

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

PEDRO AFONSO ZANETTI GONÇALVES FRAGA

CADEIA DO HIDROGÊNIO DE BAIXO CARBONO E SEU POTENCIAL DE
INTERNALIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE VALOR

SÃO CARLOS
2024

PEDRO AFONSO ZANETTI GONÇALVES FRAGA

**CADEIA DO HIDROGÊNIO DE BAIXO CARBONO E SEU POTENCIAL DE
INTERNALIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE VALOR**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientadora: Prof^a Associada Daisy Aparecida do Nascimento Rebelatto

VERSÃO CORRIGIDA

SÃO CARLOS

2024

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Z
811c Zanetti-Gonçalves-Fraga, Pedro Afonso
Cadeia do hidrogênio de baixo carbono e seu
potencial de internalização da geração de valor / Pedro
Afonso Zanetti-Gonçalves-Fraga; orientadora Daisy
Aparecida do Nascimento Rebelatto. São Carlos, 2024.

Monografia (Graduação em Engenharia de
Produção) -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2024.

1. Hidrogênio de Baixo Carbono. 2. Hidrogênio
Renovável. 3. Cadeia de geração valor. 4. Aço verde. 5.
Internalização de Geração de Valor. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Pedro Afonso Zanetti Gonçalves Fraga
Título do TCC: A Cadeia do Hidrogênio de Baixo Carbono e seu Potencial para a Internalização da Geração de valor
Data de defesa: 21/06/2024

Comissão Julgadora	Resultado
Profesora Doutora Daisy Aparecida do Nascimento Rebelatto (orientador)	<i>Aprovado</i>
Instituição: EESC - SEP	
Pesquisador Guilherme Augusto Roiz	<i>Aprovado</i>
Instituição: EESC - SEP	
Professora EBTT D3II Fabianne Roberta de Araujo	<i>Aprovado</i>
Instituição: IFSP - Gestão	

Presidente da Banca: **Profesora Doutora Daisy Aparecida do Nascimento
Rebelatto**

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Maria José e Claudio, pela dedicação imensurável, pelas palavras duras e pelas calorosas; e por me ofertarem o mais belo presente que recebi em toda minha vida: a educação.

A Amanda, por seu incansável apoio, por me ensinar resiliência, compaixão e cumplicidade. *Ad aeternum* a escolha de caminhar lado a lado.

Aos meus irmãos, Ana Lisete e Claudio, por dividirem comigo a estranha sensação de crescer e conhecer o mundo.

Aos demais familiares, aos que sempre tive, por serem minha base; e aos que ganhei no caminho, pelo acolhimento em palavras e momentos.

Aos meus amigos de turma, uma agradável surpresa deste caminho, por terem tornado os dias mais brandos e prazerosos e as dificuldades transpassáveis.

Aos meus companheiros de república, por me acolherem e encorajarem, pela parceria nos dias bons e nos ruins; e por compartilharem a singular experiência de ser Bob Nelson.

RESUMO

FRAGA, P. Cadeia do hidrogênio de baixo carbono e seu potencial de internalização da geração de valor. 2024. 811c. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Diante do atual cenário de alerta com as mudanças climáticas, instituições intergovernamentais, públicas e privadas buscam soluções para reduzir os impactos das atividades humanas frente ao aquecimento global. Neste contexto, o hidrogênio de baixo carbono emerge como um importante tema da transição energética, pelo seu potencial de descarbonizar, de forma significativa, cadeias produtivas extremamente poluentes e integrar fontes de geração renovável de energia.

Este trabalho tem como objetivo apresentar a cadeia de valor do hidrogênio de baixo carbono e avaliar seu potencial de internalização da geração de valor no cenário brasileiro. A apresentação da cadeia será realizada por meio do detalhamento dos processos produtivos, das formas de armazenamento, transporte, distribuição e do consumo final, com foco em destacar as oportunidades de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) em diversos setores. Além disso, esse estudo contempla a definição e comparação de dois cenários com diferentes destinações para a produção do hidrogênio renovável; no *primeiro*, avalia-se exportação de produtos (como o hidrogênio) sem beneficiamento industrial; no *segundo*, avalia-se a cadeia focada no abastecimento interno para posterior exportação de produtos com maior valor agregado (como o aço verde).

Palavras-chave: Hidrogênio de Baixo Carbono. Hidrogênio Renovável. Cadeia de geração valor. Aço verde. Internalização de Geração de Valor.

ABSTRACT

SOBRENOME, N. P. Low-carbon hydrogen chain and its potential for internalizing value creation. 2024. 811c. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Given the current climate change alert scenario, intergovernmental, public, and private institutions are seeking solutions to reduce the impacts of human activities on global warming. In this context, low-carbon hydrogen emerges as an important theme in the energy transition due to its potential to significantly decarbonize highly polluting production chains and integrate renewable energy sources.

This work aims to present the low-carbon hydrogen value chain and study its potential for internalizing value creation in the Brazilian context. The presentation of the chain will be carried out through detailing the production processes, ways of storage, transportation, distribution, and final consumption, with a focus on highlighting opportunities for reducing greenhouse gas (GHG) emissions in various sectors. Furthermore, this study includes the definition and comparison of two scenarios with different destinations for renewable hydrogen production: the first evaluates the export of products (such as hydrogen) without industrial processing; the second evaluates the chain focused on internal supply for subsequent export of higher value-added products (such as green steel).

Keywords: Low-Carbon Hydrogen. Renewable Hydrogen. Value Creation Chain. Green Steel. Internalization of Value Creation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Cadeia de valor do Hidrogênio Renovável	22
Figura 2: Classificações do processo produtivos do hidrogênio	23
Figura 3: Diagrama de possibilidades de obtenção do hidrogênio	24
Figura 4: Representação da reforma a vapor com remoção de CO ₂ por solventes	25
Figura 5: Histórico de investimento de capital de risco em startups de energia em áreas relacionadas ao hidrogênio, para negócios em <i>early stage e late stage</i> , 2010-2023	37
Figura 6: Representação gráfica da construção dos cenários 1 e 2	44
Figura 7: Projeção do preço do hidrogênio, 2021-2040	48
Figura 8: Custos de <i>Opex</i> BF-BOF versus H ² DRI-EAF	54
Figura 9: Janela de configuração da ferramenta Atingir Meta	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Políticas e Metas de Hidrogênio no mundo.....	35
Tabela 2: Estimativa do potencial técnico brasileiro de produção de hidrogênio a partir do saldo de recursos energéticos até 2050.....	46
Tabela 3: Estimativa do potencial técnico brasileiro de produção de hidrogênio.....	47
Tabela 4: Preço do hidrogênio, 2021-2050.	49
Tabela 5: Projeções de crescimento da produção e comercialização do minério de ferro.	50
Tabela 6: Projeções de produção do minério de ferro brasileiro.	50
Tabela 7: Preço histórico do Minério de Ferro, 1997-2023.	52
Tabela 8: Previsão de preço do minério de ferro, 2023-2050.	53
Tabela 9: Estimativa de preço do aço verde, 2023-2050.....	55
Tabela 10: Principais valores de consumo típico do processo DRI.	57
Tabela 11: Produção máxima de aço verde com base na capacidade da indústria, disponibilidade e proporção dos insumos isolados.	59
Tabela 12: Produção máxima de aço verde com base na capacidade instalada e disponibilidade e proporção dos insumos.	60
Tabela 13: Quantidades de H ² R e Minério de Ferro utilizados nos Cenários 1 e 2.	61
Tabela 14: Valor de exportação do aço verde, minério de ferro e hidrogênio de baixo carbono.	63
Tabela 15: Comparação dos Cenários 1 e 2.	64
Tabela 16: Estimativa do potencial técnico brasileiro de produção de hidrogênio anualizado.....	77
Tabela 17: Histórico de Valores do IPA-DI.	79
Tabela 18: Previsão de Valores do IPA DI, 2024-2050.	80

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1 Cadeia de Valor do Hidrogênio	22
2.1.1 Produção de hidrogênio	22
2.1.2 Armazenamento, Transporte e Distribuição do Hidrogênio.....	28
2.1.3 Consumo Final de Hidrogênio.....	29
2.2 Dados do mercado de hidrogênio	34
2.3 Rotas do Hidrogênio Renovável Brasileiro	42
3. MÉTODO	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
4.1 Hidrogênio de Baixo Carbono.....	46
4.1.1 Produção	46
4.1.2 Preço	48
4.2 Minério de Ferro	50
4.2.1 Produção	50
4.2.2 Preço	51
4.3 Aço verde.....	53
4.3.1 Preço	53
4.3.2 Produção	56
4.4 Comparação de cenários	61
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
Apêndice A – Fórmulas e Ferramentas	74
Apêndice B – Memória de Cálculo para Taxa de Crescimento da Produção do Hidrogênio ..	77
Apêndice C – Projeção do índice de inflação IPA-DI.....	79

Apêndice D – Memória de cálculo da equação do preço do aço verde em função do preço do hidrogênio de baixo carbono	81
--	----

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Serviço de Mudanças Climáticas Copernicus da União Europeia (C3S), 2023 foi o ano mais quente nos registos de temperatura global desde 1850, estando, em média, 1,48°C mais quente que no período pré-industrial (1850-1900), quando grandes quantidades de dióxido de carbono foram lançadas na atmosfera devido a queima de combustíveis fósseis de forma desenfreada (COPERNICUS, 2024).

Ainda, de acordo com o relatório publicado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), as temperaturas globais devem bater novos recordes nos próximos cinco anos, com 80% de probabilidade de que a temperatura média global anual exceda temporariamente em 1,5°C os níveis pré-industriais durante pelo menos um dos próximos cinco anos (ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL, 2023). A crescente probabilidade é motivada por conta dos gases que causam o efeito estufa (GEE) e do fenômeno do *El Niño*.

O limite de 1,5°C para o aumento da temperatura média global foi estabelecido no Acordo de Paris, em 2015, e representa um ponto de inflexão das mudanças climáticas, para além do qual aumentariam as consequências graves para o planeta, como calor extremo, inundações, secas, incêndios florestais e escassez de alimentos e água se tornando mais comuns e desfavoráveis para a manutenção da vida humana. O relatório da Copernicus (2024) aponta que a marca já foi ultrapassada em quase 50% do ano de 2023, gerando uma série de impactos climáticos e condições meteorológicas extremas.

Para corroborar com a manutenção de uma temperatura média global em níveis aceitáveis, organizações mundiais, governos, empresas e indivíduos dedicam esforços para encontrar soluções que freiem o aquecimento global. Um dos principais meios de se evitar que o planeta atinja esse estado irreversível é a redução das emissões de gases poluentes, responsáveis pelo efeito estufa (GEE).

Com isso, inúmeras tecnologias, combustíveis e modelos de negócios sustentáveis estão sendo desenvolvidos com o objetivo de redução desses gases. Convenções e órgãos internacionais apontam essa necessidade há décadas e buscam estabelecer diretrizes que reforcem o objetivo. Nesse contexto, destaca-se a Conferência das Partes (COP), realizada pela *UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change)*, desde 1994, que busca prevenir intervenções humanas perigosas no sistema climático (UNFCCC, 2023a).

Durante a COP 21, em 2015, 195 países firmaram um acordo com o objetivo de fortalecer a resposta global à ameaça da mudança climática e aumentar a capacidade dos países de lidar com seus impactos. O acordo visa reduzir as emissões de (GEE) no contexto

do desenvolvimento sustentável e reafirmar o limite do aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (UNFCCC, 2023b).

Para o alcance dos objetivos, cada governo se envolveu na construção de seus próprios compromissos, através das *iNDCs* (*Intended Nationally Determined Contributions*), ou Pretendidas Contribuições Nacionalmente Determinadas. A partir das iNDCs, cada nação apresentou sua contribuição de redução de emissões dos gases de efeito estufa, seguindo premissas de viabilidade de acordo com o cenário socio-econômico do país.

Além disso, a Organização das Nações Unidas (ONU) definiu diretrizes globais para combater as mudanças climáticas, estabelecendo os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) nos 193 países membros. Esses objetivos abordam questões essenciais para a humanidade como, por exemplo, a erradicação da pobreza (Objetivo Nº 1) e o combate à fome (Objetivo Nº 2). Cada objetivo possui metas específicas a serem alcançadas até 2030, totalizando 169 metas para os 17 objetivos (UNITED NATIONS, 2023). Relacionados ao tema deste trabalho, destaca-se os ODS 7 e 13.

O ODS 7, “Energia limpa e acessível”, visa garantir o acesso a uma energia acessível, segura, sustentável e moderna para todos. Segundo o relatório “Tracking SDG 7: The Energy Progress Report” (2023), há 675 milhões de pessoas que vivem sem eletricidade em todo o mundo. O estudo é realizado pelas cinco organizações responsáveis por este ODS: A Agência Internacional de Energia, a Agência Internacional de Energia Renovável, a Divisão de Estatística das Nações Unidas, o Banco Mundial (BM) e a Organização Mundial da Saúde (OMS). O ODS 7 possui os seguintes objetivos para o ano de 2030:

- Garantir o acesso universal a serviços energéticos acessíveis, confiáveis e modernos;
- Aumentar a proporção de energia renovável no conjunto das fontes de energia;
- Aumentar a cooperação internacional para facilitar o acesso à pesquisa e à tecnologia relativas à energia limpa;
- Ampliar a infraestrutura e melhorar a tecnologia para prestar serviços de energia modernos e sustentáveis para todos.

