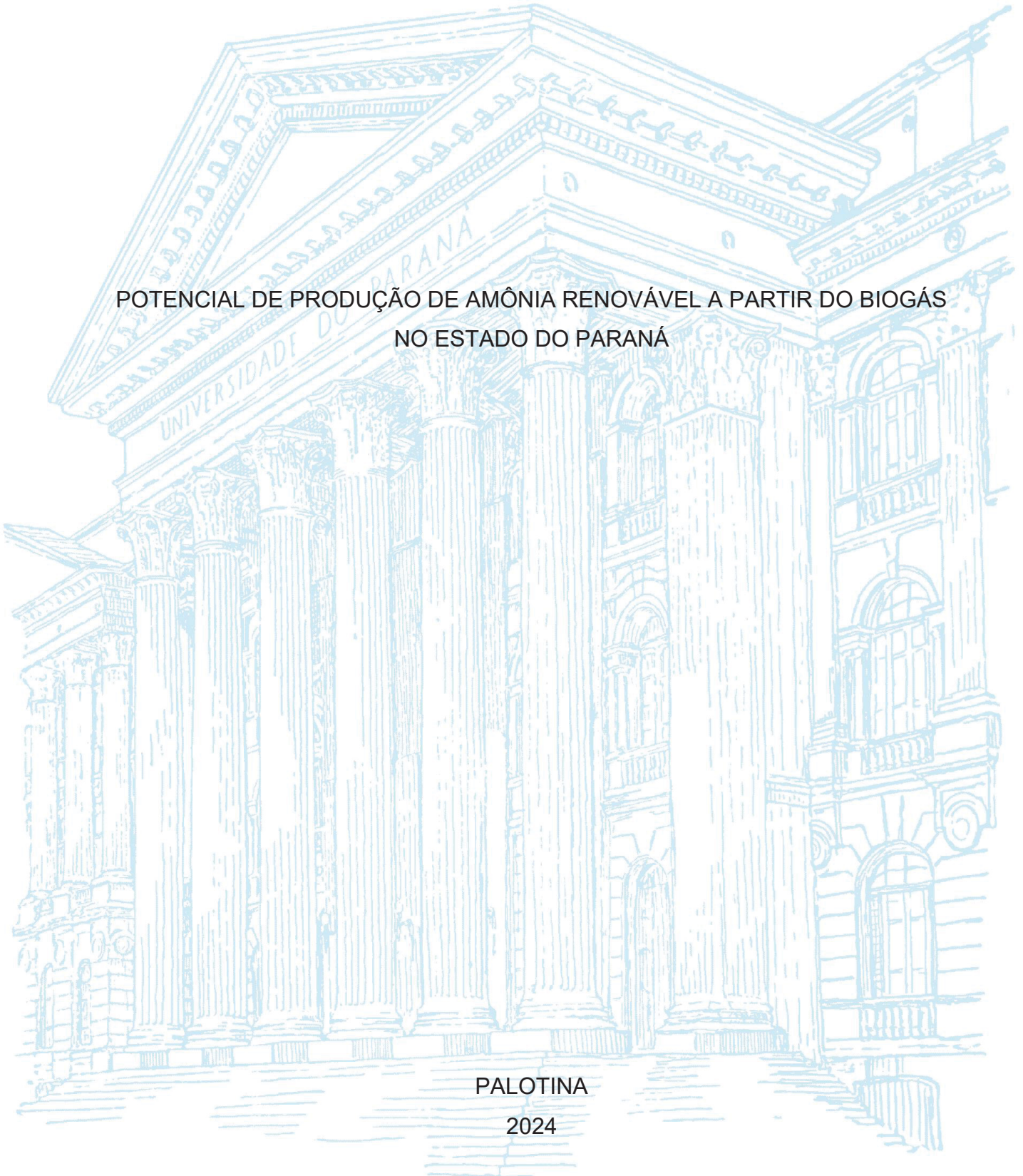


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALINE SCARPETTA

POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA RENOVÁVEL A PARTIR DO BIOGÁS
NO ESTADO DO PARANÁ



PALOTINA

2024

ALINE SCARPETTA

POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA RENOVÁVEL A PARTIR DO BIOGÁS
NO ESTADO DO PARANÁ

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Ambiental, Setor de Palotina - PR, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Helton José Alves

PALOTINA

2024

Universidade Federal do Paraná. Sistemas de Bibliotecas.
Biblioteca UFPR Palotina.

S286 Scarpetta, Aline

A potencial de produção de amônia renovável a partir do biogás no estado do paraná / Aline Scarpetta.
– Palotina, PR, 2024.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná,
Setor Palotina, PR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
e Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Helton José Alves.

1. Agronegócio. 2. Hidrogênio. 3. Reforma do Biogás.
I. Alves, Helton José. II. Universidade Federal do Paraná.
III. Título.

CDU 620.9



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR PALOTINA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA E
TECNOLOGIA AMBIENTAL - 40001016173P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **ALINE SCARPETTA** intitulada: **POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA RENOVÁVEL A PARTIR DO BIOGÁS NO ESTADO DO PARANÁ**, sob orientação do Prof. Dr. HELTON JOSE ALVES, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Palotina, 05 de Julho de 2024.

Assinatura Eletrônica

08/07/2024 08:43:16.0

HELTON JOSE ALVES

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

08/07/2024 13:35:31.0

MAURICIO ROMANI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

15/07/2024 10:04:12.0

THIAGO EDWIGES

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ - CAMPUS MEDIANEIRA)

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida; a minha família por todo amor e dedicação e; ao meu orientador pela confiança e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por estar comigo, me guiar nas decisões e me dar saúde. Obrigada por colocar pessoas maravilhas no meu caminho.

À Universidade Federal do Paraná, a Universidade Estadual do Oeste do Paraná, ao Programa de Pós Graduação em Engenharia e Tecnologia Ambiental e aos professores pela oportunidade de aprendizado, troca de experiências e todo conhecimento compartilhado.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Prof. Dr. Helton José Alves, pelos ensinamentos, orientação e incentivo na realização deste trabalho. Meu muito obrigada por sua dedicação e confiança depositada em mim, não poupou esforços para me ajudar a concretizar essa dissertação. Tenho muita admiração por você.

A minha mãe, Eunice Scarpetta, a minha avó, Maria Madalena Scarpetta, e a minha tia, Cleusa Scarpetta, vocês são inspiração. Obrigada por tamanha dedicação, pelos conselhos, por me ensinar os valores mais preciosos de um ser humano, pelo apoio e amor imenso que têm por mim e eu por vocês. Á vocês, sou imensamente grata.

Aos meus tios Delcides Scarpetta e Valdir Scarpetta, por todo apoio, cuidado, incentivo, sempre me desejando o melhor.

Ao Alisson Vinicius Nurnberg, por seu companheirismo, amor, apoio e dedicação, não apenas durante a realização deste trabalho, mas em todos os momentos da vida.

Quero também agradecer ao CIBiogás e aos colegas, em especial o Felipe Souza Marques, Rafael Hernando de Aguiar Gonzalez, Daiana Gotardo Martinez, Rafaela Carnevale, Nicolas Berhorst e Alessandra Freddo e Gabriela Bonassa, cujos os auxílios tonaram possível a realização desse projeto. Muitas vezes me ajudaram nesse percurso, compartilhando importantes conhecimentos, me ensinando tanto.

Por fim, expresso minha gratidão a todos que, de alguma forma, me apoiaram e contribuíram para a realização desta pesquisa.

"O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis." (José de Alencar)

RESUMO

A segurança energética e alimentar, tem sido temas recorrentes em discussões de políticas governamentais em áreas consideradas estratégicas no Brasil e no mundo. Nesse contexto, as fontes de energia têm um papel fundamental no crescimento econômico e desenvolvimento de um país propiciando avanços industriais, tecnológicos e ocasionando melhorias no padrão de vida da sociedade. Aliada a estas vantagens, amplia-se o desafio ao combate às mudanças climáticas e modificação nos padrões tradicionais de consumo que resultaram em significativa exploração de recursos naturais e uma elevada geração de resíduos. Ainda, alinhado a necessidade de produção de alimentos para atender à crescente demanda global, maior é a demanda por nutrientes dos fertilizantes, cuja maior parte da produção mundial é obtida a partir de fonte fóssil. Todos os fertilizantes nitrogenados decorrem da amônia, e mundialmente, mais de 70% de toda a amônia produzida é destinada a produção de fertilizantes e obtida a partir da reforma do gás natural. Diante do exposto, destaca-se a oportunidade de utilização dos resíduos agroindustriais, para produção de biogás, sendo esses precursores para a produção renovável de fertilizantes. A reforma do biogás é uma estratégia emergente que visa converter o biogás em gás de síntese que é uma mistura gasosa composta por hidrogênio (H_2) e monóxido de carbono (CO), que pode ser aplicado na produção de produtos com alto valor agregado, como a amônia. Dessa forma, este estudo teve por objetivo estimar o potencial de produzir amônia a partir da reforma a seco do biogás proveniente das atividades do agronegócio no Estado do Paraná. Pode-se concluir que o volume total de biogás produzido é de aproximadamente 400 milhões de Nm^3 por ano e se todo esse biogás fosse convertido em gás de síntese, haveria um potencial para produzir 721,5 milhões de Nm^3 de gás de síntese anualmente. Esse volume permitiria a produção de 15 milhões de kg de hidrogênio e 30,9 mil toneladas de amônia por ano. As mesorregiões que mais se destacam no potencial de produção de amônia são o Oeste, o Noroeste e o Centro Oriental. Os resultados foram apresentados em um painel dinâmico utilizando ferramenta de BI, o que permitiu apresentá-los de forma objetiva, personalizada e de fácil visualização.

Palavras-chave: Agronegócio. Reforma do Biogás. Hidrogênio. Fertilizante. Amônia.

ABSTRACT

Energy and food security have been recurring themes in government policy discussions in areas considered strategic in Brazil and worldwide. In this context, energy sources play a fundamental role in a country's economic growth and development, promoting industrial and technological advances and leading to improvements in society's standard of living. Along with these advantages, the challenge of combating climate change and changing traditional consumption patterns, which have resulted in significant exploitation of natural resources and high waste generation, has also grown. Furthermore, in line with the need to produce food to meet the growing global demand, there is an increasing demand for nutrients from fertilizers, the majority of which are derived from fossil sources worldwide. All nitrogenous fertilizers stem from ammonia, and globally, more than 70% of all ammonia produced is used for fertilizer production and is obtained from the reforming of natural gas. Given the above, there is an opportunity to use agro-industrial waste for biogas production, which can serve as a precursor for renewable fertilizer production. Biogas reforming is an emerging strategy aimed at converting biogas into synthesis gas, a gaseous mixture composed of hydrogen (H₂) and carbon monoxide (CO), which can be applied in the production of high-value-added products, such as ammonia. Therefore, this study aimed to estimate the potential for ammonia production from the reform of dry biogas from agribusiness activities in the State of Paraná. It can be concluded that the total volume of biogas produced is approximately 400 million Nm³ per year and if all this biogas were converted into synthesis gas, it would have the potential to produce 721.5 million Nm³ of synthesis gas annually. This volume would allow the production of 15 million kg of hydrogen and 30.9 thousand tons of ammonia per year. The mesoregions that stand out most in terms of ammonia production potential are the West, the Northwest and the Central East. The results were presented in a sound panel using a BI tool, which allowed them to be presented in an objective, personalized and easy-to-view manner.

Keywords: Agribusiness. Biogas Reforming. Hydrogen. Fertilizer. Ammonia.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA E AGRÍCOLA DO ESTADO DO PARANÁ	22
FIGURA 2 - MAIORES CONSUMIDORES DE FERTILIZANTES EM 2020	23
FIGURA 3 - TOTAL DE PLANTAS CADASTRADAS NO BIOGÁSMAP EM 2023	25
FIGURA 4 - NÚMERO DE PLANTAS DE BIOGÁS POR ESTADO EM 2023	26
FIGURA 5 - CARACTERÍSTICAS DAS PLANTAS DE BIOGÁS.....	27
FIGURA 6 - POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO ESTADO DO PARANÁ	29
FIGURA 7 - POTENCIAIS ROTAS PARA VALORIZAÇÃO DO CO ₂ ADVINDO DO BIOGÁS.....	39
FIGURA 8 - PRINCIPAIS FERTILIZANTES NITROGENADOS PRODUZIDOS A PARTIR DA AMÔNIA	441
FIGURA 9 - PRINCIPAIS PRODUTOS IMPORTADOS PELOS PORTOS DO PARANÁ EM 2022	43
FIGURA 10 - PREÇOS DE FRETE PRATICADOS NO PARANÁ.....	44
FIGURA 11 - MERCADO DE FERTILIZANTES NO BRASIL	46
FIGURA 12 - PRODUÇÃO NACIONAL DOS PRINCIPAIS FERTILIZANTES NITROGENADOS	46
FIGURA 13 - UREIA VENDIDA A GRANEL NO MERCADO EUROPEU PARA O PERÍODO DE DEZ/2017-SET/2022.....	47
FIGURA 14 - CADEIA PRODUTIVA DA UREIA E POSSÍVEL INTEGRAÇÃO SETORIAL.....	49
FIGURA 15 - POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA NA MESORREGIÃO CENTRO OCIDENTAL.....	59
FIGURA 16 - POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA NA MESORREGIÃO CENTRO ORIENTAL	59
FIGURA 17 - POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA NA MESORREGIÃO CENTRO SUL	60
FIGURA 18 - POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA NA MESORREGIÃO NOROESTE	61
FIGURA 19 - POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA NA MESORREGIÃO NORTE CENTRAL	61

FIGURA 20 - POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA NA MESORREGIÃO NORTE PIONEIRO	62
FIGURA 21 - POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA NA MESORREGIÃO SUDESTE	63
FIGURA 22 - POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA NA MESORREGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA	63
FIGURA 23 - POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA NA MESORREGIÃO OESTE	64
FIGURA 24 - POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA NA MESORREGIÃO SUDOESTE.....	65
FIGURA 25 - POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS, HIDROGÊNIO E AMÔNIA POR MESORREGIÃO DO ESTADO DO PARANÁ	69
FIGURA 26 - TELAS DO POWER BI	70
FIGURA 27 - POTENCIAL TOTAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO ESTADO DO PARANÁ EM 2022	71

LISTA DE TABELA

TABELA 1 - POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS, HIDROGÊNIO E AMÔNIA POR MESORREGIÃO DO ESTADO DO PARANÁ	68
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

AEN - Agência Estadual de Notícias
ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos
CADE - Conselho Administrativo de Defesa Econômica
CIBIOGÁS - Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás
CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento
Covid-19 - Coronavírus
CNA - Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil
DERAL - Departamento de Economia Rural
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
FAFEN - Fábrica de Fertilizantes Nitrogenados
GEE - Gases de efeito estufa
GEF - Global Environment Facility
GIZ - Deutsche Gesellschaft Für Internationale Zusammenarbeit
GNL - Gás natural liquefeito
GW - Gigawatt
IDH - Índice de Desenvolvimento Humano
IEA - International Energy Agency
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDR - Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná
IFA - International Fertilizer Association
IPARDES - Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social
IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
LCOH - Custo nivelado do hidrogênio
MMA - Ministério do Meio Ambiente
MME - Ministério de Minas e Energia
NPK - Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio
ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis
ONU - Organização das Nações Unidas
PDE - Plano Decenal de Expansão de Energia
PNA - Plano Nacional de Adaptação as Mudanças Climáticas

PIB - Produto Interno Bruto

SEAB - Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento

SAE - Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos

SINDIADUBOS - Sindicato da Indústria de Adubos e Corretivos Agrícolas no Estado do Paraná

Ton - Tonelada

UNIDO - Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial

USP/ESALQ - Universidade de São Paulo/Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

UAN - Solução de Uréia e Nitrato de Amônio

WGS - *Water Gas Shift*

LISTA DE SÍMBOLOS

°C - Graus Celsius

% - Porcentagem

Bar - Bares

CO - Monóxido de carbono

CO+H₂ - Gás de síntese

CO₂ - Dióxido de carbono

CH₄ - Metano

DH - Delta H (Variação de entalpia)

EJ - Exajoule

Fe - Ferro

GtCO_{2e} - Toneladas de dióxido de carbono equivalente

H₂O - Água

H₂S - Sulfeto de hidrogênio

H₂ - Hidrogênio

HJ mol - Quilo joule por quantidade de substância

Kg - Quilograma

M³ - Metro cúbico

MPa - Megapascal

Nm³ - Normal metro cúbico

NH₃ - Amônia

N₂ - Nitrogênio

Ru - Rutênio

US\$ - United States Dollar

USD - Dólar Americano

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	20
1.1.1 Objetivo geral	20
1.1.2 Objetivos específicos.....	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA	21
2.1 AGRONEGÓCIO NO BRASIL E NO PARANÁ	21
2.2 POTENCIAL E MERCADO DO BIOGÁS NO BRASIL E NO ESTADO DO PARANÁ.....	24
2.3 ECONOMIA DE BAIXO CARBONO E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA	29
2.4 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA	33
2.4.1 O processo Haber-Bosch na Síntese de Amônia	34
2.4.2 Reforma Catalítica para produção de hidrogênio (rota convencional).....	35
2.5 PRODUÇÃO DE AMÔNIA A PARTIR DO BIOGÁS	37
2.5.1 Reforma a Seco do Biogás.....	37
2.5.2 Produção de Hidrogênio Renovável advindo do Biogás	40
2.6 MERCADO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS NO BRASIL E NO ESTADO DO PARANÁ	41
3 MATERIAL E MÉTODOS	51
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	51
3.1.1 Fundamentação Teórica.....	52
3.1.2 Identificar a capacidade real e o potencial total de produção de biogás no Paraná em 2023, com base em dados de plantas existentes e substratos do agronegócio não aproveitados	53
3.1.3 Estimativa do potencial de produção de amônia renovável a partir da reforma do biogás.....	54
3.1.3.1 Estimativa estequiométrica do potencial de produção de gás de síntese e hidrogênio.....	54
3.1.3.2 Estimativa do potencial de produção de amônia	56
3.1.3.3 Painel dinâmico com os resultados	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

A intensificação dos processos industriais, somado ao crescimento populacional, 203,1 milhões em 2022, com aumento de 6,5% frente ao censo demográfico anterior, realizado em 2010 (IBGE, 2023), urbanização da população e as mudanças nos padrões de consumo resultaram em significativa exploração de recursos naturais e elevada geração de resíduos no país. Por conseguinte, surge um dos principais desafios da atualidade: a gestão adequada dos resíduos, a maior produção de alimento e a diversificação da matriz energética mediante processos mais sustentáveis e eficientes.

Ainda, alinhado com o incremento populacional e com a iminente escassez de recursos e alterações climáticas, o mundo está sendo obrigado a repensar sobre seu padrão de consumo e descarte atual. Segundo as projeções da ONU divulgadas em julho de 2022, estima-se que até 2030, a população mundial chegue a 8,5 bilhões de pessoas e em 2080, 10,4 bilhões de pessoas (ONU, 2022). E em um ambiente sensível a alterações comportamentais e de flutuações de mercado, a bioeconomia tem uma relação direta com ganhos de produtividade reduzindo o uso de recursos naturais e eliminando desperdícios.

Nesse contexto, conforme aumenta a necessidade de produção de alimentos para atender a demanda global, maior é a demanda por nutrientes dos fertilizantes para o cultivo das plantações. Com isso o uso de fertilizantes é um dos principais fatores que possibilita tanto o aumento da produção alimentar global, quanto sua rentabilidade sem incremento de novas áreas para cultivo (REETZ JR, H. 2017).

A descoberta da síntese de amônia por meio do processo de Haber-Bosch, em 1908, possui uma enorme relevância para o abastecimento de alimentos no mundo nos dias de hoje, uma vez que ela facilitou a produção em escala industrial de fertilizantes agrícolas. Estima-se que na década de 90, o aumento de 30 a 50% da produção agrícola era atribuído ao uso de fertilizantes nitrogenados proveniente da síntese de Haber-Bosch (Nelson, 1990). Se trata do principal processo de produção de amônia (NH_3), um importante intermediário para a produção de fertilizantes nitrogenados (EPE, 2021).

Em meio a este cenário, destaca-se a importância desses fertilizantes que tem se ampliado nos tempos atuais. Na última década cerca de 60% do crescimento da produtividade agrícola deveu-se a esses insumos e estima-se que sem o processo de fixação de nitrogênio desenvolvido por Haber-Bosch, menos de 50% da população mundial teria sua subsistência alimentar (Stewart et al., 2005; Erisman et al., 2008; Vieira 2017).

Globalmente, os fertilizantes são usados como suporte para a produção agrícola, de modo a garantir a segurança alimentar (IFA, 2023) e são responsáveis por cerca de metade da produção mundial das culturas, fornecendo alimento, forragem, fibra, e combustível alternativo (REETZ, 2017).

No estágio tecnológico atual, o H₂ é produzido majoritariamente a partir de combustíveis fósseis, em que o gás natural é o mais utilizado, destinando-se o H₂ para produção de amônia e refinarias de petróleo. Contudo, a produção de H₂ nesta rota, denominada hidrogênio cinza, é responsável pela emissão anual de cerca de 800 milhões de toneladas de CO₂ (IEA, 2020b). Embora a síntese de amônia seja um processo intensivo em energia e altamente dependente de combustíveis fósseis, a utilização de hidrogênio de baixa emissão como matéria prima e fonte de energia pode reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa associadas à produção de fertilizantes (ANEEL, 2024).

A amônia verde, é produzida a partir de hidrogênio renovável por meio de sua reação com o nitrogênio. Cabe ressaltar que o mercado doméstico de fertilizantes é atendido majoritariamente por importação (aproximadamente 85%) e em 2020, representou o segundo lugar nas importações totais e da indústria de transformação brasileira. Ainda quando comparado 2018 a 2008 observa-se que dobrou a quantidade importada pelo Brasil. Em 2018, foram importadas cerca de 9 milhões de toneladas de fertilizantes nitrogenados. Além da amônia verde poder ser utilizada para produção de fertilizantes, é uma promissora forma de distribuição intercontinental do hidrogênio verde reduzindo assim dependência das importações e do uso do gás natural como insumo (GIZ, 2021). No caso dos fertilizantes nitrogenados, apenas 5% da demanda interna é produzida no país (EPE, 2023).

Com objetivo de melhoria da eficiência energética, a aceleração da implantação de energias renováveis e o armazenamento de gás, representantes de 40 governos e da Agência Internacional de Energia (IEA) estabeleceram esforços cuja oferta de energia segura, acessível e com baixo teor de carbono guiará as políticas dos governos, as ações de agentes de mercado e de consumidores. Algumas iniciativas para uso de malhas existentes de gasodutos para a movimentação de hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis já iniciaram (EPE, 2023).

Portanto, existe a oportunidade de obter hidrogênio renovável a partir de uma fonte de carbono neutra e sua conversão em amônia, produto amplamente utilizado como fertilizante neste setor. Se trata ainda de um nicho subexplorado e com oportunidades de implementação de soluções que promovam uma economia circular, garantindo o uso mais inteligente e sustentável dos resíduos orgânicos que é matéria prima para produção de biogás e este utilizado para obtenção do hidrogênio renovável. Tendo em vista que há resíduos distribuídos em todo território nacional, as oportunidades de desenvolvimento desse mercado se estendem a todas as regiões brasileiras.

Considerando este contexto, destaca-se a oportunidade de utilização do biogás, um recurso rico em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), assim como o gás natural, porém de origem renovável para produção de hidrogênio, utilizado como insumo no processo Haber-Bosch.

