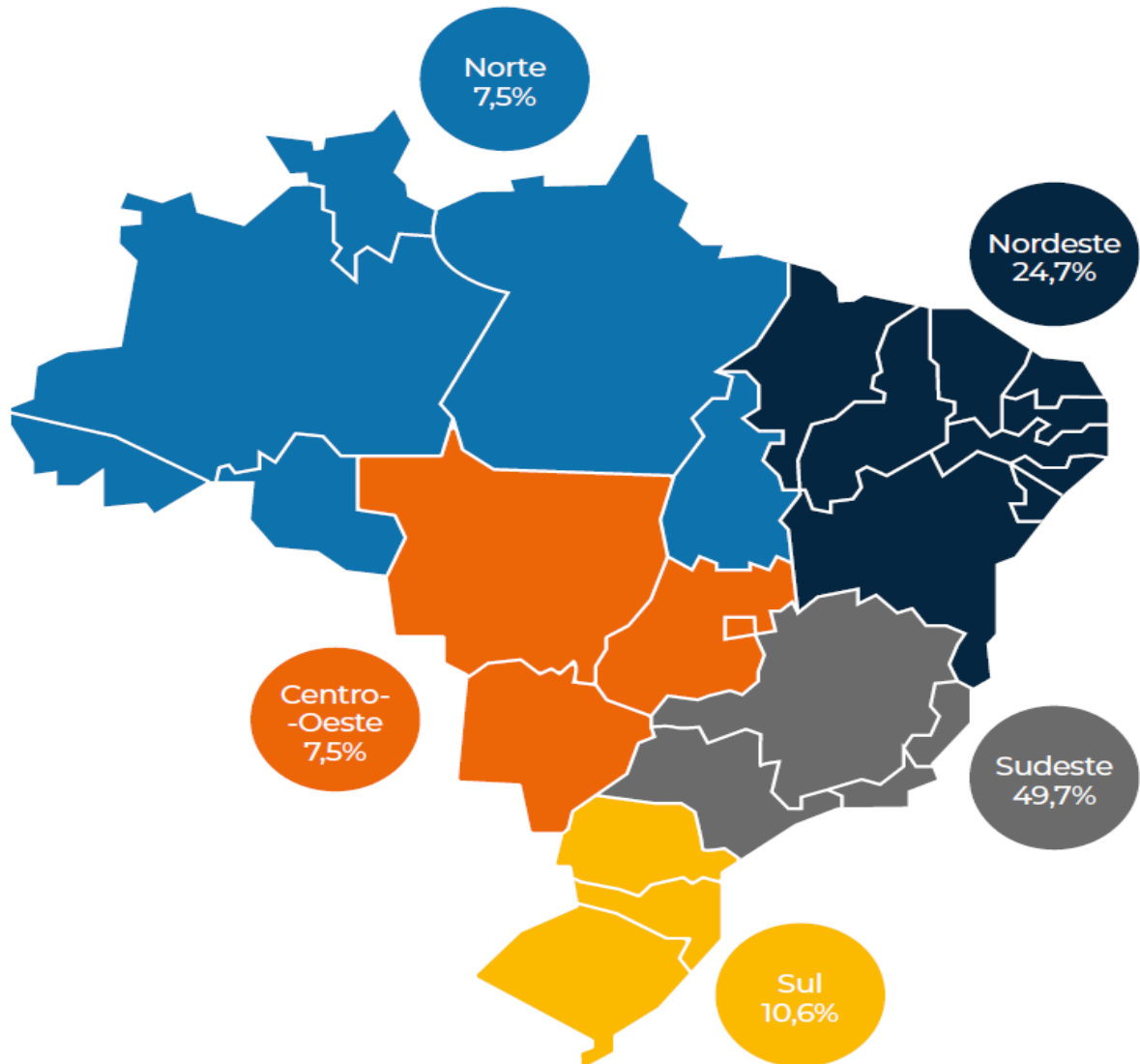
Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como os gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

Ainda de acordo com a Lei nº 12.305/2010, art. 13 (BRASIL, 2010, p.14), os resíduos sólidos são classificados como:

(...) quanto a origem: resíduos domiciliares, de limpeza urbana ou de varrição, resíduos sólidos urbanos, resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, resíduos dos serviços públicos de saneamento básico, industriais, de serviços de saúde, da construção civil, agrossilvopastoris, de serviços de transportes e de mineração; quanto à periculosidade: perigosos e não perigosos.

É de competência do Poder Público a coleta e a correta destinação dos resíduos gerados nos municípios. Com relação aos demais tipos de resíduos, cabe aos próprios geradores proverem a coleta e destinação final.

Figura 21: Participações das regiões na geração de RSU em 2022, em %

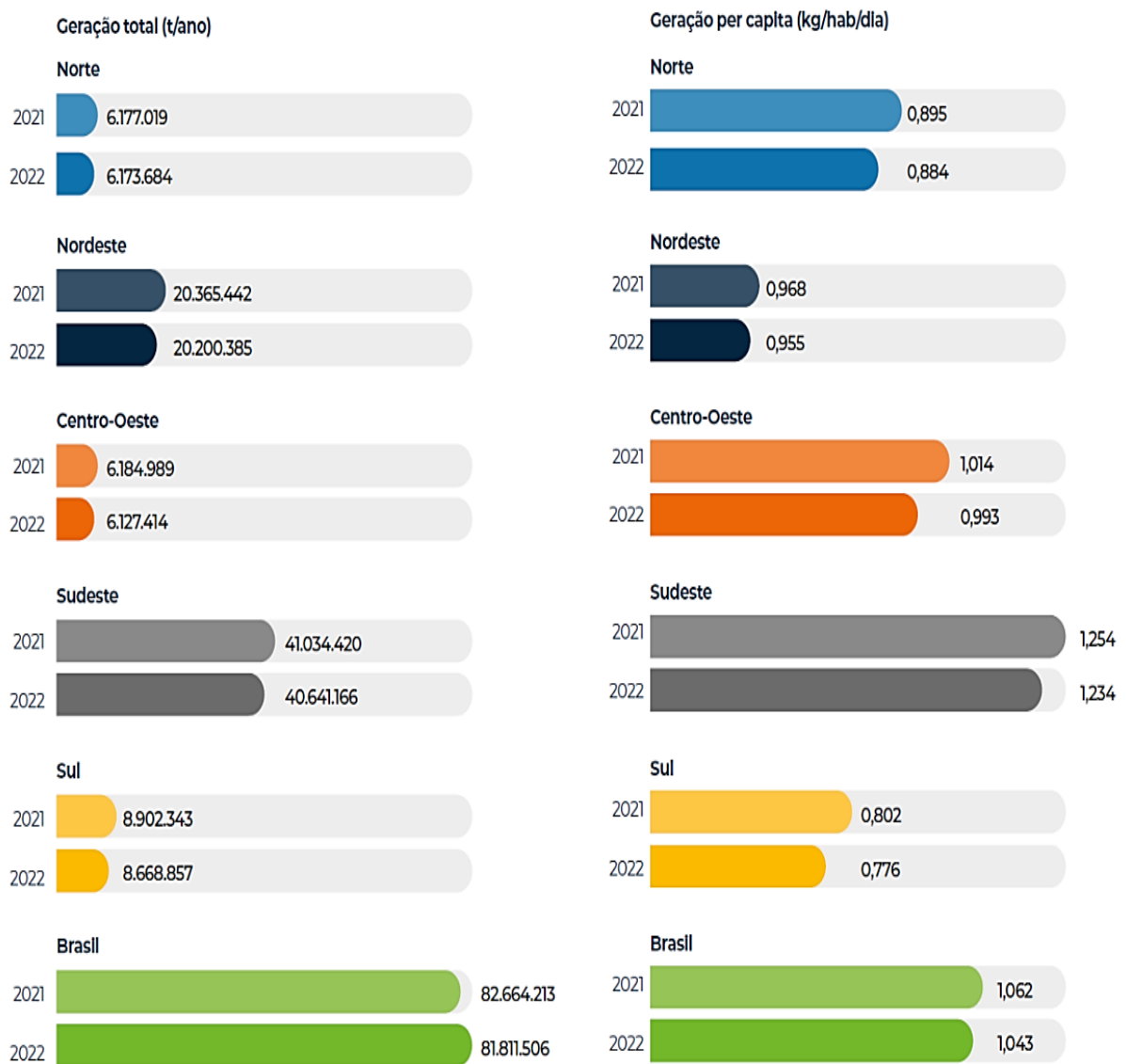


Fonte: ABRELPE, 2022.

De acordo com a Abrelpe (2022), em 2022 a geração de RSU no país alcançou 81,8 milhões de toneladas, o que equivale a uma média de 1,043 kg/hab/dia. Comparando com o ano anterior, observou-se uma redução de geração de cerca de 0,81%.

No ano de 2022, o Brasil gerou⁷ 81.811.506 t/ano de RSU, representando uma geração per capita de 1,043 kg de RSU/hab/dia. As Figuras 21 e 22 demonstram que a região Sudeste apresentou o maior nível de geração de resíduos em 2022, com uma geração per capita de 1,234 kg/hab/ano. Por outro lado, a região Centro-Oeste foi a que menos contribuiu para a geração de RSU, com aproximadamente 7,5% do total gerado, representando 0,993 kg/hab/ano.

Figura 22: Geração total (t/ano) e per capita (kg/hab/dia) de RSU em 2022

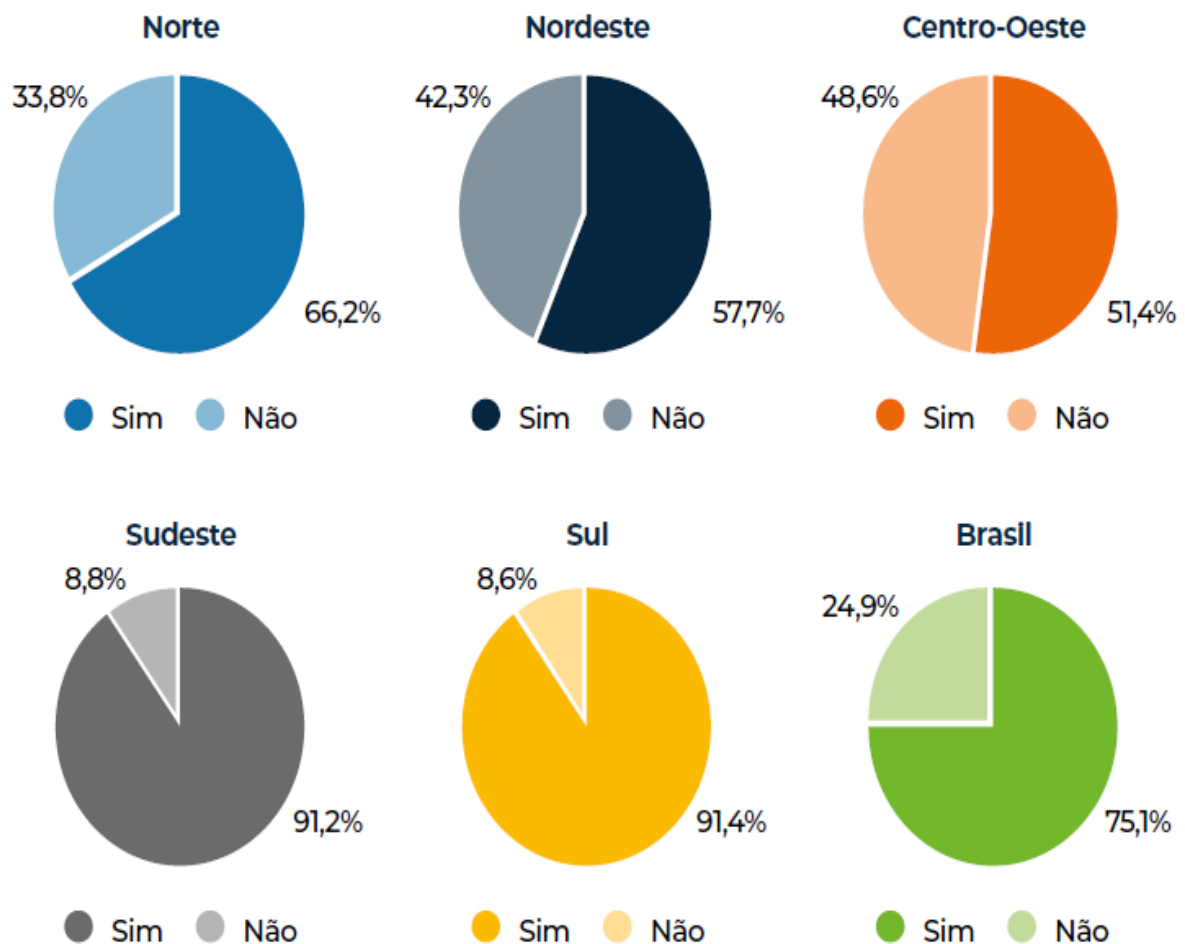


Fonte: ABRELPE, 2022.