Já o ODS 13, “Combate às mudanças climáticas”, foca na necessidade de adotar medidas urgentes para acabar com as mudanças climáticas que afetam todos os países. As atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis, o desmatamento, a perda de florestas ou as atividades agrícolas e pecuárias que usam fertilizantes e outros produtos

químicos, têm sido os principais causadores das mudanças climáticas. Além disso, de acordo com a Organização Mundial da Saúde (2021), espera-se que as mudanças climáticas causem mais 250.000 mortes por ano entre 2030 e 2050. Atualmente, a poluição e as substâncias tóxicas causam pelo menos nove milhões de mortes prematuras por ano em todo o mundo. O ODS 13 possuem as seguintes metas para o ano de 2030:

- Fortalecer a resiliência e a capacidade de adaptação aos riscos relacionados ao clima e aos desastres naturais em todos os países.
- Incluir medidas relativas às mudanças climáticas nas políticas, estratégias e planos nacionais.
- Melhorar a educação, a conscientização e a capacidade humana e institucional sobre as mudanças climáticas, a redução de seus efeitos e o alerta precoce.
- Promover mecanismos para aumentar a capacidade de planejamento e de gestão eficaz em relação às mudanças climáticas nos países menos desenvolvidos.

Diante de todo este cenário de alerta com as mudanças climáticas, reiterado pelas pressões internacionais, o hidrogênio emerge como tema central na transição energética, definida como um conjunto de mudanças estruturais para transformar uma matriz energética focada em combustíveis fósseis, seja ela nacional ou global, numa matriz com baixa ou zero emissões de carbono. Segundo a Agência Internacional de Energia (2019), a relevância do hidrogênio se dá pelo seu potencial de descarbonizar, de forma significativa, cadeias produtivas extremamente poluentes e integrar fontes de geração renovável de energia.

A colaboração internacional é vital para superar os desafios tecnológicos e econômicos associados ao hidrogênio de baixo carbono, e governos e indústrias ao redor do mundo precisam trabalhar juntos para desenvolver políticas e incentivos que promovam a adoção do hidrogênio como parte integral da transição energética (STAFFELL et al., 2019).

Este trabalho tem como objetivo **apresentar a cadeia de valor do hidrogênio de baixo carbono e avaliar seu potencial de internalização da geração de valor no cenário brasileiro**. Este estudo será realizado a partir da definição e comparação de dois cenários com diferentes destinações para a produção do hidrogênio renovável; no *primeiro*, avalia-se exportação de produtos (como o hidrogênio) sem beneficiamento industrial; no *segundo*, avalia-se a cadeia focada no abastecimento interno para posterior exportação de produtos com maior valor agregado (como o aço verde).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo Moreira e Neto (2007), o hidrogênio é encontrado quase sempre associado a outros elementos químicos e, para utilizá-lo, é necessário extraí-lo de sua fonte original. O hidrogênio produzido contém grande parte da energia química, térmica e/ou elétrica empregada em sua geração, a qual poderá ser recuperada praticamente em sua totalidade por meio de processos adequados.

Dentre todos os combustíveis, o hidrogênio é o que possui maior poder calorífico, ou seja, maior quantidade de energia por unidade de massa, cerca de três vezes maior quando comparado com combustíveis derivados do petróleo. Sua principal vantagem é que as reações químicas, que o convertem em energia dependendo do processo empregado, produzem somente água como produto final, tornando-o essencial no desafio da transição energética. Além do alto poder calorífico, outras vantagens são não ser tóxico e ser bastante reativo (NETO; MOREIRA, 2007).

O protagonismo do hidrogênio numa economia de baixo carbono é percebido por três principais motivos, o primeiro é que existem meios de se produzir hidrogênio de baixo carbono. Os outros dois motivos estão relacionados a suas aplicações. O hidrogênio serve como vetor energético, ou seja, pode ser armazenado (por longos períodos sem perda de carga) e transportado, favorecendo o comércio e a distribuição de energia. Além da possibilidade de armazenamento, o hidrogênio colabora na transição para fontes renováveis, uma vez que consegue integrar energias renováveis na geração de energia, descarbonizar setores com alta emissão de carbono, como transporte e indústria, além de ser uma matéria-prima limpa para diversos processos industriais (HYDROGEN COUNCIL, 2021).

A flexibilidade do hidrogênio como vetor energético facilita a integração de energias renováveis, como solar e eólica, ao sistema energético, ajudando a superar a intermitência dessas fontes (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019). Isto é importante para alcançar uma matriz energética estável e confiável, essencial para o desenvolvimento econômico sustentável e a segurança energética global.

Por outro lado, as tecnologias atuais para o uso do hidrogênio energético não lhe conferem competitividade frente aos energéticos concorrentes. Além disso, não existe ainda uma infraestrutura que comtemple, do ponto de vista comercial, a produção, armazenamento, transporte, distribuição e consumo do hidrogênio energético. Em outras palavras, todos os elos da cadeia do hidrogênio possuem barreiras a serem superadas, para que o setor se

consolide como uma das alavancas da transição energética. Por isso, o investimento e desenvolvimento de uma cadeia de suprimentos robusta para o hidrogênio é crucial e pode reduzir os custos associados e tornar o hidrogênio competitivo com os combustíveis fósseis tradicionais (HYDROGEN COUNCIL, 2021).

Para o entendimento da cadeia de valor de hidrogênio de baixo carbono, deve-se entender três principais fatores que são de extrema relevância para a consolidação de uma nova cadeia energética. Estes três fatores, atualmente, representam as principais barreiras para o desenvolvimento da cadeia em escala comercial.

- *Off take* ou Retirada: Para que uma nova cadeia se forme, é necessário que haja uma demanda para o produto em questão. A medida que novas tecnologias são desenvolvidas e novas plantas de produção de hidrogênio são implementadas, é preciso que haja arranjos contratuais com as partes interessadas na compra destas moléculas, garantindo que todo o volume produzido tenha a devida remuneração, e consequentemente, que os investimentos aplicados para a produção da molécula sejam viáveis financeiramente.
- Escala: As tecnologias aplicadas para a fabricação e uso do hidrogênio renovável ainda possuem preços elevados, que tornam o combustível pouco competitivo frente a outras fontes energéticas. Por isso, é necessário que tenhamos processos em vigor que ajudem a escalar essas indústrias, visto que a escala é o principal fator para redução de custos de um novo processo, equipamento ou produto final.
- Políticas: As políticas públicas são cruciais para garantir agilidade no desenvolvimento da economia do hidrogênio. Políticas, neste contexto, não se restringe a apoios diretos com subsídios, engloba também certificações e autorizações para a instalação de novas infraestruturas necessárias. Além de ser um fator decisivo para estímulo do desenvolvimento da cadeia interna do hidrogênio, as políticas requerem uma atuação global conjunta, para que se tenha um alinhamento internacional dos principais aspectos do hidrogênio. Para se exportar moléculas de hidrogênio para a Europa, por exemplo, é preciso haver um entendimento mútuo que atesta que se tratam de moléculas com baixas emissões de carbono, além da necessidade de uma precificação unificada, global.

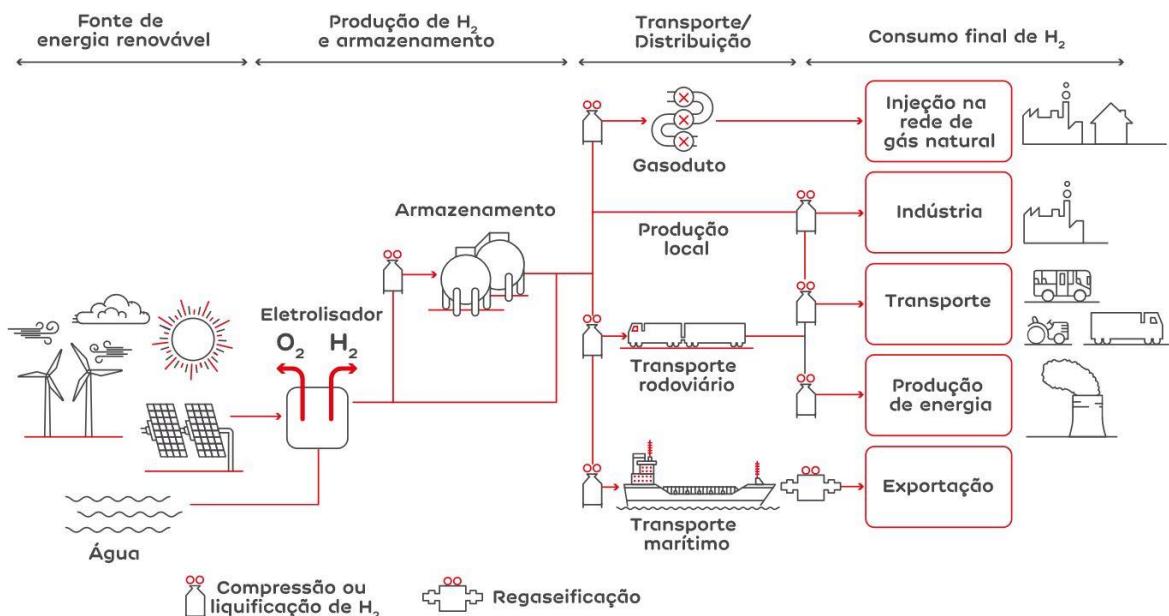
Dito isso, busca-se entender qual o cenário e as principais tecnologias envolvidas em cada elo da cadeia.

2.1 Cadeia de Valor do Hidrogênio

A cadeia de produção do hidrogênio renovável apresenta uma série de procedimentos interconectados que englobam a geração, produção, armazenamento, transporte e a utilização deste recurso energético, conforme ilustra a

Figura 1.

Figura 1: Cadeia de valor do Hidrogênio Renovável.



Fonte: EDP (2024), adaptado de Siemens Energy (2021).

A seguir, descreve-se a geração a partir de fonte renováveis, o armazenamento, transporte e distribuição e consumo final.

2.1.1 Produção de hidrogênio

Na Figura 1, a produção do hidrogênio é representada pela eletrólise, uma das principais fontes de produção de hidrogênio renovável. O hidrogênio proveniente da eletrólise é chamado popularmente de hidrogênio verde, assim como outros processos também são nomeados por uma escala de cores do hidrogênio, relacionando a forma de obtenção com a

pegada de carbono existente no processo produtivo. Ainda não existe um consenso no que se refere à esta categorização, no entanto, algumas classificações estão sendo amplamente divulgadas por instituições como IEA, EPE, *Hydrogen Council*, entre outras, podendo ser resumidas conforme classificação da Figura 2.

Figura 2: Classificações do processo produtivos do hidrogênio.

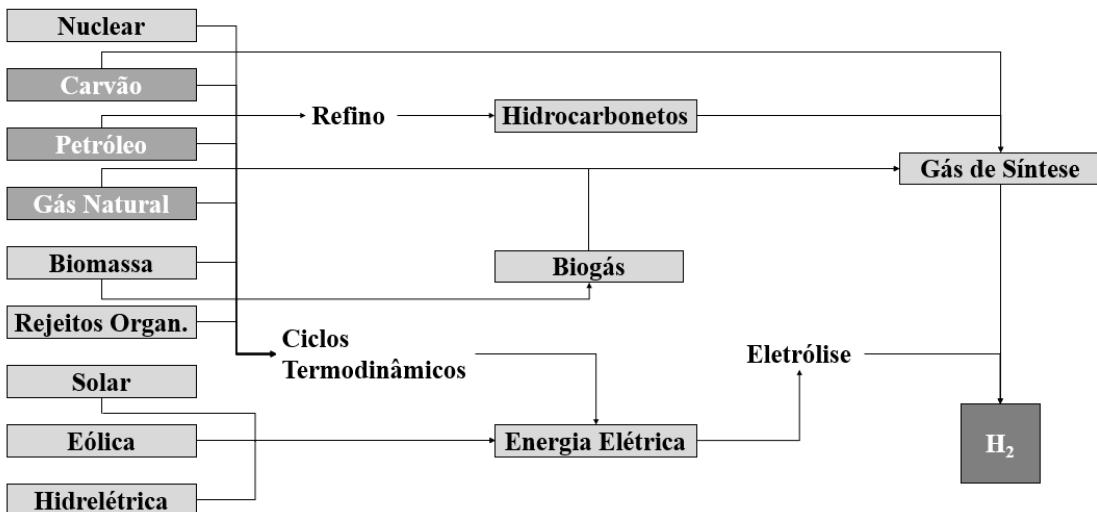
Cor	Resumo do processo de produção do hidrogênio
Preto	Gaseificação do carvão mineral (antracito) sem CCUS
Marrom	Gaseificação do carvão mineral (Lignito/Linhito/Hulha) sem CCUS
Cinza	Reforma a vapor do gás natural sem CCUS
Azul	Reforma a vapor do gás natural com CCUS
Turquesa	Pirólise do metano sem geração de CO ₂
Verde	Eletrólise da água com energias de fontes renováveis (eólica/solar)
Musgo	Reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS
Rosa	Energia nuclear como fonte
Amarelo	Energia da rede elétrica, composta por diversas fontes
Branco	Extração do hidrogênio natural ou geológico

Fonte: EPE (2021).

No contexto da transição energética, muitas vezes, o hidrogênio verde é usado para referenciar o hidrogênio renovável, ou hidrogênio de baixo carbono, de forma errônea. Visto que o conceito de hidrogênio verde se refere a apenas uma forma sustentável de produção da molécula (EPE, 2021). Este uso errôneo do termo hidrogênio verde pode ser visto como uma tentativa de impor tecnologias específicas em detrimento das especificações e certificações relacionadas ao hidrogênio de baixo carbono. Isto pode, por exemplo, desconsiderar o processo de gaseificação da biomassa, ou outros processos acoplados com tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCUS – “Carbon Capture, Utilisation and Storage”) como alternativas sustentáveis, com baixas ou nenhuma emissão de carbono. Desta forma, serão empregados os termos “hidrogênio renovável” ou “hidrogênio de baixo carbono” para as moléculas de H₂ obtidas em processos sustentáveis.

Existem diferentes métodos de obtenção de moléculas de H₂, que possuem diferentes insumos, fontes de energia, processos e resultados. A Figura 3 apresenta um diagrama com todas as possibilidades de obtenção do hidrogênio.