O mercado nacional de biogás vem se expandindo consideravelmente nos últimos anos e ao avaliar o potencial de mercado e sua ascensão, com a hipótese de desenvolvimento e implementação do produto aqui apresentado, a amônia, identifica-se a possibilidade de abertura e viabilização de um mercado promissor.

A escolha de priorizar o Estado do Paraná se deu principalmente por aspectos de mercado, cujos resultados são estratégicos, e pela alta disponibilidade de dados publicados pelo CIBiogás. Devido a economia da região ser vinculada majoritariamente ao setor agrícola, é favorecida a implementação de arranjos produtivos de biogás a partir dos dejetos originados das atividades da pecuária (suinocultura, avicultura e bovinocultura) e agroindustrial (beneficiamento). Nesse contexto, o Estado configura-se com o maior número de plantas de biogás do Brasil, com 391 unidades em operação,

produzindo cerca de 461 milhões Nm³/ano de biogás em 2023 (CIBiogás, 2024).

Espera-se que os resultados desse estudo ampliem as rotas de produção de amônia renovável a partir das oportunidades de mercado a serem apresentadas, que possa contribuir para a exploração sustentável da vasta disponibilidade de recursos no território paranaense e brasileiro, neste caso o biogás, além de colocar o Estado e o país à frente da construção de um mercado da amônia renovável contribuindo também com as soluções para a descarbonização da economia mundial.

O estudo traz dados para que oportunize a ampliação de benefícios econômicos, sociais e ambientais, pois está em consonância com os conceitos de produção mais limpa, eficiência ambiental e energética, assim como está alinhada com as iniciativas necessárias para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para o *compliance* com compromissos internacionais assumidos pelo Brasil no âmbito do Acordo de Paris e da Agenda 2030, estruturada em torno dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). Cabe ainda destacar que se trata de um resultado com caráter pioneiro, tendo em vista que não existem dados de potencial de amônia renovável a partir do biogás no Estado do Paraná conforme pesquisas realizadas, além dos trabalhos disponíveis serem escassos.

No contexto do trabalho, foi identificado o potencial de produzir amônia a partir do biogás proveniente das atividades do agronegócio. Diante do exposto, responde-se ao seguinte questionamento: Qual o potencial do estado do Paraná de produzir amônia a partir do biogás?

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Estimar o potencial de produção de amônia renovável a partir da reforma do biogás proveniente do agronegócio no estado do Paraná.

1.1.2 Objetivos específicos

- Identificar a capacidade real de produção de biogás no estado do Paraná em 2023, utilizando dados de plantas implementadas e considerando substratos provenientes do agronegócio;
- Estimar o potencial total de produção de biogás que o estado do Paraná poderia ter ao aproveitar todo substrato residual proveniente do agronegócio por mesorregião no estado do Paraná;
- Estimar a conversão do biogás em gás de síntese, do gás de síntese em hidrogênio renovável e este em amônia renovável;
- Desenvolver um painel dinâmico para melhor compreensão, apresentação e visualização dos resultados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

2.1 AGRONEGÓCIO NO BRASIL E NO PARANÁ

O agronegócio engloba, de forma geral, todas as operações relacionadas a fabricação e logística de insumos agrícolas, desde a produção, armazenamento, processamento e distribuição de *commodities*. O setor é uma importante opção de desenvolvimento econômico e atração de investimentos estrangeiros, o que traz consigo efeitos benéficos de modernização e fortalecimento das cadeias produtivas atreladas ao setor. Nesse cenário, o Brasil destaca-se como um dos principais modelos de desenvolvimento agroindustrial de todo o mundo (MEDINA e POKORNY, 2022).

Segundo dados da Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA) e do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (USP/ESALQ), o agronegócio contribuiu com 27,4% de todo o Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro no ano de 2021, demonstrando um crescimento de 8,36% em relação ao ano anterior. Quando descritas as categorias que mais impactaram nesse expressivo resultado, citam-se: a cadeia produtiva da Soja (398,1 bilhões de reais), carne bovina (200,8 bilhões de reais), milho (138,4 bilhões de reais), leite (77,4 bilhões de reais), frango (77 bilhões de reais), cana-de-açúcar (398,1 bilhões de reais) e suínos (30,4 bilhões de reais). Tais resultados colocam o país no *ranking* mundial como o maior produtor de soja (EMBRAPA SOJA, 2021), segundo maior produtor de carne bovina (EMBRAPA, 2021), terceiro maior produtor de milho (CONAB, 2022), terceiro maior produtor de frangos (EMBRAPA SUÍNOS E AVES, 2022) e maior produtor de cana-de-açúcar (IEA, 2022).

No contexto nacional, o Estado do Paraná se destaca contribuindo com 6,412% do PIB brasileiro, alcançando sua maior participação em 2020 (AEN, 2022). No primeiro trimestre de 2023, o estado registrou uma expansão de 9,16% em relação ao mesmo período de 2022. As principais atividades que compuseram o valor adicionado foram a agropecuária (38,32%), a indústria (7,95%) e o setor de serviços (4,89%), correspondendo a 7,6% do PIB nacional (IPARDES, 2023). O Paraná também se destaca por sua população estimada

em 11,4 milhões de pessoas e um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de 0,749 (IBGE, 2022).

Com relação ao setor produtivo, o Estado encontra-se em primeiro lugar para produção de aves (27%), segundo lugar na produção de suínos (15%) e terceiro lugar em vacas de leite (7,8%). Em 2021, produziram-se 308,07 mil toneladas na bovinocultura de corte, 4,4 bilhões de litros de leite, 1,02 milhões toneladas de suínos, 4,87 milhões de toneladas de frango de corte e 144,85 mil toneladas de peixes. Com relação às indústrias de processamento, o estado acumula a primeira e segunda posições nacionais para o abate de frangos e suínos, respectivamente, tem o ano base de 2021 (SEAB, 2023).

Ainda segundo o Departamento de Economia Rural (Deral), da Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento (Seab), a safra de 2022/2023 no estado está estimada em 46,85 milhões de toneladas, representando uma redução de 1% na área e um aumento de 38% no volume quando comparado aos resultados do ano 2021/2022 (SEAB, 2023).

Sobre o status da produção agrícola para o ano de 2021, o estado contou com a produção de 197,31 mil toneladas de aveia (2ª posição nacional), 804,08 mil toneladas de batata-inglesa (2ª posição nacional), 33,55 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (5ª posição nacional), 301,757 mil toneladas de cevada (1ª posição nacional), 548,08 mil toneladas de feijão (1ª posição nacional), 3,33 milhões de toneladas de mandioca (2ª posição nacional), 9,32 milhões de toneladas de milho (3ª posição nacional), 19,78 milhões de toneladas de soja (3ª posição nacional) e 3,15 milhões de toneladas de trigo (2ª posição nacional), conforme apresentado na Figura 1 (SEAB, 2023).

FIGURA 1 - PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA E AGRÍCOLA DO ESTADO DO PARANÁ



FONTE: SEAB, 2023. Elaborado pelo Autor (2023).

O crescimento na produção de alimentos ocorreu exponencialmente nas últimas décadas, influenciado principalmente pelo grande aumento da população. Para isso, grandes esforços voltados ao desenvolvimento tecnológico aplicado ao campo foram realizados, visto a necessidade do aumento da produtividade pela indisponibilidade no avanço de terras agricultáveis. Nesse sentido, o uso de fertilizantes tornou-se parcela fundamental na cadeia global de fornecimento de alimentos, tendo sua produção e uso acrescido em até 300% entre as décadas de 1970 a 2010 (WALLING e VANEECKHAUTE, 2020).

Pode ser definido como fertilizante toda “substância mineral ou orgânica, natural ou sintética, fornecedora de um ou mais nutrientes de plantas” conforme Decreto Nº 4.954 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2004). Nesse sentido, a função principal dos fertilizantes é devolver ao solo os elementos que são dele retirados a cada colheita, suprir as demandas nutricionais das culturas no intuito de manter ou elevar a produtividade, resultando em um melhor aproveitamento da área plantada e maior rentabilidade (YARA BRASIL, 2023).

O Brasil é o quarto maior consumidor de fertilizantes, ficando atrás apenas dos Estados Unidos, Índia e China, e dentre os principais produtos da categoria, aqueles à base de nitrogênio, fósforo e potássio são os mais empregados comercialmente no país, de acordo com a Figura 2 (FERREIRA et al. 2022).

FIGURA 2 - MAIORES CONSUMIDORES DE FERTILIZANTES EM 2020



FONTE: GlobalFert (2021b). Elaboração DPE/SAE-PR.

Segundo dados da Associação Nacional para Difusão de Adubos foram entregues ao mercado nacional mais de 45,85 milhões de toneladas de

fertilizantes no ano de 2021, sendo que em ordem de grandeza de aplicação em lavouras, tem-se o potássio (38%), cálcio (33%) e nitrogênio (29%). Do montante, quase 85% foram advindos de importações, diluídos principalmente em 76% para o nitrogênio, 55% para o fósforo e 94% para o potássio (ANDA, 2022; SAE, 2020).

Além dos benefícios atrelados ao incremento nos indicadores produtivos das cadeias agroindustriais nacionais, crescente é a geração de resíduos desse setor, responsáveis por consideráveis impactos ambientais que variam e se potencializam de acordo com o processo produtivo (FUESS et al., 2017). Além disso, com o desenvolvimento de grandes polos agroindustriais regionalizados, também se concentrou a geração desses efluentes, mobilizando o setor para o desenvolvimento e implementação de eficientes tecnologias e processos para o tratamento e gestão desses resíduos (CREMONEZ et al., 2021).

Ainda hoje, grande parte da produção mundial de fertilizantes é obtida de uma indústria fóssil, o que contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa (GEE) do setor agrícola (aproximadamente 12% das emissões totais) (WALLING e VANEECKHAUTE, 2020). A possibilidade pela utilização de resíduos agroindustriais como precursores para a produção renovável de fertilizantes pode abrir caminho para redução nas importações de fertilizantes inorgânicos, reduzindo a dependência nacional a flutuações de preços, redução nas emissões de GEE, a qual contribui para um ciclo de vida mais renovável, além de agregar valor econômico as cadeias produtivas agroindustriais.

2.2 POTENCIAL E MERCADO DO BIOGÁS NO BRASIL E NO ESTADO DO PARANÁ

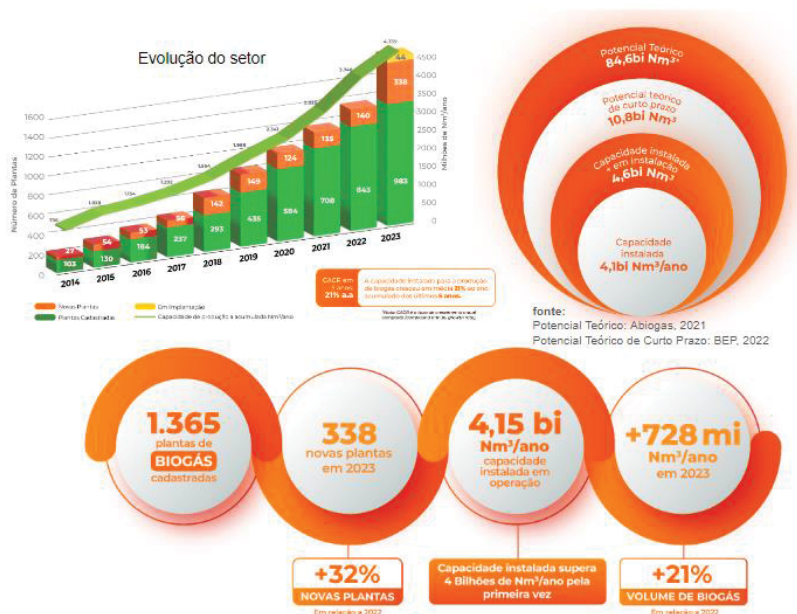
O Brasil possui um clima subtropical, que é favorável ao processo de biodigestão, além de ter como base de sua economia atividades ligadas ao setor primário, com um enorme potencial para produção de biogás/biometano (BRASIL, 2017).

O biogás é um energético composto majoritariamente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) (KAINTHOLA et al., 2019) que convencionalmente

pode ser utilizado para a produção de energia elétrica, térmica ou refinado na qualidade de biometano para aplicação veicular. Este biogás normalmente contém teores equilibrados entre seus dois principais constituintes que, se processado corretamente, pode proporcionar uma fonte renovável de hidrogênio, essencialmente, a partir de resíduos (ARESTA et al., 2001). Nesse sentido, tanto biogás quanto biometano podem ser submetidos a processos de reforma catalítica que os convertem em gás de síntese ($\text{CO} + \text{H}_2$), que ao passar por processos de purificação, separa a parcela de monóxido de carbono, produzindo hidrogênio de origem renovável, com alto valor agregado de mercado (BRÉMOND et al., 2021; UNIDO e CIBIOGÁS, 2022).

De acordo com o Panorama do Biogás 2023, lançado pelo CIBiogás, o mercado nacional de biogás com aplicações voltadas para fins energéticos vem se expandindo consideravelmente nos últimos anos. Atualmente o Brasil conta com 1.365 plantas de produção de biogás, das quais 1.324 encontram-se em operação (95%). Em relação a 2022, 338 novas plantas de biogás foram implementadas, representando um crescimento de 32% e um crescimento no volume de biogás na ordem 21%, ou seja, 728 milhões de Nm^3/ano . Quanto a sua aplicação, 57% é destinado a geração de energia elétrica, 37% biometano e 5% energia térmica e 0,1% energia mecânica, cujos os dados são apresentados na Figura 3 (CIBIOGÁS, 2024).

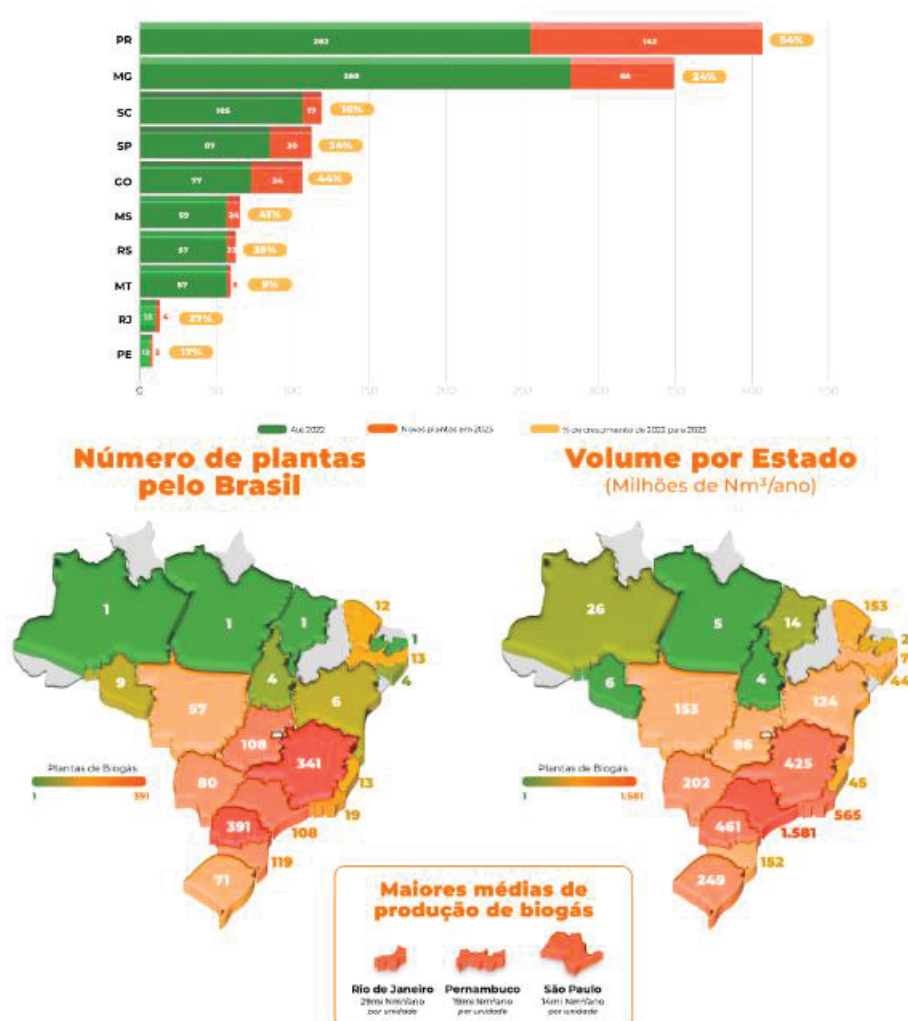
FIGURA 3 - TOTAL DE PLANTAS CADASTRADAS NO BIOGÁSMAP EM 2023



FONTE: CIBiogás (2024).

Em 2023, os estados com o maior número de plantas em operação foram Paraná, Minas Gerais, Santa Catarina, São Paulo e Goiás, no qual o Paraná ocupa a primeira posição no ranking com 391 plantas em operação, o que corresponde a 461 milhões de Nm³/ano. Já os estados onde ocorreram o maior crescimento do número de plantas foram, Paraná (54%), Goiás (44%), Mato Grosso do Sul (41%), Rio Grande do Sul (39%), São Paulo (34%) e Rio de Janeiro (27%), conforme Figura 4.

FIGURA 4 – NÚMERO DE PLANTAS DE BIOGÁS POR ESTADO EM 2023



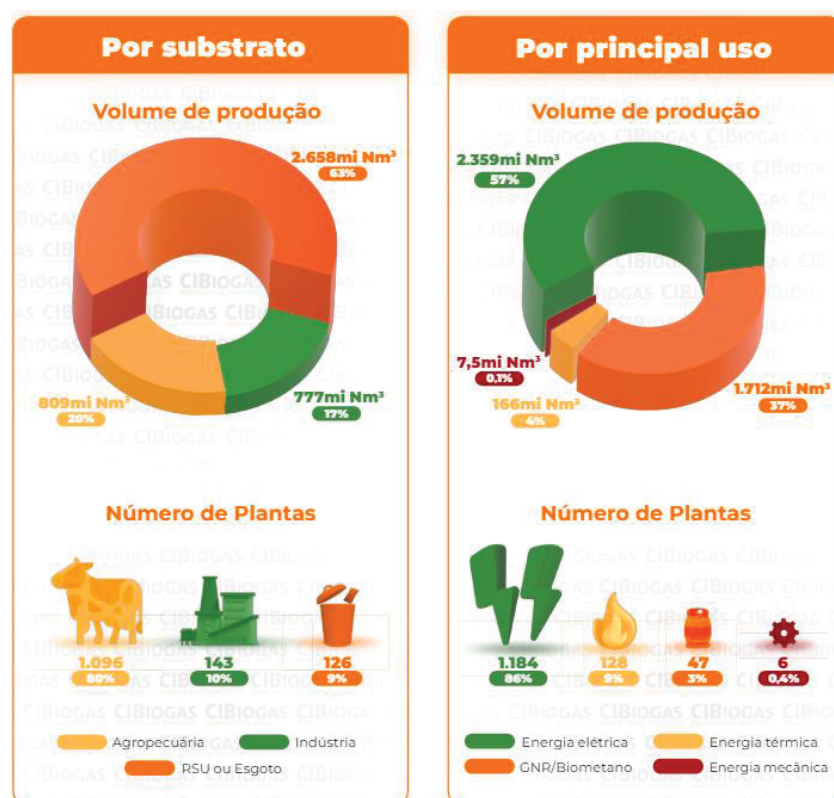
FONTE: Panorama do Biogás no Brasil 2023. CIBiogás (2024).

Apesar dos avanços no setor, o subaproveitamento do potencial do biogás para o Brasil é evidente. Considerando o potencial nacional de produção de biogás (84,6 bilhões de Nm³/ano) e a produção atual + em instalação (4,6 bilhões de Nm³/ano), constata-se que apenas 5,4% do volume total é

aproveitado, e que, portanto, existe um cenário de expansão muito promissor para as próximas décadas no Brasil.

Nesse contexto, cabe ressaltar que majoritariamente o maior número de plantas de biogás são da agropecuária (1.096 plantas – 80%) o que corresponde a 20% da produção de biogás, seguido da indústria (143 plantas – 10%) que corresponde a 17% do volume de biogás e o setor de saneamento composto por resíduos sólidos urbanos e esgoto (126 plantas – 9%) que corresponde 63% de volume de produção de biogás, cujos os dados podem ser observados na Figura 5 (CIBIOGÁS, 2024).

FIGURA 5 – CARACTERÍSTICAS DAS PLANTAS DE BIOGÁS









FONTE: Panorama do Biogás no Brasil 2023. CIBiogás (2024).

Corroborando com este grande potencial de biomassa residual disponível no Estado do Paraná, o relatório publicado em 2019, pelo GEF Biogás Brasil em parceria com o CIBiogás, sobre o Potencial de Produção de Biogás para o Sul do Brasil, evidenciou que o Paraná possui potencial para produzir aproximadamente 1,19 bilhões de m³ de biogás ao ano, considerando-

se os setores de avicultura, bovinocultura, suinocultura, abatedouros, laticínios e processamento de mandioca.

Conforme o estudo supracitado, o Estado do Paraná tem potencial para gerar 255 milhões Nm³/ano de biogás a partir do plantel de suínos (5.388.380 cabeças), em que 70% da produção está concentrada na mesorregião oeste, seguido da centro oriental que concentra 14% da suinocultura (769 mil cabeças de suínos). Considerando os substratos da bovinocultura (8,2 bilhões de m³ de efluentes e plantel de 4,1 milhões), esses teriam o potencial de produzir 546 mi Nm³/ano de biogás, cuja a mesorregião noroeste lidera o potencial de produção com estimativa de 110 mi Nm³/ano (20% do potencial estadual). No setor de avicultura, considerando corte e de postura, são 347 milhões de aves que geram na ordem de 657 mil toneladas de resíduos (dejetos somados a cama de frango) e 683 mil m³ de resíduos efluente por ano, o que representam um potencial de produção de 161 mi Nm³/ano de biogás. As mesorregiões Oeste e Sudoeste concentram o maior número de aves do Estado e reúnem 50% do total da produção. Referente a produção e processamento de mandioca (3,4 milhões de toneladas e 20 mi m³/ano de efluentes), o potencial apresentado é cerca de 126 mi Nm³/ano de biogás, sendo a região noroeste a de maior destaque quanto ao potencial, correspondendo a 66,3%. Já no processo de industrialização do leite (2,7 bilhões de litros por ano), são gerados cerca de 6,9 mi m³/ano de efluentes que contam com um potencial de produção de 30,6 mi Nm³/ano de biogás, concentrado nas mesorregiões Sudoeste e Oeste, que juntas somam 68% do total do Estado. No que se refere aos abatedouros (aves, bovinos e suínos), totalizando 301,2 mil toneladas de resíduos orgânicos, apresenta um potencial de produzir 79 mi Nm³/ano de biogás, concentrado na mesorregião Norte Central, seguida das mesorregiões Oeste e Noroeste, conforme Figura 6 (GEF, 2019).

FIGURA 6 - POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO ESTADO DO PARANÁ

	 Aves	 Bovinos	 Suínos	 Mandioca	 Industrialização do leite	 Abatedouros (aves, bovinos e suínos)
Potencial de Biogás	161 milhões Nm ³ /ano	546 milhões Nm ³ /ano	255 milhões Nm ³ /ano	126 milhões Nm ³ /ano	30,6 milhões Nm ³ /ano	79 milhões Nm ³ /ano
Plantel / produção	347 milhões	4,1 milhões	5,3 milhões	3,4 milhões de toneladas	2,7 bilhões de litros/ano	2,8 mi aves; 3,4 mi bovinos; 14,4 mi suínos
Resíduos / efluentes	657 mil ton/ano resíduos e 683 mil m ³ /ano de efluente	8,2 milhões	6,8 milhões	20 milhões m ³ /ano de efluente	6,9 milhões m ³ /ano de efluente	301,2 milhões ton
Região	50% na região oeste e sudoeste	20% na região noroeste	70% na região oeste	63% na região noroeste	40% na região sudeste	Região Oeste maior potencial de biogás

FONTE: GEF Biogás Brasil (2019). Elaborado pelo Autor (2023).