⁷ Importante destacar que desse total gerado, somente 76.118.317 toneladas foram coletadas, representando 7% de RSU gerados no Brasil em 2022, não foram coletados (ABRELPE, 2022).

Em 2021, 75,1% dos municípios brasileiros implementaram iniciativas de coleta seletiva (ABRELPE, 2022), conforme representado na Figura 23. É relevante ressaltar, no entanto, que em muitas cidades as atividades de reciclagem ainda não abrangem toda a população, com aproximadamente 25% das cidades não contando com tal iniciativa. A região Sul se sobressai por ter 91,4% das cidades com programas de separação de resíduos, enquanto na região Centro-Oeste, esse percentual se limita a apenas 51,4% das cidades.

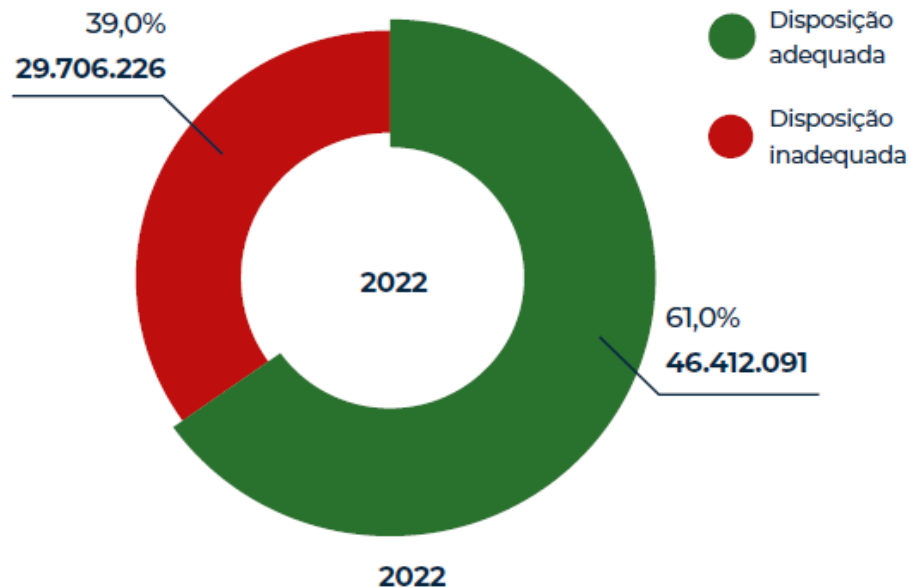
Figura 23: Regiões com coleta seletiva no Brasil (%), em 2021



Fonte: ABRELPE, 2022.

A PNRS estabelece que os resíduos devem receber uma destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010). Neste contexto, em 2022, 46,4 Mt de RSU coletados, foram destinados adequadamente para aterros sanitários. Em contrapartida, quase 30,0 Mt, receberam destinação inadequada, sendo dispostos em lixões e aterros controlados (ABRELPE, 2022). Na região Centro-Oeste, 56,5% dos 5,8 Mt de RSU coletados, foram destinados inadequadamente.

Figura 24: Disposição final de RSU no Brasil e por região (t/ano e %), em 2022



Região	Disposição adequada		Disposição inadequada	
	t/ano	%	t/ano	%
Norte	1.870.470	36,6%	3.240.105	63,4%
Nordeste	6.214.527	37,2%	10.491.191	62,8%
Centro-Oeste	2.532.762	43,5%	3.288.281	56,5%
Sudeste	29.773.638	74,3%	10.298.552	25,7%
Sul	6.020.694	71,6%	2.388.097	28,4%
Brasil	46.412.091	61,0%	29.706.226	39,0%

Fonte: ABRELPE, 2022.

Sob a ponto de vista ambiental, os aterros sanitários apresentam menor impacto ambiental se comparados a aterros controlados e lixões. No entanto, ainda há impactos ambientais significativos, tais como transbordamentos, infiltração de chorume no solo, contaminação do lençol freático, emissão de gases. De acordo com Waldman (2011), a destinação final dos RSU, mesmo que pareça ambientalmente adequada, vai contra a ecoeficiência e as práticas mais avançadas da economia circular, que recomendam a destinação de resíduos para aterros sanitários somente quando não há alternativa de reaproveitamento.

2.6 PANORAMA DOS RSU NA REGIÃO METROPOLITANA DE GOIÂNIA

A Região Metropolitana de Goiânia (RMG) conta com 20 municípios, compreendendo uma área territorial de 7.340 km², totalizando 2.594.787 de residentes na região, conforme dados do último censo divulgado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2022).

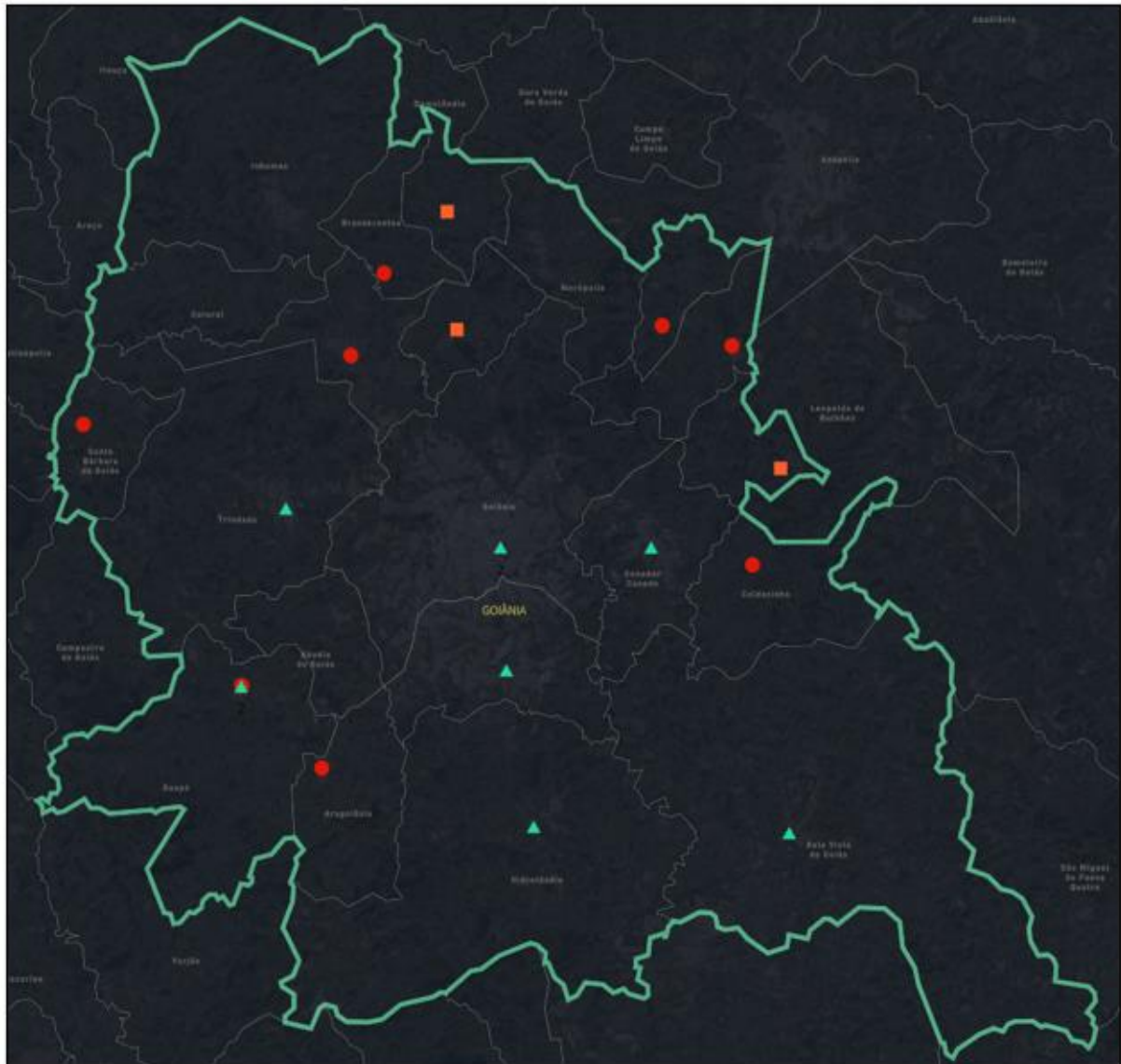
Tabela 2.1: Região Metropolitana de Goiânia: população e taxa de crescimento demográfico (2022)

Unidade da Federação e Município	População residente	Área da unidade territorial (km²)	Densidade demográfica (Hab/km²)
Abadia de Goiás (GO)	19.128	143,36	133,43
Aparecida de Goiânia (GO)	527.796	279,95	1.885,30
Aragoiânia (GO)	11.890	218,13	54,51
Bela Vista de Goiás (GO)	34.445	1.274,03	27,04
Bonfinópolis (GO)	10.296	121,92	84,45
Brazabrantes (GO)	3.992	125,33	31,85
Caldazinha (GO)	4.507	251,72	17,90
Caturai (GO)	5.184	205,07	25,28
Goianápolis (GO)	13.967	166,64	83,81
Goiânia (GO)	1.437.366	729,30	1.970,90
Goianira (GO)	71.916	213,77	336,41
Guapó (GO)	19.545	514,18	38,01
Hidrolândia (GO)	27.742	952,12	29,14
Inhumas (GO)	52.204	614,89	84,90
Nerópolis (GO)	31.932	204,71	155,98
Nova Veneza (GO)	9.481	122,35	77,49
Santo Antônio de Goiás (GO)	7.386	135,02	54,70
Senador Canedo (GO)	155.635	247,01	630,09
Terezópolis de Goiás (GO)	7.944	107,41	73,96
Trindade (GO)	142.431	712,69	199,85
TOTAL	2.594.787	7.340	353,53

Fonte: IBGE, 2022

O Sistema Nacional de Informações sobre Resíduos Sólidos (SINIR) é um instrumento da PNRS estando sob responsabilidade do Governo Federal, por meio do Ministério do Meio Ambiente (MMA) (SINIR, 2024), que fornece dados detalhados sobre a gestão de RSU no Brasil.

Figura 25: Identificação de aterros sanitários, controlados e lixões na RMG, em 2019



Legenda:

- ▲ Aterro sanitário ■ Aterro controlado ● Lixão — Extensão territorial da RMG

Fonte: SINIR, 2024.

É possível visualizar a extensão territorial da RMG na Figura 25, indicando os locais destinados ao descarte de RSU na área. Os triângulos de cor verde simbolizam os aterros

sanitários, os quadrados de cor laranja representam os aterros controlados e os círculos vermelhos indicam os lixões.

É possível observar que, entre os 20 municípios da RMG, 9 utilizam aterros sanitários, 3 utilizam aterros controlados e 8 utilizam lixões para a disposição final dos RSU. Essa diversidade na distribuição dos locais de destinação dos resíduos sólidos urbanos mostra uma realidade variada na gestão desses materiais na região, com algumas cidades adotando medidas adequadas do ponto de vista ambiental, como os aterros sanitários, enquanto outras ainda recorrem a alternativas inadequadas, como os aterros controlados e os lixões.

Figura 26: Panorama das destinações de RSU na RMG, 2019



Fonte: SINIR, 2024.