Figura 3: Diagrama de possibilidades de obtenção do hidrogênio.



Fonte: Adaptado de Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio (EPE, 2021).

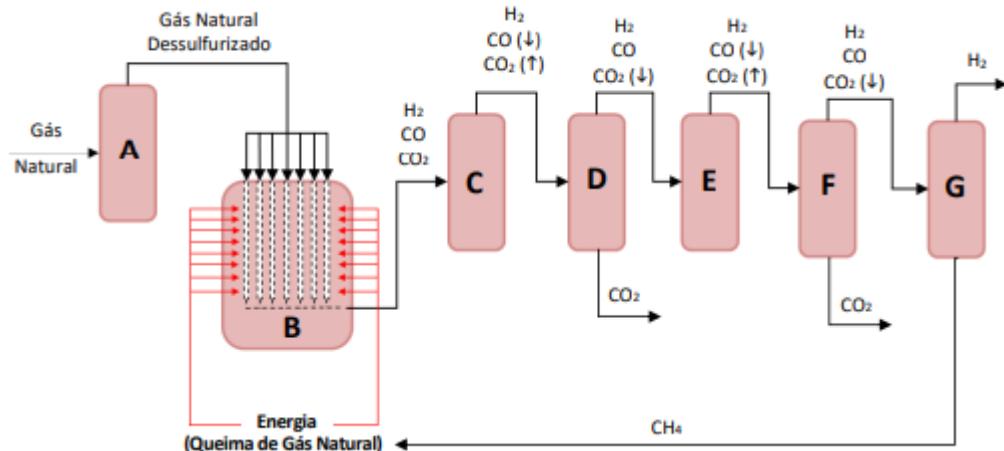
Na Figura 3, os processos destacados, que se utilizam de Carvão, Petróleo ou Gás Natural, estão associados a emissões de CO₂, caso desconsiderado o uso de metodologias de captura, uso e armazenamento de carbono (EPE, 2021). Os principais métodos de produção do hidrogênio renovável são a partir da Reforma do Gás Natural, Gaseificação da Biomassa e Eletrólise da Água, os quais serão descritos a seguir.

2.1.1.1 Reforma do Gás Natural

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022), o processo de produção do hidrogênio a partir da reforma a vapor envolve as seguintes etapas:

- Preparação do gás para consumo na planta, eliminando contaminantes ou hidrocarbonetos mais pesados;
- Produção da mistura CO + H₂ (gás de síntese); e
- Remoção do CO e CO₂ para obtenção de uma corrente de alta pureza de hidrogênio.

Figura 4: Representação da reforma a vapor com remoção de CO₂ por solventes.



Fonte: EPE (2022).

Notas: (A): Dessulfurizador (B): Reformador (C): Conversor de shift (primeiro estágio) (D): Absorvedor de CO₂ (primeiro estágio) (E): Conversor de shift (segundo estágio) (F): Absorvedor de CO₂ (segundo estágio) (G): Metanador (↓): Redução da concentração (↑): Aumento da concentração.

Conforme representado na Figura 4, o gás natural a ser utilizado no processo é purificado (A), através de reações entre a carga de gás natural e hidrogênio a alta pressão, permitindo a remoção do enxofre na forma de H₂S e impedindo o envenenamento dos catalisadores. Em seguida, reformado (B), a etapa consiste na conversão dos hidrocarbonetos mais pesados presentes no gás natural (C₂ a C₅) em CH₄, H₂, CO₂ e H₂O, que servirão de insumo para a produção de H₂.

Dentro dos tubos aquecidos, o metano e o monóxido de carbono, com auxílio de catalisadores, formarão hidrogênio e dióxido de carbono, esta etapa representam 90% a 92% de todo o H₂ gerado no processo. Os gases produzidos são então enviados para as etapas de conversão adicionais, nas quais são produzidos volumes adicionais de H₂ a partir da conversão do CO a CO₂ para posterior remoção. Em seguida esta corrente é enviada para mais uma etapa de conversão final com o intuito de converter o CO e o CO₂ residuais a CH₄, que é retornado para ser queimado e fornecer energia ao sistema. Ao final destas etapas, obtém-se o hidrogênio de alta pureza.

Além deste, existem outros métodos a partir do gás natural, menos utilizados, como a Reforma Autotérmica, Reforma com CO₂, Reatores a membrana e Conversão direta do gás

natural. Esses outros métodos apresentam alguma desvantagem frente ao método apresentado, que inviabilizam seu uso, tornando a Reforma do Gás Natural o principal método de produção do H₂ a partir do gás natural (EPE, 2022).

2.1.1.2 Gaseificação da Biomassa

A biomassa foi definida, durante a Convenção sobre a alteração climática no enquadramento das Nações Unidas (“United Nations Framework Convention on Climate Change”) (UNFCCC, 2005), como sendo:

Material orgânico não fossilizado e biodegradável, que teve como origem plantas, animais ou microrganismos. Também deve incluir produtos, produtos derivados, resíduos ou desperdício provenientes da agricultura, floresta e indústrias relacionadas, bem como frações orgânicas não fossilizadas e biodegradáveis de desperdício industrial e municipal.

De toda a biomassa existente apenas 5% pode ser potencialmente recolhida para a produção de energia. No entanto, esta quantidade é suficiente para conseguir produzir cerca de 26% da necessidade energética mundial (IFP, 2007).

Segundo Pinho et al. (2011), a gaseificação é um processo químico que converte materiais carbonosos, como a biomassa, em combustíveis gasosos ou compostos químicos que podem ser usados na produção de outros tipos de combustíveis. O processo requer a utilização de um agente gaseificante que pode ser gasoso ou vapor supercrítico. Esta apenas converte uma potencial forma de combustível em outra, a fim de:

- Aumentar poder calorífico do combustível, rejeitando componentes não combustíveis;
- Remover enxofre e azoto para não serem liberados na atmosfera durante a queima do combustível;
- Reduzir a razão mássica Carbono – Hidrogênio.

A gaseificação envolve as seguintes etapas:

- Pré-aquecimento e secagem;
- Pirólise;
- Gaseificação do carbonizado “char”;
- Combustão.

Na primeira etapa, a biomassa é aquecida até que sua umidade reduza significativamente, visto que a biomassa pode chegar a ter mais de 90% de umidade. A última secagem da biomassa ocorre quando esta é introduzida no gaseificador. Após isso, o material passa para a etapa da pirólise (transformação por aquecimento de uma mistura ou composto orgânico em outras substâncias), na qual não é adicionado qualquer agente externo, ocorrendo a quebra de hidrocarbonetos complexos em moléculas gasosas de menores dimensões. Quando a pirólise é realizada de forma lenta, o produto sólido formado apresenta uma composição próxima do carbono puro, havendo maior formação de “char”. A etapa que ocorre após a pirólise, chamada de Gaseificação e Combustão do “char”, envolve a reação entre os hidrocarbonetos, presentes no combustível, com vapor, CO₂, O₂ e H₂ presentes no reator. Entre todas as reações, a mais relevante diz respeito ao “char”, que é composto quase na totalidade por carbono, apresentando pequenas quantidades de hidrogênio e oxigênio. A gaseificação envolve várias reações que dependem do tipo de agente gaseificante presente, geralmente vapor d’água. Como a maioria das reações de gaseificação do “char” são endotérmicas, é necessário que uma pequena parte do “char” queime de forma a fornecer energia para que etapas como aquecimento, a secagem e a pirólise possam ocorrer no gaseificador. O dióxido de carbono gerado na gaseificação pode ser submetido a ciclos de reforma de vapor, produzindo CO e H₂ novamente, ou então submetidos a estratégias de captura e armazenamento de carbono (CCUS – “Carbon Capture, Utilisation and Storage”).

Embora a gaseificação da biomassa seja mais sustentável que a produção a partir do gás natural, o método ainda está em desenvolvimento e apresenta desafios em termo de disponibilidade de biomassa em larga escala, maturidade da cadeia produtiva e eficiência energética, assim como a consolidação de tecnologias de CCUS, que garantam a baixa pegada de carbono do processo (PINHO; SILVA; RIBEIRO, 2011).

2.1.1.3 Eletrólise da Água

O processo da eletrólise é uma reação química desencadeada a partir de uma fonte de energia externa ao sistema químico, o fornecimento de tensão e corrente contínua é efetuado entre os eletrodos do eletrolisador, separados por um eletrólito com boa condutividade iônica. A eletrólise quebra a molécula da água em hidrogênio e oxigênio, e quando empregado com uso de fontes renováveis de energia, é considerado o processo de fabricação do hidrogênio mais limpo (NETO; MOREIRA, 2007).

2.1.2 Armazenamento, Transporte e Distribuição do Hidrogênio

O hidrogênio como vetor energético vem sendo cada vez mais estudado para o desenvolvimento econômico sustentável, por conta de seu potencial de armazenar e transportar energia.

Segundo estudo realizado pela FGV Energia (2023), o hidrogênio pode ser armazenado e transportado em três diferentes estados, sendo eles o gasoso, o líquido criogênico (baixíssimas temperaturas) e através de compostos intermediários. A forma mais comum de se armazenar, transportar e utilizar o hidrogênio é em estado gasoso, com o armazenamento feito em reservatórios de alta pressão e transporte por meios convencionais, como rodovias, ou através de gasodutos. O hidrogênio em estado gasoso possui baixa densidade, o que representa uma desvantagem, visto que a quantidade de energia por unidade de massa é reduzida. Em relação aos gasodutos, a tecnologia atual é aplicável, e os únicos problemas potenciais advém da estanquidade das vedações, uma vez que a difusibilidade do hidrogênio é maior que a do gás natural. O método de armazenamento e transporte de hidrogênio em líquido criogênico é realizado em containers criogênicos, com formato e construção dependentes da capacidade e pressão de trabalho. O hidrogênio, quando liquefeito, pode ter densidade energética até 70 vezes maior, quando comparado com o estado gasoso. Porém, este método, conforme considera-se a energia gasta no processo de liquefação, os custos dos containers e a perda de gás por evaporação (entre 0,5% e 1%), não se mostra eficiente para transporte em pequenas distâncias. Ou seja, é mais empregado para longas distâncias, evitando o desperdício potencial de um vazamento de hidrogênio gasoso.

Ainda segundo a FGV Energia (2023), outra forma de armazenar e transportar hidrogênio é através dos carreadores orgânicos líquidos de hidrogênio, ou *Liquid Organic Hydrogen Carriers* (LOHC), em inglês, que são caracterizados por serem compostos orgânicos capazes de armazenar hidrogênio em sua estrutura molecular e liberá-lo quando necessário. Esses compostos são geralmente hidrocarbonetos ou outras moléculas orgânicas que podem ser quimicamente modificadas para absorver e liberar hidrogênio. Como vantagem, esses podem ser armazenados e transportados em forma líquida em condições próximas à pressão e temperatura ambiente. A amônia possui densidade de energia por volume mais alta do que o H₂ líquido, e pode ser armazenada e transportada como líquido a cerca de -33°C a 1 bar, ou a temperatura ambiente a pressões entre 5 e 15 bar. Deste modo, a

amônia pode ser transportada a baixo custo por dutos, navios, caminhões e outros meios de transporte a granel. A ressalva é que a síntese da amônia e sua subsequente desidrogenação para liberar hidrogênio demandam significativo consumo de energia. Semelhante à amônia, o metanol apresenta riscos substanciais à saúde e segurança devido à sua toxicidade e inflamabilidade. Sua vantagem como carregador de hidrogênio se deve ao fato de ser um composto, líquido a temperatura e pressão ambiente, que apresenta maior densidade volumétrica que o hidrogênio líquido e a amônia, emergindo assim como uma alternativa altamente viável para o armazenamento e transporte eficientes (DNV, 2022).

2.1.3 Consumo Final de Hidrogênio

Atualmente, o hidrogênio já possui diversas aplicações em diferentes segmentos da economia, entretanto, quase toda a demanda atual é suprida por moléculas de hidrogênio produzidas por fontes emissoras. A medida que métodos limpos de produção se desenvolvem e ganham escala, cresce a demanda de hidrogênio. Isso se da pela forte tendência de descarbonização de setores com grandes emissões, tanto em aplicações já estabelecidas, como em novas aplicações, visto que os segmentos que já empregam o hidrogênio como insumo são segmentos poluentes (IEA, 2023). Para estudo do cenário atual e projeções de produção e consumo do hidrogênio, busca-se entender as aplicações já estabelecidas e as com grande potencial de uso.

2.1.3.1 Produção de Fertilizantes e Amônia

A amônia (NH_3) é produzida pela reação de hidrogênio (H_2) e nitrogênio (N_2), no processo Haber-Bosch, em que o gás natural é reformado para produzir hidrogênio. A molécula é então combinada com o nitrogênio em condições de alta pressão e temperatura para formar amônia. A amônia possui uma ampla gama de aplicações além da sua notória utilização na produção de fertilizantes. Ela desempenha um papel crucial em sistemas de refrigeração, na fabricação de explosivos, em diversos produtos farmacêuticos e também na indústria têxtil (GIZ, 2021).

O processo de produção de amônia, de maneira geral, é poluente, pois utiliza gás natural e carvão como principais matérias-primas para geração do hidrogênio aplicado no processo. Essa poluição corresponde a 1,8% das emissões globais anuais, de acordo com GIZ (2021). Por consequência, o gás natural também é um elemento constituinte da cadeia de

produção dos fertilizantes, pois é utilizado na produção de amônia.

Os fertilizantes possuem alta importância para as atividades agrícolas, tendo em vista a sua utilização no aumento da produtividade e na redução da degradação do solo (GIZ, 2021). Em 2021, a indústria mundial da amônia demandou cerca de 34 milhões de toneladas de hidrogênio para satisfazer sua produção (IEA, 2022). Atualmente, a indústria produtora de fertilizantes é a segunda maior consumidora de hidrogênio do mundo (CNI, 2022).