As atuais tendências e perspectivas do setor sinalizam para o crescente uso do biogás como uma das fontes de maior potencial do Brasil para a obtenção de hidrogênio renovável. Para o cumprimento de tais perspectivas, tem-se dado grande destaque ao uso da biomassa, destinada diretamente para a produção de hidrogênio a partir de processos como a gaseificação ou reforma do biogás. Os principais setores ou cadeias produtivas que contribuem para geração da biomassa passível de conversão em biogás são aquelas baseadas em: resíduos agroindustriais (manipueira, vinhaça, glicerol, gordura, etc.); restos de colheitas (palhadas e bagaços); resíduos pecuários (água de lavagem, fezes, urina); aterros sanitários e esgoto doméstico (SOUZA, 2009).

2.3 ECONOMIA DE BAIXO CARBONO E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

A economia do carbono refere-se basicamente a economia tradicional que se baseia na queima de combustíveis fósseis, principalmente para locomoção e geração de energia elétrica. Em contrapartida, uma economia de baixo carbono está atrelada a um sistema de desenvolvimento sustentável, gerando menos gases de efeito estufa (SAMARGANDI e SOHAG, 2022). Com o advento da Revolução Industrial, constante crescimento populacional e um

consumo energético global baseado significativamente em carvão, o aumento na concentração de CO₂ atmosférico é reconhecido com grande indutor do aquecimento global. Nesse sentido, o princípio de uma economia de baixo carbono é atualmente proposto e bem aceito, o que implica que uma forma sustentável de reduzir as emissões de carbono consiste em reduzir o consumo de derivados de petróleo (WANG e HUANG, 2022; ZHOU et al., 2022).

Propostas voltadas ao desenvolvimento de uma economia de baixo carbono baseiam-se principalmente na responsabilidade pela proteção ambiental, desenvolvimento e implementação de metas de conservação, redução e otimização do uso da energia, além de adequações nos ambientes industriais (LIU et al., 2022). Além disso, a transição para uma sociedade abastecida por energia de fontes de baixo carbono é uma das importantes mudanças necessárias na mitigação dos impactos relacionados as mudanças climáticas (WROBEL-DAVEAU et al., 2022).

Pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de tecnologias para produção de combustíveis alternativos e mais eficientes vem crescendo constantemente nas últimas décadas. Como exemplo, citam-se as seguintes tecnologias: energia geotérmica, energia oceânica, energia nuclear, energia eólica, além de biocombustíveis líquidos e gasosos em geral (LIU et al., 2022). O aumento no uso de fontes renováveis de energia atrelado a redução do uso de opções altamente poluentes é um processo conhecido mundialmente como transição energética (SELVAKKUMARAN e AHLGREN, 2020). Um dos principais pontos relacionados a velocidade de avanço dos processos de transição energética se relacionam a capacidade e velocidade na compensação e substituição de uma determinada fonte de energia (não renovável) por outra (renovável) (WROBEL-DAVEAU et al., 2022).

Apesar dos interessantes indicadores relacionados a introdução de fontes alternativas de energia, análises de fatores que influenciam no crescimento de combustíveis renováveis indicam que esses energéticos ainda são pouco competitivos comercialmente frente aos derivados fósseis e da importância de mecanismos para assegurar a competição. Por exemplo, no setor de transportes, o uso de biocombustíveis ainda é limitado, dados os baixos preços dos combustíveis fósseis e quando se olha para transição energética para o setor de gás, ainda o país depende de altos investimentos

em infraestrutura e se tem baixa inserção tecnológica na transformação das redes pela digitalização e armazenamento de energia (MME/EPE, 2020; IPEA, 2021).

Como estímulo ao processo de descarbonização e busca por sistemas de produção e consumo baseados em uma baixa ou nula emissão de carbono, diversas metas de descarbonização foram estipuladas por tratados e programas internacionais e que nortearam o planejamento das nações.

O protocolo de Kyoto, assinado em 1997 estabeleceu metas diretas de redução de emissões para países que estavam aderindo ao capitalismo com grande impacto na emissão de GEE. Pelo protocolo permitiu-se que cada nação estipulasse suas metas de redução de emissões, principalmente para países em desenvolvimento, o que limitou a eficiência do tratado no avanço da quantidade de emissões atmosféricas nos anos seguintes. Como contraponto a isso, o Acordo de Paris (2015) propôs metas efetivas para países desenvolvidos e em desenvolvimento em controlar o aumento da temperatura global através de esforços conjuntos, sendo então, o mais importante tratado internacional na busca pelo controle do aquecimento global. Além das apresentações de cada país sobre indicadores e previsões de reduções de emissões, foram propostas pelo tratado revisões das contribuições nacionais a cada cinco anos (SAMPAIO, 2022).

Apesar dos acordos firmados, relatórios apresentados ao final da última década indicaram um cenário aquém das metas firmadas, com emissões aproximadamente equivalentes a um cenário sem políticas de redução de carbono. Além disso, os documentos demonstram previsões de elevação nas emissões de 53 GtCO_{2e} em 2030, as quais podem subir para 59 GtCO_{2e} caso não ocorram as implementações previstas pelos países signatários. Com base nisso, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) convocou o Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas que tornaram bem definidas as metas para redução das emissões globais, sendo de 45% em relação ao nível de 2017 até o ano de 2030 e de zero até o fim do século. Tal meta impõe uma média de redução de aproximadamente 7,6% ao ano até o fim da década (MORGAN e PATOMÄKI, 2021).

No presente acordo, o Brasil firmou em sua Contribuição Nacionalmente Determinada, após revisão em 2020, a meta de reduzir em 37% as emissões de GEE, frente aos níveis de referência do ano de 2005 (2,8 GtCO₂e) até o ano de 2025. Adicionalmente, o país acordou redução de até 50% de suas emissões até o ano de 2030 frente ao mesmo período de referência. No mesmo acordo, o Brasil ainda estipula o objetivo de longo prazo em alcançar a neutralidade climática até o ano de 2050. O plano nacional de adaptação as mudanças climáticas (PNA) prevê mais de 50 políticas, planos e programas governamentais de diferentes setores, com a preocupação de elevar a eficiência e integração de diferentes iniciativas em concordância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS) das Organização das Nações Unidas (ONU) (ACORDO DE PARIS - BRASIL, 2022).

Destaca-se também que as tecnologias de energia renovável sofreram drásticas reduções de custos nos últimos anos, o que as tornaram amplamente competitivas em termos de custo (APPLEMAN, COUTURE e JACOBS, 2018).

Logo, tais fatores oportunizam um ambiente mercadológico, regulatório e político favorável a este momento de transição energética, impulsionando o crescimento e o fortalecimento das energias renováveis, conforme destacado no Plano Decenal de Expansão de Energia - PDE 2032 que indica que os biocombustíveis continuarão a ter participação relevante na matriz energética brasileira no próximo decênio, em especial devido aos incentivos aos biocombustíveis (EPE, 2022).

Nesse contexto, destaca-se o hidrogênio presente nos planos estratégicos para transição energética de muitos países, em especial da União Europeia, visto que se trata de um energético de alta densidade, sem carbono e ainda pode ser utilizado como um vetor de armazenamento de energia. Ainda, visto a preocupação mundial com a descarbonização, decorreu em diferenciar por cores o hidrogênio a depender da fonte e rotas tecnológicas de produção do hidrogênio de acordo com a pegada de carbono, entretanto, ainda não se identificou uma robusta definição considerando todas as diferentes rotas tecnológicas e sim disponibilidade de jargões de mercado utilizando diferentes critérios para designar as cores. O hidrogênio produzido via biodigestão da biomassa ou de resíduos tem sido considerando hidrogênio musgo (EPE, 2021). Já Bezerra (2021) refere-se como hidrogênio renovável quando obtido

a partir do biogás. Segundo a Lei nº 14.948 que institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono, hidrogênio verde é definido como o hidrogênio produzido por eletrólise da água, utilizando fontes de energia renováveis e o hidrogênio renovável como “ hidrogênio de baixa emissão de carbono, combustível ou insumo industrial coletado como hidrogênio natural ou obtido a partir de fontes renováveis, incluindo o hidrogênio produzido a partir de biomassa, etanol e outros biocombustíveis, bem como hidrogênio eletrolítico, produzido por eletrólise da água, usando energias renováveis, tais como solar, eólica, hidráulica, biomassa, etanol, biogás, biometano, gases de aterro, geotérmica e outras a serem definidas pelo poder público”.

2.4 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA

A amônia (NH_3) é um gás incolor na temperatura de 25 °C, apresentando-se mais leve que o ar e dotado de odor marcante, composto por nitrogênio que pode ser obtido da própria atmosfera e hidrogênio. É facilmente dissolvida em água e por isso é um solvente amplamente utilizado em reações químicas (FELIX e CARDOSO, 2004; CADE, 2018). A amônia anidra (NH_3) é o fertilizante nitrogenado comercial mais concentrado com 82% de nitrogênio e nas condições normais de temperatura e pressão se encontra no estado gasoso e líquido quando submetido a pressão elevada ou baixa temperatura (REETZ JR, H. 2017).

O composto químico apresenta também grande aplicação na indústria, podendo ser utilizado como substrato promissor para síntese de combustíveis, tendo teor energético comparado ao da gasolina (BAZOOYAR et al., 2022; SONKER et al., 2022) e podendo ser aplicado como combustível marinho (MACHAJ et al., 2022), como agente neutralizador na indústria do petróleo (FELIX e CARDOSO, 2004), em sistemas de refrigeração industrial (WAGHARE e SATHYABHAMA, 2022; YAMAMOTO et al., 2022), na fabricação de explosivos (KATILIE et al., 2019), e principalmente, na produção de fertilizantes (KE et al., 2022; LI et al., 2022a; LI et al., 2022b).

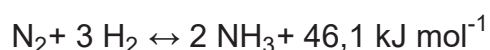
Anteriormente à Revolução Industrial, a fixação de nitrogênio ocorria exclusivamente de forma natural. Dentre os mais importantes avanços

científicos aplicados à agricultura, tem-se a síntese industrial de fertilizantes à base de amônia, sendo esse um produto essencial para a elevação da produtividade de culturas agrícolas. Atualmente, o processo Haber-Bosch responde por aproximadamente 90% de toda a produção global de amônia (HAN et al., 2022).

2.4.1 O processo Haber-Bosch na Síntese de Amônia

O processo Haber-Bosch foi desenvolvido no início do século 20 pelos pesquisadores F. Haber e C. Bosch. Teve seu início de aplicação em larga escala em 1913 pela empresa BASF (KOBAYASHI et al., 2019; YÜZBAŞIOĞLU et al., 2022). O processo original foi significativamente modificado ao longo dos anos, de modo que se tornasse o mais otimizado possível e que fosse comercialmente viável (BERWAL et al., 2021). O processo baseia-se na reação entre nitrogênio (N₂) e hidrogênio (H₂) com o emprego de catalisadores heterogêneos, normalmente a base de ferro (Fe). As reações envolvem elevado gasto energético pela aplicação de temperaturas (400-500 °C) e pressões elevadas (10-30, podendo chegar até 300 bar). A eficiência de conversão do processo gira em torno de 25%, e deste modo, H₂ e N₂ moleculares remanescentes são reciclados novamente para o início do processo para que se obtenham maiores conversões em amônia (AZIZ et al., 2020; BERWAL et al., 2021). Ainda de acordo com Tavares et al. (2023) e Carvalho (2016), na etapa de produção de amônia, o gás de síntese é constantemente misturado com o gás de reciclo e cerca de 20 – 30% do gás de síntese é convertido em amônia, sendo necessário o reciclo de modo que componentes que não reagiram retornem ao início do processo.

A reação de produção de hidrogênio pela combinação das duas espécies químicas é descrita na equação 1 (HUMPHREYS et al., 2021).



Mesmo que a reação decorrente seja exotérmica e a consideração que temperaturas baixas com elevada pressão sejam desejadas para um maior rendimento teórico de amônia, moléculas de nitrogênio apresentam ligação

tripla e requerem elevada quantidade de energia para alcançarem altos níveis de dissociação. Desta forma, a taxa cinética da reação se eleva de forma proporcional ao aumento da temperatura até atingir uma faixa estipulada e descrita anteriormente, tendo seu rendimento reduzido com a aplicação de temperaturas superiores. O equilíbrio entre temperatura, pressão e rendimento de amônia durante a operação do sistema é extremamente importante para obtenção de elevados rendimentos de produto (YÜZBAŞIOĞLU et al., 2022).

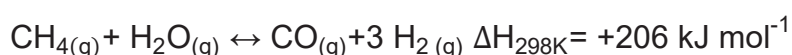
Como proposta à descarbonização da cadeia de produção da amônia, o desenvolvimento de catalisadores que operem e permitam elevadas conversões sob condições operacionais mais amenas vem sendo amplamente estudados. Aziz et al. (2020) faz menção a utilização de catalisadores a base de Rutênio (Ru), facilitando a síntese de amônia sob condições de temperatura variando entre 300-450 °C e pressões de 4-15 MPa, condições relativamente inferiores as empregadas em catalisadores a base de ferro convencionais. Kawamura e Taniguchi (2017) avaliaram sódio derretido como catalisador, apresentando resultados eficientes sob condições de temperatura variando entre 500-590 °C e sob condições atmosféricas de pressão.

2.4.2 Reforma Catalítica para produção de hidrogênio (rota convencional)

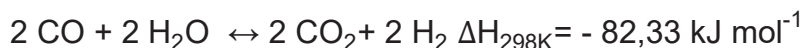
Anualmente são produzidos aproximadamente 180 milhões de toneladas de amônia em todo o mundo (GIZ, 2021). A maior parte desse montante emprega como co-reagente hidrogênio advindo da reforma a vapor do gás natural, processo esse de elevado gasto energético e com elevadas taxas de emissões de GEE (aproximadamente 289 milhões de toneladas de CO₂). Apesar da reforma a vapor do gás natural ser o método mais utilizado em escala industrial para a produção de hidrogênio, o processo de reforma catalítica permite a conversão de outros derivados do petróleo como o metano, metanol, gás natural e nafta (PALO et al., 2007). O gás de síntese gerado no processo de reforma é uma mistura química baseada em hidrogênio molecular (H₂) e monóxido de carbono (CO), sendo empregado como composto básico na síntese de hidrocarbonetos, como combustíveis, álcoois, plásticos, amônia, dentre outros compostos químicos (GHAREGHASHI et al., 2017).

A reação global de reforma a vapor requer altas temperaturas para que seja favorecida e é descrita como uma reação endotérmica. O metano (CH₄), advindo do gás natural, e água (vaporizada) são convertidos em um gás de síntese com alta concentração de hidrogênio (maiores que 70%) (MORTENSEN e DYBKJÆR, 2015; ALVES et al., 2013). O processo ocorre pela passagem das duas espécies químicas por um leito reacional, impregnado com um catalisador (os mais comumente utilizados são a base de níquel) (PANTOLEONTOS et al., 2012).

Sobre as condições operacionais, consideram-se temperaturas variando entre 520-900 °C, pressões entre 1-30 bar e razões de mistura entre H₂O/CH₄, variando entre 1-5 (AVRAAM et al., 2010; PANTOLEONTOS et al., 2012; GHOUSE e ADAMS, 2013; LULIANELLI et al., 2015; CIPITI et al., 2016). Na equação 2 visualiza-se a reação global do processo catalítico de reforma a vapor.



Adicionalmente ao processo de reforma, a produção adicional de hidrogênio pode ser realizada em um segundo reator a partir da reação de *Water Gas Shift* (WGS) (equação 3). Nela, cada molécula de CO produzido na etapa de reforma é convertida em CO₂ quando em contato com o vapor de água, produzindo adicionalmente H₂ (ALVES et al., 2013). Quando considerado o processo WGS pós reforma, tem-se como produtos dessas reações combinadas o H₂ e o CO₂ (MADEIRA et al. 2021), podendo ser facilmente separados com o emprego de membranas a base de paládio (BANG et al. 2021).



Frente a necessidade pelo desenvolvimento de cadeias de produção de amônia com menor impacto ambiental, processos alternativos de produção de “amônia verde” vêm surgindo em pequena escala em diversas regiões do mundo (KOBAYASHI et al., 2019; AZIZ et al., 2020). Em concordância e como citado anteriormente, elevadas quantidades de combustíveis fósseis são destinadas a geração do hidrogênio empregado no processo. O

desenvolvimento e escalonamento de tecnologias voltadas a produção de hidrogênio renovável podem contribuir significativamente para a obtenção de um processo global muito menos poluente pela mínima ou ausente emissão de GEE. A produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água (empregando eletricidade advinda de energia fotovoltaica ou eólica), foto-fermentação, da gaseificação da biomassa ou da reforma a seco do biogás são exemplos de rotas amplamente estudadas por seu grande potencial técnico e ambiental (BERWAL et al., 2021; CVETKOVIC et al., 2021; GHAVAM et al., 2021).

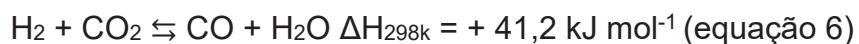
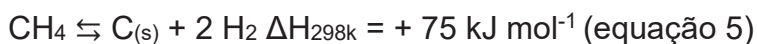
2.5 PRODUÇÃO DE AMÔNIA A PARTIR DO BIOGÁS

2.5.1 Reforma a Seco do Biogás

Diferente da Reforma a Vapor, direcionada exclusivamente a conversão do metano em gás de síntese tendo o vapor de água como co-reagente, no processo de Reforma a Seco, dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), principais constituintes do biogás, reagem para a formação de gás de síntese. Além de permitir a utilização de um biogás com razões balanceadas entre CH₄/CO₂, o processo pode ser considerado interessante ambientalmente por permitir a conversão do CO₂ em gás combustível (JUNG et al., 2021).

De forma semelhante ao processo de reforma a vapor, reações altamente endotérmicas são observadas. Para tal, temperaturas elevadas são necessárias de modo que se obtenha um equilíbrio químico para formação dos produtos desejados. A equação 4 descreve a reação global para o processo de reforma a seco (PAKHARE e SPIVEY, 2014). Dependendo das condições do processo, reações secundárias podem ocorrer, dentre elas citam-se: a decomposição do metano (equação 5), problemática pela deposição de coque sobre o leito reacional e a reação reversa de deslocamento de água (equação 6), reduzindo o saldo líquido de hidrogênio ao fim do processo (GUIMARÃES, 2020). De forma semelhante ao processo de Reforma a Vapor, a produção adicional de hidrogênio pode ser realizada em um segundo reator a partir da reação de *Water Gas Shift* (WGS), conforme já descrito no item 4.4.2.





Com relação às condições operacionais, observam-se: pressões atmosféricas para a maioria das pesquisas avaliadas; temperaturas variando entre 600-900 °C; e razões entre CH₄ e CO₂ próximas a 1. Para o processo global, observam-se em literatura rendimentos superiores a 99% (ARBAG et al., 2015; BIAN et al., 2016; AGUIAR et al., 2019; BACH et al., 2019; GAO et al., 2020). Já estudos realizados por Bian et al. (2016) encontraram eficiência de 89% e Yentekakis et al. (2019) de 90%. Sobre catalisadores empregados no processo, citam-se os sintetizados a base de Níquel (Ni) e Irídio (Ir) por garantirem elevada eficiência com custo inferior aos produzidos a partir de metais nobres (ZHAO et al., 2020).

Afzal et al. (2018) estudaram a viabilidade ambiental da técnica de reforma a seco dentre outras tecnologias considerando essa técnica como a de menor pegada de CO₂ quando as proporções de gás de síntese vão até 1.

Para a reforma a seco, grande parte dos trabalhos indica a utilização de um biogás em iguais proporções entre CH₄ e CO₂, o que é facilmente obtido em biodigestores rurais e agroindustriais, não havendo a necessidade de etapas adicionais de enriquecimento, somente da remoção da umidade do sulfeto de hidrogênio (H₂S) (GEF, 2022).

O H₂S é corrosivo em meio gasoso e aquoso, acarretando danos aos equipamentos e tubulações, reduzindo sua vida útil. Sua remoção é uma importante etapa do processo de purificação do biogás, visto que sua presença implica cuidados na aplicação direta do biogás (ANGHEBEN, 2017).

No processo de reforma, o H₂S também apresenta impactos de iguais proporções, sendo recomendado sua total remoção mesmo que alguns trabalhos indiquem alguma resistência dos catalisadores em determinadas concentrações, o produto subsequente do gás de síntese também demandará baixos teores do contaminante (GEF, 2022).

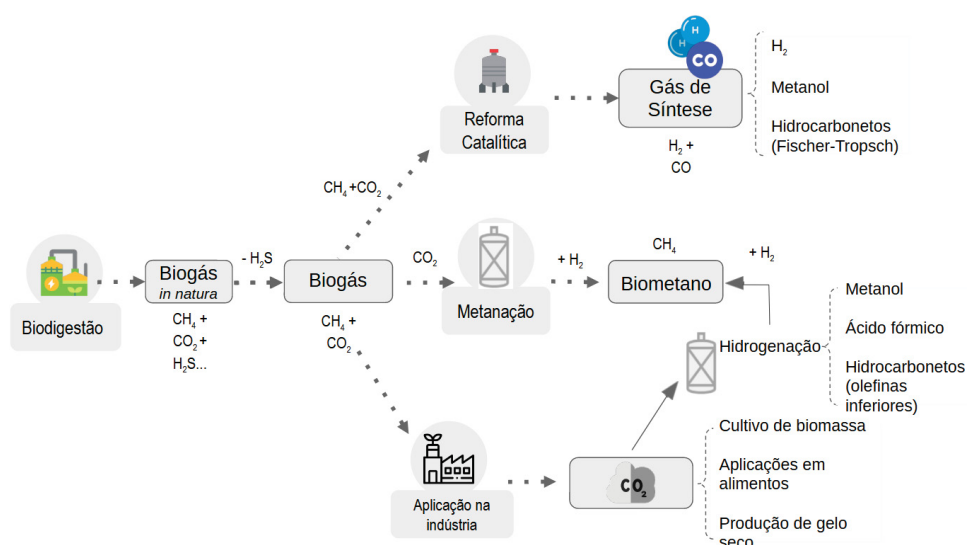
Em uma revisão de literatura conduzida por Gao et al. (2018), avanços recentes sobre a tecnologia de reforma a seco do biogás são discutidos indicando que a tecnologia pode ser extremamente competitiva na conversão de gases do efeito estufa (CH₄ e CO₂) em gás de síntese (H₂ + CO) para

produção de outros compostos químicos de alto valor agregado. Dentre as principais barreiras a serem vencidas para o escalonamento da tecnologia, cita-se a necessidade pelo desenvolvimento de catalisadores estáveis e de baixo custo, além de mais estudos sobre o efeito e impactos de contaminantes do biogás *in natura*.

O CO_2 presente no biogás, quando não utilizado nos processos, pode ser empregado na geração de diversos outros produtos, energéticos ou químicos, de alto valor agregado (BRÉMOND et al., 2021).