No Brasil, a coleta de RSU pode ser dividida entre indiferenciada, em que os resíduos são coletados sem separação prévia, resultando em perdas na reciclagem; e a coleta seletiva, que envolve a separação de materiais na origem. A coleta seletiva, por sua vez, pode ser feita separando resíduos úmidos e secos, ou ainda de forma mais criteriosa, separando resíduos orgânicos, secos e rejeitos (MMA, 2022).

Dentro do cenário da destinação final dos RSU na RMG, a Figura 26 apresenta uma visão ampla para o ano de 2019:

- Apenas 1,47% dos materiais de coleta seletiva são reaproveitados, evidenciando a necessidade de aumentar a recuperação como meio de dar mais importância aos resíduos e promover a economia circular.
- 84,57% dos RSU, provenientes da coleta seletiva e indiferenciada, são encaminhados para aterros sanitários;
- Somente 1,68% dos RSU são destinados aos aterros controlados, os quais possuem uma segurança inferior se comparados aos aterros sanitários;
- Cerca de 12,31% dos RSU são depositados em lixões, causando sérios impactos ambientais e sociais.

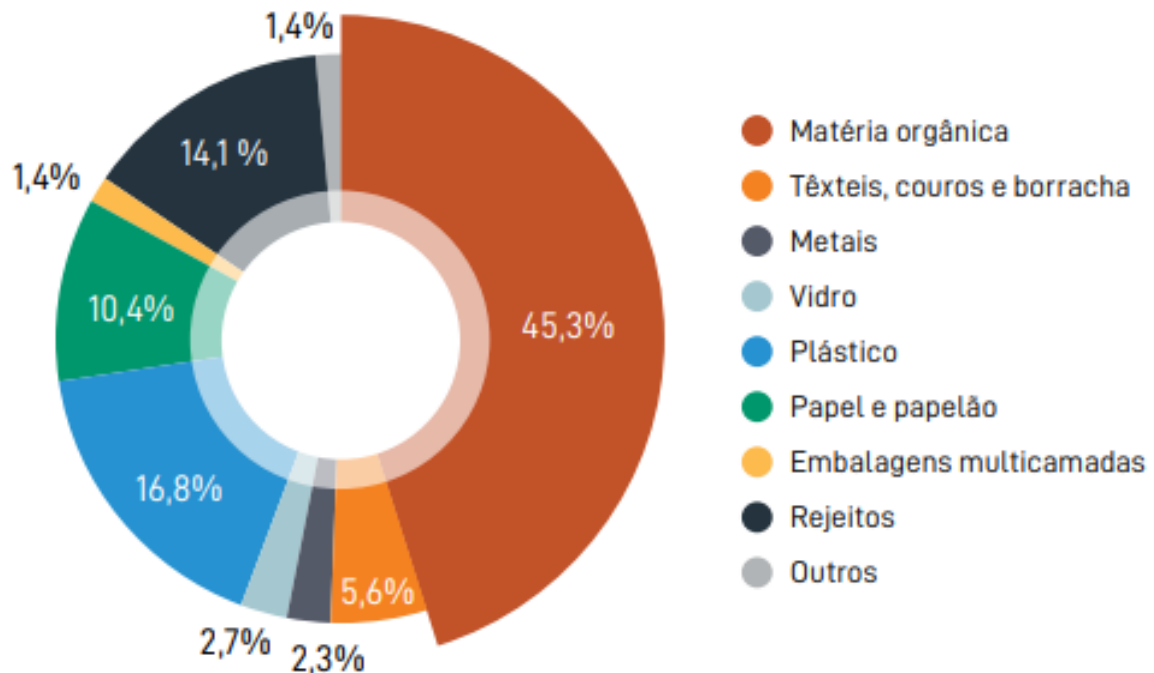
Os dados apresentados pelo SINIR incluem os resíduos orgânicos e materiais recicláveis gerados na RMG, fornecendo um panorama amplo da destinação final na região. Uma análise mais detalhada revela uma situação em que 65% dos RSU são descartados de maneira inadequada em aterros controlados e/ou lixões.

Frente a esse cenário, é essencial buscar alternativas ecologicamente corretas para o gerenciamento de RSU. A introdução de métodos inovadores, como os biodigestores anaeróbios e a conversão do biogás em biometano, surge como uma oportunidade promissora de converter uma questão ambiental em uma fonte de energia renovável e agregar valor aos resíduos sólidos.

2.6.1 Composição gravimétrica dos RSU

Segundo a ABRELPE (2020), a composição gravimétrica típica dos RSU no Brasil, com classificação para matéria orgânica, metais, vidros, plástico, papel e papelão e rejeitos, segue a distribuição apresentada na Figura 27. A gravimetria típica estimada considerou a média ponderada da geração total dos RSU por faixa de renda dos municípios, considerando a população e geração per capita.

Figura 27: Gravimetria típica dos RSU, em %



Fonte: ABRELPE, 2020.

A Tabela 2.2 apresenta a participação de diferentes tipos de materiais na fração total dos RSU gerados no Brasil em 2020, sendo que tais dados permitem analisar a distribuição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos.

Tabela 2.2: Gravimetria estimada, dos RSU, de cada região brasileira em 2020

Região	Orgânicos	Têxteis, couros e borracha	Metais	Vidro	Plástico	Papel e Papelão	Embalagens	Rejeitos	Outros
Norte	55,9%	1,3%	3,6%	1,7%	13,2%	11,3%	0,4%	8,8%	1,8%
Nordeste	46,0%	4,6%	2,1%	2,2%	17,9%	9,2%	1,2%	15,3%	1,7%
Centro-Oeste	44,3%	4,8%	2,2%	3,3%	16,8%	10,4%	1,1%	16,5%	0,6%
Sudeste	45,1%	6,7%	2,0%	2,5%	15,6%	9,4%	1,3%	14,6%	2,7%
Sul	42,8%	6,1%	2,7%	3,3%	16,9%	12,4%	1,8%	13,0%	0,8%

Fonte: ABRELPE, 2020.

Tabela elaborada pelo autor.

O material orgânico é o componente dominante dos resíduos sólidos urbanos em todas as regiões do Brasil, variando de 44,3% no Centro-Oeste a 51,4% no Nordeste. Já os resíduos

recicláveis secos, como papel, plástico, metal e vidro, correspondem a uma proporção entre 27,1% no Centro-Oeste e 32,8% na região Sul.

De acordo com os dados disponibilizados pelo SINIR (2024), a geração total de RSU na RMG em 2019 foi de 904.000 t/ano. Com base na população residente, a RMG possui uma geração per capita de 0,954 kg/hab/dia. Esta geração per capita será utilizada como base para análise deste trabalho. A Tabela 2.3 representa a geração de RSU na RMG para o ano de 2019.

Tabela 2.3: Geração de RSU na RMG em 2019

Município	População	RSU	Orgânicos	Metais e Vidro	Plástico, papel e papelão	Rejeitos	Outros ⁴
	(mil) ¹	(t/ano) ²	(t/ano) ³	(t/ano)	(t/ano)	(t/ano)	(t/ano)
Abadia de Goiás	19.128	6.668	2.954	367	1.814	1.100	433
Aparecida de Goiânia	527.796	183.976	81.502	10.119	50.042	30.356	11.958
Aragoiânia	11.890	4.145	1.836	228	1.127	684	269
Bela Vista de Goiás	34.445	12.007	5.319	660	3.266	1.981	780
Bonfinópolis	10.296	3.589	1.590	197	976	592	233
Brazabrantes	3.992	1.392	616	77	378	230	90
Caldazinha	4.507	1.571	696	86	427	259	102
Caturai	5.184	1.807	801	99	492	298	117
Goianápolis	13.967	4.869	2.157	268	1.324	803	316
Goiânia	1.437.366	501.030	221.956	27.557	136.280	82.670	32.567
Goianira	71.916	25.068	11.105	1.379	6.819	4.136	1.629
Guapó	19.545	6.813	3.018	375	1.853	1.124	443
Hidrolândia	27.742	9.670	4.284	532	2.630	1.596	629
Inhumas	52.204	18.197	8.061	1.001	4.950	3.003	1.183
Nerópolis	31.932	11.131	4.931	612	3.028	1.837	723
Nova Veneza	9.481	3.305	1.464	182	899	545	215
Santo Antônio de Goiás	7.386	2.575	1.141	142	700	425	167
Senador Canedo	155.635	54.250	24.033	2.984	14.756	8.951	3.526
Terezópolis de Goiás	7.944	2.769	1.227	152	753	457	180
Trindade	142.431	49.648	21.994	2.731	13.504	8.192	3.227
Total	2.594.787	904.478	400.684	49.746	246.018	149.239	58.791

Fonte: SINIR, 2024.

Elaborado pelo autor.

¹ Estimativa IBGE (2022).

² A geração na região Centro-Oeste, em 2021, foi de 0,955 (kg/hab/dia).

³ Gravimetria estimada em 44,3%, conforme ABRELPE (2020).

⁴ Incluso têxteis, couros e borracha e embalagens multicamadas na voz de outros.

A escolha em considerar as informações de geração de RSU divulgadas pelo SINIR, é fundamentada em duas razões principais:

- Regionalização específica: o SINIR apresenta dados detalhados sobre a geração de RSU na RMG, assegurando informações de acordo com a realidade regional e o foco deste trabalho.
- A veracidade dos dados do SINIR é reconhecida por sua confiabilidade e atualização, sendo essencial para garantir a fidedignidade da análise em relação à realidade da RMG.

2.7 GERAÇÃO DO BIOGÁS A PARTIR DOS RSU

2.7.1 Processo de digestão anaeróbia de RSU e geração de biogás

A decomposição da matéria orgânica através da digestão anaeróbia é um processo que ocorre na ausência de oxigênio. Carboidratos, proteínas e gorduras, que possuem um grande potencial energético para o processo, são predominantemente encontrados na fração orgânica dos RSU. Microrganismos anaeróbios, convertem essas moléculas em biogás através do processo anaeróbio completo (COELHO *et al.*, 2018).

No processo anaeróbio, microrganismos anaeróbios decompõe a matéria orgânica para obtenção de energia e nutrientes para o seu próprio crescimento e reprodução. Esta decomposição ocorre através de quatro processos bioquímicos fundamentais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (SILVA MARTINEZ, 2021). Estes processos que ocorrem durante a decomposição, quebram as substâncias orgânicas, obtendo-se uma mistura composta majoritariamente de gás metano (CH₄) e gás carbônico (CO₂), originando, portanto, o biogás.

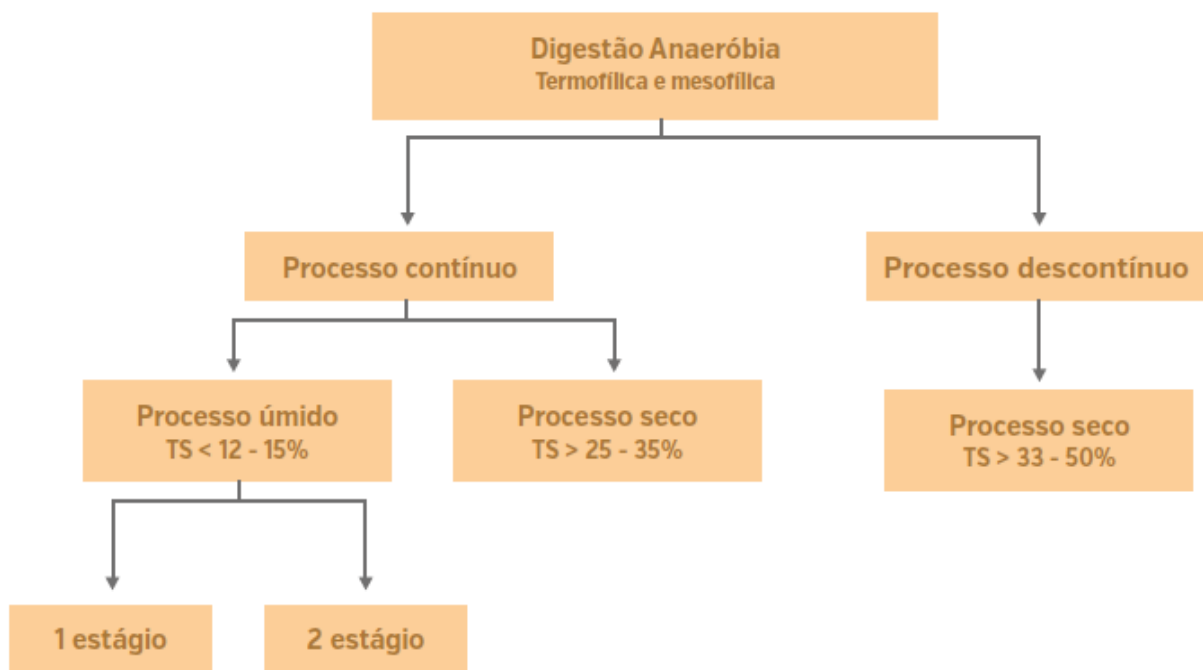
A Tabela 2.4 apresenta a concentração dos compostos comumente presentes no biogás, em comparação com a mistura gasosa do gás natural de origem fóssil.