A alta demanda é explicada pela própria composição do fertilizante que, dentre alguns elementos de fabricação, utiliza nitrogênio, amônia e ureia, químicos que utilizam hidrogênio em suas respectivas cadeias produtivas.

2.1.3.2 Produção de metanol

O metanol (CH_3OH) é outro importante composto químico aplicado em diversos setores industriais, apresenta diversas aplicabilidades e usos. Ao ser convertido em formaldeído (HCHO), por exemplo, ele torna-se parte constitutiva do processo de produção de plásticos, tintas e adesivos. Ademais, o metanol também pode ser utilizado na indústria alimentícia e de cosméticos como solvente, garantindo uma amplitude de usos para esse produto químico.

A produção de metanol pode ser dividida em duas fases. A primeira consiste na formação do gás de síntese que é constituído de uma mistura básica de monóxido de carbono (CO) com hidrogênio (H_2), sendo produzido, principalmente, pelo gás natural. Em sua segunda etapa, o gás de síntese é usado para produzir metanol em um processo catalítico, sendo que esse processo ocorre em condições de altas temperaturas e com uso de catalisadores (CNI, 2022).

Dessa forma, o hidrogênio é um importante componente no processo de geração de metanol industrial. Em 2021, a cadeia produtiva do metanol demandou cerca de 15 milhões de toneladas de hidrogênio (IEA, 2022), o que representa um consumo significativo em termos globais.

No entanto, o metanol, quando gerado a partir de uma cadeia produtiva que envolve matérias-primas fósseis e não renováveis, está associado a um processo produtivo que envolve a emissão de gases de efeito estufa.

Alternativamente, as indústrias produtoras de metanol vêm desenvolvendo estudos e pesquisas que visam descarbonizar seu processo produtivo, a partir da utilização de hidrogênio renovável na geração de metanol. Dessa forma, a produção de metanol a partir de hidrogênio

renovável apresenta a vantagem de não exigir a construção e investimentos em uma nova infraestrutura de produção, ao mesmo tempo que associa uma cadeia de menor impacto ambiental à geração do metanol (CNI, 2022).

2.1.3.3 Transportes e combustíveis

O hidrogênio possui um papel importante dentro do mercado de transportes e de combustíveis. Os veículos movidos a célula a combustível de hidrogênio possuem sistema capaz de converter a energia química do hidrogênio em energia elétrica. Esta tecnologia já vem sendo utilizada em carros de passeios, ônibus, caminhões e trens.

No ano de 2022, a utilização de hidrogênio em transportes rodoviários aumentou em 45%, com relação aos números obtidos em 2021; esse aumento pode ser explicado, principalmente, pelo maior número de vendas de veículos movidos a células a combustível, com destaque para o mercado chinês (IEA, 2023). A China, em 2021, já possuía cerca de 1.200 caminhões, 2.800 ônibus e 50 carros movidos a célula a combustível de hidrogênio renovável (GIZ, 2021), demonstrando que o país apresenta aderência a utilização de células a combustível.

Tal cenário reforça a estimativa da IEA (2023) de que a maioria da utilização de hidrogênio nos transportes permanecerá no setor rodoviário, apesar do setor ferroviário ter um aumento de demanda, à medida que os testes com base em hidrogênio se mostram mais eficazes. A Alemanha, em 2022, implementou a sua primeira frota de trens movidos a célula a combustível (IEA, 2022). Em termos absolutos, diversas regiões do mundo vêm construindo infraestrutura que visem abastecer veículos movidos a hidrogênios, com destaque principal para Ásia.

O hidrogênio renovável também é uma alternativa de descarbonização do transporte marítimo. Foram identificados projetos para desenvolver embarcações com baixas emissões, dedicados para uso de células a combustível e amônia renovável. No âmbito político, a União Europeia, em 2023, adotou uma nova regulamentação que visa fomentar o processo de descarbonização do setor marítimo pelo uso de combustíveis com baixa emissão de carbono, incluindo o uso de células a combustível (IEA, 2023).

Outro segmento, a aviação, começa a vislumbrar a implementação do hidrogênio como combustível. A Airbus, por exemplo, pretende lançar aviões movidos a célula de combustível até 2035 (CNI, 2022). Além disso, o Parlamento Europeu, em abril de 2023, aumentou a pretensão de descarbonização do setor de aviação, dentre as propostas metas de utilização de

combustíveis sintéticos foram traçadas, com uma participação mínima desses combustíveis no setor já em 2025 (IEA, 2023).

Portanto, a utilização de hidrogênio nos mais variados setores de transportes, promete ser um mercado em expansão nos próximos anos. No cenário de Net Zero de Emissões, cerca de 8 milhões de toneladas de hidrogênio serão utilizadas no setor de transporte, tanto rodoviário como marítimo (IEA, 2023).

2.1.3.4 Siderurgia

O setor de siderurgia responde por cerca de 7% das emissões globais de dióxido de carbono. A produção de aço sustentável é um dos grandes desafios da indústria, que espera que o hidrogênio possa substituir o carvão nos processos integrados para redução do minério de ferro. Seguindo essa tendência, começaram na Suécia os primeiros testes para usar hidrogênio como combustível para a fabricação de aço em larga escala. Neste projeto, o hidrogênio será produzido na planta-piloto eletrolisando água com eletricidade derivada de fontes renováveis, como solar e eólica, substituindo o óleo e o bio-óleo utilizados para aquecer os fornos e fundir o minério de ferro (DE OLIVEIRA, 2022).

Dentre todas as rotas de produção do aço, a rota AF-BOF (Rota Sinter) é responsável por mais de 80% de todo aço produzido a partir do minério de ferro, porém tal processo demanda combustíveis fósseis para o abastecimento do alto-forno, utilizado em dois diferentes processos da rota. Em comparação com as rotas Sinter, as Rotas de Redução Direta apresentam uma menor necessidade térmica, visto que o minério é convertido diretamente em ferro esponjoso, sem passar pelo estágio de produção de ferro-gusa, o que já significa uma redução no consumo de combustíveis fósseis. Além disso, nesta rota, o hidrogênio pode e vem sendo usado tanto como fonte de energia, quanto como agente redutor, evitando a formação de gases nocivos ao meio ambiente. A desvantagem do processo de Redução direta é o custo das plantas de DRI, que são mais elevados do que as plantas de produção do aço por rotas de sinterização.

Como se poderia esperar, todas as tecnologias voltadas para o emprego do hidrogênio na indústria siderúrgica voltadas para a descarbonização do setor precisam ser avaliadas sob o aspecto econômico e comparadas com aquelas que privilegiam a captura e armazenamento de CO₂. Ao analisar a possibilidade do emprego de hidrogênio nas operações de refino ou de laminação do aço, também deverão ser considerados os aspectos logísticos, seja de produção local do hidrogênio, seja de sua importação através de dutos, haja vista o elevado volume

requerido. As usinas são classificadas em três classes dependendo da sua participação na cadeia de produção. As usinas integradas englobam todos os processos produtivos (redução, refino e laminação), as semi-integradas que atuam no refino e na laminação e as não integradas que participam apenas de uma fase da produção (processamento ou redução). As usinas integradas seriam talvez as mais propensas à utilização do hidrogênio em seus processos produtivos, porém, por se tratar de um mercado altamente competitivo, os fatores econômicos poderiam constituir uma barreira (GESEL, 2023).

2.1.3.5 Mineração

A mineração brasileira é um segmento extremamente relevante para a economia nacional e representa quase 5% de seu produto interno bruto (PIB). O minério de ferro está na terceira posição do ranking dos produtos mais exportados pelo Brasil em 2019, sendo uma indústria de base para muitas linhas de produção, como a matéria-prima do aço que vai para os automóveis, máquinas e eletrodomésticos.

A transição energética está em andamento também no setor de mineração, com o estabelecimento de altas metas de redução de carbono; nesse contexto, o hidrogênio de baixo carbono pode ser uma alternativa de descarbonização na indústria de minério de ferro. Entretanto, as oportunidades para o uso de hidrogênio na indústria de mineração se confundem com aquelas descritas na de mobilidade, quais sejam promover a descarbonização e reduzir os custos relacionados ao consumo e transporte de diesel para os imensos caminhões presentes nas minas e, também, no transporte ferroviário de minério. O desenvolvimento de parcerias entre empresas de energia renovável e mineração pode ajudar a criar modelos de negócios e projetos-piloto, para entender todos os diferentes elementos, incluindo energias renováveis, baterias e hidrogênio.

A indústria de mineração busca uma maior sustentabilidade ao mesmo tempo em que mantém a competitividade e a otimização de custos. Estima-se que a partir de 2024/2025, a bolsa de valores exigirá a incorporação de parâmetros ambientais, sociais e de governança (*ESG – Environment, Social & Governance*) para financiamento de atividades de mineração (DE OLIVEIRA, 2022).

2.2 Dados do mercado de hidrogênio

2.2.1.1 Oferta e Demanda globais

A demanda global por hidrogênio atingiu mais de 95 milhões de toneladas (Mt) em 2022, segundo o *Global Hydrogen Review 2023* da IEA - *International Energy Agency* (2023). Entretanto, a produção global de hidrogênio se baseia majoritariamente em combustíveis fósseis, proveniente de processos de reforma de gás natural sem CCUS (captura e armazenamento de carbono), que representou 62% da produção global, e gaseificação de carvão (21%), que são altamente intensivos em carbono. O hidrogênio também é produzido como subproduto da reforma de nafta em refinarias (16%) e depois usado em outros processos de refino.

A produção global de hidrogênio de baixa emissão ou hidrogênio renovável foi de menos de 1Mt (0,7%) em 2022, quase toda a partir de combustíveis fósseis com CCUS (0,6%), com apenas 95kt de H₂ (0,1%) gerados a partir de eletrólise da água. Portanto, a adoção do hidrogênio de baixa emissão como uma matéria-prima industrial limpa e vetor de energia está em estágio inicial (IEA, 2023).

O mercado global de hidrogênio possui maior foco em aplicações não energéticas, como a produção de componentes para fertilizantes, indústria alimentícia, derivados do petróleo, entre outras (MME, 2023).

Estudos calculam que para alcançar a neutralidade climática até 2050, a capacidade de mercado de hidrogênio de baixa emissão deve crescer para 170 milhões de toneladas equivalentes de hidrogênio (MtH₂eq) em 2030 e para 600 MtH₂eq em 2050 (DELOITTE, 2023).

Em linhas gerais, a baixa produção do hidrogênio renovável é explicada pelo fato que o custo de produção do hidrogênio convencional intensivo em carbono não reflete suficientemente seu impacto no clima (externalidades). Não por acaso, diversos projetos necessitam de apoio público para se tornarem viáveis, como ilustrado pelo programa dos EUA que prevê orçamento de US\$ 9,5 bilhões no médio prazo para a produção de hidrogênio renovável. Assim, o apoio do governo pode ser necessário até que o hidrogênio renovável alcance custos competitivos, aproveitando as economias de escala e o endurecimento da precificação de CO₂.

Uma vez que o incentivo à produção e ao consumo de hidrogênio renovável é tema de interesse global, diversos fóruns internacionais têm atuado para disseminar a adoção do uso

da energia do hidrogênio. Dentre eles, tem-se: *Hydrogen Council* (desde 2017); *International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy* (desde 2003); *Clean Energy Ministerial* (desde 2019); a comissão *TC-197 Hydrogen Technologies* da *International Organization for Standardization* (desde 1990); a comissão *TC-105 Fuel Cell Technologies* da *International Electrotechnical Commission* (desde 1998); e *Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking* de âmbito europeu (desde 2008).

Segundo a *IEA* (2023), a América Latina representa cerca de 5% da demanda global por hidrogênio (4,1Mt de H₂). Seis países na região (Argentina, Brasil, Chile, Colômbia, México e Trinidad e Tobago) responderam por cerca de 87% da demanda de hidrogênio na América Latina em 2019.

Em 2019, a produção de Trinidad e Tobago foi de 1,8MtH₂, do México 0,7MtH₂, do Brasil 0,4MtH₂, da Colômbia e Chile 0,2MtH₂ e outros países 0,7MtH₂. Na região, o gás natural, em particular, é a principal matéria-prima, representando 91% da produção total em 2019.

O *Institute of the Americas* avaliou o potencial do hidrogênio na América Latina considerando alguns critérios, como existência de marco regulatório, mercado interno e demanda, entre outros, e concluiu que o Brasil possui indicadores favoráveis para o desenvolvimento do produto, como por exemplo a existência de demanda e mercado doméstico, infraestrutura industrial, indústria de óleo e gás (IEA, 2021).

2.2.1.2 Políticas Públicas globais

O número de projetos em desenvolvimento vem crescendo, segundo estimativas da *IEA* (2023). Em seu relatório *Global Hydrogen Review*, a produção de hidrogênio renovável poderá atingir 20 milhões de toneladas, um aumento de 30% quando comparado às projeções realizadas no relatório de 2022 (IEA, 2022). Uma das principais causas deste aumento nas projeções se dá pelos movimentos globais direcionados ao desenvolvimento da cadeia do hidrogênio. Diversos governos vêm adotando medidas para impulsionar sua economia do hidrogênio como demonstra a Tabela 1.

Tabela 1: Políticas e Metas de Hidrogênio no mundo.