Ao fomentar o uso de métodos que proporcionam a utilização do CO_2 , seja por meio da sua captura e aproveitamento ou pela reforma do biogás, tem-se a transformação do gás, que costumeiramente é rejeitado, em um ativo energético ou em matéria-prima de outras aplicações comerciais. Ainda segundo Brémond, *et al* (2021), o processo de reforma catalítica do biogás permite a formação direta de hidrogênio combustível, além do gás de síntese que pode ser destinado a produção de hidrocarbonetos e metanol por processos subsequentes (Fischer-Tropsch). No processo de metanação, hidrogênio reage com o biogás para geração de metano adicional. Com o CO_2 com alto grau de pureza, obtido a partir da purificação do biogás, pode-se gerar metanol, ácido fórmico e outros hidrocarbonetos, também por processos de hidrogenação, conforme apresentado na Figura 7 (BRÉMOND et al., 2021).

FIGURA 7 - POTENCIAIS ROTAS PARA VALORIZAÇÃO DO CO_2 ADVINDO DO BIOGÁS



FONTE: Brémond et al. (2021). Elaborado pelo Autor (2023).

2.5.2 Produção de Hidrogênio Renovável advindo do Biogás

O Brasil possui potencial para se tornar um dos líderes mundiais na produção de hidrogênio renovável devido ao seu alto potencial de geração de energia renovável, um sistema elétrico integrado e de baixo carbono e uma posição geográfica vantajosa para comercializar H₂ para a Europa e a costa leste norte-americana, além de sua relevante indústria doméstica. Além disso, o Brasil está entre os países mais competitivos para produção de hidrogênio verde no mundo: o custo nivelado do hidrogênio (LCOH) verde brasileiro ficaria ao redor de ~ 1,50 USD/kg de H₂ em 2030 e ~1,25 USD/kg de H₂ em 2040. Para viabilizar esse cenário, o hidrogênio verde precisará de USD 200 bilhões em investimentos, incluindo 180 GW de capacidade de geração de eletricidade renovável adicional — o que é mais do que a capacidade de geração instalada no país atualmente (Mckinsey & Company, 2021). Neste contexto, abre-se um mercado promissor para o aproveitamento do biogás para a produção de hidrogênio renovável.

Segundo nota técnica do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2022) do Ministério da Economia, o Brasil tem sua produção de hidrogênio focada principalmente na indústria de refino do petróleo, além da indústria de fertilizantes a base de amônia. Nesse sentido, as estratégias governamentais apontam para um processo de transição, inicialmente buscando captar, utilizar e armazenar o carbono emitido durante a produção do hidrogênio de origem fóssil e na sequência, investir em rotas e propostas que visem a produção de hidrogênio renovável.

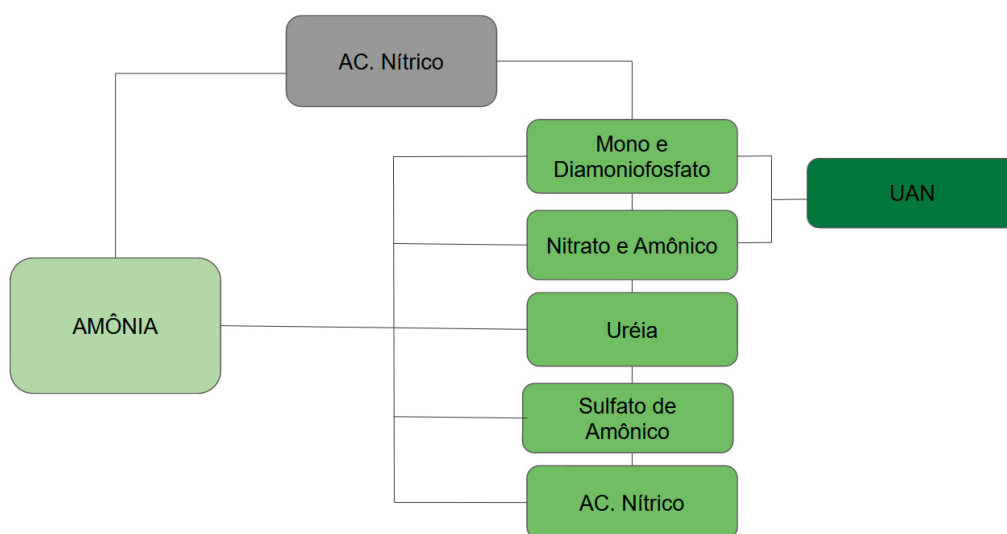
Segundo dados da IEA (2021), Brasil, México, Argentina, Colômbia e Chile responderam por quase 90% de todo o hidrogênio consumido na América Latina no ano de 2019. Considerando o avanço dos setores de energias renováveis, como energia eólica, energia solar e energia da biomassa (biogás), nota-se grande potencial nacional na produção de hidrogênio renovável, principalmente quando considera sua aplicação a produção de amônia voltada a obtenção de fertilizantes. A produção de hidrogênio de baixo carbono e produzido de forma descentralizada pode contribuir significativamente na redução da dependência da importação de fertilizantes que tanto impacta a balança de produtos químicos e de grãos. O Governo Federal aponta diversos

projetos e investimentos no setor de hidrogênio no Brasil que, considerando apenas as iniciativas já anunciadas, somam mais de 27 bilhões de dólares (IPEA, 2022).

2.6 MERCADO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS NO BRASIL E NO ESTADO DO PARANÁ

Todos os fertilizantes nitrogenados decorrem da amônia (Figura 8), que é a matéria-prima utilizada para se produzir nitratos para adubos ou ainda ser utilizada diretamente como fertilizante. A amônia é combinada com outros compostos para formar diferentes fertilizantes nitrogenados conforme apresentado na Figura 8.

FIGURA 8 - PRINCIPAIS FERTILIZANTES NITROGENADOS PRODUZIDOS A PARTIR DA AMÔNIA



*UAN = Solução de Uréia e Nitrato de Amônio

FONTE: Franco e Saraiva Neto (2007). Adaptado pelo Autor (2023).

Mundialmente, mais de 70% de toda a amônia produzida é destinada a produção de fertilizantes. Sua produção demanda aproximadamente 2% (8,6 EJ) de toda a energia consumida no mundo, principalmente na etapa destinada para a obtenção do hidrogênio, empregado como insumo de seu processo produtivo (IFA, 2023). Para produção de amônia, há uma alta demanda de energia na desidrogenação (cerca de 13% da energia carregada pelo H₂) e

purificação (CNI, 2022). A purificação do hidrogênio, pode ser conduzido de diversas formas: remoção do CO₂ via absorção química e metanização, adsorção por oscilação de pressão (PSA) e separação por membranas. O processo de absorção química normalmente é realizado utilizando aminas, porém, plantas mais modernas utilizam sistemas de adsorção por variação de pressão (PSA) (SCHULTZ & SOARES., 2014) e então ser utilizado para produção de amônia.

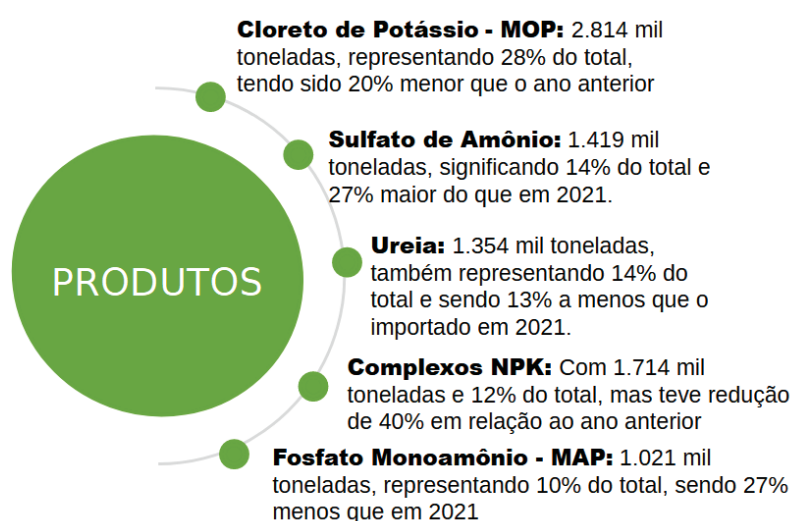
Segundo dados da *International Energy Agency* (IEA, 2021b), apenas no ano de 2019 foram produzidas aproximadamente 183 Mt de amônia em todo o mundo. Da produção global, China, Rússia e Estados Unidos são responsáveis por 29%, 10% e 9%, respectivamente (SAE, 2021). Quando se trata dos maiores consumidores de fertilizantes nitrogenados, tem-se o Brasil ocupando a quarta colocação, atrás de China, Índia e Estados Unidos (SAE, 2021). O país encontra-se na mesma colocação tratando-se apenas do consumo de ureia, com mais de dois milhões de toneladas por ano. Para Nitrato de Amônio e Sulfato de Amônio o Brasil apresenta-se como maior consumidor com mais de 400 mil de toneladas e mais de 500 mil toneladas por ano, respectivamente (IFA, 2022; FERNANDES, 2022).

O Paraná, conforme já mencionado, tem elevado destaque do setor do agronegócio brasileiro, sendo um dos principais componentes de sua matriz econômica, que também é um dos mais diversificados do País. Entretanto, seu solo apresenta elevada acidez e baixos teores de nutrientes, fazendo com que as práticas de correção da acidez e a adubação sejam essenciais para garantir maiores incrementos na produtividade (IDR, 2022).

Nesse contexto, em 2021 o Estado importou US\$ 908,48 milhões em fertilizantes, vindos da China e principalmente da Rússia que já chegou a representar a 36% e 40% do total dos fertilizantes importados nos anos de 2003 e 2009 e atualmente encontra-se com decréscimo, chegando a uma taxa de participação de 20% em 2021, devido a importações advindas do Canadá (17%), China (17%) e Belarus (15%). Ainda no ano de 2021, a importação de fertilizantes atingiu um volume máximo quando comparado com o ano de 2017, atingindo um crescimento de 45%. Em 2017 foram importados 9,23 milhões de toneladas e em 2021 houve um crescimento de 19% nas importações, representando 10,98 milhões de toneladas, sendo Porto de Paranaguá a

principal porta de entrada (DERAL, 2022a). Tanto o porto de Paranaguá, Terminal da FOSPAR e Porto da Ponta do Félix em Antonina, juntos alcançaram em 2022 a marca de 9.911.462 toneladas de fertilizantes importados, ainda não estão computadas as importações de fertilizantes em contêineres. A seguir (Figura 9) são apresentados os cinco principais produtos importados, representando 78% do total (SINDIADUBOS, 2022).

FIGURA 9 - PRINCIPAIS PRODUTOS IMPORTADOS PELOS PORTOS DO PARANÁ EM 2022



FONTE: Sindiadubos (2022). Elaborado pelo Autor (2023).

Ainda segundo o Departamento de Economia Rural (DERAL) o preço dos fertilizantes tem grande impacto nos custos de produção e relata que no ano de 2021, grande parte dos preços por tonelada dos fertilizantes químicos tiveram um aumento médio de 125% em relação a 2020 e 168% a 2019. Por exemplo, o custo com fertilizantes ocupou a primeira posição do custo total das culturas de milho 1ª safra, trigo, feijão 1ª e 2ª safra e soja, com 31%, 24%, 23%, 21% e 16%, respectivamente. Os custos na produção de milho na 1ª safra em 2021 cresceram, em fevereiro de 2021, os fertilizantes que custavam R\$ 13,51, passaram a custar R\$ 22,50 em novembro, representando uma elevação de 39,97%, influenciados principalmente pela alta demanda, escassez dos produtos e a pandemia da covid-19. O mesmo acontece na produção de soja, onde pode-se observar o impacto dos preços devido a variação dos insumos

como os fertilizantes, que a partir do 2º trimestre de 2021, chegou a registrar um aumento de 61,5% para os fertilizantes e de 43,3% para os agrotóxicos, quando comparados ao 4ª trimestre de 2020 (DERAL, 2022b).

No setor de mandioca, entre os custos do sistema produtivo, os fertilizantes apresentaram o maior aumento entre os anos de 2015 a 2021, cujo o preço que era de R\$ 25,41 no primeiro trimestre de 2021, passou a ser de R\$ 47,44 em novembro do mesmo ano, representando um aumento de 86,73% e um dos fatores e a dependência de importação dos biofertilizante, com a alta do dólar durante a pandemia (DERAL, 2022).

Cabe destacar que os preços dos fertilizantes são definidos no mercado internacional, influenciados pela oferta e demanda global, com parte deles relacionada aos custos logísticos, desde o embarque no porto de origem. O frete rodoviário é uma variável que determina o preço final do fertilizante importado para o comprador (MARCONATO, 2012). Outros custos, como a sobre-estadia (demurrage) na importação de fertilizantes, também impactam significativamente. Em 2022, esses gastos somaram US\$ 227 milhões, um aumento de 206% em relação a 2021. Esse crescimento exponencial foi causado pelo grande volume de importações, que resultou em gargalos logísticos na infraestrutura de descarga e armazenagem, prolongando o tempo de permanência dos navios nos portos do Paraná (SINDIADUBOS, 2022).

Não se tratando do valor do transporte de fertilizante, mas como referência são apresentados os valores de transporte do milho na rota Toledo - Paraná que teve incremento de 17% nos fretes e já as operações envolvendo soja com destino a Paranaguá apresentaram redução de 31%, partindo de Cascavel e Ponta Grossa, devido à estiagem e à conseqüente queda na produção (CONAB, 2022).

FIGURA 10 - PREÇOS DE FRETE PRATICADOS NO PARANÁ

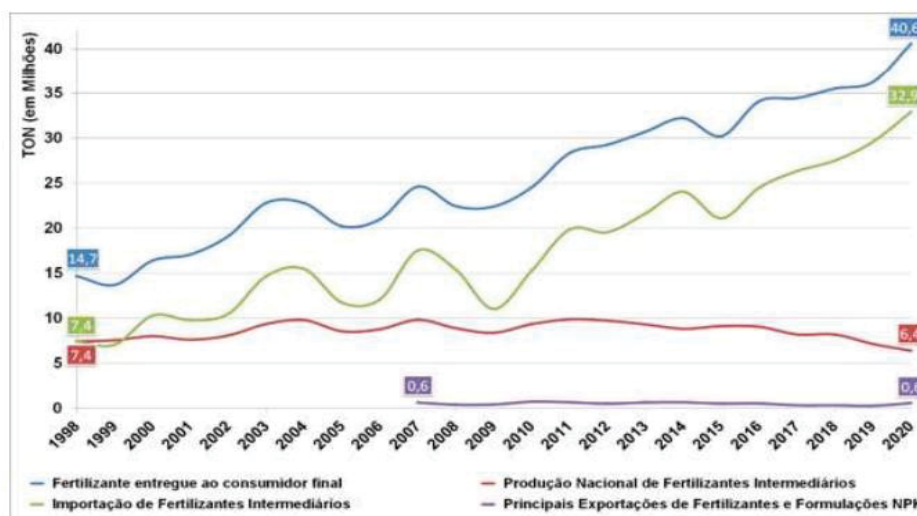
ROTAS		R\$ / t			VARIAÇÃO PERCENTUAL (%)
ORIGEM-UF	DESTINO-UF	KM	dez/21	jan/22	MÊS
TOLEDO (PR)	PASSO FUNDO (RS)	560	150,00	175,00	17%
	PARANAGUÁ (PR)	640	90,00	90,00	0%
CAMPO MOURÃO (PR)	PARANAGUÁ (PR)	554	SI	85,00	-
CASCADEL (PR)		602	80,00	55,00	-31%
PONTA GROSSA (PR)		214	85,00	65,00	-31%

FONTE: Conab (2022).

Sobre a produção nacional, o Brasil conta com quatro unidades de produção de fertilizantes nitrogenados com uso predominante de gás natural como matéria-prima para produção de amônia e/ou ureia e outros três projetos de FAFENs anunciados ou tiveram sua construção iniciada em anos anteriores, entretanto não se encontram concluídos ou em construção. As unidades são a Unigel Agro BA (antiga FAFEN-BA), com contrato atual de arrendamento para a Proquigel, apresentando produção de amônia e ureia; Unigel Agro SE (antiga FAFEN-SE), atualmente arrendada para a Proquigel com produção principalmente de amônia, ureia e sulfato de amônio; Yara Brasil (em Piaçaguera – São Paulo), em operação com produção de amônia e nitrato de amônio; e Araucária Nitrogenados S.A. (antiga FAFEN-PR) com capacidade nominal de produção de 437,4 mil ton/ano de amônia e, atualmente hibernada, administrada por subsidiária da Petrobras e encontra-se em processo de arrendamento (já passou por negociações junto ao Acron Group) - produzia amônia e ureia a partir de resíduo asfáltico (ARAUCÁRIA NITROGENADOS S. A., 2020; SAE, 2021).

De modo geral, o mercado nacional importou 32,87 milhões de toneladas de fertilizantes no ano de 2020, sendo esse volume 11% superior em relação ao ano anterior. No mesmo intervalo, a produção nacional teve redução de produção de fertilizantes em mais de 13%, atingindo em 2020, 6,4 milhões de toneladas conforme Figura 11 (ANDA, 2021). Especificadamente com relação aos fertilizantes nitrogenados, foram consumidos no ano de 2021 mais de 13 milhões de toneladas, sendo que mais de três quartos desse montante foram advindos de fora do país (ANDA, 2022; SAE, 2020).

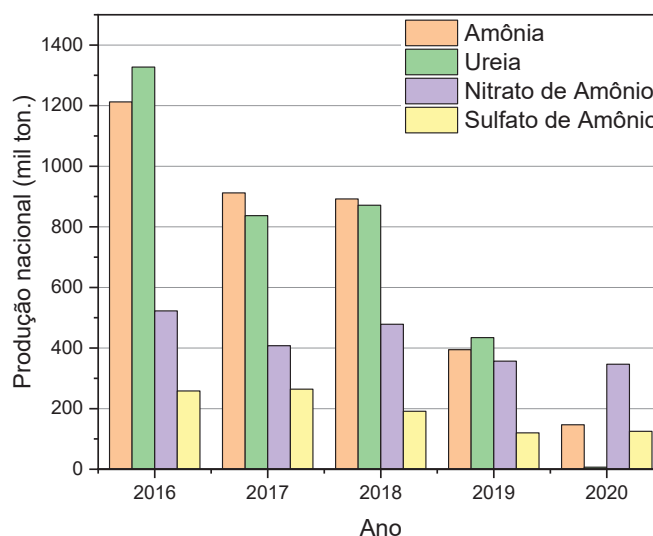
FIGURA 11 - MERCADO DE FERTILIZANTES NO BRASIL



FONTE: Anda (2021). Elaboração: DPE/SAE-PR.

Sobre a redução acentuada na produção nacional de fertilizantes nitrogenados, visualiza-se a partir da Figura 12 as principais formas de fertilizantes nitrogenados produzidos no Brasil entre os anos de 2016 a 2020 (MME, 2021). Durante esse período, houve uma queda significativa na produção de todos os principais fertilizantes nitrogenados comercializados. A amônia destacou-se com uma redução superior a 87%, e a ureia teve sua produção praticamente extinta.

FIGURA 12 - PRODUÇÃO NACIONAL DOS PRINCIPAIS FERTILIZANTES NITROGENADOS



FONTE: MME (2021).

fertilizantes e gás natural. Entre março de 2021 e março de 2022, o preço da ureia na Ucrânia aumentou 110%. Na Rússia, o preço do nitrato de amônio dobrou no mesmo período. O país, segundo maior produtor mundial de fertilizantes nitrogenados, atrás apenas da China, é responsável por 98% do nitrato de amônio importado pelo Brasil.

Tal cenário expõe a fragilidade brasileira quanto a dependência externa de fertilizantes, promovendo, em contrapartida, o incentivo por iniciativas nacionais voltadas a produção de fertilizantes. Nesse contexto, a companhia petroquímica Unigel, principal produtora de fertilizantes do Brasil, anunciou recentemente investimentos para o primeiro projeto de produção eletrolítica de hidrogênio e amônia, em grande escala no país. A unidade localizada no complexo industrial do Camaçari (província baiana) pretende receber inicialmente US\$ 120 milhões de dólares em investimentos. A perspectiva é que a planta poderá produzir até 60 mil toneladas de amônia por ano até 2023, com possibilidade de expansão de produção em até quatro vezes em uma segunda fase, prevista para o ano de 2025 (AMMONIA ENERGY ASSOCIATION, 2022).

O Brasil ganhou destaque com um ambiente favorável ao desenvolvimento de novos negócios no âmbito internacional no que se refere a produção de hidrogênio verde devido a sua matriz energética limpa e potencialidade de expansão. O foco está na exportação do hidrogênio, seja diretamente ou ainda na forma de amônia e metanol, principais aplicações do hidrogênio na atualidade (EPE, 2021; IPEA, 2022).

Pode-se observar o desenvolvimento de várias iniciativas para viabilizar o “hidrogênio verde” e acelerar o processo de transição energética de baixo carbono, entre eles, o mercado de fertilizantes. Entretanto cabe destacar que ainda são limitadas as aplicações energéticas do hidrogênio e que desafios tecnológicos para geração de hidrogênio de baixo carbono, custos de produção e dos equipamentos para seu uso energético (incluindo aspectos relacionados à segurança), a dificuldade de armazenamento e transporte, necessidade de desenvolvimento de arcabouços institucionais, legais e regulatórios (desenho de mercado, normatização etc.), entre outros ainda precisam ser desenvolvidos. Nesse contexto a União Europeia, por exemplo, já anunciou políticas para financiar plantas de hidrogênio em outros países e investimentos

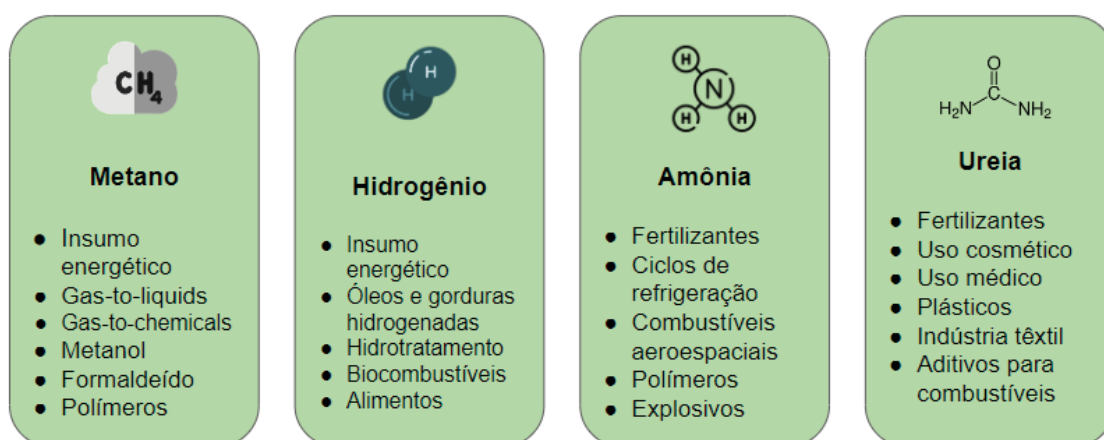
em pesquisa, desenvolvimento e inovação também serão essenciais para consolidação desse mercado (EPE, 2021).

O Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (2022) relata que os custos de produção podem ser rapidamente reduzidos com a ampliação da estrutura regulatória de longo prazo e apoio público e que as projeções mostram que o custo da produção de hidrogênio renovável em 2030 pode ficar entre US\$ 2,3/kg e US\$ 1,4/kg. Atualmente os menores custos de produção de hidrogênio, são obtidos a partir de fontes não renováveis via reforma a vapor do metano (gás natural) e na gaseificação do carvão (EPE, 2021).

Além de benefícios ambientais, a geração nacional de hidrogênio de baixo carbono fortalece o mercado nacional, já que é produzido e processado localmente, contribuindo para a redução da dependência de importação de fertilizantes e no déficit da balança comercial de produtos químicos contribuir para a redução da dependência de importação de fertilizantes, além de não sofrer com oscilações cambiais e variações severas de preços (IPEA 2022).