Tabela 2.4: Composição típica do biogás em comparação com o gás natural

Compostos	Unidade	Concentração (%)	
		Biogás	Gás Natural
Metano (CH ₄)	% Vol.	55 - 70	91
Dióxido de Carbono (CO ₂)	% Vol.	25 - 40	0,61
Gás Sulfídrico (H ₂ S)	% Vol.	0,5 - 1	< 0,001

Fonte: Adaptado de COELHO *et al.*, 2018.

Figura 28: Possíveis rotas do processo de digestão anaeróbia



Fonte: PROBIOGÁS, 2016a

O processo de digestão anaeróbia se subdivide em processo via úmida e seca, com operação contínua ou descontínua. No processo contínuo, a decomposição anaeróbia pode ocorrer via fermentação úmida ou seca. Já no processo descontínuo, a decomposição aeróbia só ocorre por meio da fermentação seca (PROBIOGÁS, 2016a).

Visando exclusivamente extrair o potencial energético do biogás através do tratamento dos RSU, os processos secos são mais indicados para serem utilizados em um processo de conversão energética (SUANI *et al.*, 2020). Considerando o tratamento de RSU, as três tecnologias de biodigestores comumente utilizadas são de digestão anaeróbia seca contínua ou descontínua e biodigestores de mistura contínua (digestão anaeróbia úmida) (PROBIOGÁS,

2015b). Na Tabela 2.5 é apresentado as suas principais características, vida útil dos biodigestores, vantagens e desvantagens.

Tabela 2.5: Comparativo das tecnologias de biodigestores anaeróbios para RSU

	Digestão Anaeróbia Seca Descontínua	Digestão Anaeróbia Seca Contínua	Digestão Anaeróbia Úmida
Condição de utilização da tecnologia	Umidade < 65%, > 25.000 hab.	Umidade < 75% > 80.000 hab.	Umidade > 85%, > 15.000 hab.
Substratos	Fração orgânica dos RSU em geral		Exclusivo para restos de alimentos (restaurantes, mercados, feiras, etc.)
Substâncias não orgânicas	Aceitável	Parcialmente aceitável	Não aceitável
Concentração de sólidos no biodigestor	35 - 45%	25 - 30%	10 - 15%
Geração estimada de metano	35 - 90 Nm ³ -CH ₄ /ton	50 - 250 Nm ³ -CH ₄ /ton	50 - 350 Nm ³ -CH ₄ /ton
Nº plantas	Não disponível	de 500 a 750	de 500 a 1.000
Tempo de construção	9 - 12 meses	12 - 18 meses	10 - 15 meses
Tempo de comissionamento	1 - 3 meses	3 - 6 meses	4 - 6 meses
Vida útil: civil	Não disponível	20 - 25 anos	15 - 20 anos
Vida útil: equipamentos	Não disponível	7 - 15 anos	5 - 10 anos
Vida útil médio	Não disponível	13 - 20 anos	10 - 15 anos
Vantagens	Aproveitamento energético dos RSU; Maior controle de fugas de CH ₄ ; aplicado com UTMB, dispensa grandes áreas de aterros		Aproveitamento energético, maior controle de fugas de CH ₄
Desvantagens	Custo inicial para instalação consideravelmente alto; Municipalidades carecem de vivência e recursos para gestão de operação e manutenção		Separação e classificação da fração orgânica exigentes

Fonte: PROBIOGÁS, 2015b.

2.7.2 Tratamento mecânico-biológico como gestão de resíduos

De acordo com o art. 3º, inciso VII instituído pela PNRS define que “a destinação final ambientalmente adequada de resíduos inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes.” (BRASIL, 2010, p.1). Desta forma, a disposição final dos resíduos é fundamental para garantir

segurança, minimizar os impactos ambientais e prevenção de danos à saúde pública (BRASIL, 2010).

Importante destacar que a alternativa de destinação final adequada se aplica exclusivamente aos rejeitos, que são resíduos que não possuem outra opção além da disposição em aterro sanitário, após esgotadas todas as formas de tratamento e recuperação (MMA, 2022).

Dessa forma, iniciativas voltadas para a economia circular estão se tornando cada vez mais relevantes, buscando um modelo eficaz que prioriza a reintrodução de materiais na cadeia produtiva, através da implementação de políticas públicas com foco na gestão integrada (MMA, 2022). Nesta conjuntura, perante o que PNRS institui, prevê que o responsável pelos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos deve dar prioridade à estruturação e operacionalização de cooperativas ou outras modalidades de associação de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis para as atividades de reutilização e reintegração dos resíduos em processos produtivos (MCTI, 2020).

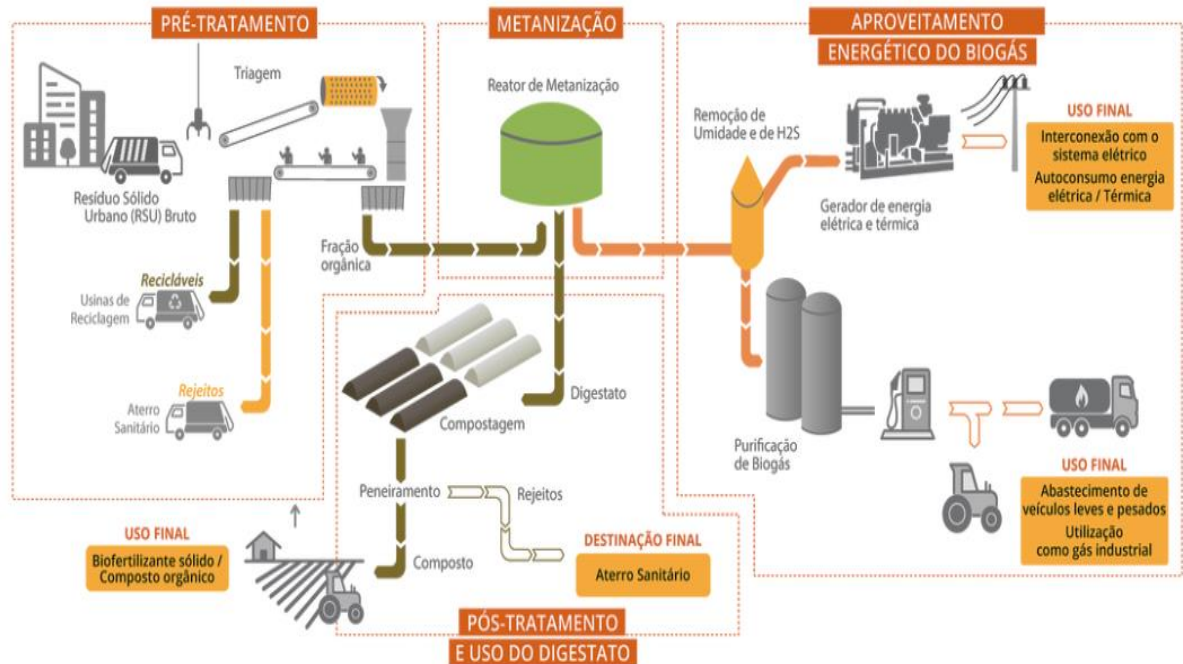
Neste contexto, através de um Acordo de Cooperação Técnica entre o projeto GEF Biogás Brasil e o Governo do Distrito Federal, foi desenvolvido um projeto de concessão para a iniciativa privada de Unidades de Tratamento Mecânico Biológico (UTMB) de RSU. Estas UTMB terão o objetivo de separar os materiais coletados para a produção de biogás, proporcionando um destino correto para os resíduos gerados no Distrito Federal (GEF BIOGÁS BRASIL, 2023).

O Tratamento Mecânico-Biológico (TMB) é empregado como alternativa de gestão de resíduos para municípios, visando promover a recuperação e valorização de materiais, resultando assim a reciclagem de materiais inorgânicos, produção de CDR⁸ e principalmente reaproveitamento energético (MMA, 2022).

No processo de TMB, os RSU coletados são submetidos a um processo de triagem com o objetivo de promover a separação da fração orgânica do resíduo inorgânico reciclável. Uma vez realizada esta triagem, a fração orgânica é então encaminhada o processo de biodigestão anaeróbia para a geração de biogás.

⁸ Combustível Derivado de Resíduo (CDR): é um combustível com alto poder calorífico gerado a partir dos RSU, permitindo o seu uso como fonte energética.

Figura 29: Fluxograma simplificado de uma UTMB



Fonte: GEF BIOGÁS BRASIL, 2023.

Os RSU coletados são encaminhados para a UTMB para o seu recebimento e armazenamento. Com o pré-tratamento, é realizada a triagem dos resíduos, visando a preparação e separação dos materiais inorgânicos recicláveis, que são encaminhados para usinas de reciclagem, da fração orgânica para posterior envio ao processo de biodigestão. Ainda assim, nesta etapa, os rejeitos, que são resíduos sanitários e materiais recicláveis contaminados, são separados e destinados para aterros sanitários.

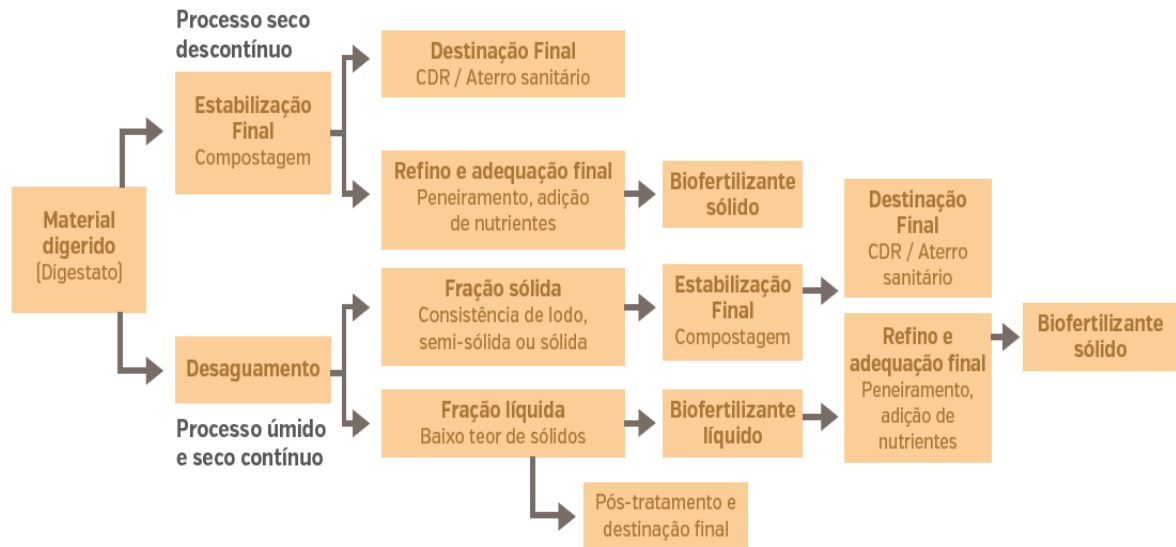
No processo identificado na Figura 29 como metanização, o biodigestor é alimentado com a fração orgânica do pré-tratamento para a decomposição biológica da matéria orgânica. Nesta etapa, o biogás gerado é encaminhado para remoção de umidade e do gás sulfídrico (H_2S). Após a etapa de purificação, o biogás pode ser utilizado para geração de energia elétrica ou seguir para mais processos de purificação para obtenção do biometano.