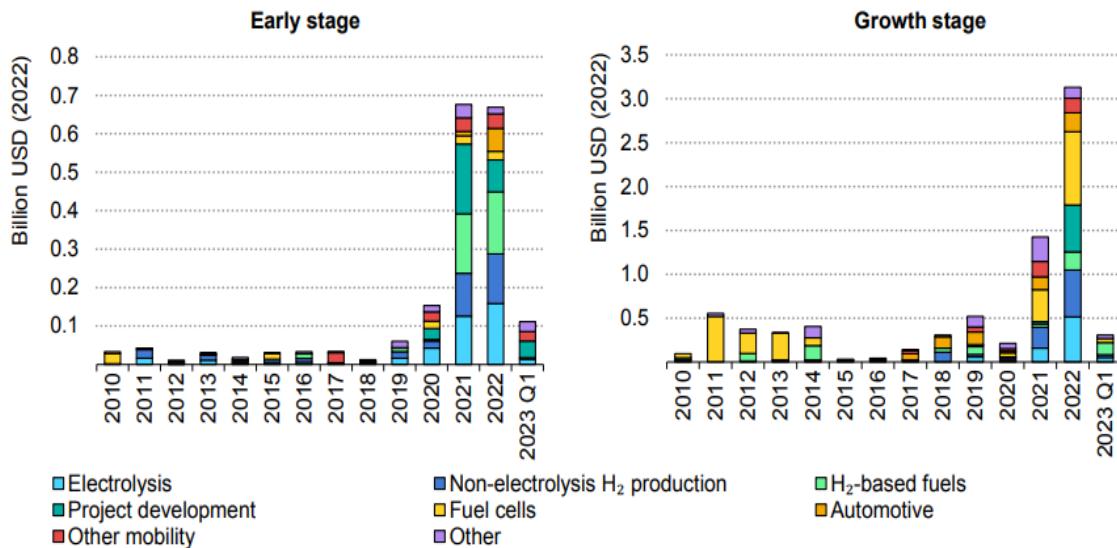
País	Políticas e metas
Argélia	Meta de produzir e exportar 30-40 TWh de hidrogênio e combustíveis à base de hidrogênio até 2040. Enfoque em projetos piloto até 2030 para iniciar o setor.
Brasil	O Plano Trienal de Trabalho do Programa Nacional do Hidrogênio 2023-2025 define a estratégia do país, com três prazos: até 2025, implantar usinas piloto de hidrogênio de baixo carbono em todo o país; até 2030, consolidar o Brasil como um produtor competitivo de hidrogênio de baixo carbono; e, até 2035, consolidar centros de hidrogênio de baixo carbono no Brasil.
Costa Rica	Meta de instalar 0,15-0,50 GW de capacidade de eletrólise, substituir 8-10% do gás liquefeito de petróleo (GLP) por hidrogênio renovável e implantar 100-250 veículos elétricos de célula de combustível (FCEVs) e 200-600 caminhões pesados de célula de combustível até 2030.
Equador	Meta de instalar 3 GW de eletrolisadores até 2040 e estabelecer regulamentações para o uso doméstico de hidrogênio e potencialmente para exportação para mercados internacionais.
Índia	Meta de produzir 5 Mt de hidrogênio renovável até 2030 (com adição de 125 GW de capacidade renovável) com potencial adicional de atingir 10 Mt/ano com exportações. Interesse em desenvolver uma indústria nacional de fabricação de eletrolisadores.
Israel	Os planos exploram opções para integrar o hidrogênio à matriz energética nacional, juntamente com a consideração do armazenamento subterrâneo.
Quênia	Meta de instalar 150-250 MW de eletrolisadores e produzir 300-400 kt de fertilizantes de nitrogênio até 2032. Objetivo de desenvolver uma indústria local de fertilizantes "verdes" para diminuir a dependência de fertilizantes importados.
Namíbia	Meta de produzir 1-2 Mt de hidrogênio "verde" até 2030 e 10-15 Mt até 2050. Objetivo de desenvolver três vales do hidrogênio para iniciar a produção e o uso.
Panamá	No transporte, o país pretende aumentar o uso de hidrogênio e derivados para abastecimento de combustíveis marítimos para 5% até 2030. Meta de produzir 0,5 Mt de hidrogênio até 2030.
Singapura	Objetivo de transformar Singapura em um HUB de hidrogênio e combustíveis à base de hidrogênio no Pacífico. Forte foco na geração de eletricidade, com a estimativa de que o hidrogênio possa atender até 50% da demanda de eletricidade em 2050, bem como na aviação e no setor marítimo.
Sri Lanka	O roteiro inclui planos para exportar derivados de hidrogênio até 2030.
Turquia	Meta de instalar 2 GW de eletrolisadores até 2030, 5 GW até 2035 e 70 GW até 2053. Apoio a projetos de demonstração para a produção de hidrogênio renovável.
Emirados Árabes Unidos	A estratégia inclui uma previsão para a produção de 1,4 Mt de hidrogênio até 2030, 7,5 Mt até 2040 e 15 Mt até 2050, através de uma mistura de eletrólise alimentada por eletricidade renovável e nuclear, e gás natural com captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS).
EUA	Meta de produzir 10 Mt de hidrogênio renovável até 2030, 20 Mt até 2040 e 50 Mt até 2050. Atualizar a cada 3 anos (conforme exigido pela Lei Bipartidária de Infraestrutura).
Uruguai	Meta de instalar 1-2 GW de eletrolisadores até 2030 e 10 GW até 2040, com foco inicial na demanda doméstica no curto prazo e exportações no longo prazo.
Bélgica	Visão estruturada em quatro pilares: tornar-se um centro de importação/trânsito de hidrogênio renovável na Europa, expandir a liderança tecnológica, estabelecer um mercado doméstico robusto e cooperação internacional.
Alemanha	Meta de instalar 10 GW de eletrolisadores até 2030, e aumento da demanda na indústria e transporte para substituir maiores parcelas de gás natural, com mais de 1.800 km de infraestrutura de dutos.
Japão	Meta intermediária de demanda de hidrogênio de 12 Mt até 2040 (complementando metas anteriores de 3 Mt até 2030 e 20 Mt até 2050) e atingir 1% do fornecimento de gás em redes existentes com metano sintético até 2030, aumentando para 90% até 2050. Meta de instalar 15 GW de eletrólise globalmente. Mudar o foco de veículos elétricos a células de combustível (FCEVs) para o uso de hidrogênio em aplicações, principalmente nas indústrias siderúrgica e petroquímica.
Coréia do Sul	Meta de atingir 2,1% da produção total de eletricidade com hidrogênio e amônia até 2030 e 7,1% até 2036. Criação de um marco para um Mecanismo de Certificação de Hidrogênio Limpo a ser lançado até o final de 2023.

Fonte: Adaptado do *Global Hydrogen Review* (2023). Tradução própria.

Concomitantemente, o setor privado também vem adotando medidas de investimentos

na economia do hidrogênio. Fundos de Venture Capital vêm investindo em startups de Hidrogênio. Desde 2022, startups de hidrogênio de *early-stage* investiram cerca de US\$ 670 milhões (IEA, 2023). Entretanto, as perspectivas para 2023 indicam uma captação menor devido ao cenário macroeconômico com altas taxas de juros e os títulos do tesouro americano futuros em alta. Na Figura 5, é possível analisar o histórico de investimentos ao longo do tempo.

Figura 5: Histórico de investimento de capital de risco em startups de energia em áreas relacionadas ao hidrogênio, para negócios em *early stage* e *late stage*, 2010-2023.



Fonte: *Global Hydrogen Review* (2023).

2.2.1.3 Oferta e Demanda brasileiras

O Brasil produz cerca de 0,4Mt de hidrogênio por ano, segundo informações do Plano de Trabalho Trienal do Programa Nacional de Hidrogênio (MME, 2023). De acordo com a EPE (2022), 87% do hidrogênio que é produzido no Brasil atualmente é proveniente da reforma a vapor do gás natural, para consumo doméstico nas refinarias e nas fábricas de fertilizantes.

O Brasil segue a tendência global da produção de hidrogênio por meio da reforma de gás natural. A grande maioria das plantas de produção de hidrogênio se encontram em regiões litorâneas próximas à malha de gasodutos. Segundo mapeamento do GIZ (2021), por exemplo, o fornecimento de hidrogênio como insumo para a indústria no Brasil é realizado majoritariamente por quatro empresas de gases industriais: *Linde*, *Air Liquide*, *Air Products*, e *Messer*.

Em relação ao mercado consumidor brasileiro, assim como em outros países, o

hidrogênio é utilizado para síntese de produtos e diversos processos e insumos. Os principais setores identificados pela GIZ (2021) foram: petroquímico (refino de combustíveis); siderúrgico e metalúrgico (redução de ferro gusa e fornos de atmosferas controladas); alimentos (hidrogenação de produtos); vidros planos (processo de inertização do banho de estanho); e geração de energia (termelétricas, refrigeração de turbinas). Além desses, o estudo destaca o setor de transporte (carros, caminhões, ônibus, aviões e navios).

Portanto, o Brasil tem uma posição de destaque para se tornar um exportador de hidrogênio de baixo carbono, por apresentar condições climáticas excelentes e favoráveis para geração de energia elétrica através de fontes eólicas, solar e hídricas (OLIVEIRA, 2022).

2.2.1.4 Políticas Públicas brasileiras

O governo brasileiro tem, há algumas décadas, promovido políticas públicas de incentivo ao mercado de hidrogênio. Mais recentemente, essas políticas e marcos regulatórios são direcionadas ao hidrogênio de baixo carbono. As iniciativas históricas descritas a seguir contemplam desde as propostas realizadas na década de 1990 até o estabelecimento do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH) em 2022 e a chamada pública aprovada pela ANEEL para projetos de hidrogênio no setor elétrico.

- **1998:** Implementação do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH) pelo MCTI.
- **2002:** Divulgação do Programa Brasileiro de Células a Combustível (ProCaC) pelo MCTI.
- **2003:** Brasil tornou-se membro da Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia (IPHE).
- **2005:** Reformulação do ProCaC, renomeado como "Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio" (ProH2).
- **2005:** Publicação do "Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil" pelo MME.
- **2010:** Publicação de "Hidrogênio energético no Brasil: Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025" pelo CGEE.
- **2017:** A responsabilidade pela representação na IPHE transferida do MME para o MCTI.

- **2017:** Criação da Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH2) para coordenar ações relacionadas ao hidrogênio.
- **2018:** Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) destacou o hidrogênio como tecnologia disruptiva.
- **2020:** Indicação do interesse em novo roteiro para tecnologias relacionadas ao hidrogênio pelo MME.
- **2021:** Publicação das "Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio" pela EPE em fevereiro.
- **2021:** Publicação de resoluções do CNPE com implicações positivas para o desenvolvimento do hidrogênio no Brasil.
- **2021:** Coliderança do Diálogo de Alto Nível das Nações Unidas sobre Energia e apresentação de pacto energético sobre hidrogênio.
- **2021:** Proposta de Diretrizes para o Plano Nacional de Hidrogênio.
- **2022:** Resolução nº 6 do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE).
- **2023:** Instalação da Comissão Especial para Debate de Políticas Públicas sobre Hidrogênio Verde no Senado Federal.
- **2023:** PNH2 - Plano de Trabalho Trienal.
- **2023:** Aprovação da Chamada Pública nº 23/2024 de projetos de hidrogênio no contexto do setor elétrico.

Dentre todas as iniciativas públicas já realizadas, destaca-se a Resolução CNPE nº 6/2021, que expôs os fatores motivadores e orientadores fundamentais para o Programa Nacional do Hidrogênio, quais sejam:

- I - O interesse em desenvolver e consolidar o mercado de hidrogênio no Brasil e a inserção internacional do País em bases economicamente competitivas;*
- II - A inclusão do hidrogênio como um dos temas prioritários para investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação, conforme Resolução CNPE nº 2, de 10 de fevereiro de 2021, aprovada pelo Conselho Nacional de Política Energética;*
- III - A importância do hidrogênio como vetor energético que, combinado a outras soluções, tem potencial para contribuir globalmente para uma matriz energética de baixo carbono;*
- IV - O interesse na cooperação internacional para o desenvolvimento tecnológico e de mercado para produção e uso energético do hidrogênio;*
- V - A diversidade de fontes energéticas disponíveis no País para a produção de hidrogênio;*

VI - As tecnologias associadas a esse vetor energético já desenvolvidas e em desenvolvimento no País;

VII - A diversidade de aplicações do hidrogênio na economia;

VIII - O potencial de demanda interna e para exportação de hidrogênio no contexto de transição energética; e

IX - A liderança do Brasil no tema "Transição Energética" no Diálogo de Alto Nível das Nações Unidas sobre Energia.

Dessa forma, os princípios do Programa Nacional de Hidrogênio são:

- **Valorizar o potencial nacional de recursos energéticos:** reconhecendo as diversas fontes para obtenção do hidrogênio, sendo elas renováveis ou não, bem como a ampla gama de aplicações em múltiplos setores da economia (transportes, energia, siderurgia e mineração, por exemplo);
- **Ser abrangente:** reconhecendo a diversidade de fontes energéticas e alternativas tecnológicas disponíveis ou potenciais, inclusive as possíveis sinergias, para produção, logística, armazenamento e uso do hidrogênio;
- **Alinhar-se às ambições de descarbonização da economia:** considerando trajetórias que viabilizem que o hidrogênio contribua para a neutralidade líquida de carbono até 2050;
- **Valorizar e incentivar o desenvolvimento tecnológico nacional:** tendo em vista os investimentos e experiências já existentes no País e a necessidade da continuidade do esforço em pesquisa, desenvolvimento e inovação, com vistas à capacitação e autonomia tecnológica e desenvolvimento do sistema produtivo nacional;
- **Almejar o desenvolvimento de um mercado competitivo:** considerando o potencial de demanda interna e para exportação de hidrogênio, bem como a evolução dos custos e riscos nos horizontes de curto, médio e longo prazos;
- **Buscar sinergias e articulação com outros Países:** reconhecendo que esse mercado deve ter abrangência global e seu desenvolvimento pode ser acelerado por meio de cooperação e coordenação internacional;
- **Reconhecer a contribuição da indústria nacional:** o Brasil tem base industrial robusta para a produção de bens de capital, produtos e serviços aptos para contribuir com a economia do hidrogênio.