Por fim, cabe destacar que toda cadeia de produção de fertilizantes nitrogenados conta com interfases e integração com outras cadeias produtivas que utilizam os mesmos insumos e intermediários, como por exemplo, a produção de ureia que há pontos de contato com a cadeia do gás natural, do hidrogênio e da amônia (SAE, 2021).

FIGURA 14 - CADEIA PRODUTIVA DA UREIA E POSSÍVEL INTEGRAÇÃO SETORIAL



FONTE: Empresa de Pesquisa Energética (2019) apud SAE (2021).

Elaborado pelo Autor (2023).

Em 2023, a produção nacional de gás natural atingiu um recorde histórico de 150 milhões de metros cúbicos por dia, um aumento de 8,7% em relação ao ano anterior (MME, 2024; ANP, 2023). No entanto, desde 2019, o mercado global tem enfrentado uma sobreoferta, que se intensificou em 2020. Esse excesso de oferta levou a preços baixos na Europa e na Ásia, devido aos altos níveis de estocagem, um inverno mais ameno e restrições relacionadas à Covid-19, que reduziram a atividade econômica e o deslocamento, ampliando a oferta internacional (EPE, 2020).

Na conjuntura internacional, ao longo do segundo semestre de 2021 e primeiro semestre de 2022 a Europa se deparou com acentuado aumento do valor da energia, em especial o gás natural, que corresponde a 26% da matriz alemã, empregado majoritariamente no setor industrial e 95% do consumo é atendido por importações, sendo a Rússia o principal fornecedor em 2021. (EPE, 2022). O cenário de recordes de preços internacionais de gás natural devido aos desdobramentos do conflito Rússia-Ucrânia, bem como a competição entre europeus e asiáticos por GNL pôde ser observada em 2022 (EPE, 2023).

Já em 2023, o mercado internacional de gás natural se reequilibrou diante da crise global de energia desencadeada devido a interrupção dos gasodutos que forneciam gás da Rússia para Europa, visto que a União Europeia manteve seus estoques acima da média por meio da queda expressiva no consumo industrial, incentivos políticos, importações de GNL e um inverno mais ameno, o que permitiu que iniciassem a primavera de 2023 com 55% da capacidade dos seus reservatórios cheios, ou seja, 63% acima da média 2018-2022 e mais que o dobro da situação no mesmo período em 2022. Com isso, o alívio nas pressões pelo lado da demanda internacional reduziu os preços do gás natural no mundo (EPE, 2023).

Em decorrência a guerra entre Ucrânia e Rússia, tensões geopolíticas, redirecionamento de fluxos mundiais de óleo e gás, bem como o reestabelecimento de atividades pós-Covid, observa-se a volatilidade nos preços e uma grande preocupação com a segurança do abastecimento que culmina em uma busca acelerada para um movimento de transição energética (EPE, 2022; EPE 2023).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O capítulo descreve a classificação da pesquisa e apresenta a metodologia adotada, explicando como os dados foram acessados e apresentados. O principal resultado deste estudo é um painel dinâmico, cujos resultados são exibidos na ferramenta de Business Intelligence, Microsoft Power BI. Nesse contexto, as atividades descritas a seguir foram realizadas para acessar e organizar os dados em visuais dinâmicos.

Segundo Santos (2019) o Power BI, ferramenta de Business Intelligence, desenvolvida pela Microsoft e lançado em 2015, é um software da categoria BI e está entre um dos líderes de mercado. Ele permite o tratamento e análise de um alto volume de dados de forma a apresentá-los de forma objetiva e personalizada em dashboards ou relatórios para suportar processos de tomada de decisão mais assertiva, transformando dados brutos em visuais dinâmicos, além de trazer uma nova visão quanto ao tratamento e modelagem dos mesmos. Ainda de acordo com o site oficial da Microsoft (2023), “o Power BI é uma coleção de serviços de software, aplicativos e conectores que trabalham juntos para transformar suas fontes de dados não relacionadas em informações coerentes, visualmente envolventes e interativas. Os dados podem estar em uma planilha do Excel ou em uma coleção de data warehouses híbridos locais ou baseados na nuvem”.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

De acordo com Marconi e Lakatos (2003) a pesquisa parte de uma dúvida ou problema seja ele teórico ou prático em que se pretende resolver ou buscar uma resposta. Ainda segundo Gil (2022) este problema compreende um enunciado explicitado de forma clara, compreensível e operacional quanto a questão que se pretende solucionar, bem como permite descobrir novos dados e conhecimentos, utilizando métodos, técnicas e outros procedimentos científicos.

O desenvolvimento do projeto de pesquisa compreende em definir os objetivos considerando o problema a ser investigado, a justificativa, modalidade

de pesquisa, método de coleta e análise dos dados, cronograma e definição dos recursos a serem empregados (GIL, 2010).

O estudo foi desenvolvido por meio da abordagem de pesquisa aplicada, que conforme descrito no Manual de Frascati da OECD (2002), refere-se à investigação realizada com o propósito de adquirir novos conhecimentos, mas que é principalmente orientada para atingir um objetivo prático. Trata-se de um tipo de pesquisa que busca desenvolver soluções concretas para problemas específicos, utilizando-se de novos conhecimentos adquiridos durante o processo investigativo para gerar impactos diretos em contextos reais.

3.1.1 Fundamentação Teórica

A pesquisa partiu do levantamento de dados de material bibliográfico, que incluiu o estudo referencial e levantamento informações em artigos científicos, relatórios, notas técnicas e outras publicações.

A pesquisa bibliográfica refere-se a um conjunto de informações sobre trabalhos e levantamento de dados já realizados. Marconi e Laktos (2003) explicam que a obtenção de dados pode ser realizada a partir da pesquisa documental, pesquisa bibliográfica e contatos diretos.

No âmbito do trabalho, a fundamentação teórica foi centrada em documentos e trabalhos referentes aos seguintes temas:

- i. mercado do agronegócio no Brasil e Paraná;
- ii. potencial e mercado do biogás no Brasil e Paraná;
- iii. economia de baixo carbono e transição energética;
- iv. processo de produção de amônia;
- v. produção de amônia a partir do biogás;
- vi. mercado de fertilizantes nitrogenados no Brasil e no Estado do Paraná.

3.1.2 Identificar a capacidade real e o potencial total de produção de biogás no Paraná em 2023, com base em dados de plantas existentes e substratos do agronegócio não aproveitados.

Nesta etapa, foram utilizados dados disponíveis no Panorama do Biogás no Brasil referente ao ano de 2023, publicado em 2024 pelo CIBiogás, e atualizações já realizadas em 2024. Além disso, foi consultado o Biogasmapp, um painel dinâmico de plantas de biogás e biometano brasileiras elaborado pelo CIBiogás, Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (Unido), diversos consultores, pesquisadores e produtores da cadeia do biogás. A base de dados foi construída considerando substratos das atividades do agronegócio, abrangendo indústria alimentícia e agropecuária (suinocultura, bovinocultura e avicultura). O objetivo foi atingir os seguintes pontos:

- i. número de plantas de biogás no estado do Paraná, suas atuais capacidades produtivas (Nm^3/dia), aplicação energética do biogás e distribuição no território por mesorregião, considerando os substratos do agronegócio;
- ii. potencial teórico total de biogás do estado, considerando os substratos do agronegócio.

Coube ao estudo também identificar dois cenários a partir dos dados acessados, sendo:

- i. a produção atual de biogás proveniente do agronegócio por mesorregião (indústria alimentícia e agropecuária - suinocultura, bovinocultura e avicultura);
- ii. estimativa do potencial total de produção de biogás que o estado do Paraná poderia ter ao aproveitar todo substrato residual proveniente do agronegócio por mesorregião no estado do Paraná.

Nessa fase da pesquisa as informações ainda não receberam tratamento analítico e os dados foram organizados de forma de estabelecer as relações entre os resultados obtidos com outros já conhecidos de modo a facilitar a busca pelas respostas do problema (GIL, 2002).

Após o acesso aos dados foi possível identificar o atual perfil predominante dos empreendimentos no setor do biogás, oferecendo informações para aplicação nas etapas seguintes.

3.1.3 Estimativa do potencial de produção de amônia renovável a partir da reforma do biogás

3.1.3.1 Estimativa estequiométrica do potencial de produção de gás de síntese e hidrogênio

Nessa etapa foi estimado o potencial de produção de gás de síntese por mesorregião a partir do biogás proveniente do agronegócio no estado do Paraná considerando os 02 (dois) cenários supracitados. A rota tecnológica para o cálculo de conversão do biogás em gás de síntese foi a reforma a seco.

Para o estudo em questão, foi considerado que o biogás a ser convertido em gás de síntese tinha concentração menor que 10 ppm de H₂S (sulfeto de hidrogênio), visto que o produto subsequente do gás de síntese demandará baixos teores do contaminante.

Para a conversão do biogás em gás de síntese por meio da reação de reforma a seco, assumiu-se que o biogás está purificado e apresenta uma composição média de 50-60% em vol. de CH₄ e 30-40% em vol. de CO₂. Na reação de reforma a seco, o metano e o dióxido de carbono reagem para formar CO e H₂. Com base nesta reação, a razão molar entre H₂ e CO de carbono no gás de síntese resultante será de 1:1. Isso significa que, no processo de conversão, as proporções de hidrogênio e monóxido de carbono no gás de síntese serão, respectivamente, 50% do volume total do gás produzido. Essa proporção é essencial para determinar a composição final do gás de síntese e para as etapas subsequentes do processo.

Para a obtenção da fração de hidrogênio, considerou-se uma eficiência média do sistema de purificação do hidrogênio de 90%, um valor que reflete a média dos equipamentos comerciais e adota uma abordagem conservadora. O cálculo foi assumindo uma operação contínua de 24 horas. Para converter o volume de hidrogênio de normais metros cúbicos (Nm³) para quilogramas (kg), utilizou-se a densidade de 0,09 kg/Nm³.

Ou seja, na primeira etapa, o biogás é convertido em gás de síntese (CO e H₂) via reforma a seco com um rendimento médio de 90% (Bian et al., 2016 e Yentekakis et al., 2019), conforme descrito na equação 4 apresentada no referencial teórico.



onde:

CH₄ é a quantidade de metano presente no biogás;

CO₂ é a quantidade de dióxido de carbono presente no biogás;

2 CO é a quantidade de monóxido de carbono presente no gás de síntese resultante da reforma a seco do biogás;

2 H₂ é a quantidade de hidrogênio presente no gás de síntese resultante da reforma a seco do biogás

$\Delta H_{298\text{K}} = + 247 \text{ kJ mol}^{-1}$ é a variação de entalpia da reação exotérmica, ou seja, é uma reação que libera energia.

Para a etapa subsequente, foi considerado o processo de *water gas shift* (WGS), onde o monóxido de carbono (CO) excedente do processo de obtenção do gás de síntese reage com vapor de água, convertendo o CO em CO₂ e H₂, conforme ilustrado na equação 3, também discutida no referencial teórico. Esta reação desempenha um papel crucial no processo, pois possibilita a produção adicional de H₂ por meio da conversão do CO residual. Para os cálculos, foi considerada uma eficiência de 50%, conforme indicado por Oliveira (2021).



onde:

CO é a quantidade de monóxido de carbono excedente do processo de obtenção do gás de síntese;

H₂O refere-se ao vapor de água para o processo de *water gas shift*;

CO₂ é a quantidade de dióxido de carbono produzido após o processo de *water gas shift*;

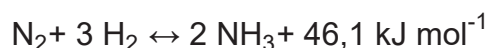
H₂ é a quantidade de hidrogênio produzido após o processo de *water gas shift*.

$\Delta H_{298\text{K}} = - 41.17 \text{ kJ/mol}$ é a variação de entalpia da reação endotérmica, ou seja, é uma reação que absorve energia.

3.1.3.2 Estimativa do potencial de produção de amônia

A partir dos dados obtidos de potencial de produção de hidrogênio renovável considerando também o processo de *water gas shift*, calculou-se o potencial de produção de amônia. A conversão de Nm³ de amônia para Kg, foi considerada a densidade de 0,73 e uma eficiência de 25% (AZIZ et al., 2020; BERWAL et al., 2021; TAVARES et al., 2023; CARVALHO; 2016).

A última fase do processo, que consiste na purificação do hidrogênio foi considerado o emprego de operações unitárias para obtenção do hidrogênio e nitrogênio isolados, aplicando-se a equação 1.



Onde:

N₂ refere-se ou nitrogênio, indica que cada molécula de gás nitrogênio é composta por dois átomos de nitrogênio;

3 H₂ indica que três moléculas de hidrogênio estão envolvidas na reação;

2 NH₃ é a quantidade de amônia após o processo de conversão;

46,1 kJ mol⁻¹ refere-se à quantidade de energia (em quilojoules por mol) liberada (exotérmica) durante a reação.

Além disso, esta fase incluiu a integração das informações sobre a produção de biogás e a conversão desse biocombustível para a produção de amônia.

3.1.3.3 Painel dinâmico com os resultados

Após o acesso aos dados, esses foram organizados com auxílio da planilha Microsoft® Excel e para apresentação dos resultados propôs-se a aplicação de uma ferramenta de BI, o Microsoft Power BI, na modalidade de licença gratuita a partir do Power BI Desktop para computadores com Windows. Esta ferramenta foi utilizada para preparação, modelagem e visualização dos dados, cujo os dados em formato .xlsx foram importados para o Power Bi, referenciando um arquivo armazenado em um Excel.

O painel dinâmico conta com os resultados a seguir apresentado por mesorregião considerando as plantas de biogás implementadas:

- i. capacidade atual de produção de biogás por mesorregião;
- ii. potencial de produção de gás de síntese renovável por mesorregião;
- iii. potencial de produção de hidrogênio renovável por mesorregião;
- iv. potencial de produção de amônia renovável por mesorregião.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

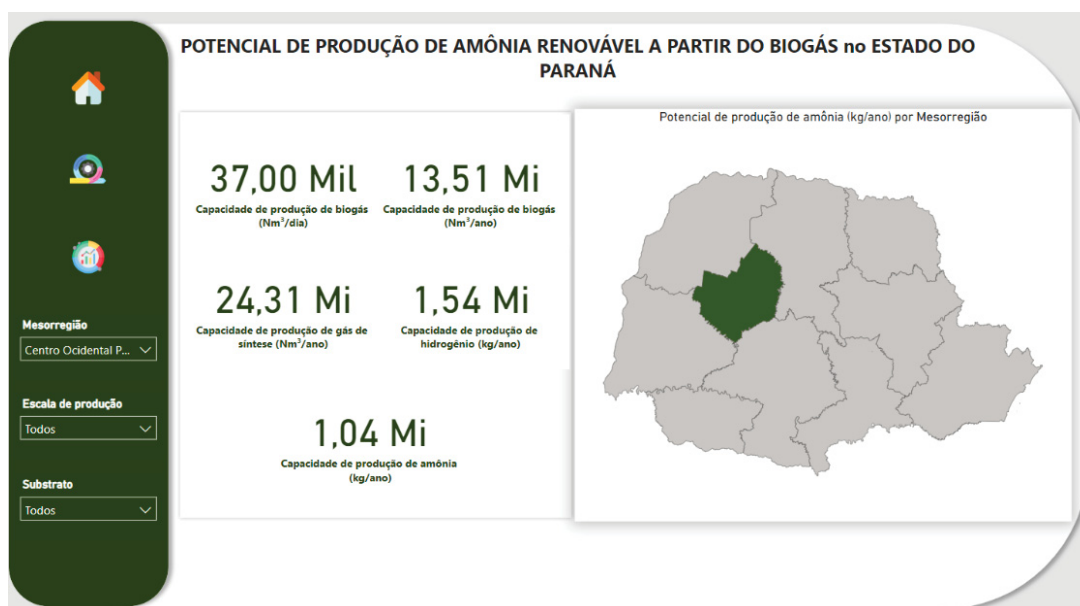
O Estado do Paraná se destaca no sentido de inserção de novas fontes renováveis, estimulando a implantação de novas unidades produtoras de biogás, aplicadas a geração de energia elétrica, térmica ou combustível veicular (biometano) e conta o maior número de plantas de biogás em operação no país, somando 198 unidades com 270,76 milhões de Nm³ de biogás aproveitados no ano.

Segundo o Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social (IPARDES), o Estado é composto por 10 mesorregiões, sendo elas: Norte Pioneiro, Metropolitana de Curitiba, Centro Ocidental, Noroeste, Norte Central, Sudoeste, Oeste, Norte Pioneiro, Sudeste e Centro Oriental.

No Centro Ocidental, 36 % das plantas de produção de biogás são de médio porte e 63% de pequeno porte e mais de 80% da aplicação do biogás é destinada para geração de eletricidade. Na região Noroeste, a maior parte das plantas também são de médio porte, o que representa 54% e dessas, o biogás majoritariamente é aplicado para energia térmica. Já nas mesorregiões Centro Oriental e Centro Sul, Metropolitana, Norte central, Norte Pioneiro, Oeste, Sudeste, Sudoeste a maior parte das plantas são de pequeno porte e utilizam o biogás para geração de energia elétrica.

Na mesorregião Centro Ocidental, as 11 plantas de biogás possuem uma capacidade total de produção de 13,5 milhões de Nm³ por ano, o que equivale a aproximadamente 37 mil Nm³ por dia. Esse volume representa um potencial de produção de gás de síntese de 24,3 milhões de Nm³ por ano, capaz de gerar 1,5 milhões de kg de hidrogênio ou 1,04 milhões de kg de amônia, ou seja, 1mil toneladas anuais, conforme apresentado na Figura 15.

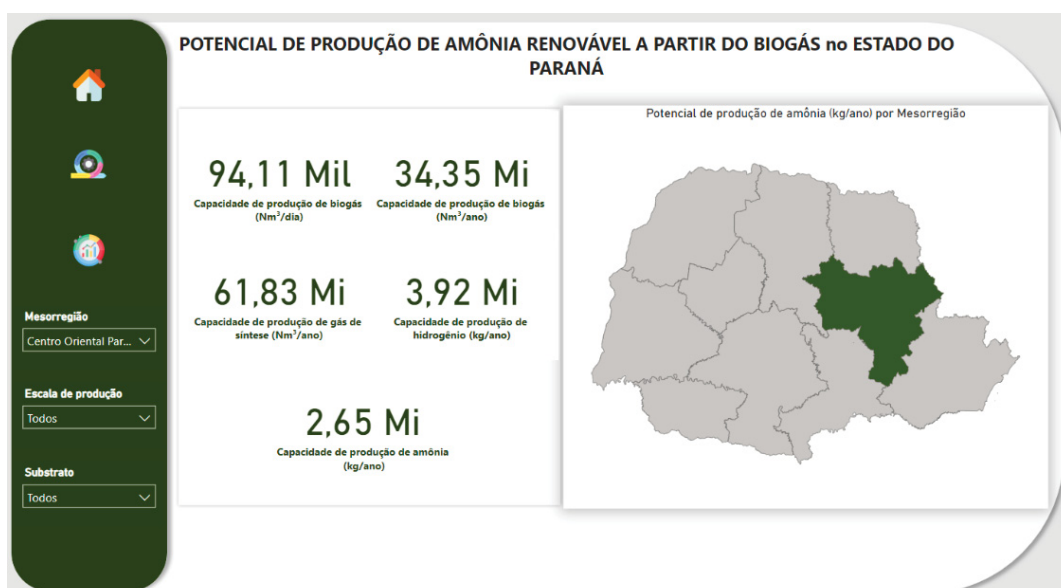
FIGURA 15 – POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA NA MESORREGIÃO CENTRO OCIDENTAL



FONTE: autor, 2024.

Já no Centro Oriental (Figura 16), com 40 plantas de biogás, a capacidade total de produção atinge 34,3 milhões de Nm³ por ano, ou cerca de 94 mil Nm³ por dia. Esse volume permite um potencial de produção de gás de síntese de 61,8 milhões de Nm³ por ano, resultando em 3,9 milhões de kg de hidrogênio e 2,6 milhões de kg de amônia, ou 2,6 mil toneladas anuais.

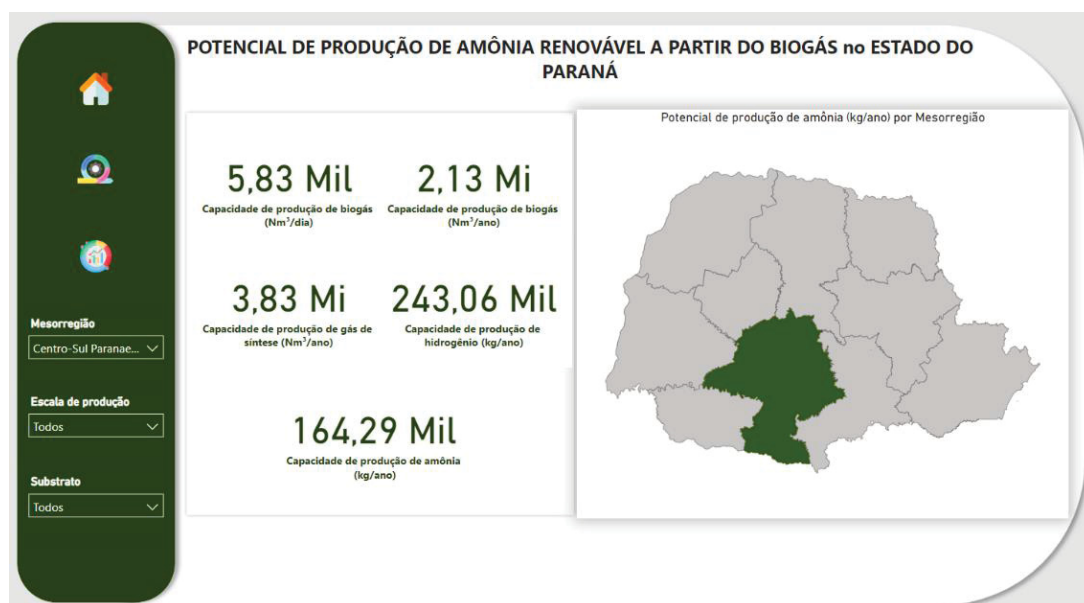
FIGURA 16 – POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA NA MESORREGIÃO CENTRO OCIDENTAL



FONTE: autor, 2024

Na mesorregião Centro Sul (Figura 17), as 08 plantas de biogás somam 2,1 milhões de Nm^3 por ano de capacidade de produção de biogás e aproximadamente 5,8 mil Nm^3 por dia, cujo potencial de produção de gás de síntese é de 3.8 milhões Nm^3/ano , o que representa um potencial de produção de hidrogênio na ordem de 243 mil kg ou e 164 mil de kg de amônia, ou 164 toneladas ano.