O material orgânico digerido, ou digestato, após o processo de biodigestão, é necessário encaminhá-lo para a etapa de pós-tratamento, com o objetivo de viabilizar sua aplicação na agricultura como composto orgânico e/ou fertilizante. Importante destacar que a sua utilização como condicionador de solo deve seguir as normas vigentes para a sua correta utilização.

A biodigestão anaeróbia, pode ser classificada em digestão úmida ou seca, as quais dependem do tipo de biodigestor utilizado no processo. Assim, dependendo do processo, deve-se

aplicar tratamento apropriado do material digerido considerando o tipo de biodigestão utilizada, conforme apresentado na Figura 30: Processos de pós-tratamento do material digerido.

Figura 30: Processos de pós-tratamento do material digerido



Fonte: PROBIOGÁS, 2016b

Assim, o digestato deve passar por um processo final de estabilização aeróbica (compostagem), sendo que nesta etapa o rejeito não reaproveitado como fertilizante pode receber a destinação final em aterros sanitários, ou possível utilização como Combustível Derivado de Resíduos (CDR). O biofertilizante oriundo da compostagem deve ser peneirado, com o objetivo de remover possíveis inertes que podem estar presentes no biofertilizante (PROBIOGÁS, 2016b).

2.7.3 Geração de biometano

O biometano é obtido após a purificação do biogás, para a remoção de umidade, CO₂, H₂S entre outros contaminantes. As propriedades físico-químicas do biometano são semelhantes às do gás natural, o que permite a sua utilização em diversas aplicações (COELHO *et al.*, 2018). A Tabela 2.6 apresenta a concentração dos compostos do biometano, em comparação com o biogás.

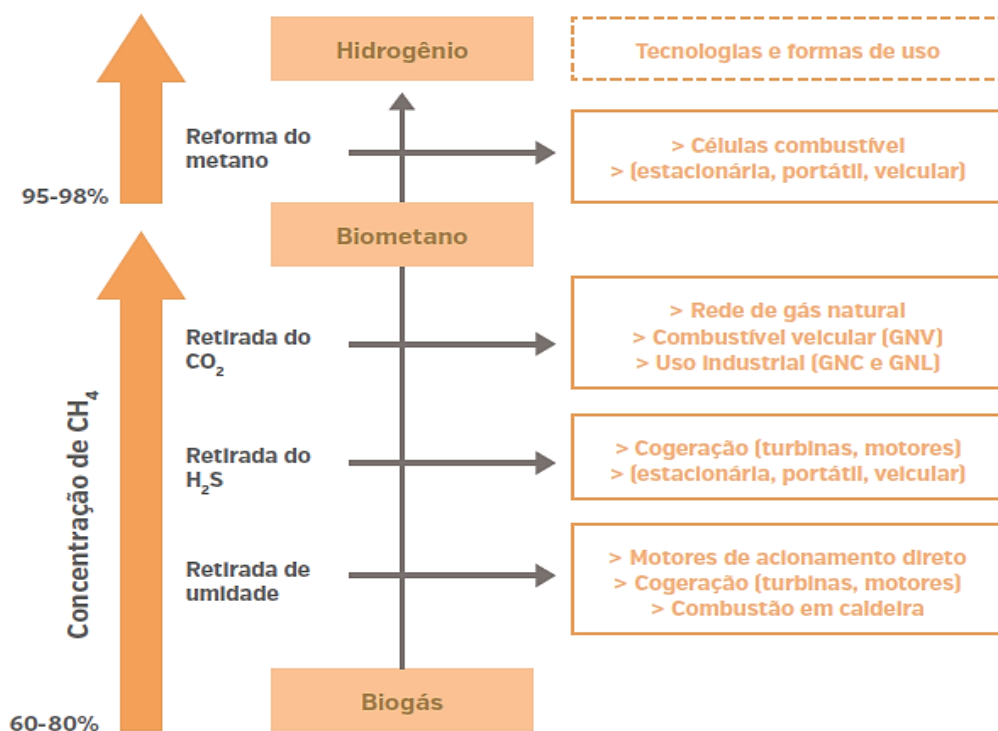
Tabela 2.6: Composição típica do biometano em comparação com o biogás

Componente	Unidade	Concentração	
		Biometano	Biogás
Metano	% mol	90 a 95	55 a 65
Dióxido de Carbono	% mol	4	35 a 45
Gás Sulfídrico	ppmv	< 20	20 a 20.000
Amônia	ppmv	< 20	< 500
Vapor d'água	ppmv	0	< 5

Fonte: Adaptado de COELHO *et al.*, 2018.

Para a purificação do biogás, é necessário considerar a sua composição química, principalmente os contaminantes e suas concentrações presentes no biogás para optar pela melhor tecnologia (PROBIOGÁS, 2015b).

Figura 31: Etapas de purificação do biogás



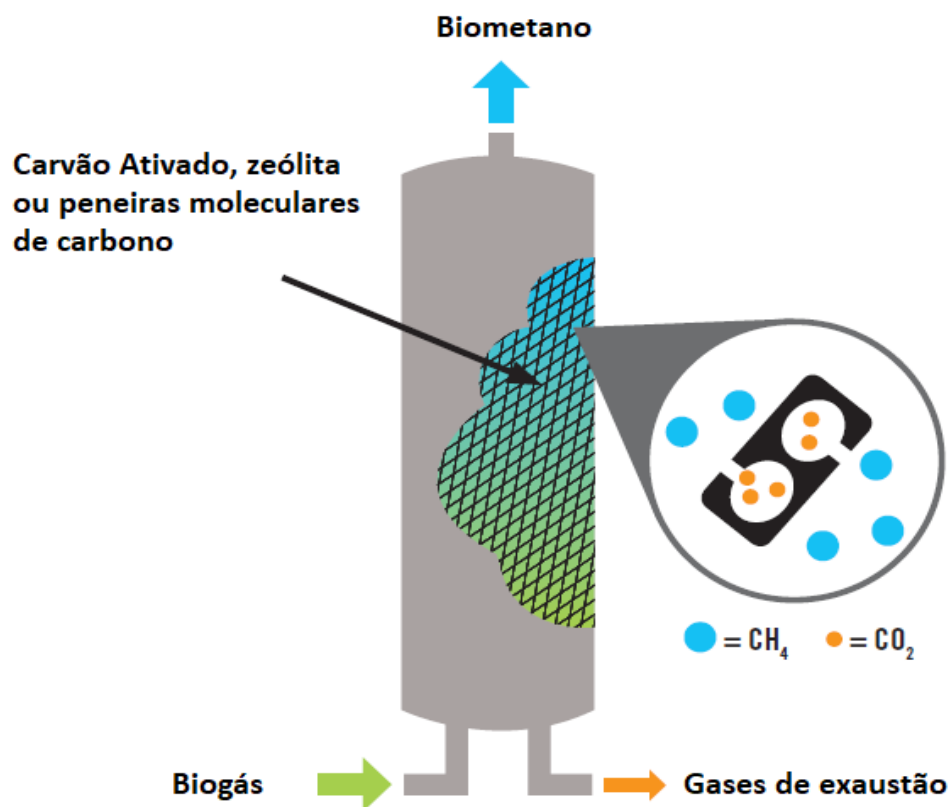
Fonte: PROBIOGÁS, 2015b

Ao substituir o uso do gás natural pelo biometano, visando a obtenção de hidrogênio, é fundamental que toda a umidade, gás sulfídrico, CO₂ e outros contaminantes sejam removidos.

Para remoção da umidade do biogás, é possível aplicar os processos de compressão seguido de resfriamento ou de adsorção. Neste processo, ocorre a alteração do equilíbrio termodinâmico da umidade no biogás, através da alteração de pressão e temperatura, ocorrendo assim a condensação do vapor d'água presente na corrente gasosa. Já no processo de adsorção, são utilizados materiais adsorventes, como por exemplo óxido de alumínio ou sílica, sendo que a molécula de água é atraída por estes materiais, ocorrendo, portanto, a remoção da umidade (COELHO *et al.*, 2018).

Os níveis de H_2S são determinados pelo tipo de biomassa utilizada e pelas condições de processo da tecnologia empregada na biodigestão, sendo que a sua concentração pode variar de 100 a 1.000 mg/Nm^3 . O processo de remoção mais comumente utilizado é a adsorção em carvão ativado (COELHO *et al.*, 2018).

Figura 32: Processo simplificado do processo PSA para remoção de CO_2



Fonte: WILKEN *et al.*, 2017 (modificado pelo autor).

O dióxido de carbono (CO_2) é o principal contaminante do biogás, e o método de sua remoção comumente utilizado é a adsorção por variação de pressão (PSA⁹). O princípio dessa

⁹ Pressure Swing Adsorption (PROBIOGÁS, 2015b).

tecnologia está na diferença de afinidade entre os gases metano e CO₂ em relação ao material absorvente. O CO₂, por apresentar uma forte ligação com o material absorvente, é adsorvido, obtendo-se assim um fluxo de biometano purificado.

3 METODOLOGIA

O objetivo deste trabalho é estimar o potencial técnico de geração de hidrogênio musgo a partir do biometano obtido da biodigestão anaeróbia do RSU gerado pela população da RMG. Fundamentado na revisão bibliográfica, serão estabelecidas estimativas das quantidades do RSU gerado, da gravimetria, da parcela orgânica do RSU e, a partir dos fatores de geração e purificação de biogás, serão estimados os potenciais técnicos de geração de biogás, biometano e hidrogênio musgo.

Destaca-se que será empregado o tratamento mecânico biológico como ferramenta de gestão dos resíduos de todo RSU coletado na RMG.

A Figura 33 apresenta o diagrama esquemático das etapas e dos tratamentos necessários, desde a geração dos RSU na RMG até a estimativa do potencial de geração hidrogênio musgo.

Figura 33: Fluxograma básico para obtenção do hidrogênio musgo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o cálculo de geração de RSU na RMG, serão consideradas as premissas abaixo:

- Número de habitantes residente de cada município pertencente. Os dados serão obtidos na base de dados do IBGE;
- Geração de RSU per capita em kg/hab/dia na RMG. Os dados serão obtidos na base de dados do SINIR.

Para estimar a quantidade de RSU gerada será considerado que 100% do RSU gerado pelos municípios da RMG serão coletados e enviados para unidade de triagem, visando promover a recuperação e valorização de materiais inorgânicos e recicláveis, encaminhando a fração orgânica resultante encaminhada para a biodigestão anaeróbia.

A composição gravimétrica dos RSU coletado na RMG tem como base os valores apresentados na Tabela 2.3 na seção 2 deste trabalho, os quais serão utilizados para determinar a proporção de matéria orgânica presente nos RSU coletados.

O processo de biodigestão considerado é o de digestão anaeróbia seca contínua, indicado pela literatura como uma tecnologia que é aplicável para RSU. Ademais, este processo aceita frações de substâncias não orgânicas (PROBIOGÁS, 2015b), considerando que alguma parcela inorgânica e rejeitos podem estar presentes no substrato mesmo após a triagem.

Para estimar a quantidade de biogás gerado, é utilizada a equação 1 abaixo. A equação considera a quantidade de matéria orgânica presente no RSU e o fator de conversão de biogás a partir do tratamento anaeróbio (SUANI *et al.*, 2020).

$$V_{biogás} = MO_{RSU} \times F_{MO} \quad (1)$$

Onde:

$V_{biogás}$: Volume de biogás gerado (Nm³/ano);

MO_{RSU} : Quantitativo de matéria orgânica no RSU (t/ano)

F_{MO} : Fator de produção de biogás a partir do tratamento anaeróbio da matéria orgânica do RSU - 101,5 Nm³ biogás/t de RSU (SUANI *et al.*, 2020).

No volume de biogás estimado é considerado uma concentração de metano igual a 55% (SUANI *et al.*, 2020).

O biogás gerado passará por um processo de limpeza e purificação, para a redução da concentração de contaminantes. Na purificação do biogás, é considerado o uso da tecnologia PSA por tratar-se de uma tecnologia consolidada para a produção de biometano, cuja eficiência de purificação é maior que 95% (PROBIOGÁS, 2015b).