Portanto, o Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2) se propõe a definir um conjunto de ações que facilite o desenvolvimento conjunto de três pilares fundamentais para o sucesso de uma trajetória de desenvolvimento da economia do hidrogênio no Brasil: políticas públicas, tecnologia e mercado. Esses pilares são interdependentes e precisam evoluir de forma síncrona para que possam promover uma aceleração na obtenção dos resultados almejados.

Para os princípios apontados, o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) se estrutura em seis eixos:

- 1) fortalecimento das bases científico-tecnológicas;
- 2) capacitação de recursos humanos;
- 3) planejamento energético;
- 4) arcabouço legal e regulatório-normativo;
- 5) abertura e crescimento do mercado e competitividade; e
- 6) cooperação internacional.

A importância do hidrogênio renovável na rota de transição energética é destacada, por exemplo, pelo Plano Nacional de Energia 2050 do MME, que “recomenda o estabelecimento políticas públicas para o incentivo da utilização das tecnologias de hidrogênio na transição energética brasileira, pois trata-se de um energético versátil que pode ser produzido a partir de inúmeras fontes, incluindo produção por eletrólise da água a partir de sistemas de energia renovável. Neste caso, o hidrogênio pode ser produzido nos momentos que os preços de energia estão baixos, podendo oferecer oportunidades de acoplamento com setores de difícil descarbonização, como o setor de transportes, e representar uma oportunidade de provimento de flexibilidade aos sistemas energéticos. Essas políticas deverão buscar capacidades tecnológicas e P&D, com envolvimento de Universidades e Organizações de Pesquisa”.

Por fim, para a governança, o Programa Nacional Hidrogênio instituiu o Comitê Técnico PNH2. Trata-se de comitê representativo das partes interessadas para gerenciar o programa, “que se reunirá em periodicidade a ser definida no seu ato de constituição, o qual preverá, ainda, a forma de prestação de contas e de monitoramento dos resultados, alinhada com os compromissos assumidos no âmbito do diálogo em Alto Nível das Nações Unidas sobre Energia”.

Como último ponto de destaque das políticas públicas, tem-se a aprovação da Chamada Pública n° 23/2024 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que trata do cadastramento de projetos apoiados pelo Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PDI) desenvolvido pela ANEEL, que contemple a inserção de sistemas de produção de hidrogênio renovável de forma integrada e sustentável. A aprovação sucedeu o aprimoramento das regras para o cadastramento dos projetos, realizada através da consulta pública (CP18/2023) que recebeu mais de 1.500 contribuições. O principal objetivo da Chamada Pública é tornar o processo decisório de escolha dos projetos e consumidores

beneficiados pelo PDI mais transparente e democrático, promovendo mais participação da sociedade.

No período de Consulta Pública, entre 7 de junho e 24 de julho de 2023, 1.568 contribuições foram enviadas à Agência por 73 instituições. Entre as inovações aprovadas para a Chamada, serão considerados não só projetos de hidrogênio produzidos a partir de fontes renováveis de geração de energia elétrica (hidráulica, solar e eólica), mas também de fontes de baixo carbono, fontes hidráulicas, solar, eólica, biomassa, nuclear, geotérmica, marinha ou termelétrica (com captura, armazenamento e utilização do carbono).

A avaliação dos impactos no setor elétrico nos projetos será restrita aos observados no Sistema Interligado Nacional (SIN). As propostas também irão contemplar temas relacionados com logística do hidrogênio (produção, armazenamento, outras infraestruturas e sistemas, e usos finais) e com células a combustível (aplicações estacionárias, aplicações móveis, outras aplicações, e células a combustível não alocadas), incluindo temas afins.

A ANEEL destaca que, entre os benefícios com o uso de hidrogênio, está a melhoria da qualidade da energia elétrica a partir do conhecimento prévio dos potenciais impactos no sistema elétrico com a adoção de diferentes sistemas de produção de hidrogênio. Outra perspectiva é de aumento da confiabilidade do sistema elétrico brasileiro, devido à possibilidade do uso de hidrogênio armazenado para geração de energia.

2.3 Rotas do Hidrogênio Renovável Brasileiro

A partir do melhor entendimento da cadeia do hidrogênio, das tendências relacionadas ao desenvolvimento de novas tecnologias e das possíveis rotas comerciais do hidrogênio e seus derivados, o presente trabalho busca analisar o potencial da cadeia do hidrogênio de baixo carbono na geração de valor da indústria brasileira, em detrimento da exportação de produtos com baixo ou nenhum beneficiamento industrial. Este estudo é embasado na definição de cenários produtivos e de exportação, utilizando-se de análises comparativas entre a exportação do hidrogênio verde como vetor energético e a exportação de produtos de maior valor agregado, que utilizam do hidrogênio renovável para descarbonizar cadeias já estabelecidas.

O foco no desenvolvimento da cadeia do hidrogênio para uso como vetor energético não oferece grandes avanços para a descarbonização da economia brasileira, que possui a matriz elétrica mais renovável do mundo, com 84,25% da eletricidade gerada por fontes renováveis (ANEEL, 2024). Com isso, a produção da molécula se torna mais atrativa para a exportação, como vetor energético, ou para compor cadeias e setores com alta demanda

energética, como de transportes e siderurgia.

Quando utilizado como um subproduto no mercado interno, o H₂ pode descarbonizar diversas cadeias produtivas, tanto através da substituição do hidrogênio com alta pegada de carbono já utilizado nessas cadeias, quanto em novas aplicações da molécula, como no caso da transformação do minério de ferro em ferro metálico (ou DRI – Direct Reduced Iron), através do processo de Redução Direta (HALL et al., 2021). Ambas as vertentes apresentam dois grandes benefícios para a economia local; o primeiro deles é que, com o uso do H₂R para consumo interno, reduz-se as emissões de carbono em setores extremamente poluentes; o segundo é que, a exportação de subprodutos mais complexos, com baixas emissões de carbono, favorece a industrialização nacional, permitindo que o Brasil internalize a geração de valor e exporte produtos com maiores valores agregados, como o aço verde.

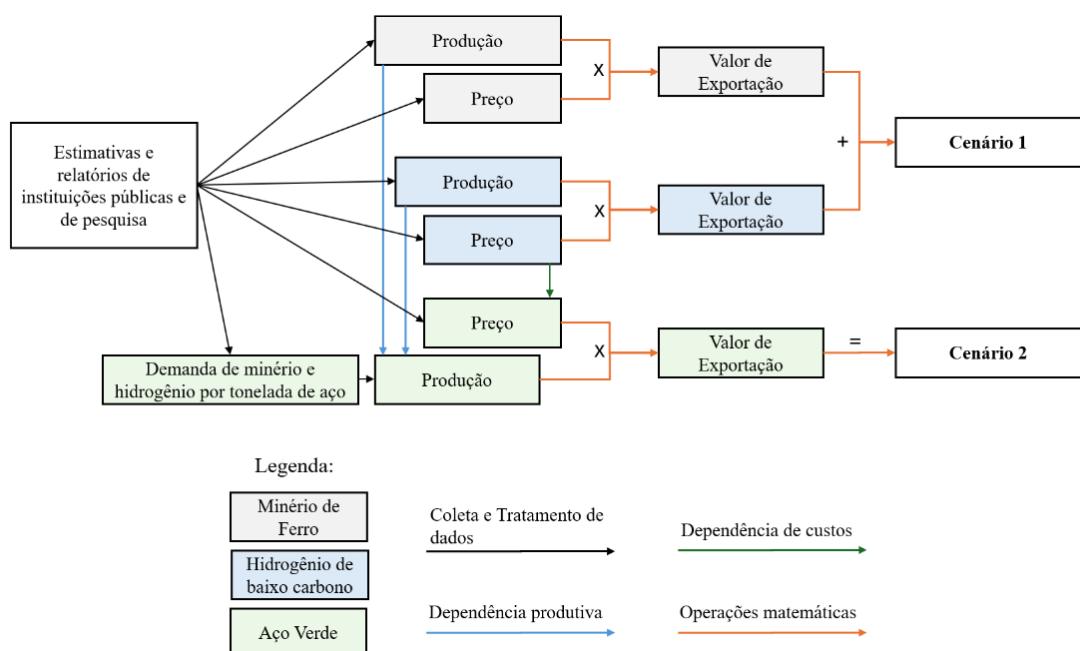
3. MÉTODO

Com o intuito de comparar os dois possíveis destinos do hidrogênio de baixo carbono citados anteriormente e seus impactos no PIB e na balança comercial brasileira, serão definidos dois cenários, que utilizam da cadeia do aço como recorte de análise.

- **Cenário 1:** Representatividade da exportação do hidrogênio de baixo de carbono e do minério de ferro, separadamente, sem beneficiamento industrial;
- **Cenário 2:** Representatividade da exportação do aço verde, que se utiliza do minério como principal insumo e do hidrogênio como agente redutor do minério em ferro metálico, no processo de Redução Direta.

A elaboração dos cenários conta com estimativas de produção e preço dos principais elementos dos cenários definidos, baseadas em projeções de instituições públicas e privadas e renomadas empresas de pesquisa, como a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a Agência Internacional de Energia (ou *International Energy Agency – IEA*), o Ministério de Minas e Energia (MME), a Secretaria de Comércio Exterior, a FGV e o IBGE. A partir dos dados coletados, serão definidas as premissas de produção e preço para o cálculo do valor de exportação de cada cenário. O processo para se obter os cenários descritos é resumido na Figura 6.

Figura 6: Representação gráfica da construção dos cenários 1 e 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram definidas as seguintes premissas:

- A quantidade de aço verde a ser exportada no Cenário 2 considera que toda a produção de aço verde é realizada através do processo *DRI-EAF* (*Direct Reduced Iron – Electric Arc Furnace*), definido como base por permitir que a demanda energética da redução seja provida do hidrogênio, permitindo uma redução de até 95% das emissões de carbono, quando comparado ao convencional processo *BF-BOF* (*Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace*) (BELLONA, 2023);
- A disponibilidade de aço verde, de 2023 a 2050, depende da disponibilidade e das proporções de uso de minério de ferro e hidrogênio de baixo carbono, conforme setas azuis na Figura 6;
- A exportação de minério de ferro e hidrogênio no Cenário 1 considera as quantidades desses insumos utilizados no Cenário 2, para que a comparação se delimita à diferença de geração de valor nas duas rotas definidas;
- O preço do aço verde é dependente do preço do hidrogênio de baixo carbono, conforme indica a seta verde na Figura 6.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por se tratar de um assunto relativamente novo, e com processos e produtos que ainda não atingiram grande escala comercial, muitas das informações necessitaram de premissas e técnicas de inferência para que possam ser comparáveis. As fórmulas e ferramentas de análise utilizadas no estudo são descritas no Apêndice A.

Além disso, para padronizar a visualização das informações nas tabelas realizadas, todas as células de inputs, ou seja, informações tiradas de artigos, estudos e pesquisas referenciadas, serão destacadas em amarelo. Consequentemente, entende-se que todas as células de dados sem destaque foram calculadas pelo autor.

4.1 Hidrogênio de Baixo Carbono

4.1.1 Produção

Vellardo (2023) demonstra o potencial técnico brasileiro de produção de hidrogênio a partir do saldo de recursos energéticos até 2050, em amarelo na Tabela 2. Os recursos renováveis *onshore* e *offshore* considerados são o hidráulico, o solar e o eólico. Vale destacar que o potencial *offshore* se mostra mais representativo, uma vez que a maior parte do potencial técnico *onshore* é utilizado para atender a demanda elétrica convencional.

Tabela 2: Estimativa do potencial técnico brasileiro de produção de hidrogênio a partir do saldo de recursos energéticos até 2050.

Recurso Energético	Potencial de hidrogênio (Mt/ano)
Renovável – <i>Offshore</i>	1.715,3
Renovável – <i>Onshore</i> ¹	18,1
Biomassa	50,5
Nuclear ²	6,9
Fósseis ²	60,2
Total	1.851,0
Total (H²R)	1.783,9

Fonte: Vellardo (2023).

De acordo com Vellardo (2023), o potencial técnico de produção a partir de fontes renováveis *onshore* (¹) pode se revelar bastante superior ao apontado em caso de não ocorrência da suposição de atendimento à totalidade da demanda de energia por fontes dessa natureza, conforme premissa assumida no estudo consultado. Além disso, para compor os cenários comparativos definidos anteriormente, foram desconsiderados os potenciais de produção de hidrogênio com as fontes nuclear e fósseis (²), para garantir que o cenário seja baseado apenas em fontes limpas, seja por emissão de gases de efeito estufa, quanto por risco de contaminação.

O valor apresentado de 1.783,9Mt/ano de hidrogênio de baixo carbono representa o potencial técnico de forma normalizada, no horizonte de 2023 a 2050. Em 2022, a produção brasileira total de hidrogênio foi de 0,4Mt, (MME, 2023). Neste ano, a porcentagem de hidrogênio de baixo carbono global, frente a todo o hidrogênio produzido, foi de apenas 0,7%, IEA (2023). Partindo da premissa de que esta porcentagem se aplica ao Brasil, conclui-se que a produção de hidrogênio de baixo carbono, em 2022, no Brasil, foi de 0,0028Mt.

Para análise da evolução do potencial técnico de maneira não-normalizada, parte-se

da premissa do somatório de 49.949,20Mt, o valor inicial aplicado a taxa de crescimento deve resultar em igual somatório. O cálculo da taxa de crescimento foi realizado com o auxílio da ferramenta Atingir Meta (Excel), conforme Apêndice B; a taxa de crescimento calculada é de 76,2% ao ano e os valores anuais são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Estimativa do potencial técnico brasileiro de produção de hidrogênio.