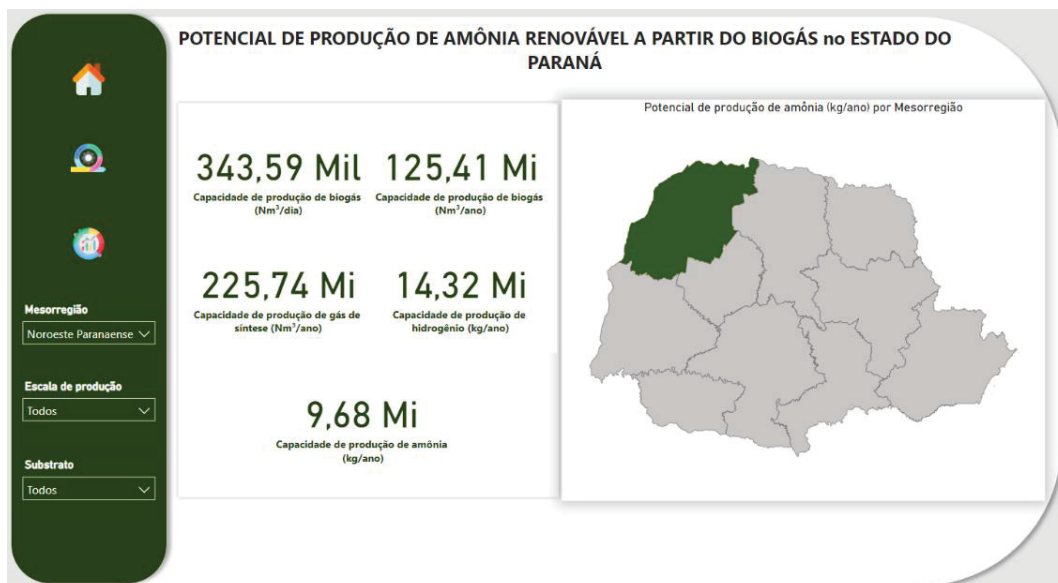
FIGURA 17 – POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA NA MESORREGIÃO CENTRO SUL



FONTE: autor, 2024.

No Noroeste (Figura 18), são 46 plantas de biogás que apresentam a capacidade de produção de biogás na ordem de 125,4 milhões de Nm^3 por ano ou 343 mil Nm^3 por dia. Esse biogás tem potencial para produzir cerca de 225.7 milhões de Nm^3 por ano de gás de síntese e gerar 14,3 milhões de kg de hidrogênio e 9,6 milhões de kg de amônia, ou 9,6 mil toneladas por ano.

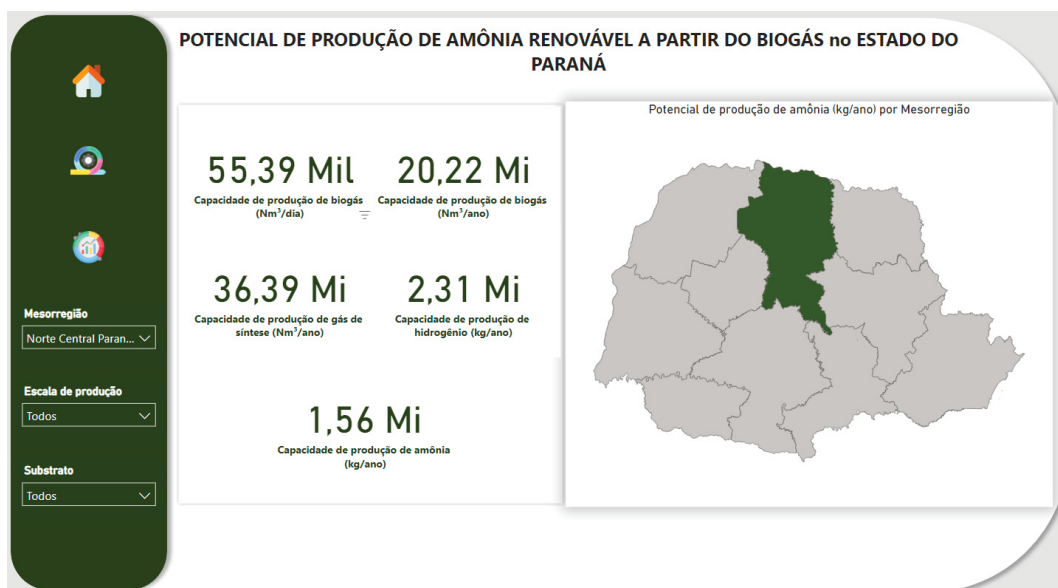
FIGURA 18 – POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA NA MESORREGIÃO NOROESTE



FONTE: autor, 2024.

Na mesorregião Norte Central (Figura 19), tem 18 plantas de biogás, as quais somam milhões de 20,2 milhões de Nm^3 por ano de capacidade de produção de biogás e 55 mil Nm^3 por dia, apresenta um potencial de produção de gás de síntese de 36,3 milhões Nm^3/ano , 2,3 milhões de kg de hidrogênio e 1,5 milhões de kg de amônia, ou 1,5 mil toneladas ano.

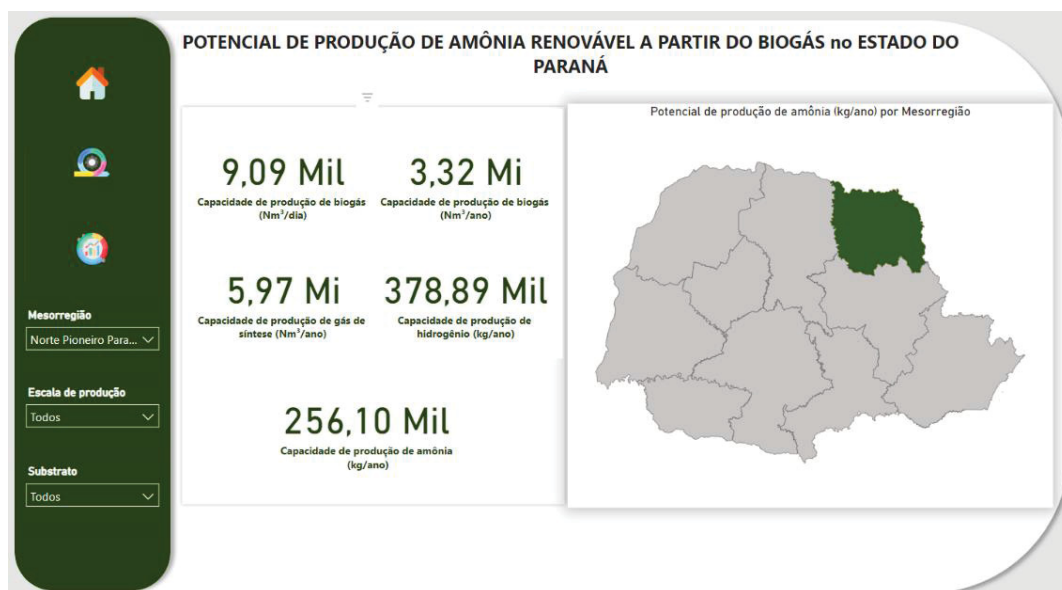
FIGURA 19 – POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA NA MESORREGIÃO NORTE CENTRAL



FONTE: autor, 2024.

Em Norte Pioneiro as 06 plantas de biogás produzem 3,3 milhões de Nm^3 por ano de capacidade de produção de biogás e 9 mil Nm^3 por dia, com um potencial de produção de gás de síntese de 5,9 milhões Nm^3/ano , 378 mil kg de hidrogênio e 256,1 mil de kg de amônia, ou 256 toneladas ano (Figura 20).

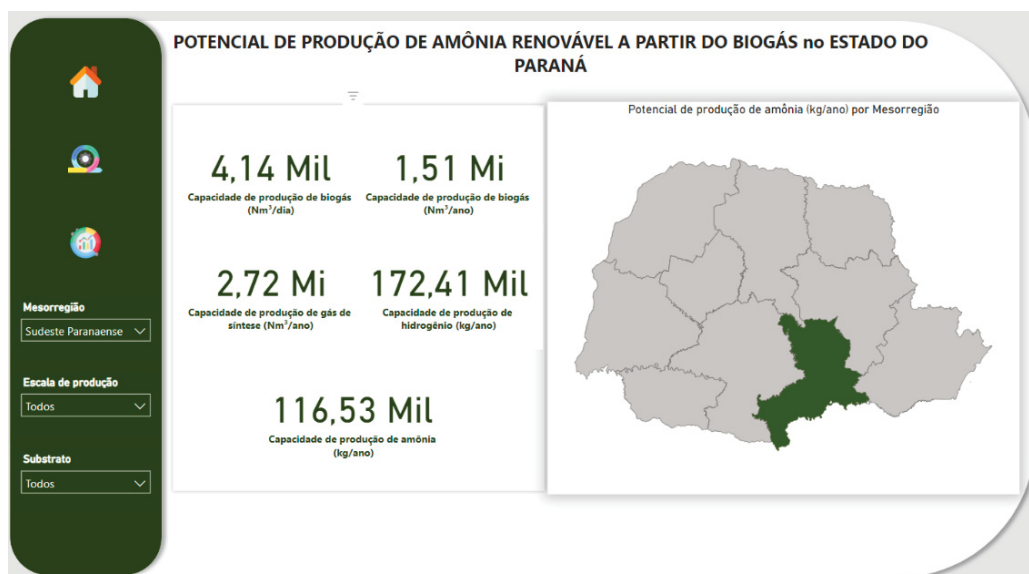
FIGURA 20 – POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA NA MESORREGIÃO NORTE PIONEIRO



FONTE: autor, 2024.

No Sudeste, também há 6 plantas de biogás que produzem 1,5 milhões de Nm^3 por ano, com uma capacidade diária de 4,1 mil Nm^3 . Esse biogás tem o potencial de gerar 2,7 milhões de Nm^3 de gás de síntese por ano. A partir disso, é possível produzir aproximadamente 172 mil kg de hidrogênio e 116,6 mil kg de amônia por ano, o que equivale a 116 toneladas anuais, conforme apresentado na Figura 21.

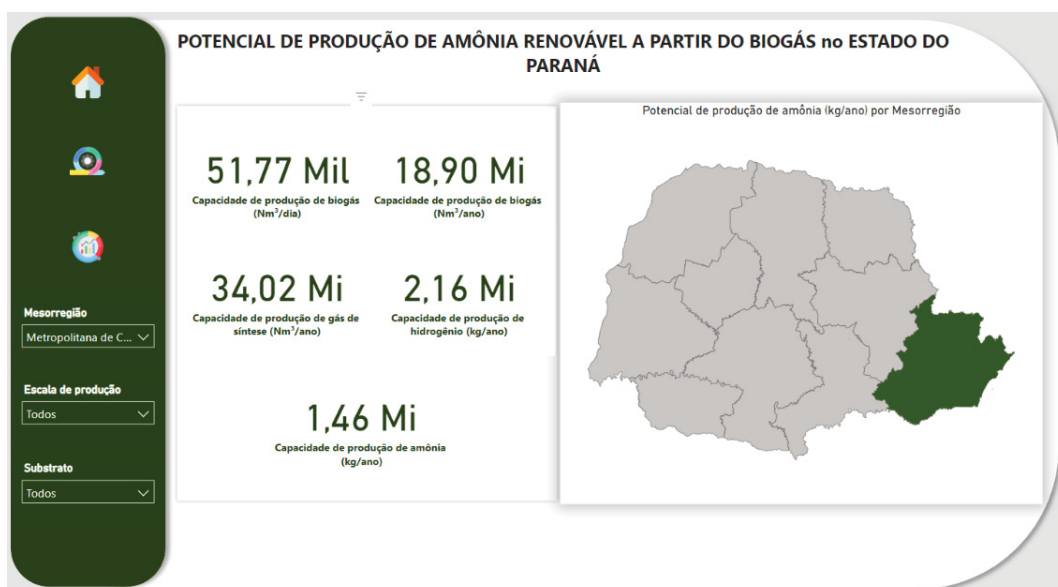
FIGURA 21 – POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA NA MESORREGIÃO SUDESTE



FONTE: autor, 2024.

Ainda com 6 plantas de biogás, a mesorregião Metropolitana de Curitiba possui uma capacidade de produção de 18,8 milhões de Nm^3/ano , ou 51,7 mil Nm^3/dia de biogás. Em termos de gás de síntese, isso representa um potencial de 34 milhões de Nm^3 por ano, o que possibilita a produção de 2,7 milhões de kg de hidrogênio e 1,4 milhões de kg de amônia, ou 1,4 mil toneladas por ano (Figura 22).

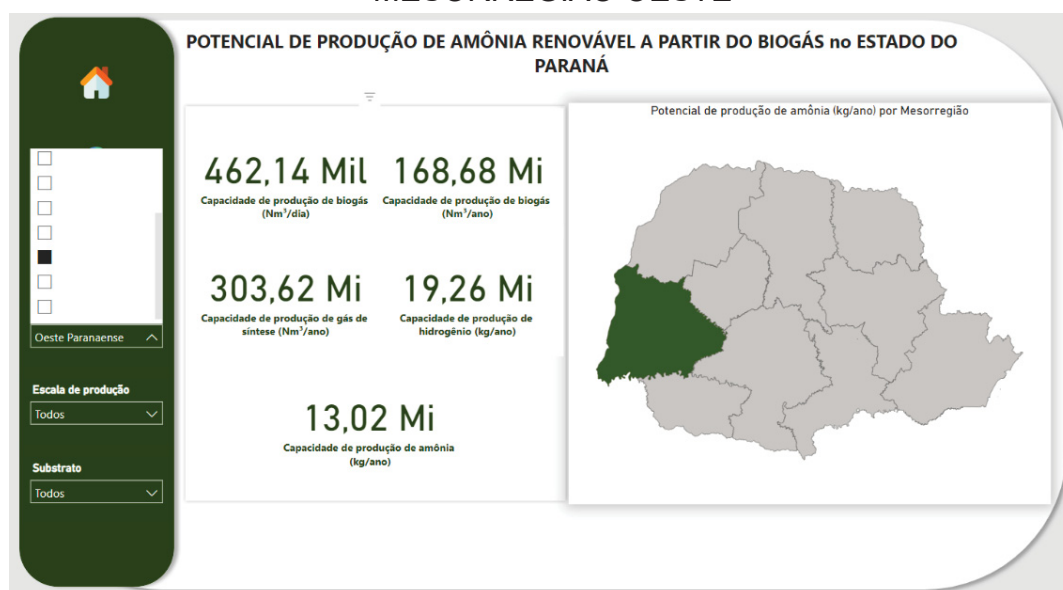
FIGURA 22 – POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA NA MESORREGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA



FONTE: autor, 2024.

No Oeste (Figura 23), existem 222 plantas de biogás com uma capacidade de produção de 168,6 milhões de Nm^3 por ano, ou 462,1 mil Nm^3 por dia. Quando convertido em gás de síntese, esse biogás tem o potencial de produzir 303,6 milhões de Nm^3 por ano, o que representa 19,2 milhões de kg de hidrogênio e 13 milhões de kg de amônia, equivalentes a 13 mil toneladas.

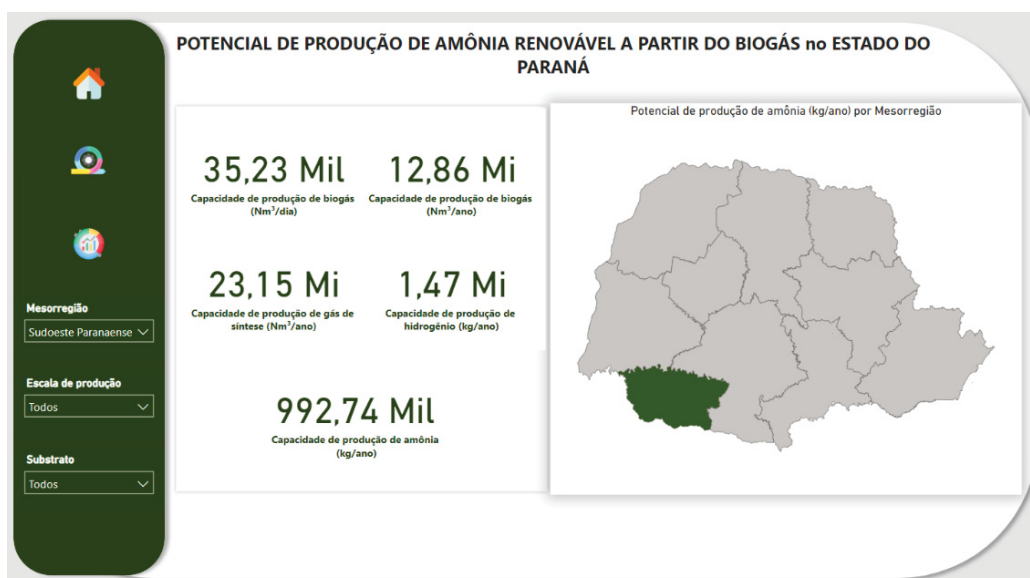
FIGURA 23 – POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA NA MESORREGIÃO OESTE



FONTE: autor, 2024.

Por fim, a mesorregião Sudoeste conta com 28 plantas de biogás, que produzem 12,8 milhões de Nm^3 de biogás por ano, com uma capacidade diária de 35,2 mil Nm^3 . Esse volume de biogás tem o potencial de gerar 23,1 milhões de Nm^3 de gás de síntese por ano, possibilitando a produção de 1,4 milhões de kg de hidrogênio e 992,7 mil kg de amônia, ou 992 toneladas anuais, cujo os dados são apresentados na Figura 24.

FIGURA 24 – POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA NA MESORREGIÃO SUDOESTE



FONTE: autor, 2024.

No total, o volume de biogás no estado do Paraná é de aproximadamente 400 milhões de Nm³ por ano considerando a capacidade das plantas implementadas. Se todo esse biogás fosse convertido em gás de síntese, haveria um potencial para produzir 721,5 milhões de Nm³ por ano. Isso corresponde a uma produção de 45 milhões de kg de hidrogênio e 30,9 milhões de kg de amônia, ou 30,9 mil toneladas anuais. As mesorregiões que mais se destacam no potencial de produção de amônia são o Oeste, o Noroeste e o Centro Oriental. Os dados foram organizados por mesorregião e os resultados estão apresentados na Tabela 1, que serviu como base para a construção do dashboard no Power BI, ilustrado na Figura 25.

A mesorregião Oeste destaca-se como a líder em número de plantas de produção de biogás implementadas, possuindo a maior capacidade instalada de produção desse energético e, conseqüentemente, um significativo potencial para a produção de amônia. A região desempenha um papel essencial na industrialização do leite, na criação de aves e suínos, e nos abatedouros de aves, bovinos e suínos. Além disso, é um importante centro da agroindústria de beneficiamento de proteína animal, onde os resíduos desses processos são tratados de forma eficiente em biodigestores e refletem os valores apresentados.

Em segundo lugar, a mesorregião Noroeste se destaca como líder na produção e processamento de mandioca, além de ter uma relevância significativa na bovinocultura e nos abatedouros de aves, bovinos e suínos. Esses setores geram substratos que oferecem oportunidades promissoras para a produção de biogás. Às unidades de processamento da mandioca geram efluentes líquidos (manipueira + água de lavagem) e resíduos sólidos (massa de mandioca) passíveis da biodigestão anaeróbia para a geração de biogás.

A mesorregião, desempenha ainda um papel estratégico no desenvolvimento regional. Com um PIB de R\$ 23,5 bilhões, representando 4,8% do PIB estadual, a região abriga centros urbanos em crescimento contínuo e tem se destacado na agropecuária, com foco na produção em escala, commodities e diversas matérias-primas industriais.

Percebe-se que a região possui oportunidades estratégicas para a produção e utilização do biogás, permitindo o aproveitamento de diversos substratos e, conseqüentemente, ampliando a oferta dessa fonte de energia sustentável. Isso inclui o setor sucroalcooleiro, cujo processo industrial gera torta de filtro e vinhaça, resíduos com alto potencial para a geração de biogás, que ainda são subaproveitados.

A terceira mesorregião com maior potencial para a produção de amônia é a Centro Oriental, responsável por 14% da suinocultura do Estado.

Pode-se identificar que o Estado do Paraná tem se destacado na expansão de fontes de energia renovável, especialmente com o crescimento significativo na implantação de unidades produtoras de biogás. A forte vinculação da economia regional ao setor agrícola favorece a implementação dessas plantas, utilizando dejetos da pecuária (suinocultura, avicultura e bovinocultura) e resíduos agroindustriais. Além de oferecer uma solução para o tratamento desses substratos, essa alternativa impulsiona o desenvolvimento de novas fontes de energia no estado, contribuindo para os resultados observados nesse estudo.

Esse progresso é ainda mais fortalecido a partir das políticas públicas que reconhecem o biometano como um biocombustível análogo ao gás natural, ampliando suas aplicações e estabelecendo especificações mínimas de uso, conforme as resoluções ANP nº 8/2015 e ANP nº 685/2017 ou ainda a Lei

14.300/2022, que regulamenta a Micro e Minigeração Distribuída. A Política Nacional de Biocombustíveis - RenovaBio também desempenha um papel vital, incentivando a produção de biocombustíveis, incluindo o biometano.

Projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P&D+I) também desempenharam um papel crucial no avanço do biogás. A Itaipu Binacional, por exemplo, tem sido um ator fundamental nesse processo, investindo no setor no Estado do Paraná. Desde 2011, o CIBiogás, com investimento realizado por Itaipu Binacional, opera o primeiro laboratório dedicado a biogás no Brasil, e as iniciativas pioneiras têm fornecido subsídios técnicos que contribuem para os avanços regulatórios.

Além dessas iniciativas, programas como o Paraná Energia Rural Renovável - RenovaPR, criado para estimular a transformação energética no campo paranaense, têm incentivado investimentos em energias renováveis, com a meta de alcançar R\$10 bilhões em investimentos até 2030, por meio da redução de juros para esses projetos.

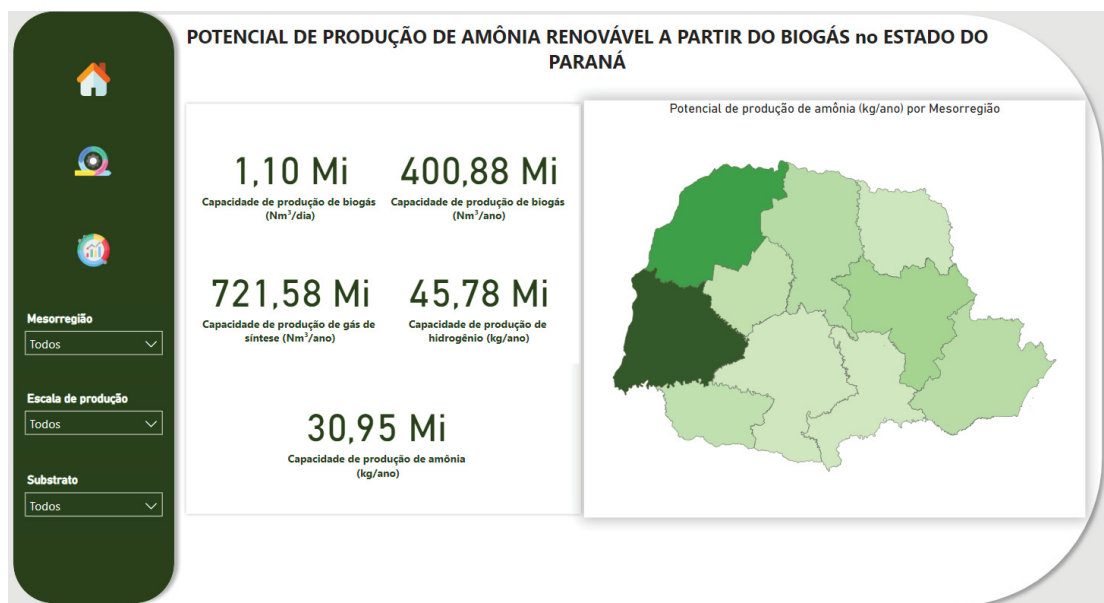
Todas essas iniciativas, aliadas à vocação agroindustrial do Estado, contribuíram para o fortalecimento de uma cadeia de biogás robusta no Paraná, consolidando a região com o maior número de plantas de biogás implementadas e por consequente o potencial de produção de amônia identificado.

TABELA 1 – Potencial de produção de biogás, hidrogênio e amônia por mesorregião do estado do Paraná.