Para a estimativa de geração de biometano, é utilizada a equação 2 (SUANI *et al.*, 2020) abaixo.

$$V_{biometano} = \frac{V_{biogás} \times \text{Concentração } CH_4}{\% \text{ metano}_{biometano}} \quad (2)$$

Onde:

$V_{\text{biometano}}$: volume de biometano gerado (Nm^3/ano);

$V_{\text{biogás}}$: volume de biogás gerado (Nm^3/ano);

Concentração CH_4 : concentração de 55% de metano presente no biogás;

% $\text{metano}_{\text{biometano}}$: porcentagem do metano presente no biometano.

O nível de purificação do biogás depende da aplicação final desejada, porém no caso específico será utilizado uma taxa média de purificação do biogás de 97%. A diferença corresponde a eventuais perdas de metano e às impurezas remanescentes (SUANI *et al.*, 2020).

Por fim, para se estimar o potencial de geração de hidrogênio musgo, é considerado a tecnologia de reforma a vapor do metano (SMR). Trata-se de um processo consolidado e tecnologia predominante no mercado de produção de hidrogênio.

O CO_2 gerado no processo de SMR será capturado pelo processo de absorção em aminas cuja eficiência de captura é de 99%. O CO_2 gerado, é considerado de biogênico, sendo, portanto, considerado um carbono neutro em termos de emissões gases de efeito estufa.

Com o objetivo de se estimar o total de geração de hidrogênio musgo, é considerado um rendimento global de conversão de biometano para hidrogênio de 74% (EPE, 2022b).

Tabela 3.1: Parâmetros para estimativa do potencial de geração de biogás, biometano e hidrogênio musgo

Parâmetro	Unidade	Valor	Referência Bibliográfica
Geração de RSU na RMG	t/ano	904.478	SINIR, 2024
Fator de geração per capita de RSU	kg/hab/dia	0,955	Autor
Porcentagem de RSU coletado	%	100,0	Autor
Contribuição da fração orgânica no RSU	%	44,3	ABRELPE, 2022
Fator de produção de biogás	Nm^3/t de RSU	101,5	SUANI <i>et al.</i> , 2020
Concentração de metano no biogás	%	55,0	SUANI <i>et al.</i> , 2020
Taxa média de purificação do biogás	%	97,0	SUANI <i>et al.</i> , 2020
Eficiência de produção de hidrogênio musgo	%	74,0	EPE, 2022b
Densidade do hidrogênio NTP ¹⁰	kg/m^3	0,08375	HYDROGEN TOOLS, 2024

Fonte: Elaborado pelo autor.

¹⁰ NTP: *normal temperature and pressure*, para temperatura de 20°C e pressão 1,0 atm (HYDROGEN TOOLS, 2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os dados e parâmetros apresentados, a Tabela 4.1 ilustra o resultado do potencial de geração de hidrogênio musgo a partir da fração orgânica dos RSU da RMG.

Tabela 4.1: Potencial técnico de geração de hidrogênio musgo, em Nm³/ano

Parâmetro	Unidade	Resultado
População RMG	hab	2.594.787
Geração per capita de RSU	kg/hab/dia	0,955
RSU Gerado	t/ano	904.478
Porcentagem de RSU coletado	%	100,0
Quantidade de RSU coletado	t/ano	904.478
Fração orgânica no RSU	%	44,3
Quantitativo de matéria orgânica pós triagem	t/ano	400.684
Potencial técnico de geração de biogás	Nm ³ /ano	40.669.426
Potencial técnico de geração de biometano	Nm ³ /ano	23.059.984
Potencial técnico de geração de hidrogênio musgo	Nm³/ano	17.064.388

Fonte: Elaborado pelo autor.

A produção de hidrogênio através da fração orgânica dos RSU ainda é uma discussão recente. A disposição final inadequada dos resíduos envolve questões ambientais, sanitárias e sociais, sendo que os aterros controlados e lixões contribuem expressivamente para externalidades negativas de recursos hídricos e do solo (MMA, 2022). A geração de energia a partir dos resíduos não apenas ajuda a reduzir esses impactos, mas também diminui os custos de produção de alimentos e de produtos industrializados, estendendo a vida útil dos recursos naturais e energéticos (MME/EPE, 2020).

Em 2022, foi assinado um MoU entre a Zona Econômica do Canal de Suez (SCZONE, sigla para *Canal Suez Economic Zone*), localizada no Egito, com a empresa norte americana *H₂-Enterprises Group Inc.*, para a construção de uma planta de geração de hidrogênio a partir de resíduos orgânicos e plásticos não recicláveis (SCZONE, 2022). A estimativa é que a planta receba 4,0 Mt/ano de resíduos orgânicos e plásticos não recicláveis, com uma geração estimada de 300.000 t/ano de hidrogênio musgo (H2 ENTERPRISE, 2024).

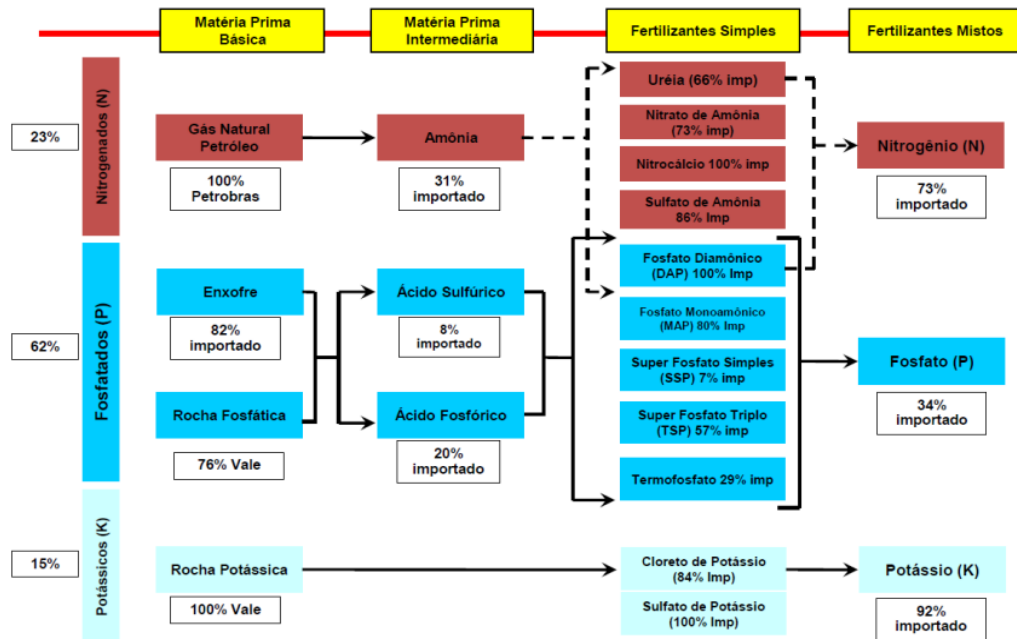
Neste contexto de novas pesquisas e projetos, no Brasil, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), lançou em maio de 2024, um projeto multidisciplinar para avaliar quatro rotas consideradas como promissoras para a produção de hidrogênio. Dentre as quais destaca-se a rota intitulada “RSU – resíduos sólidos urbanos” que se baseia na geração de hidrogênio através do biogás obtido a partir da fração orgânica dos RSU. Este projeto, que já conta com uma planta de biodigestão no município de Bertioga/SP, iniciou testes em escala laboratorial, para a conversão do biogás em hidrogênio e gás de síntese em reatores catalíticos. Nestes testes já com geração de hidrogênio, visa validar a rota tecnológica considerada no projeto e principalmente obter um banco de dados de resultados que permitam a realização de aumento de escala desta tecnologia empregada, além de ajustes necessários no processo (IPT, 2024).

Neste sentido, o Brasil tem buscado alternativas e rotas tecnológicas viáveis para a produção de hidrogênio. Desta forma, a Frente Parlamentar de Energia Renovável (FER), criou em 23 de março de 2023 a Comissão Especial para “Estudo, Avaliação e Acompanhamento das Iniciativas e Medidas Adotadas para Transição Energética – Fontes Renováveis e Produção de Hidrogênio Verde no Brasil”. Nesta comissão especial, é apresentado um plano de trabalho para o desenvolvimento do hidrogênio na economia brasileira, dentre os quais destaca-se a produção de hidrogênio através da utilização do biogás/biometano (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2024).

Nota-se que instituições e o Governo brasileiro tem buscado alternativas e pesquisas para a produção de hidrogênio de baixo carbono. Neste contexto, a utilização de biometano para a sua geração, torna-se uma alternativa viável na produção de hidrogênio de baixo carbono, em substituição ao gás natural. Além disso, na produção de fertilizantes nitrogenados, pode ser uma estratégia importante para o desenvolvimento da cadeia do hidrogênio para a RMG, visto que cerca de 80% da demanda nacional de fertilizantes é importada (CÂMARA DOS DEPUTADOS/ABIOGÁS, 2023).

Segundo o EPE (2019), o Brasil é o maior importador de fertilizantes no mundo, representando uma dependência de 80% do mercado externo. Ademais, a cadeia produtiva de fertilizantes utilizado pela agricultura brasileira utiliza-se dos nutrientes nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), conforme apresentado na Figura 34.

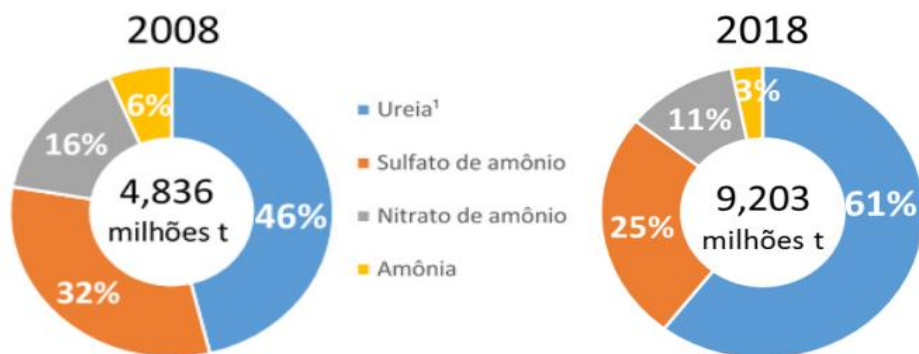
Figura 34: Cadeia produtiva de fertilizantes NPK



Fonte: EPE, 2019.

Nota-se pela Figura 34 que os fertilizantes nitrogenados representam um percentual de 23% na cadeia produtiva de fertilizantes, no qual, em 2018, a importação de fertilizantes nitrogenados foi de cerca de 9,2 milhões de toneladas (EPE, 2019). Neste total, a amônia e a ureia representam um percentual de 3,0% e 61,0% de importação, respectivamente. A Figura 35 apresenta a variação e comparação do percentual de importações de fertilizantes nitrogenados em 2008 e 2018.

Figura 35: Importação de fertilizantes nitrogenados e suas participações (2008 e 2018)



Nota: ¹Ureia mesmo em solução aquosa, com teor de nitrogênio (azoto) superior a 45 %, em peso, calculado sobre o produto anidro no estado seco.

Fonte: EPE, 2019.

Conforme apresentado na Figura 35, destaca-se o aumento do percentual de importação da ureia, onde em 2018, a ureia já representava um percentual de 61% do total de fertilizantes nitrogenados. Neste contexto, o EPE (2023), publicou em junho de 2023 um documento intitulado “Potencial técnico de H₂ e ureia no biogás de resíduos”, sendo que a partir da metodologia aplicada no referido documento, aplica-se os seguintes consumos abaixo para a produção de amônia e ureia:

- Consumo específico de 0,18 t-H₂ / t-amônia pelo processo Haber-Bosh;
- Consumo específico de 0,57 t-amônia / t-ureia pelo processo Bosch-Meiser.