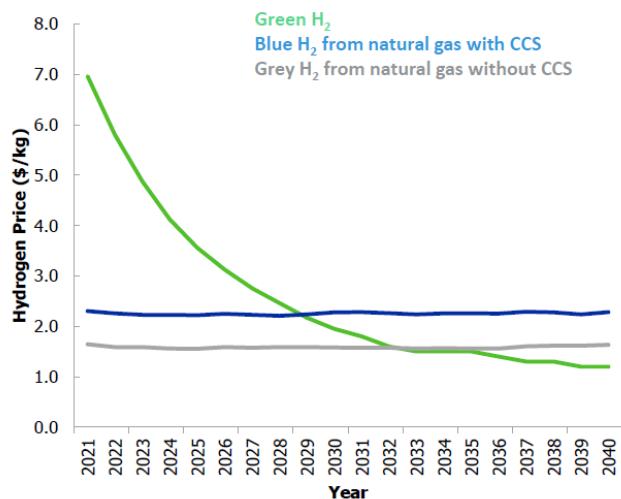
Taxa de crescimento (2022 a 2050)		76,2%
Ano	Anualizado (Mt)	Não-anualizado (Mt)
2020		
2021		
2022		0,0028
2023	1.783,9	0,005
2024	1.783,9	0,009
2025	1.783,9	0,015
2026	1.783,9	0,027
2027	1.783,9	0,048
2028	1.783,9	0,084
2029	1.783,9	0,148
2030	1.783,9	0,260
2031	1.783,9	0,458
2032	1.783,9	0,807
2033	1.783,9	1,422
2034	1.783,9	2,505
2035	1.783,9	4,414
2036	1.783,9	7,777
2037	1.783,9	13,702
2038	1.783,9	24,140
2039	1.783,9	42,532
2040	1.783,9	74,937
2041	1.783,9	132,029
2042	1.783,9	232,617
2043	1.783,9	409,842
2044	1.783,9	722,089
2045	1.783,9	1272,228
2046	1.783,9	2241,502
2047	1.783,9	3949,239
2048	1.783,9	6958,052
2049	1.783,9	12259,192
2050	1.783,9	21599,121
Total	49.949,20	49.949,20

Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.2 Preço

Segundo a Frost & Sullivan (2023), com projetos de Eletrólise de baixa temperatura (*Low-Temperature Electrolysis – LTE*) em larga escala planejados e uma redução no custo dos eletrolisadores de hidrogênio, juntamente com energia renovável cada vez mais barata, o hidrogênio verde será mais barato de produzir do que o hidrogênio azul por volta de 2030. O preço do hidrogênio de baixo carbono, em comparação com o hidrogênio produzido através do gás natural, segue conforme Figura 7.

Figura 7: Projeção do preço do hidrogênio, 2021-2040.



Fonte: Frost & Sullivan (2023).

Na projeção, a curva em verde representa o preço do hidrogênio de baixo carbono de 2021 a 2040. A partir da Figura 7, chega-se na Tabela 4: Preço do hidrogênio, 2021-2050.Tabela 4.

Tabela 4: Preço do hidrogênio, 2021-2050.

Ano	Preço (US\$/kg)
2020	
2021	
2022	6
2023	5,2
2024	4,8
2025	4,4
2026	3,8
2027	3,3
2028	2,7
2029	2,15
2030	1,9
2031	1,85
2032	1,49
2033	1,48
2034	1,47
2035	1,37
2036	1,33
2037	1,28
2038	1,22
2039	1,18
2040	1,1
2041	1,1
2042	1,1
2043	1,1
2044	1,1
2045	1,1
2046	1,1
2047	1,1
2048	1,1
2049	1,1
2050	1,1

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir do ano de 2041, opta-se por manter o preço constante, com base na tendência de estabilização percebida pela curva do gráfico da Figura 7 e na maturidade que as tecnologias de produção do hidrogênio terão no ano em questão.

4.2 Minério de Ferro

4.2.1 Produção

Segundo a Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (2022), conforme descrito no Caderno 2 – Pesquisa e Produção Mineral, do Plano Nacional de Mineração 2050, as projeções de crescimento da produção do minério de ferro brasileiro seguem os valores da Tabela 5.

Tabela 5: Projeções de crescimento da produção e comercialização do minério de ferro.

Ano	2020	2021	2022	2026	2030	2034	2038	2041	2046	2050
Reservas Medidas (Bt) ¹	98,6	98,08	97,55	95,4	93,18	90,88	88,52	86,07	83,55	80,95
Produção (Mt)²	523	527,2	531,4	548,6	566,4	584,7	603,7	623,2	643,4	664,2
Consumo (Mt)	121	122	122,9	126,9	131	135,3	139,7	144,2	148,9	153,7
Importações (Mt)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Exportações (Mt)	402	405,2	408,5	421,7	435,3	449,4	464	479	494,5	510,6
Empregos diretos	141.351	142.486	143.622	148.270	153.081	158.027	163.162	168.432	173.892	179.514
Empregos indiretos	226.162	227.978	229.795	237.232	244.930	252.843	261.059	269.492	278.227	287.222

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2022).

É importante ressaltar que os valores de reservas medidas (1) consideram as reservas das empresas já em operação, juntamente com as declaradas pelas empresas de Mineração de ferro e mantidas fixas, para evidenciar a necessidade de exploração de novos depósitos. A produção (2) leva em conta as produções das empresas já em operação, juntamente com as dos projetos já divulgados. Além disso, destaca-se também que as projeções de Produção crescem numa taxa anual de 0,8%, o que nos permite entender a expectativa de produção anual, representada na tabela a seguir.

Tabela 6: Projeções de produção do minério de ferro brasileiro.

Taxa de crescimento		0,8%
Ano [n]	Produção (Mt)	
2020	523	
2021	527,2	
2022	531,4	
2023	535,7	
2024	539,9	
2025	544,3	

2026	548,6
2027	553,0
2028	557,4
2029	561,9
2030	566,4
2031	570,9
2032	575,5
2033	580,1
2034	584,7
2035	589,4
2036	594,1
2037	598,9
2038	603,7
2039	608,5
2040	613,4
2041	618,3
2042	623,2
2043	628,2
2044	633,2
2045	638,3
2046	643,4
2047	648,5
2048	653,7
2049	659,0
2050	664,2

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para calcular o valor dos anos que não são especificados no estudo, foi aplicada a seguinte fórmula:

$$Produção_{n+1} = Produção_n \cdot (1 + i)$$

Onde i é a taxa de crescimento, de 0,8%.

4.2.2 Preço

Para compor o cenário de exportação dos materiais sem beneficiamento industrial, juntamente com a expectativa de produção, é preciso entender a tendência do preço do minério praticado na exportação. Para isso, foram consultados os dados consolidados do resultado do Comércio Exterior Brasileiro, divulgado pelo Ministério da Economia (2024).

Tabela 7: Preço histórico do Minério de Ferro, 1997-2023.

Data	Preço (US\$/t)
2023	80,9
2022	84,1
2021	125,0
2020	75,6
2019	64,6
2018	51,9
2017	50,1
2016	35,5
2015	38,5
2014	75,0
2013	98,6
2012	94,9
2011	126,4
2010	92,9
2009	49,8
2008	58,7
2007	39,2
2006	36,9
2005	32,6
2004	22,5
2003	19,8
2002	18,3
2001	18,8
2000	19,4
1999	19,6
1998	21,7
1997	21,2

Fonte: Secretaria de Comércio Exterior (2024).

Para projetar os preços de 2024 a 2050, foi utilizado o índice de inflação IPA-DI (Índice de Preços ao Produtor Amplo – Disponibilidade Interna), que, segundo FGV (2016), é o índice de inflação que melhor representa as variações de preços de produtos dos setores agropecuário e industrial, uma vez que está estruturado para medir as variações médias dos preços recebidos pelos produtores domésticos na venda de seus produtos. A sua composição tem por base as pesquisas estruturais relativas aos setores agropecuário e industrial, além das Contas Nacionais, todas divulgadas pelo IBGE.

A partir dos valores do preço do minério em 2023 e dos valores projetados do IPA-DI de 2023 a 2050, cuja projeção foi demonstrada no Apêndice C, obtém-se a previsão do preço do minério até 2050, apresentada na Tabela 8.

Fórmula de cálculo do preço do minério:

$$Preço_{n+1} = Preço_n \cdot (1 + IPA_n)$$

Tabela 8: Previsão de preço do minério de ferro, 2023-2050.

Ano [n]	Preço (US\$)	IPA-DI
2023	80,91	-5,93%
2024	76,11	6,03%
2025	80,70	6,76%
2026	86,15	6,25%
2027	91,54	6,40%
2028	97,40	6,21%
2029	103,45	6,29%
2030	109,95	6,58%
2031	117,19	6,25%
2032	124,51	6,14%
2033	132,16	6,76%
2034	141,09	6,62%
2035	150,43	6,41%
2036	160,06	6,41%
2037	170,32	5,46%
2038	179,61	5,51%
2039	189,51	6,27%
2040	201,39	6,29%
2041	214,05	6,26%
2042	227,45	6,26%
2043	241,67	6,25%
2044	256,77	6,25%
2045	272,82	6,25%
2046	289,86	6,22%
2047	307,89	6,22%
2048	327,05	6,23%
2049	347,42	6,19%
2050	368,93	6,16%

Fonte: Elaborada pelo autor.

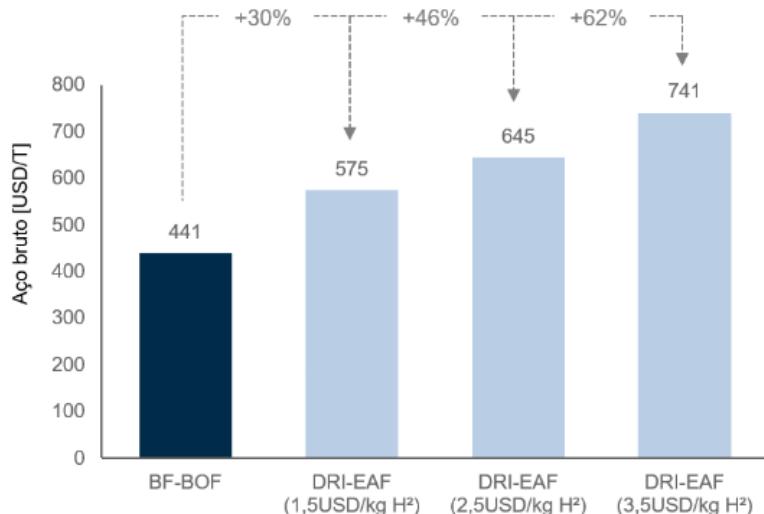
4.3 Aço verde

4.3.1 Preço

Segundo a Wuppertal Institut (2021), iniciar a transição do pipeline de projetos de novas usinas siderúrgicas em economias emergentes, passando do carvão para tecnologias limpas, será um enorme desafio, mas também trará grandes benefícios. Para isso, será necessário

implementar um amplo conjunto de fatores facilitadores, incluindo investimentos significativos em energias renováveis, hidrogênio de baixo carbono e infraestrutura relacionada. De modo geral, os custos de implementação entre os diferentes tipos de siderúrgicas seriam semelhantes, não resultando em despesas adicionais significativas. O verdadeiro desafio será lidar com o aumento das despesas operacionais (*Opex*) das plantas de Redução Direta de Ferro (*DRI*) baseadas em H₂. Essas despesas podem variar de 30 a 62%, dependendo, em grande parte, do custo futuro do hidrogênio com baixo teor de carbono, conforme gráfico a seguir.

Figura 8: Custos de *Opex* BF-BOF versus H₂ DRI-EAF.



Fonte: Wuppertal Instut (2021), adaptada pelo autor.

A partir dos valores acima descritos, e utilizando-se da aplicação do método de regressão linear (Apêndice A), calcula-se o coeficiente angular (*b*) e a interceptação (*a*) da equação da reta que dita o comportamento do preço do aço verde em função do hidrogênio de baixo carbono.

Equação: $Y = a + b \cdot X \pm e$	$b = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$ $a = \bar{Y} - b \cdot \bar{X}$ $e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n - 2}}$
---------------------------------------	---

Conforme aplicação demonstrada no Apêndice D, obtém-se a equação do preço do aço verde (US\$/t), em função do preço do hidrogênio de baixo carbono (US\$/kg).

$$\text{Preço Aço Verde} = 446,17 + 83 \cdot \text{Preço H}_2 \pm 10,61$$

Com isso, calcula-se a expectativa de preço do aço verde de 2023 a 2050, com base na expectativa de preço do H₂ de baixo carbono, já apresentada anteriormente.

Tabela 9: Estimativa de preço do aço verde, 2023-2050.

Ano	Preço H ₂ R (US\$/kgH ₂)	Preço Aço (US\$/t)
2021	7	1027,17
2022	6	944,17
2023	5,2	877,77
2024	4,8	844,57
2025	4,4	811,37
2026	3,8	761,57
2027	3,3	720,07
2028	2,7	670,27
2029	2,15	624,62
2030	1,9	603,87
2031	1,85	599,72
2032	1,49	569,84
2033	1,48	569,01
2034	1,47	568,18
2035	1,37	559,88

2036	1,33	556,56
2037	1,28	552,41
2038	1,22	547,43
2039	1,18	544,11
2040	1,1	537,47
2041	1,1	537,47
2042	1,1	537,47
2043	1,1	537,47
2044	1,1	537,47
2045	1,1	537,47
2046	1,1	537,47
2047	1,1	537,47
2048	1,1	537,47
2049	1,1	537,47
2050	1,1	537,47

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.2 Produção

Para estabelecer um cenário de exportação do aço verde, com base no preço e na disponibilidade de minério de ferro e hidrogênio, é preciso saber a demanda desses insumos para produção de uma tonelada de aço verde.