Mesorregião	Biogás capacidade de produção (Nm ³ /ano)	Biogás capacidade de produção (Nm ³ /dia)	Gás de síntese (Nm ³ /ano)	Hidrogênio (Nm ³ /ano)	WGS (Nm ³ /ano)	Total Hidrogênio (reforma + wgs)	Hidrogênio (Kg/ano)	Amônia (Nm ³ /ano)	Amônia (Kg/ano)	Amônia (Ton/ano)
Centro Ocidental	13.505.116,5	37.000,4	24.309.209,7	11.425.328,6	5.712.664,3	17.137.992,8	1.542.419,4	1.428.166,1	1.042.561,2	1.042,6
Centro Oriental	34.349.706,3	94.110,5	61.829.471,3	29.059.851,5	14.529.925,8	43.589.777,3	3.923.080,0	3.632.481,4	2.651.711,5	2.651,7
Centro-Sul	2.128.210,8	5.830,7	3.830.779,4	1.800.466,3	900.233,2	2.700.699,5	243.063,0	225.058,3	164.292,6	164,3
Noroeste	125.411.352,7	343.593,0	225.740.434,9	106.098.004,4	53.049.002,2	159.147.006,6	14.323.230,6	13.262.250,5	9.681.442,9	9.681,4
Norte Central	20.216.658,5	55.388,1	36.389.985,3	17.103.293,1	8.551.646,5	25.654.939,6	2.308.944,6	2.137.911,6	1.560.675,5	1.560,7
Oeste	168.679.637,1	462.136,2	303.623.346,8	142.702.973,0	71.351.486,5	214.054.459,5	19.264.901,4	17.837.871,6	13.021.646,3	13.021,6
Norte Pioneiro	3.317.477,9	9.088,9	5.971.460,2	2.806.586,3	1.403.293,2	4.209.879,5	378.889,2	350.823,3	256.101,0	256,1
Sudeste	1.509.561,7	4.135,9	2.717.211,1	1.277.089,2	638.544,6	1.915.633,8	172.407,0	159.636,1	116.534,4	116,5
Sudoeste	12.859.787,2	35.232,3	23.147.617,0	10.879.380,0	5.439.690,0	16.319.070,0	1.468.716,3	1.359.922,5	992.743,4	992,7
Metropolitana de Curitiba	18.897.517,2	51.774,0	34.015.531,0	15.987.299,6	7.993.649,8	23.980.949,3	2.158.285,4	1.998.412,4	1.458.841,1	1.458,8
TOTAL	400.875.025,9	1.098.290,0	721.575.046,7	339.140.271,9	169.570.136,0	508.710.407,9	45.783.936,7	42.392.534,0	30.946.549,8	30.946,5

Fonte: autor, 2024.

FIGURA 25 - CADEIA PRODUTIVA DA UREIA E POSSÍVEL INTEGRAÇÃO SETORIAL



FONTE: autor, 2024.

Os resultados do estudo resultaram nas seguintes telas do Power BI, apresentadas da Figura 26:

1. Menu Principal: Proporciona uma visão geral e opções de navegação para as demais seções.
2. Resumo: Contém uma visão geral do projeto, seus objetivos e as principais conclusões obtidas.
3. Material e Métodos: Descreve os recursos e técnicas utilizados no desenvolvimento do projeto, bem como os procedimentos seguidos.
4. Resultados: Apresenta os resultados obtidos, utilizando diversas visualizações interativas para facilitar a compreensão e interpretação dos resultados.


FIGURA 26 – TELAS DO POWER BI

POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA RENOVÁVEL A PARTIR DO BIOGÁS no ESTADO DO PARANÁ

ALINE SCARPETTA
Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Ambiental, Setor de Palotina - PR, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia Ambiental.
Orientador: Prof. Dr. Helton José Alves

Menu principal
Resumo
Material e Métodos
Resultados

Palotina, 2024



Resumo

A segurança energética e alimentar, tem sido temas recorrentes em discussões de políticas governamentais em áreas consideradas estratégicas no Brasil e no mundo. Nesse contexto, as fontes de energia têm um papel fundamental no crescimento econômico e desenvolvimento de um país propiciando avanços industriais, tecnológicos e ocasionando melhorias no padrão de vida da sociedade. Aliada a estas vantagens, amplia-se o desafio ao combate às mudanças climáticas e modificação nos padrões tradicionais de consumo que resultaram em significativa exploração de recursos naturais e uma elevada geração de resíduos. Ainda, alinhado a necessidade de produção de alimentos para atender à crescente demanda global, maior é a demanda por nutrientes dos fertilizantes, cuja maior parte da produção mundial é obtida a partir de fonte fóssil. Todos os fertilizantes nitrogenados decorrem da amônia, e mundialmente, mais de 70% de toda a amônia produzida é destinada a produção de fertilizantes e obtida a partir da reforma do gás natural. Diante do exposto, destaca-se a oportunidade de utilização dos resíduos agroindustriais, para produção de biogás, sendo esses precursores para a produção renovável de fertilizantes. A reforma do biogás é uma estratégia emergente que visa converter o biogás em gás de síntese que é uma mistura gasosa composta por hidrogênio (H₂) e monóxido de carbono (CO), que pode ser aplicado na produção de produtos com alto valor agregado, como a amônia. Dessa forma, este estudo teve por objetivo estimar o potencial de produzir amônia a partir da reforma a seco do biogás proveniente das atividades do agronegócio no estado do Paraná. Pode-se concluir que o volume total de biogás produzido é de aproximadamente 400 milhões de Nm³ por ano e se todo esse biogás fosse convertido em gás de síntese, haveria um potencial para produzir 721,5 milhões de Nm³ de gás de síntese anualmente. Esse volume permitiria a produção de 15 milhões de kg de hidrogênio e 30,9 milhões de kg de amônia, ou 30,9 mil toneladas por ano. As mesorregiões que mais se destacam no potencial de produção de amônia são o Oeste, o Noroeste e o Centro Oriental. Os resultados foram apresentados em um painel dinâmico utilizando ferramenta de BI, o que permitiu apresentá-los de forma objetiva, personalizada e de fácil visualização.

Palavras-chave: Agronegócio. Reforma do Biogás. Hidrogênio. Fertilizante. Amônia.

Materiais e Métodos

3.1.3 Fundamentação Teórica
A pesquisa partiu do levantamento de dados de material bibliográfico, que incluiu o estudo referencial e levantamento informações em artigos científicos, relatórios, notas técnicas e outras publicações. A pesquisa bibliográfica refere-se a um conjunto de informações sobre trabalhos e levantamento de dados já realizados. Marconi e Laktos (2003) explicam que a obtenção de dados pode ser realizada a partir da pesquisa documental, pesquisa bibliográfica e contatos diretos. No âmbito do trabalho, a fundamentação teórica foi centrada em documentos e trabalhos referentes aos seguintes temas: i. mercado do agronegócio no Brasil e Paraná; ii. potencial e mercado do biogás no Brasil e Paraná; iii. economia de baixo carbono e transição energética; iv. processo de produção de amônia; v. produção de amônia a partir do biogás; vi. mercado de fertilizantes nitrogenados no Brasil e no Estado do Paraná.

3.1.2 Diagnóstico atual da produção de biogás proveniente do agronegócio no estado do Paraná

3.1.2.1 Acesso e organização dos dados
Nesta etapa, foram utilizados dados disponíveis no Panorama do Biogás no Brasil referente ao ano de 2023, publicado em 2024 pelo CIBiogás, e atualizações já realizadas em 2024. Além disso, foi consultado o Biogasmapp, um painel dinâmico de plantas de biogás e biometano brasileiras elaborado pelo CIBiogás, Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (Unido), diversos consultores, pesquisadores e produtores da cadeia do biogás. A base de dados foi construída

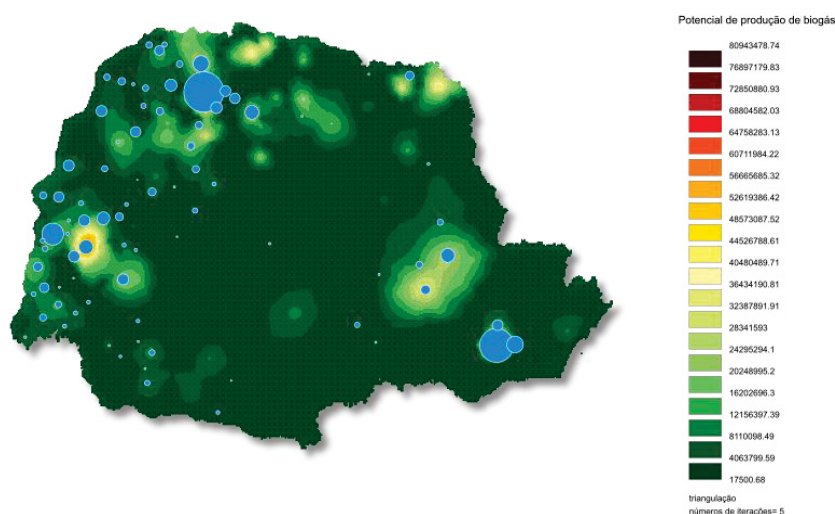
3.1.3 Estimativa do potencial de produção de amônia renovável a partir da reforma do biogás

3.1.3.1 Estimativa estequiométrica do potencial de produção de gás de síntese e hidrogênio
Nessa etapa foi estimado o potencial de produção de gás de síntese por mesorregião a partir do biogás proveniente do agronegócio no estado do Paraná considerando os 02 (dois) cenários supracitados. A rota tecnológica para o cálculo de conversão do biogás em gás de síntese foi a reforma a seco. Afzal et al. (2018) estudaram a viabilidade ambiental da técnica de reforma a seco dentre outras tecnologias considerando essa técnica como a de menor pegada de CO₂ quando as proporções de gás de síntese vão até 1. Para a reforma a seco, grande parte dos trabalhos indica a utilização de um biogás em iguais proporções entre CH₄ e CO₂, o que é facilmente obtido em biodigestores rurais e agroindustriais, não havendo a necessidade de etapas adicionais de enriquecimento, somente da remoção da umidade do sulfeto de hidrogênio (H₂S) (GEE, 2022). O H₂S é corrosivo em meio gasoso e aquoso, acarretando danos aos equipamentos e tubulações, reduzindo sua vida útil. Sua remoção é uma importante etapa do processo de purificação do biogás, visto que sua presença implica cuidados na aplicação direta do biogás (ANGHEBEN, 2017). No processo de reforma, o H₂S também apresenta impactos de iguais proporções, sendo recomendado sua total remoção mesmo que alguns trabalhos indiquem alguma resistência dos catalisadores em determinadas concentrações, o produto

FONTE: autor, 2024.

A análise do potencial total de produção de biogás no estado do Paraná, conforme apresentado no Panorama de Biogás de 2022, indica que o estado tem a capacidade de gerar até 1,7 bilhões de Nm³ de biogás por ano, como ilustrado na Figura 27.

FIGURA 27 – POTENCIAL TOTAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO ESTADO DO PARANÁ EM 2022



FONTE: CIBiogás, 2023

Se todo esse biogás, que representa a estimativa total, fosse convertido em gás de síntese, o volume potencial de produção alcançaria 3,06 bilhões de Nm³ anuais. Esse volume de gás de síntese poderia resultar na produção de aproximadamente 194 milhões de kg de hidrogênio. Além disso, seria possível produzir 131,2 milhões de kg de amônia por ano, equivalentes a 131,2 mil toneladas. Esses resultados destacam o significativo potencial do Paraná para a produção de amônia renovável, evidenciando uma oportunidade substancial para o aproveitamento dos recursos do agronegócio.

Quando se trata dos maiores consumidores de fertilizantes nitrogenados, o Brasil ocupa a quarta colocação, ficando atrás de China, Índia e Estados Unidos e estima-se que até 2050 o consumo pode totalizar entre 49,6 e 77 milhões de toneladas anuais (SAE, 2021). O país mantém essa posição também no consumo de ureia, com mais de dois milhões de toneladas anuais. Em relação ao Nitrato de Amônio e Sulfato de Amônio, o Brasil é o

maior consumidor mundial, com consumo superior a 400 mil toneladas e 500 mil toneladas, respectivamente (IFA, 2022; FERNANDES, 2022). Ainda, segundo a Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2021), o consumo médio anual de fertilizantes no Brasil é da ordem de 40 milhões de toneladas.

Esses dados indicam que o Paraná possui potencial para contribuir na produção de amônia, um insumo essencial para a fabricação de fertilizantes nitrogenados, o que pode ajudar a atender a demanda crescente no estado e no Brasil. Considerando que o país é um dos maiores consumidores de fertilizantes nitrogenados do mundo, o aproveitamento desse potencial no Paraná pode não apenas fortalecer a indústria local, mas também reduzir a dependência do país em relação às importações, promovendo maior sustentabilidade e autossuficiência no setor agrícola, uma vez que o preço dos fertilizantes tem grande impacto nos custos de produção.

Por exemplo, no ano de 2021, grande parte dos preços por tonelada dos fertilizantes químicos tiveram um aumento médio de 125% em relação a 2020 e 168% a 2019. O custo com fertilizantes ocupou a primeira posição do custo total das culturas de milho 1ª safra, trigo, feijão 1ª e 2ª safra e soja, com 31%, 24%, 23%, 21% e 16%, respectivamente (DERAL, 2022b).

Além disso, os preços dos fertilizantes são formados no mercado internacional, influenciados pela demanda e oferta mundial, e incluem custos logísticos, como o frete rodoviário, que impacta o preço final ao comprador (MARCONATO, 2012). Gastos adicionais, como a sobre-estadia (demurrage), também afetam os custos. Em 2022, esses gastos foram de US\$ 227 milhões, um aumento de 206% em relação ao ano anterior, devido ao alto volume de importações que causou gargalos logísticos e maior tempo de permanência dos navios nos portos do Paraná (SINDIADUBOS, 2022).

A produção local de amônia no Paraná pode contribuir significativamente para reduzir os riscos associados às oscilações cambiais e às flutuações do mercado internacional, fortalecendo a segurança e a estabilidade do abastecimento de fertilizantes nitrogenados no Brasil. Além disso, por ser de fonte renovável, essa produção contribui com a transição energética e a obtenção de produtos com menor pegada de carbono, alinhando-se às metas de sustentabilidade e redução de emissões de gases de efeito estufa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estado do Paraná conta com um volume total de biogás de aproximadamente 400 milhões de Nm³ por ano, considerando a capacidade das plantas implementadas. Os resultados revelaram que se convertido em gás de síntese, esse volume poderia resultar na produção de 721,5 milhões de Nm³ anuais, possibilitando a geração de 45 milhões de kg de hidrogênio e 30,9 mil toneladas de amônia por ano. As mesorregiões que mais se destacam no potencial de produção de amônia são o Oeste, o Noroeste e o Centro Oriental.

Quanto ao potencial teórico ao aproveitar todo substrato residual proveniente do agronegócio, se todo o biogás fosse convertido em gás de síntese, a produção alcançaria 3,06 bilhões de Nm³ por ano, gerando 194 milhões de kg de hidrogênio e 131,2 mil toneladas de amônia anualmente. Esses números ressaltam a notável capacidade do Paraná na produção de amônia renovável, evidenciando uma oportunidade significativa para o aproveitamento dos substratos do agronegócio.

O cenário brasileiro de investimentos no setor de reforma do biogás para obtenção de amônia ainda é muito incipiente. Não foram identificadas nas pesquisas casos implementados de produção de amônia a partir do biogás. Assim, o primeiro desafio foi buscar referencial teórico relacionado a reforma catalítica do biogás e a conversão do gás de síntese em amônia, visto que se trata de um assunto recente.

Ainda, há uma série de desafios que precisam ser superados para que este arranjo tecnológico e de mercado se estabeleça. O desafio mais apontado é a consolidação de um preço competitivo frente aos produtos de fonte fóssil. Para isto, as rotas produtivas precisam ser amplamente estudadas, escalonadas e difundidas no mercado, além do desenvolvimento de estudos de potencial, mercado e modelos de negócios alinhados com metodologias que permitam valorar os produtos de fontes renováveis de forma completa, considerando aspectos econômicos e ambientais.

Contudo, com o método aplicado, apesar da existência de lacunas, o estudo pode incentivar novas oportunidades de mercado, ao se ter conhecimento do potencial existente, haja visto que o Estado do Paraná, assim

como o Brasil é um grande consumidor e importador de fertilizantes nitrogenados, o que pode abrir oportunidades para identificar como aproveitar a referida oferta de amônia no Estado.

REFERÊNCIAS

AEN – AGÊNCIA ESTADUAL DE NOTÍCIAS. Com 6,412%, Paraná alcança maior participação da história no PIB nacional. Agência Estadual de Notícias – Governo do Estado do Paraná, 2022. Disponível em: <<https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/Com-6412-Parana-alcanca-maior-participacao-da-historia-no-PIB-nacional>>. Acesso em: 02 jul. 2023.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Chamada No 023/2024 Projeto Estratégico: “Hidrogênio no Contexto do Setor Elétrico Brasileiro”. Março, 2024.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojZjZhZDliMTYtOWIyZi00OGY5LWJkYzltOTQ1MzFjZGMzMjMDNkliwidCI6IjQ0OTlmNGZmLTl0YTtytNGI0Mi1iN2VmLTI0YyY2FkYzkyZkxMyJ9>>. Acesso em: 21 mar. 2024.

AGUIAR, M.; CAZULA, B. B.; COLPINI, L. M. S.; BORBA, C. E.; DA SILVA, F. A.; NORONHA, F. B.; ALVES, H. J. Si-MCM-41 obtained from different sources of silica and its application as support for nickel catalysts used in dry reforming of methane. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, n. 60, p. 32003-32018, 2019.

AGUIRRE, M.; IBIKUNLE, G. Determinants of renewable energy growth: A global sample analysis. **Energy Policy**, v. 69, p. 374–384, 2014.

AFZAL, S.; SENGUPTA, D.; SARKAR, A.; EL-HALWAGI, M. M.; ELBASHIR, N. O. An optimization approach to the reduction of CO₂ emissions for syngas production involving dry reforming. **ACS Sustain. Chem. Eng.**, v. 6, n. 6, p. 7532-7544, 2018.

AMMONIA ENERGY ASSOCIATION. **Brazil’s first electrolysis-based ammonia plant takes shape**. New York: AEA, 2022. Disponível em: <<https://www.ammoniaenergy.org/articles/brazils-first-electrolysis-based-ammonia-plant-takes-shape/>>. Acesso em: 22 nov. 2022.

ANDA - ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Macro Indicadores**. 2022. Disponível em: <http://anda.org.br/pesquisa_setorial/> Acesso em: 09 nov. 2022.

ANDA - ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. Principais indicadores do setor de fertilizantes: janeiro de 2021. São Paulo: ANDA, 2021. Disponível em: <https://anda.org.br/wpcontent/uploads/2021/06/Principais_Indicadores_2021.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2022.

ARAUCÁRIA NITROGENADOS S. A. **Demonstrações financeiras em 31 de dezembro de 2020 e 2019 e relatório dos auditores independentes.**

Disponível em:

<<https://petrobras.com.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=8AE99E8B8477153E01849FE5B0F4408A>>. Acesso em: 01 fev. 2023.

ARBAG, H.; YASYERLI, S.; YASYERLI, N.; DOGU, G.; DOGU, T.; ČRNIVEC, O.; PINTAR, A. Coke Minimization during Conversion of Biogas to Syngas by Bimetallic Tungsten–Nickel Incorporated Mesoporous Alumina Synthesized by the One-Pot Route. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 54, n. 8, p. 2290–2301, 2015.

APPLEMAN, Nathan; COUTURE, Toby, D.; JACOBS, David. Uma palavra sobre Energias Renováveis. **Agora Energiewende**. Ano 2018. Disponível em: <https://www.emaisenergia.org/wp-content/uploads/2021/03/Uma-palavra-em-renov%C3%A1veis-de-baixo-custo.pdf>. Acesso em: 14 de agosto de 2021.

ARESTA, M.; DIBENEDETTO, A.; TOMMASI, I. Developing Innovative Synthetic Technologies of Industrial Relevance Based on Carbon Dioxide as Raw Material. **Energy & Fuels**, v. 15, p. 269-270, 2001.

AVRAAM D. G.; HALKIDES, T. I.; LIGURAS, D. K.; BEREKETIDOU, O. A.; GOULA, M. A. An experimental and theoretical approach for the biogas steam reforming reaction. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 18, p. 9818-9827, 2010.

AZIZ, M.; WIJAYANTA, A. T.; NANDIYANTO, B. D. Ammonia as Effective Hydrogen Storage: A Review on Production, Storage and Utilization. **Energies**, v. 13, p. 2062, 2020.

BACH, V. R.; CAMARGO, A. C.; SOUZA, T. L.; CARDOZO-FILHO, L.; ALVES, H. J. Dry reforming of methane over Ni/MgO–Al₂O₃ catalysts: Thermodynamic equilibrium analysis and experimental application. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 8, p. 5252-5263, 2020.

BAZOOYAR, B.; COOMSON, G.; MANOVIC, V.; NABAVI, S. A. Comparative analysis of ammonia combustion for domestic applications. **Journal of the Energy Institute**, 2022.

BERWAL, P.; KUMAR, S.; KHANDELWAL, B. A comprehensive review on synthesis, chemical kinetics, and practical application of ammonia as future fuel for combustion. **Journal of the Energy Institute**, v. 99, p. 273-298, 2021.

BEZERRA, Francisco Diniz. Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia. Fortaleza: **Banco do Nordeste do Brasil**, ano 6, n.212, dez. 2021. (Caderno Setorial ETENE)

BIAN, Z.; Suryawinata, I. Y.; KAWI, S. Highly carbon resistant multicoreshell catalyst derived from Ni-Mg phyllosilicate nanotubes@silica for dry reforming of methane. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 195, p. 1-8, 2016.

BRASIL, REPUBLICA FEDERATIVA. **Acordo de Paris**: Contribuição nacionalmente determinada – NDC. Brasília: República Federativa, 2022. 11p.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **RENOVABIO - Propostas das Instituições presentes na Reunião de Construção do Renovabio Biocombustíveis Biogás e Biometano**, 2017. Disponível em: <http://antigo.mme.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=87ed2d4e-5a4a-db52-5d0b-737d2662ac9c&groupId=36224>pdf. Acesso em: 08 de dezembro de 2022.

BRASIL, Decreto Nº 4.954 de 14 de janeiro de 2004. Normas gerais sobre registro, padronização, classificação, inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas destinadas à agricultura.

BRASIL, Lei Nº 14.948 de 02 de agosto de 2004. Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono; dispõe sobre a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono.

BRÉMOND, U.; BERTRANDIAS, STEYER J-P.; BERNET, N.; CARRERE, H. A vision of European biogas sector development towards 2030: Trends and challenges. *Journal of Cleaner Production*, v. 287, 125065, 2021.

CADE - CONSELHO ADMINISTRATIVO DE DEFESA ECONÔMICA. **Ato de Concentração nº 08700.000393/2018-11**. Ministério da Justiça, Conselho Administrativo de Defesa Econômica (CADE), 2018. Disponível em: <https://sei.cade.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md_pesq_documento_consulta_externa.php?DZ2uWeaYicbuRZEFhBt-n3BfPLlu9u7akQA8mpB9yMHFJNgOCn7hfTq6NzEpD3ftwe6OKyXr6DhWzldZG6XJZLkvOI8CfJ42CGbPB_IM4eS2qZXwSY6f1hHhMR2ZKJY>. Acesso em: 30 jan. 2023.

CIBIOGÁS. **BiogásMap**. Centro Internacional de Energias Renováveis – CIBIOGÁS, 2021a. Disponível em: <<https://mapbiogas.cibiogas.org/>>. Acesso em: 10 jul. 2022.

CIBIOGÁS. **Nota Técnica: Nº 001/2021** – Panorama do Biogás no Brasil 2020. Foz do Iguaçu, 2021b. 15p.