Ao considerar a densidade NTP do hidrogênio em 0,08375 kg/m³ (HYDROGEN TOOLS, 2024), o consumo a base volumétrica de hidrogênio é de cerca de 2.150 Nm³-H₂ / t-amônia. Deste modo, considerando a questão que norteia a presente investigação deste trabalho, o potencial técnico de geração anual de hidrogênio musgo a partir do biogás/biometano resultante da totalidade dos RSU da RMG foi de 17 milhões Nm³/ano, representando um potencial de produção de 7.937 t-amônia ou 13.924 t-ureia. Comparando-se com o volume de fertilizantes importados, o potencial para produção de amônia ou ureia a partir da fração orgânica dos RSU da RMG representam um percentual de 3,0% para amônia e de 0,25% de ureia.

Ao considerar somente a RMG como potencial produção de amônia ou ureia, a sua representatividade de produção a nível nacional é baixa, se comparado com o volume de importação de fertilizantes nitrogenados. De toda forma, o hidrogênio musgo gerado na RMG pode representar um potencial interessante para suprimento da demanda de amônia ou ureia a nível local da RMG, contribuindo para o desenvolvimento da região.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As mudanças climáticas atualmente, muito debatidas no cenário global, tem gerado grandes esforços no desenvolvimento de novas fontes energéticas para a contribuição na redução do aquecimento global e de emissões de GEE. Neste sentido, o foco na descarbonização fez com o hidrogênio ganhasse destaque mundial para o seu desenvolvimento técnico e interesse de políticas energéticas para a sua introdução nas matrizes energéticas mundiais, principalmente pela possibilidade de obtê-lo a partir de fontes renováveis.

O hidrogênio de baixo carbono desempenha um papel fundamental no conceito de descarbonização e zero emissões, ganhando destaque nas convenções mundiais do clima promovidas pela Organização das Nações Unidas, com vários países participantes assumindo metas ambiciosas de reduções de emissões de carbono. Dada a importância do hidrogênio atualmente, agências como por exemplo, a IEA, *Hydrogen Council* e *International Renewable Energy Agency* (IRENA), têm dedicado relatórios e discussões de novas rotas tecnológicas, formas de armazenamento e transporte, políticas públicas, projetos em desenvolvimento e previsões de demanda de hidrogênio para obter-se zero emissões até 2050.

Em setores como o transporte, por exemplo, onde se concentram a maior parcela de emissões de CO₂, o hidrogênio tem se tornado um vetor principal para a sua utilização em veículos, através do desenvolvimento de pilhas combustível. Por outro lado, além do desenvolvimento tecnológico e de P&D do hidrogênio, investimentos em infraestrutura e políticas públicas mais incisivas deverão ser realizados no curto, médio e longo prazo para consolidação do hidrogênio como vetor da transição energética mundial.

Neste sentido, o Brasil tem mostrado interesse no desenvolvimento do hidrogênio para inseri-lo na transição energética brasileira, mesmo que tardiamente comparado com outras nações. A exemplo deste interesse, em dezembro de 2020, foi lançada o Plano Nacional de Energia 2050 que, dentre vários desenhos estratégicos de expansão do setor energético, o desenvolvimento de ações do hidrogênio faz parte deste plano estratégico nacional.

Nesta linha de geração de hidrogênio de baixo carbono, o objetivo deste trabalho é explorar o potencial técnico de geração de hidrogênio musgo a partir da fração orgânica de RSU na RMG. O tratamento biológico é um método que pode ser empregado como forma de aproveitar energeticamente os RSU, utilizando-se do biogás/biometano gerado para a produção do hidrogênio.

Atualmente no Brasil, a principal forma de decomposição do RSU é através da utilização de aterros sanitários, controlados ou lixões. Mesmo que os aterros sanitários sejam a

forma correta de disposição de resíduos, algumas das desvantagens destes tipos de disposição dos resíduos podem ser elencadas abaixo:

- Necessidade de ampla área para alocação do resíduo coletado;
- Disseminação e transmissão de doenças na região do aterro;
- Impactos ambientais, como vazamentos de chorume e gases, com risco de contaminação de lençóis freáticos e aquíferos;
- Mesmo sendo desativado, há ainda longos anos de emissão de gases por conta da decomposição dos resíduos, desperdiçando-se potenciais contribuições energéticas;
- A não promoção de economia circular e reaproveitamento de materiais inorgânicos recicláveis.

Conforme apresentado na seção 2, com a utilização das UTMBs, cerca de 40% de todo RSU coletado na RMG refere-se a parcela inorgânica passível de reciclagem e reaproveitamento aplicando-se a economia circular na região. Além disso, apenas 14% dos RSU coletados da RMG, seriam encaminhados para aterros sanitários.

Neste contexto, a utilização de RSU para fins energéticos visa valorizar os resíduos no objetivo de descarbonização da economia, além de dispor de outra fonte energética para a produção de hidrogênio de baixo carbono e na contribuição de melhoria dos aspectos ambientais e sociais no país. Ainda assim, com as UTMBs no processo de triagem dos RSUs gerados, tem-se ainda o potencial de melhorar a gestão dos resíduos nas cidades, com grande potencial de recuperação de materiais inorgânicos através da reciclagem, promovendo, portanto, a economia circular.

O potencial de geração de hidrogênio musgo no Brasil, através da parcela orgânica de RSU, revela-se muito promissora. A recuperação energética é hoje uma realidade e alternativa viável para a destinação dos RSU através da transformação do resíduo em um combustível de baixo teor de carbono. Portanto, a estratégia do aproveitamento energético dos RSU se destaca por combater simultaneamente as externalidades negativas de aterros sanitários, aterros controlados e lixões e oferecer soluções sustentáveis como a produção de hidrogênio.

O Brasil ainda é dependente de importação de fertilizantes para atender a demanda brasileira, conforme já destacado neste trabalho. Desta forma, há uma importância estratégica significativa ao considerar a inserção do hidrogênio musgo para a produção de fertilizantes nitrogenados. Ademais, é sabido que o Brasil é uma grande potência na agropecuária, alimentos

e da agroindústria, sendo o principal exportador de grãos e proteínas animais para diversos países. Assim, ao considerar a geração de RSU a nível nacional, somado aos resíduos gerados na pecuária, através da biodigestão para geração de biogás/biometano, pode haver uma grande oportunidade estratégica de geração e desenvolvimento do hidrogênio para compor a matriz energética brasileira, reduzindo, portanto, a dependência na importação de fertilizantes nitrogenados. Ademais, com os avanços nas pesquisas e testes na produção de hidrogênio musgo, como o projeto multidisciplinar lançado pelo IPT e o interesse do Governo brasileiro em desenvolver e inserir o hidrogênio de baixo carbono na matriz energética, serão fundamentais para o aprimoramento e desenvolvimento do hidrogênio musgo no país.

Por fim, como sugestão para trabalhos futuros, estudos detalhados da geração total de RSU e resíduos na pecuária a nível nacional, será um excelente indicador para determinar o potencial real de produção de hidrogênio musgo no país e a sua representatividade na produção de fertilizantes nitrogenados. Esta contribuição energética dos resíduos gerados nacionalmente pode contribuir significativamente na viabilidade técnica e introdução do hidrogênio como vetor principal na transição energética brasileira e na descarbonização da economia a médio e longo prazo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022**. [S.I.]: ABRELPE, 2022. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/>>. Acesso em: 25 fev. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. [S.I.]: ABRELPE, 2020. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/>>. Acesso em: 25 fev. 2024.

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Hidrogênio de baixo carbono: oportunidades para o protagonismo brasileiro na produção de energia limpa**. Rio de Janeiro, RJ: BNDES, 2022. [online]. Disponível em: <www.bndes.gov.br/bibliotecadigital>. Acesso em: 15 jan. 2024.

BRASIL. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**: seção 1 - Extra A, Brasília, DF, ano 160, nº 8-A, p. 2-6, 12 jan. 2022. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/D10936.htm>. Acesso em: 10 jan. 2024.

BRASIL. Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022. Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 160, nº 72, p. 2-190. Disponível em: <<https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=DEC&numero=11043&ano=2022&ato=603g3aU1kMZpWT676>>. Acesso em: 10 jan. 2024.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei Nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 142, nº 147, p. 3-7, 02 ago. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/L12305.htm>. Acesso em: 10 jan. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos – Planares** [recurso eletrônico]; coordenação: André Luiz Felisberto França... [et al.]. ISBN 978-65-88265-15-4. 2. ed. Brasília, DF: MMA, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/agendaambientalurbana/>>. Acesso em: 1 fev. 2024.

CALDERONI, S. **Os bilhões perdidos no lixo**. 4. ed. São Paulo: Humanitas Fflch/USP, 2003. 348p.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Transição Energética e Produção de Hidrogênio Verde**. Brasília/DF: c2024. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-temporarias/especiais/57a-legislatura/transicao-energetica-e-producao-de-hidrogenio-verde#documentos-normas>>. Acesso em 01 jun. 2024.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS. **Comissão especial de transição energética e produção de hidrogênio da câmara dos deputados**.

Brasília/DF. CÂMARA DOS DEPUTADOS/ABIOGÁS, 05 set. 2023. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-temporarias/especiais/57a-legislatura/transicao-energetica-e-producao-de-hidrogenio-verde/apresentacoes-em-eventos/2023.09.05TAMARROITMANNGerenteExecutivadaAssociaoBrasileiradoBiogsABI OGS.pdf>>. Acesso em 01 jun. 2024.

CAMARGO, Isadora. Entregas de fertilizantes aumentaram 11,6% em 2023. **Globo Rural**, 04 mar. 2024. Disponível em: <<https://globo.com/negocios/noticia/2024/03/entregas-de-fertilizantes-aumentaram-116percent-em-2023.ghtml>>. Acesso em: 12 mai. 2024.

CASTRO, Nivalde de (org.) [et. al.]. **A Economia do Hidrogênio**: Transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil. ISBN 978-65-87065-57-1. 1. ed. – Rio de Janeiro/RJ: E-papers, 336p., 2023.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Hidrogênio energético no Brasil** - Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025. CGEE: Brasília. 2010. Disponível em: <<https://www.cgee.org.br/home>>. Acesso em: 2 mai. 2024.

COELHO, Suani Teixeira (org.) [et. al.]; **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano**: Part. I Biogás; Part. II Biometano. ISBN 978-85-86923-53-1. São Paulo: IEE-USP, 218p., 2018. Disponível em: <<http://gbio.webhostusp.sti.usp.br/sites/default/files/anexosnoticias/livro-tecnologias-producao-uso-biogas-biometano.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2023.

COELHO, S. T.; GARCILASSO, V. P.; SANTOS, M. M. dos; ESCOBAR, J. F.; PERECIN, D.; SOUZA, D. B. de. **Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo**. [Recurso eletrônico]. São Paulo: IEE-USP, 250p., 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Competitividade do Gás Natural**: Estudo de caso na indústria de fertilizantes nitrogenados. Nota Técnica EPE-DEA-IT-0001/2019. [S.I.]: EPE, 2019. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/informe-tecnico-competitividade-do-gas-natural-estudo-de-caso-na-industria-de-fertilizantes-nitrogenados>>. Acesso em: 18 jun. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Base para Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio**. Nota Técnica EPE-DEA-NT-003/2021 rev01. [S.I.]: EPE, 2021. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidrog%C3%AAnio_rev01%20\(1\).pdf#search=hidrog%C3%AAnio](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidrog%C3%AAnio_rev01%20(1).pdf#search=hidrog%C3%AAnio)>. Acesso em: 3 mar. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Hidrogênio Azul**: Produção a partir da reforma a vapor do gás natural com CCUS. Nota Técnica EPE/DPG/SPG/02/2022. [S.I.]: EPE, 2022a. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/notas-tecnicas-dedicadas-ao-hidrogenio-cinza-e-ao-hidrogenio-azul>>. Acesso em: 3 mar. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Hidrogênio Cinza**: Produção a partir da reforma a vapor do gás natural. Nota Técnica EPE/DPG/SPG/01/2022. [S.I.]: EPE, 2022b. Disponível

em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/notas-tecnicas-dedicadas-ao-hidrogenio-cinza-e-ao-hidrogenio-azul>>. Acesso em: 3 mar. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Hidrogênio Turquesa**: Produção a partir da pirólise do gás natural. Nota Técnica EPE/DPG/SPG/03/2022. [S.I.]: EPE, 2022c. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-sobre-hidrogenio-turquesa>>. Acesso em: 3 mar. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Produção e Consumo de Hidrogênio em Refinarias no Brasil**. Nota Técnica EPE/DPG/SDB/2022/01. [S.I.]: EPE, 2022d. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-producao-e-consumo-de-hidrogenio-em-refinarias-no-brasil>>. Acesso em: 4 mai. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Potencial técnico de H₂ e de ureia do biogás de resíduos**. Nota técnica. [S.I.]: EPE, 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/epe-publica-o-potencial-tecnico-de-h2-e-ureia-do-biogas-de-residuos-no-horizonte-decenal->>. Acesso em: 01 jun. 2024.

GEF BIOGÁS BRASIL. **Acordo GDF**. Brasília, DF: GEF BIOGÁS BRASIL, c2023. Disponível em: <https://www.gefbiogas.org.br/residuos_urbanos.html>. Acesso em: 16 mai.2024.

GURLIT, W.; GUILLAUMON, J.; AUDE, M.; CEOTTO, H. **Hidrogênio verde**: uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade, para o Brasil e o mundo. McKinsey & Company, [online], 25 nov. 2021. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/br/our-insights/hidrogenio-verde-uma-oportunidade-de-geracao-de-riqueza-com-sustentabilidade-para-o-brasil-e-o-mundo#>. Acesso em: 9 mar. 2024.

HONORATO, Janaina. Entregas de fertilizantes no Brasil têm alta de 11,6% em 2023. **Agro2**, 05 mar. 2024. Disponível em: <<https://agro2.com.br/agricultura/entregas-fertilizantes-brasil-2023/#:~:text=Entre%20janeiro%20e%20dezembro%20de,3%2C85%20milh%C3%B5es%20de%20toneladas.>>. Acesso em: 12 mai. 2024.

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen for Net-Zero**. Bruxelas, Bélgica: c2021. McKinsey & Company. Disponível em: <<https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-for-net-zero/>>. Acesso em 25 abr. 2024.

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen Insights 2023**. Bruxelas, Bélgica: 2023. McKinsey & Company. Disponível em: <<https://hydrogencouncil.com/en/intelligence/>>. Acesso em 09 mai. 2024.

H₂ ENTERPRISES. **Egypt**: East Port Said Industrial Zone. Nova York, Estados Unidos: c2024. Disponível em: <<https://h2-enterprises.com/projects/>>. Acesso em 01 jun. 2024.

HYDROGEN TOOLS. **Basic hydrogen properties**. Pacific Northwest National Laboratory, USA: c2024. Disponível em: <<https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/basic-hydrogen-properties>>. Acesso em 02 jun. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2022**. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2022.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Caracterização e Quadros de Análise Comparativa da Governança Metropolitana no Brasil:** análise comparativa das funções públicas de interesse comum (Componente 2). Região Metropolitana de Goiânia. Rio de Janeiro, RJ: IPEA, 2015. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/redeipea/images/pdfs/governanca_metropolitana/150820_74657_relatorio_analise_rm_Goiania.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Projeto multidisciplinar do IPT avalia quatro rotas consideradas promissoras para a produção de hidrogênio.** São Paulo, SP: IPT, c2024. Disponível em: <[https://ipt.br/2024/05/09/hidrogenio-de-baixo-carbono/#:~:text=RES%C3%8DDUOS%20S%C3%93LIDOS%20URBANOS%20%E2%80%93%20E2%80%9CO%20processo,CO2\)%2C%20e%20podem%20ser](https://ipt.br/2024/05/09/hidrogenio-de-baixo-carbono/#:~:text=RES%C3%8DDUOS%20S%C3%93LIDOS%20URBANOS%20%E2%80%93%20E2%80%9CO%20processo,CO2)%2C%20e%20podem%20ser)>. Acesso em: 05 jun. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The Future of Hydrogen:** Seizing today's opportunities. [S.I.]: IEA, 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>>. Acesso em: 2 mar. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Iron and Steel Technology Roadmap:** Towards more sustainable steelmaking. [S.I.]: IEA, 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>>. Acesso em: 15 mai. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Net Zero by 2050:** a roadmap for the global energy sector. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>>. Acesso em: 9 mar. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Ammonia Technology Roadmap:** Towards more sustainable nitrogen fertiliser production. [S.I.]: IEA, 2021a. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap>>. Acesso em: 9 mar. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Hydrogen Review 2023.** [S.I.]: IEA, 2023. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023/>>. Acesso em: 9 mar. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Global Warming of 1.5°C:** An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. IPCC, 2018. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/sr15/>>. Acesso em: 7 fev. 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Global energy transformation:** a roadmap to 2050 (2019 edition). IRENA, 2019. Abu Dhabi. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications>>. Acesso em: 7 fev. 2024.

NOUSSAN, M.; RAIMONDI, P. P.; SCITA, R.; HAFNER, M. The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition: A Technological and Geopolitical Perspective. **Sustainability**, Milano, Italy, v. 2021, 13, 298. <<https://doi.org/10.3390/su13010298>>. Acesso em: 11 mai. 2024.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES (MCTIC). Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação. **Plano de ciência, tecnologia e inovação para energias renováveis e biocombustíveis: 2018-2022**. Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação. Brasília. MCTIC: 2018. Disponível em: <<https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/tecnologia/tecnologiasSetoriais/Plano-de-Ciencia-Tecnologia-e-Inovacao-Para-Energias-Renovaveis-e-Biocombustiveis.pdf>>. Acesso em: 2 mai. 2024.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde**. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/parcerias-energeticas/publicacoes>>. Acesso em 21 abr. 2024.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Ministro participa de lançamento da Frente Parlamentar de Energia Renovável (FER)**. Brasília: Gov.br, 2021a. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/ministro-participa-de-lancamento-da-frente-parlamentar-de-energia-renovavel-fer>>. Acesso em: 4 mai. 2024.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Programa Nacional do Hidrogênio: Proposta de Diretrizes – Planares** [recurso eletrônico]; Brasília, DF: MME, 2021b. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1>>. Acesso em: 22 fev. 2024.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Resolução CNPE nº 2, de 10 de fevereiro de 2021. Estabelece orientações sobre pesquisa, desenvolvimento e inovação no setor de energia do país. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 159, nº 45, p. 2. 9 mar. 2021c. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/despacho-do-presidente-da-republica-307393461>>. Acesso em: 4 mai. 2024.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Resolução CNPE nº 6, de 23 de junho de 2021. Institui o Programa Nacional do Hidrogênio, cria o Comitê Gestor do Programa Nacional do Hidrogênio, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 160, nº 147, p. 6 e 7. 4 ago. 2022. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/despacho-do-presidente-da-republica-419972141>>. Acesso em: 4 mai. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília. MME/EPE, 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/painel-pne-2050>>. Acesso em: 2 mai. 2024.

NAZIR, H.; LOUIS, C.; JOSE, S.; PRAKASH, J.; MUTHUSWAMY, N.; BUAN, M. E. M.; FLOX, C.; CHAVAN, S.; SHI, X.; KAURANEN, P.; KALLIO, T.; MAIA, G.; TAMMEVESKI, K.; LYMPEROPOULOS, N.; CARCADEA, E.; VEZIROGLU, E.; IRANZO, A.; KANNAN, A. M. Is the H2 economy realizable in the foreseeable future? Part I: H2 production methods. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 27, p. 13777-13788, May 2020. DOI 10.1016/j.ijhydene.2020.03.092. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.092>>. Acesso em: 10 jan. 2024.

OLIVEIRA, Rosana Cavalcante de. **Panorama do Hidrogênio no Brasil**. Texto para discussão / Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. Brasília: Rio de Janeiro, 2022. DOI 10.38116/td2787. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.38116/td2787>>. Acesso em: 9 mar. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL *et al.* **Avaliação dos aspectos legais para concessão de Unidade de Tratamento Mecânico Biológico no Distrito Federal**: resultados da cooperação técnica SEPE, SLU e Projeto GEF Biogás Brasil. Brasília: MCTI, 2020. *E-book*. (Projeto Aplicações do Biogás na Agroindústria Brasileira: GEF Biogás Brasil). Disponível em: <<https://datasebrae.com.br/biogas/>>. Acesso em: 16 mai. 2024.

PROBIOGÁS. **Catálogo de tecnologias e empresas de biogás / Probiogás**; organizadores: Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores: Elisa Thieme ... [*et al.*]. ISBN 978-85-7958-038-3 – Coletânea de publicações do Probiogás – Série de Desenvolvimento do Mercado de Biogás. 1. ed. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015a.

PROBIOGÁS. **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás**; organizadores: Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autor: Oliver Jende... [*et al.*]. ISBN 978-85-7958-039-0 – Coletânea de publicações do Probiogás – Série de Desenvolvimento do Mercado de Biogás. 1. ed. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015b.

PROBIOGÁS. **Biometano como combustível veicular**; organizadores: Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ). autor: Uwe Becher. ISBN 978-85-7958-059-8 – Coletânea de publicações do Probiogás – Série de Desenvolvimento do Mercado de Biogás. 1. ed. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016a.

PROBIOGÁS. **Conceitos para o licenciamento ambiental de usinas de biogás**; organizadores: Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores: Felipe Correa de Souza Pereira Gomes... [*et al.*]. ISBN 978-85-7958-057-4 – Coletânea de publicações do Probiogás – Série de Desenvolvimento do Mercado de Biogás. 1. ed. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016b.

SILVA MARTINEZ, Rodolfo Daniel. **Dry anaerobic digestion treatment potential for the organic fraction of municipal solid waste in Brazil and Mexico**. 2021. Versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. Tese (Doutorado em Bioenergia) – USP, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”; Universidade Estadual de Campinas; Universidade Estadual Paulista, Júlio de Mesquita Filho”. Piracicaba, 2021.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Roadmap Tecnológico do Cimento**: potencial de redução das emissões de carbono da indústria de cimento brasileira até 2050. VISEDO, G.; PECCHIO, M. (coord.). Rio de Janeiro: SNIC, 2019. 64 p. Disponível em: <https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/11/Roadmap_Tecnologico_Cimento_Brasil_Book-1.pdf>. Acesso em 15 mai. 2024.

SINIR – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS. Brasília: SINIR, c2024. Disponível em: <<https://sinir.gov.br/>>. Acesso em: 10 jan. 2024.

SUEZ CANAL ECONOMIC ZONE. **SCZONE signs MOU with H2 Industries to establish a green hydrogen plant in East Port-Said**. Egito: SCZONE, 01 jun. 2022. Disponível em: <<https://sczone.eg/sczone-signs-mou-with-h2-industries-to-establish-a-green-hydrogen-plant-in-east-port-said/>>. Acesso em: 01 jun. 2024.

VIANA, N. M.; ARAÚJO, A. R. de; SCHULTZ, E. L.; SANTOS, A. C. dos; GAMBETTA, R.; ANJOS, S. S. N. dos. **Biomassas e biocombustíveis competitivos para estruturação do mercado brasileiro de hidrogênio carbono neutro ou negativo**. In: ENCONTRO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA EMBRAPA AGROENERGIA, 7., 2023, Brasília, DF. **Anais** [...]. Brasília: EMBRAPA, 2023. p. 243. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1158347/1/Biomassa-e-biocombustiveis.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2023.

WILKEN, D. *et al.* **Biogas to Biomethane**. German, 2017. Disponível em: <<https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/BRPDHS-DE-Biogas-to-Biomethane>>. Acesso em: 12 dez. 2023.

WILKEN, D. *et al.* **Biowaste to Biogas**. German, 2019. Disponível em: <https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE-biowaste-to-biogas_eng>. Acesso em: 12 dez. 2023.

WELTENERGIERAT. **International Hydrogen Strategies**. Alemanha, 2024. World Energy Council, Germany. Disponível em: <<https://www.weltenergierat.de/publikationen/studien/international-hydrogen-strategies/?cn-reloaded=1>>. Acesso em: 9 mai. 2024.

WORLD ENERGY COUNCIL. **National Hydrogen Strategies**. London, 2021. Disponível em: <<https://www.worldenergy.org/publications/entry/working-paper-hydrogen-on-the-horizon-national-hydrogen-strategies>>. Acesso em: 08 mai. 2024.