CIBIOGÁS. **Relatório Técnico: Nº 001/2022** – Panorama do Biogás no Brasil 2021. Foz do Iguaçu, CIBiogás, 2022.

CIBIOGÁS. **Relatório Técnico nº 001/2024** – Panorama do Biogás no Brasil 2023. Foz do Iguaçu, CIBiogás, 2024.

CNI - Confederação Nacional da Indústria. **Hidrogênio sustentável: perspectivas e potencial para a indústria brasileira**. Brasília: CNI, 2022. 137 p.: il.

CARVALHO, M. **Análise de Desempenho de um Reator de Síntese de Amônia**. 2016. 81 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.

CIPITÌ, F.; BARBERA, O.; BRIGUGLIO, N.; GIACOPPO, G.; ITALIANO, C.; VITA, A. Design of a biogas steam reforming reactor: A modelling and experimental approach. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 27, p. 11577-11583, 2016.

CNA - CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. **PIB do agronegócio cresceu abaixo das projeções**. 2022. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/Cepea_CNA_PIB_JAn_Dez_2021_Mar%C3%A7o2022.pdf>. Acesso em: 09 nov. 2022.

CNA - CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. **Custos Grãos: agosto/21**. 2021. Disponível em: <<https://cepea.esalq.usp.br/upload/revista/pdf/0188531001630693881.pdf>>. Acesso em: 09 jan. 2022.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos (safra 2021/22)**. Brasília-DF: CONAB, 2022, 101p.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Boletim Logístico. Ano VI, Fevereiro, 2022.

CREMONEZ, P. A.; TELEKEN, J. G.; MEIER, T. R. W.; ALVES, H. J. Two-Stage anaerobic digestion in agroindustrial waste treatment: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 281, 111854, 2021.

CVETKOVIC, S. M.; RADOIČIĆ, T. K.; KIJEVČANIN, M.; NOVAKOVIĆ, J. G. Life Cycle Energy Assessment of biohydrogen production via biogas steam reforming: Case study of biogas plant on a farm in Serbia. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 27, p. 14130-14137, 2021.

DERAL – Departamento de Economia Rural. **Impactos do custo de fertilizantes na rentabilidade da safra agrícola**. Nota Técnica nº 17/2022, 2022. Disponível em: <https://www.agricultura.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2022-03/17_nota_tecnica_fertilizantes_salatiel_sug_vmc_1.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2023.

DERAL – Departamento de Economia Rural. **Caderno Regional Agropecuário**. N. 02, Vol. 02 2022, 35p. Disponível em: <https://www.agricultura.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2022-04/caderno_regional_2d_1.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2023.

EMBRAPA. **Produção de Carnes**. 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/visao-de-futuro/trajetoria-do-agro/desempenho-recente-do-agro/carnes>>. Acesso em: 09 nov. 2022.

EMBRAPA SOJA. **Soja em Números (Safrá 2020/2021)**. 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>. Acesso em: 09 nov. 2022.

EMBRAPA SUÍNOS E AVES. **Central de Inteligência de aves e suínos: Estatísticas**. 2022. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/suinos-e-aves/cias/estatisticas/frangos/mundo>>. Acesso em: 09 nov. 2022.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional. NOTA TÉCNICA PR 07/18. **Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no horizonte 2050**. Rio de Janeiro, nov/2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-456/NT%20PR%20007-2018%20Premissas%20e%20Custos%20Oferta%20de%20Energia%20EI%203%A9trica.pdf>. Acesso em 08 de dezembro de 2022.

EPE, 2022. **Boletim de Conjuntura da Indústria do Óleo & Gás** – Número 12 – 1º Semestre/2022. Publicado em setembro 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-226/topico-645/BOG%201%C2%BAsemestre2022.pdf>>. Acessado em: 12 de outubro de 2022.

EPE, 2023. **Boletim de Conjuntura da Indústria do Óleo & Gás** – Número 14 – 1º Semestre/2023. Publicado em agosto de 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-226/topico-688/BOG%201%C2%BAsemestre2023_2023.08.31.pdf>. Acessado em 02 mar. 2024.

EPE, 2022. **Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032: Oferta de Biocombustíveis**. Publicado em dezembro de 2022. Disponível em: < https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-640/PDE%202032%20-%20Oferta%20de%20Biocombustiveis_27dez2022_envio.pdf>. Acessado em 02 mar. 2024.

EPE, 2020. **Preços de Gás Natural nos Mercados Nacional e Internacional Horizonte 2020-2030**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/topico-531/EPE,%202020%20-%20Nota%20T%C3%A9cnica%20Pre%C3%A7os%20de%20G%C3%A1s%20Natural.pdf>>. Acessado em: 12 de outubro de 2022.

EPE, 2021. **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio**. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidroge%CC%82nio_rev01%20\(1\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidroge%CC%82nio_rev01%20(1).pdf)>. Acessado em: 16 de janeiro de 2023.

ESTEVES, N. B., SIGAL, A., LEIVA, E. P. M., RODRÍDUEZ, C. R., CAVALCANTE, F. S. A., LIMA, L. C. "Wind and solar hydrogen for the potential production of ammonia in the state of Ceará – Brazil". **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, p. 9917- 9923, 2015.

FACHIN, O. **Fundamentos de metodologia**. 5. ed. São Paulo: Saraiva, 2006.

FELIX, E. P.; CARDOSO, A. A. Amônia (NH₃) atmosférica: fontes, transformação, sorvedouros e métodos de análise. **Química Nova**, v. 27, n. 1, p. 123-130, 2004.

FERREIRA, J. N.; FERREIRA, R. S.; CHAVES, F. F.; SANTOS, D. M.; FREITAS, A. L.; CARVALHO FILHO, A. M.; LEITE, M. J. H. Parâmetros físicos e qualidade de fertilizantes minerais nas indústrias do Brasil. **Research, Society and Development**, v.11, n.6, e51611629542, 2022.

FRANCO, J. A. M.; SARAIVA NETO, A. Produção de fertilizantes nitrogenados e suprimentos de matériaprima. IN: **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: IPNI, 2007, pp. 73-107.

FUESS, L. T.; RODRIGUES, I. J.; GARCIA, M. L. Fertirrigation with sugarcane vinasse: foreseeing potential impacts on soil and water resources through vinasse characterization. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, v. 52, p. 1063-1072, 2017.

GAO, Y.; JIANG, J.; MENG, Y.; YAN, F.; AIHEMAITI, A. A review of recent developments in hydrogen production via biogas dry reforming. **Energy Conversion and Management**, v. 171, p. 133-155, 2018.

GAO, Y.; JIANG, J.; MENG, Y.; AIHEMAITI, A.; JU, T.; CHEN, X.; YAN, F. A novel nickel catalyst supported on activated coal fly ash for syngas production via biogas dry reforming. **Renewable Energy**, v. 149, p. 786-793, 2020.

GEF - GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY. **Potencial de Produção de Biogás para o Sul do Brasil** (Projeto Aplicações do Biogás na Agroindústria Brasileira: GEF Biogás Brasil). 2022.

GHAREGHASHI, A.; SHAHRAKI, F.; RAZZAGHI, K.; GHADER, S.; TORANGI, M. A. Enhancement of gasoline selectivity in combined reactor system consisting of steam reforming of methane and Fischer-Tropsch synthesis. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 34, p. 87-99, 2017.

GHAVAM, S.; GARCIA-GARCIA, G.; STYRING, P. A novel approach to ammonia synthesis from hydrogen sulfide. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 5, p. 4072-4086, 2021.

GHOUSE, J. H.; ADAMS, T. A.; A multi-scale dynamic two-dimensional heterogeneous model for catalytic steam methane reforming reactors. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, p. 9984-9999, 2013.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 2008.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GIZ - DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT. Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde.

GUIMARÃES, A. C. **Estudo do comportamento de catalisadores de níquel suportados em óxidos a base de cério sintetizados pelo método sol-gel na reforma seca do biogás**. 2020. 100f. Dissertação (Mestrado em Energia e Meio Ambiente), Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ.

HAN, Z.; WU, P.; HE, M.; ZHUANG, X.; LIN, H.; HAN, S. Ammonia synthesis by electrochemical nitrogen reduction reaction - A novel energy storage way. **Journal of Energy Storage**, v. 55, 105684, 2022.

HUMPHREYS, J.; LAN, R.; TAO, S. Development and Recent Progress on Ammonia Synthesis Catalysts for Haber–Bosch Process. **Advanced Energy & Sustainability Research**, v. 2, p. 2000043, 2021.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e estados. 2022. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/panorama>>. Acesso em: 26 jun. 2023.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Agência IBGE Notícias. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37237-de-2010-a-2022-populacao-brasileira-cresce-6-5-e-chega-a-203-1-milhoes>>. Acessado em 20 de junho, 2024.

IDR - INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO RURAL DO PARANÁ. **Estratégias para aumentar a eficiência do uso de fertilizantes**. Nota Técnica nº 02/2022. Curitiba. 2022. Disponível em: <https://www.agricultura.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2022-03/nota_tecnica_fertilizantes_finalizada_18_03_2022.pdf>. Acesso em: Acessado em 10 abr. 2023.

INDEX MUNDI. **Preços de mercadorias: Ureia.** 2022. Disponível em: <<https://www.indexmundi.com/pt/pre%EF7os-de-mercado/?mercadoria=ureia&meses=60&moeda=brl>>. Acesso em: 09 jan. 2023

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Hydrogen in Latin America.** Paris: IEA, 2021.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Ammonia Technology Roadmap: Towards more sustainable nitrogen fertilizer production.** 2021b. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/6ee41bb9-8e81-4b64-8701-2acc064ff6e4/AmmoniaTechnologyRoadmap.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2022.

IFA - INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION. **Consumption and production of fertilizer.** 2022. Disponível em: <<https://www.ifastat.org/databases/plant-nutrition>>. Acesso em: 01 fev. 2023.

IFA - INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION. Food and Nutrition Security. 2023. Disponível em: <<https://fertilizer.org/about-fertilizers/why-we-need-fertilizers/food-and-nutrition-security/>>. Acesso em: 03 fev. 2023.

IPARDES – INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Nota de divulgação PIB 1º Trim. 2023.** 2023. Disponível em: <https://www.ipardes.pr.gov.br/sites/ipardes/arquivos_restritos/files/documento/2023-06/Nota_de_divulga%C3%A7%C3%A3o_PIB_1o_Trim_2023.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2023.

IPARDES – INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. Relação dos municípios do Estado do Paraná. Disponível em: <https://www.ipardes.pr.gov.br/sites/ipardes/arquivos_restritos/files/documento/2019-09/Rela%C3%A7%C3%A3o%20dos%20munic%C3%ADpios%20paranaenses%20em%20ordem%20alfab%C3%A9tica.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2024.

IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Panorama do Hidrogênio no Brasil:** texto para discussão. Brasília: IPEA, 2022. 61p.

IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Transição energética e potencial de cooperação nos BRICS em energias renováveis e gás natural:** texto para discussão. Brasília: IPEA, 2021. 71p.

JUNG, S.; LEE, J.; MOON, D. H.; KIM, K.H.; KWON, E. E.; Upgrading biogas into syngas through dry reforming. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 143, 110949, 2021.

KAINTHOLA, J.; KALAMDHAD, A. S.; GOUD, V. V. A review on enhanced biogas production from anaerobic digestion of lignocellulosic biomass by

different enhancement techniques. **Process Biochemistry**, v. 84, p. 81-90, 2019.

KATILIE, C. J.; SIMON, A. G.; DEGREEFF, L. E. Quantitative analysis of vaporous ammonia by online derivatization with gas chromatography - mass spectrometry with applications to ammonium nitrate-based explosives. **Talanta**, v. 193, p. 87-92, 2019.

KAWAMURA, F.; TANIGUCHI, T. Synthesis of ammonia using sodium melt. **Scientific reports**, v. 7, p. 11578, 2017.

KE, J.; SUN, J.; CHEN, T.; TAO, S.; ZHU, T.; YIN, C.; HE, H.; YOU, C.; WU, L.; GUO, S. Effects of mixed fertilizers formed by the compounding of two targeted controlled-release nitrogen fertilizers on yield, nitrogen use efficiency, and ammonia volatilization in double-cropping rice. **The Crop Journal**, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2022.09.011>

KOBAYASHI, H.; HAYAKAWA, A.; KUNKUMA, K. D.; OKAFOR, E. C. Science and technology of ammonia combustion. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 37, n. 1, p. 109-133, 2019.

LI, N.; YANG, Y.; WU, Y.; LIU, B.; TAO, L.; ZHAN, Y.; NI, X. YANG, Y. Better performance of compound fertilizers than bulk-blend fertilizers on reducing ammonia emission and improving wheat productivity. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 335, 108018, 2022a.

LI, T.; WANG, Z.; WANG, C.; HUANG, J.; FENG, Y.; SHEN, W.; ZHOU, M.; YANG, L. Ammonia volatilization mitigation in crop farming: A review of fertilizer amendment technologies and mechanisms. **Chemosphere**, v. 303, p. 134944, 2022b.

LIU, Y.; FA, X.; BAO, X. Economic optimization of new energy technologies in the context of low carbon economy. **Energy Reports**, v. 8, p. 11899-11909, 2022.

LULIANELLI, A.; LIGUORI, S.; HUANG, Y.; BASILE, A. Model biogas steam reforming in a thin Pd-supported membrane reactor to generate clean hydrogen for fuel cells. **Journal of Power Sources**, v. 273, p. 25-32, 2015.

MARCONATO, R. **Avaliação do custo de transporte de fertilizantes com uso de Modelagem Digital de Terreno**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2012.

MACHAJ, K.; KUPECKI, J.; MALECHA, Z.; MORAWSKI, A. W.; SKRZYPKIEWICZ, M.; STANCLIK, M.; CHOROWSKI, M. Ammonia as a potential marine fuel: A review. **Energy Strategy Reviews**, v. 44, p. 100926, 2022.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MEDINA, G. S.; POKORNY, B. Agro-industrial development: Lessons from Brazil. **Land Use Policy**, v. 120, p. 106266, 2022.

MICROSOFT. **O que é Power BI?**. Março, 2023. Disponível em <<https://learn.microsoft.com/pt-br/power-bi/fundamentals/power-bi-overview>>. Acesso em: 10 abr. 2023.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário Estatístico 2021: Setor de Transformação de Não Metálicos**. Brasília: MME, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/anuario-estatistico-do-setor-metalurgico-e-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos/anuario-estatitico-2021-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos-ano-base-2020.pdf>>. Acesso em: 09 jan. 2022.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Boletim Mensal da Produção de Petróleo e Gás Natural: Dados da produção de petróleo e gás natural no Brasil. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletins/boletim-mensal-da-producao-de-petroleo-e-gas-natural>. Acesso em 02 mar. 2024.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Nacional de Energia 2050. Brasília: MME/EPE, 2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL; CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. Produção de combustíveis líquidos a partir de biogás e biometano: nota técnica. Brasília: MCTI, 2022. E-book. (Projeto Aplicações do Biogás na Agroindústria Brasileira: GEF Biogás Brasil).

MORGAN, J.; PATOMÄKI, H. Planetary good governance after the Paris Agreement: The case for a global greenhouse gas tax. **Journal of Environmental Management**, v. 292, 112753, 2021.

NELSON, L.B. 1990. **History of the U.S. fertilizer industry**. Tennessee Valley Authority, Muscle Shoals, AL.

NEVES, Natalino. **Critérios de avaliação e seleção de projetos para o programa de P&D da Aneel**. 2011. Dissertação (Mestrado em tecnologia) - Universidade Federal Tecnológica do Paraná. Curitiba, 2011. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/195/1/CT_PPGTE_M_Neves%2c%20Natalino%20das_2011.pdf>. Acessado em: 04 jul. 2022.

ONU - NAÇÕES UNIDAS BRASIL. População mundial chegará a 8 bilhões em novembro de 2022. Julho, 2022. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/189756-popula%C3%A7%C3%A3o-mundial-chegar%C3%A1-8-bilh%C3%B5es-em-novembro-de-2022>>. Acesso em: 05 fev. 2023.

OLIVEIRA, M. C. F.; LEVKOWITZ, H. **From visual data exploration to visual data mining: a survey**. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 9, no. 3, pp. 378-394, July-Sept. 2003. Disponível em: <https://cs.nju.edu.cn/zhoush/zhoush.files/course/dm/reading/reading03/deOliveira_tvvcg03.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2023.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO (OCDE). *Manual de Frascati: metodologia proposta para a análise das atividades de pesquisa e desenvolvimento experimental*. São Paulo: IPD Eletron, 2002. Disponível em: https://www.ipdeletron.org.br/wwwroot/pdf-publicacoes/14/Manual_de_Frascati.pdf. Acesso em: 05 ago. 2024.

OSAKI, M. **Conflito no leste europeu completa um mês e setor de fertilizantes segue apreensivo**. 2022. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/opiniao-cepea/conflito-no-leste-europeu-completa-um-mes-e-setor-de-fertilizantes-segue-apreensivo.aspx>>. Acesso em: 09 jan. 2023.

PALO, D. R.; DAGLE, R. A.; HOLLADAY, J. D. Methanol Steam Reforming for Hydrogen Production. **Chemical reviews**, v. 107, n. 10, p. 3992-4021, 2007.

PAKHARE, D.; SPIVEY, J. A review of dry (CO₂) reforming of methane over noble metal catalysts. **Chemical Society Reviews**, v. 43, p. 7813-7837, 2014.

PANTOLEONTOS, G.; KIKKINIDES, E. S.; GEORGIADIS, M. C. A heterogeneous dynamic model for the simulation and optimisation of the steam methane reforming reactor. **International Journal Hydrogen Energy**, v. 37, p. 16346-16358, 2012.

REETZ JR, H. **Fertilizante e seu uso eficiente**. São Paulo: Sage, 2017. Disponível em: <https://www.ufla.br/dcom/wp-content/uploads/2018/03/Fertilizantes-e-seu-uso-eficiente-WEB-Word-Ouubro-2017x-1.pdf>. Acessado em: 04 de julho de 2022.

SAMARGANDI, N.; SOHAG, K. The interaction of finance and innovation for low carbon economy: Evidence from Saudi Arabia. **Energy Strategy Reviews**, v. 41, 100847, 2022.

SAMARGANDI, N.; SOHAG, K. The interaction of finance and innovation for low carbon economy: Evidence from Saudi Arabia. **Energy Strategy Reviews**, v. 41, 100847, 2022.

SAMPAIO, A. M. P. M. **A Política nacional de biocombustíveis e as metas brasileiras no acordo de Paris**: uma proposta de avaliação a partir da legislação. 2022. 107 f. Dissertação (Mestrado em Direito) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN, 2022.

SANTOS, H. V. **Business intelligence aplicado no desenvolvimento de indicadores da manutenção**. Monografia (Curso de Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, 2019. Disponível em:

<https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/2183/6/MONOGRAFIA_BusinessIntelligenceAplicado.pdf>. Acessado em 10 de abril de 2023.

SAE – SECRETARIA ESPECIAL DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS. **Produção Nacional de Fertilizantes**: Estudo Estratégico. Brasília: SAE, 2020. 26p.

SAE – SECRETARIA ESPECIAL DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS. **Plano Nacional de Fertilizantes 2050**: Uma Estratégia para os Fertilizantes no Brasil. Brasília: SAE, 2021. 195p.

SEAB - SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO DO PARANÁ. Pecuária - Comparativo Paraná/Brasil. Departamento de Economia Rural - DERAL, 2023. 9p.

SEAB - SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO DO PARANÁ. Agricultura - Comparativo Paraná/Brasil. Departamento de Economia Rural - DERAL, 2023.

SEAB - SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO DO PARANÁ. Comparativo de área, produção e rendimento de cultura selecionadas, 2023.

SELVAKKUMARAN, S.; AHLGREN, E. O. Impacts of social innovation on local energy transitions: diffusion of solar PV and alternative fuel vehicles in Sweden. **Glob. Transit.**, v. 2, p. 98-115, 2020.

SELVAKKUMARAN, S.; AHLGREN, E. O. Impacts of social innovation on local energy transitions: diffusion of solar PV and alternative fuel vehicles in Sweden. **Glob. Transit.**, v. 2, p. 98-115, 2020.

SONKER, M.; TIWARY, S.; SHREYASH, N.; BAJPAI, S.; RAY, M.; KUMAR KAR, S.; BALATHANIGAIMANI, M. S. Ammonia as an alternative fuel for vehicular applications: Paving the way for adsorbed ammonia and direct ammonia fuel cells. **Journal of Cleaner Production**, v. 376, p. 133960, 2022.

SOUZA, M. M. V. M. **Tecnologia do hidrogênio**. Editora Synergia, Rio de Janeiro-RJ, 2009.

SCHULTZ, E.L.; SOARES, I.P. **Circular Técnica - Reforma do Biogás**. EMBRAPA, Brasília, DF, 2014.

TAVARES, F. V., MONTEIRO, L. P. C., MAINIER, F. B. Indicators of energy in ammonia production plants. **American Journal of Engineering Research (AJER)**. 2013. Volume 2, n. 07, pp. 116-123.

WAGHARE, P.; SATHYABHAMA, A. Performance analysis of ammonia-based vapour absorption refrigeration system. **Materials today: Proceedings**, v. 51, n. 3, p. 1503-1509, 2022.

WALLING, E.; VANEECKHAUTE, C. Greenhouse gas emissions from inorganic and organic fertilizer production and use: A review of emission factors and their variability. **Journal of Environmental Management**, v. 276, p. 111211, 2020.

WANG, Y.; HUANG, J. Pathway to develop a low-carbon economy through energy-substitution technology in China. **Energy**, v. 261, p. 124964, 2022.

WROBEL-DAVEAU, J. C.; NICOLL, G.; TETLEY, M. G.; GRÉSELLE, B.; PEREZ-DIAZ, L.; DAVIES, A.; EGLINGTON, B. M. Plate tectonic modelling and the energy transition. **Earth-Science Reviews**, v. 234, p. 104227, 2022.

YAMAMOTO, E. Y.; SILVA, R. L.; HIGA, M. Performance improvements on energy and exergy basis for an ammonia-water absorption refrigeration system in a coffee industry. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 52, p. 102284, 2022.

YARA BRASIL. Entenda a importância dos fertilizantes para a segurança alimentar e a sustentabilidade do planeta. Outubro, 2023. Disponível em: <<https://www.yarabrasil.com.br/conteudo-agronomico/blog/dia-do-fertilizante-2023/>>. Acessado em: 02 mar. 2024.

YÜZBAŞIOĞLU, A. E.; AVŞAR, C.; GEZERMAN, A. O. The current situation in the use of ammonia as a sustainable energy source and its industrial potential. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry**, v. 5, p. 100307, 2022.

YENTEKAKIS, I. V.; GOULA, G.; HATZISYMEON, M.; BETSI-ARGYROPOULOU, I.; BOTZOLAKI, G.; et al. Effect of support oxygen storage capacity on the catalytic performance of Rh nanoparticles for CO₂ reforming of methane. *Appl. Catal. B Environ.*, v. 243, p. 490-501, 2019.

ZANELLA, L. C. H. **Metodologia de pesquisa**. Florianópolis: UFSC, 2011.

ZHAO, X.; JOSEPH, B.; KUHN, J.; OZCAN, S. Biogas Reforming to Syngas: A Review. **iScience**, v. 23, n. 5, p. 101082, 2020.

ZHOU, H.; BHATTARAI, R.; LI, Y.; SI, B.; DONG, X.; WANG, T.; YAO, Z. Towards sustainable coal industry: Turning coal bottom ash into wealth. **Science of The Total Environment**, v. 804, p. 149985, 2022.