4.3.2.1 Proporção de Hidrogênio no Aço Verde

Segundo a Bellona (2020), a demanda elétrica para se produzir 1 tonelada de aço verde, através do processo de Redução Direta (DRI), com hidrogênio de baixo carbono, é de 3,2MWh. Paralelamente, o estudo da Frosty & Sullivan (2023), afirma que a eficiência elétrica dos eletrolisadores é de 47kWh/kg H₂ a 66kWh/kg H₂. Tomando como base a média dos valores máximo e mínimo de eficiência do eletrolisador, de 56,5kWh/kg H₂, obtém-se a demanda de H₂/ton de aço verde.

$$\text{Demanda de H}^2 / \text{ton de aço verde [kg H}^2\text{]} = \frac{3.200 \text{ [kWh]}}{56,5 \text{ [kWh}} \text{ [kg H}^2\text{]}} = 56,6372 \text{ kg H}^2$$

4.3.2.2 Proporção de Minério de Ferro no Aço Verde

Para obtermos a demanda de minério de ferro para produção de uma tonelada de aço verde, iremos analisar cada parte do processo DRI-EAF separadamente.

Etapa de Redução Direta (Direct Reduced Iron - DRI)

Segundo Miller (2023), é necessária 1,42 tonelada de minério de ferro para se produzir 1 tonelada de *DRI* (*Direct Reduced Iron*), comumente chamado de Ferro Esponja, como apresentado na Tabela 10.

Tabela 10: Principais valores de consumo típico do processo DRI.

Planta baseada em GN	
Capacidade DRI	1 Mtpa
Produção DRI por hora	125 t _{DRI} /h
Composição do consumo:	
- Pelotas de DRI	1.42 tons/t _{DRI}
- Gás Natural	2.5 Geal líq.
- Eletricidade	120kWh
- Água (considerando resfriamento)	1.5m ³
- Mão de obra (incluindo adm)	0.12 hora-homem
- Manutenção e suprimentos	4.00

Fonte: Miller (2023), adaptada pelo autor.

Etapa de Forno a Arco Elétrico (Electric Arc Furnace - EAF)

Para o cálculo da quantidade de ferro esponja (ou *DRI*) necessária para a obtenção de uma tonelada de aço verde, realiza-se comparação com os resultados apresentados por Rossi (2014). Em seu estudo de influência da vazão de gases na eficiência energética de um forno a arco elétrico, Rossi (2014) analisa a produção de aço a partir das cargas metálicas compostas, sobretudo, por sucata, e em menores quantidades de ferro-gusa e ferro-esponja, seguindo uma proporção conforme os modos de produção mais usuais. O autor conclui que é necessário de 1.074,2kg a 1.075,6kg de carga metálica para se obter uma tonelada de aço, pelo processo EAF.

Nesse estudo, será considerada a utilização integral do ferro-esponja como carga metálica, inferindo-se a mesma proporção daquela apresentada por Rossi (2014), pelo valor médio de 1.074,2kg a 1.075,6kg, resultando em 1.074,9kg de ferro-esponja (ou *DRI*) por tonelada de aço verde.

$$\text{Minério de Ferro} \left[\frac{Kg}{t} \right] = \frac{\text{Porporção DRI} \left[\frac{Kg}{t} \right] \cdot \text{Porporção EAF} \left[\frac{Kg}{t} \right]}{1000 \left[\frac{Kg}{t} \right]}$$

$$Minério de Ferro \left[\frac{Kg}{t} \right] = \frac{1.420 \left[\frac{Kg}{t} \right] \cdot 1.074,9 \left[\frac{Kg}{t} \right]}{1000 \left[\frac{Kg}{t} \right]} = 1.526,36 \frac{Kg}{t}$$

Com isso, obtém-se que, para a produção de uma tonelada de aço verde, a quantidade de minério de ferro demandada é de 1.526,36kg.

4.3.2.3 Limitante produtivo

A partir das proporções definidas, esta seção tem como objetivo detalhar o processo de cálculo realizado para encontrar a produção máxima de aço verde no Brasil, com base na capacidade instalada da indústria siderúrgica brasileira, nas proporções de uso e estimativas de produção dos insumos, isoladamente. Com base em:

- A capacidade instalada de produção de aço no Brasil, em 2023, segundo o Instituto Aço Brasil (2023) foi de 50.950.000 toneladas por ano. Foi considerado, como premissa, um crescimento de 3,6% ao ano para essa capacidade, seguindo a mesma taxa de crescimento do PIB brasileiro, prevista até o ano de 2050 (GOLDMAN SACHS, 2003);

$$CapInst_{ano\ n+1} = CapInst_{ano\ n} \cdot (1 + 3,6\%)$$

- O cálculo do máximo de produção de aço verde com base nas quantidades e proporção de hidrogênio de baixo carbono não é afetado pela disponibilidade do minério de ferro, e vice-versa; entende-se insumo como hidrogênio de baixo carbono ou minérios, calculados separadamente pela mesma fórmula;
- A produção máxima de aço verde no Brasil para cada insumo é calculada conforme equação:

$$Max\ Aço\ insumo,\ ano\ n\ [t] = \frac{PE\ insumo,\ ano\ n [Mt] \cdot 10^9 \left[\frac{Kg}{Mt} \right]}{Proporção\ \left[\frac{Kg}{t} \right]}$$

Sendo que:

- $Max\ Aço\ insumo,\ ano\ n$: máximo de aço verde produzido com a quantidade e proporção do insumo, em determinado ano;
- $PE_{ano\ n}$: produção estimada do insumo no mesmo determinado ano;
- $Proporção$: quantidade de insumo demandado por tonelada de aço verde.

Com base no racional descrito acima, o resultado é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11: Produção máxima de aço verde com base na capacidade da indústria, disponibilidade e proporção dos insumos isolados.

Ano	Máximo de aço verde produzido com a quantidade projetada de H ² (t)	Máximo de aço verde produzido com a quantidade projetada de minério (t)	Máximo de aço verde a partir da capacidade instalada de produção de aço bruto (t)
n	Max Aço _{H2}	Max Aço _{Minério}	CapInst
2023	87.102,52	350.934.184,5	50.950.000,0
2024	153.463,44	353.741.658,0	52.784.200,0
2025	270.382,85	356.571.591,2	54.684.431,2
2026	476.379,83	359.424.164,0	56.653.070,7
2027	839.320,01	362.299.557,3	58.692.581,3
2028	1.478.773,96	365.197.953,7	60.805.514,2
2029	2.605.409,61	368.119.537,4	62.994.512,7
2030	4.590.396,78	371.064.493,7	65.262.315,2
2031	8.087.688,99	374.033.009,6	67.611.758,5
2032	14.249.468,25	377.025.273,7	70.045.781,8
2033	25.105.731,14	380.041.475,9	72.567.430,0
2034	44.233.070,68	383.081.807,7	75.179.857,4
2035	77.932.983,93	386.146.462,2	77.886.332,3
2036	137.307.898,63	389.235.633,9	80.690.240,3
2037	241.918.865,09	392.349.518,9	83.595.088,9
2038	426.229.939,22	395.488.315,1	86.604.512,1
2039	750.962.356,81	398.652.221,6	89.722.274,6
2040	1.323.099.129,02	401.841.439,4	92.952.276,4
2041	2.331.130.567,79	405.056.170,9	96.298.558,4
2042	4.107.152.370,44	408.296.620,3	99.765.306,5
2043	7.236.274.461,47	411.562.993,2	103.356.857,5
2044	12.749.385.306,12	414.855.497,2	107.077.704,4
2045	22.462.777.849,21	418.174.341,1	110.932.501,8
2046	39.576.526.757,01	421.519.735,9	114.926.071,8
2047	69.728.752.190,05	424.891.893,8	119.063.410,4
2048	122.853.097.034,87	428.291.028,9	123.349.693,2

2049	216.451.362.989,00	431.717.357,1	127.790.282,1
2050	381.359.474.612,99	435.171.096,0	132.390.732,3

Fonte: Elaborada pelo autor

O máximo de produção do aço verde, de 2023 a 2050, é dado pelo mínimo das três colunas da tabela anterior.

$$Max\ Aço\ Verde_n = \min \begin{cases} Max\ Aço_{H2,n} \\ Max\ Aço_{Minério,n} \\ CapInst_n \end{cases}$$

Desta forma, obtém-se o resultado para a produção anual do aço verde que contemple a disponibilidade dos insumos e a capacidade instalada brasileira. O resultado é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12: Produção máxima de aço verde com base na capacidade instalada e disponibilidade e proporção dos insumos.

Ano	Máximo de aço verde produzido (t)
2023	87.102,52
2024	153.463,4
2025	270.382,9
2026	476.379,8
2027	839.320,0
2028	1.478.774,0
2029	2.605.409,6
2030	4.590.396,8
2031	8.087.689,0
2032	14.249.468,2
2033	25.105.731,1
2034	44.233.070,7
2035	77.886.332,3
2036	80.690.240,3
2037	83.595.088,9
2038	86.604.512,1
2039	89.722.274,6
2040	92.952.276,4
2041	96.298.558,4
2042	99.765.306,5
2043	103.356.857,5
2044	107.077.704,4

2045	110.932.501,8
2046	114.926.071,8
2047	119.063.410,4
2048	123.349.693,2
2049	127.790.282,1
2050	132.390.732,3

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.4 Comparação de cenários

Para comparação dos Cenários 1 e 2, calcula-se a quantidade de cada insumo utilizado para se obter a quantidade de aço verde calculado na Tabela 12, aplicando-se a equação:

$$PE_{insumo, ano n}[Mt] = \frac{MaxAço_{insumo, ano n}[t]. Proporção \left[\frac{Kg}{t} \right]}{10^9 \left[\frac{Kg}{Mt} \right]}$$

Com isso, chegamos no resultado apresentado na Tabela 13.

Tabela 13: Quantidades de H²R e Minério de Ferro utilizados nos Cenários 1 e 2.

Ano	Máximo de aço verde produzido (t)	Insumos estimados	
		Hidrogênio (Mt)	Minério de Ferro (Mt)
2023	87.102,52	0,005	0,13
2024	153.463,4	0,009	0,23
2025	270.382,9	0,015	0,41
2026	476.379,8	0,027	0,73
2027	839.320,0	0,048	1,28
2028	1.478.774,0	0,084	2,26
2029	2.605.409,6	0,148	3,98
2030	4.590.396,8	0,260	7,01
2031	8.087.689,0	0,458	12,34
2032	14.249.468,2	0,807	21,75
2033	25.105.731,1	1,422	38,32
2034	44.233.070,7	2,505	67,52
2035	77.886.332,3	4,411	118,88
2036	80.690.240,3	4,570	123,16
2037	83.595.088,9	4,735	127,60
2038	86.604.512,1	4,905	132,19

2039	89.722.274,6	5,082	136,95
2040	92.952.276,4	5,265	141,88
2041	96.298.558,4	5,454	146,99
2042	99.765.306,5	5,650	152,28
2043	103.356.857,5	5,854	157,76
2044	107.077.704,4	6,065	163,44
2045	110.932.501,8	6,283	169,32
2046	114.926.071,8	6,509	175,42
2047	119.063.410,4	6,743	181,73
2048	123.349.693,2	6,986	188,28
2049	127.790.282,1	7,238	195,05
2050	132.390.732,3	7,498	202,08

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com as quantidades de cada um dos três produtos, retoma-se as projeções de preço para o cálculo de seus valores de exportação, que será o produto do preço pela quantidade calculados e apresentados anteriormente.

$$Valor\ de\ Exportação = Preço \cdot Quantidade$$

- Minério de ferro:
 - Preço - Tabela 8: Previsão de preço do minério de ferro, 2023-2050.
 - Quantidade - Tabela 13: Quantidades de H²R e Minério de Ferro utilizados nos Cenários 1 e 2.
- Hidrogênio:
 - Preço - Tabela 4: Preço do hidrogênio, 2021-2050.
 - Quantidade - Tabela 13: Quantidades de H²R e Minério de Ferro utilizados nos Cenários 1 e 2.
- Aço Verde:
 - Preço - Tabela 9: Estimativa de preço do aço verde, 2023-2050.
 - Quantidade - Tabela 12: Produção máxima de aço verde com base na capacidade instalada e disponibilidade e proporção dos insumos.

O resultado do cálculo é apresentado na Tabela 14.

Tabela 14: Valor de exportação do aço verde, minério de ferro e hidrogênio de baixo carbono.

Ano	PIB (US\$ Milhões)	Minério de Ferro	Hidrogênio	Aço Verde
		Valor (US\$ Milhões)	Valor (US\$ Milhões)	Valor (US\$ Milhões)
2023	2.251.740,45	10,76	25,65	76,46
2024	2.332.803,11	17,83	41,72	129,61
2025	2.416.784,02	33,30	67,38	219,38
2026	2.503.788,24	62,64	102,53	362,80
2027	2.593.924,62	117,27	156,87	604,37
2028	2.687.305,91	219,84	226,13	991,18
2029	2.784.048,92	411,38	317,26	1.627,39
2030	2.884.274,68	770,40	493,98	2.772,00
2031	2.988.108,57	1.446,72	847,42	4.850,35
2032	3.095.680,48	2.708,15	1.202,50	8.119,92
2033	3.207.124,97	5.064,39	2.104,44	14.285,41
2034	3.322.581,47	9.525,89	3.682,70	25.132,35
2035	3.442.194,41	17.883,44	6.043,43	43.607,00
2036	3.566.113,41	19.713,94	6.078,19	44.908,96
2037	3.694.493,49	21.731,81	6.060,27	46.178,76
2038	3.827.495,25	23.743,01	5.984,14	47.409,91
2039	3.965.285,08	25.952,78	5.996,31	48.818,79
2040	4.108.035,35	28.573,25	5.791,01	49.959,06
2041	4.255.924,62	31.463,00	5.999,49	51.757,59
2042	4.409.137,90	34.634,80	6.215,47	53.620,86
2043	4.567.866,87	38.126,45	6.439,22	55.551,21
2044	4.732.310,08	41.966,23	6.671,04	57.551,05
2045	4.902.673,24	46.193,82	6.911,19	59.622,89
2046	5.079.169,48	50.845,96	7.160,00	61.769,32
2047	5.262.019,58	55.954,74	7.417,76	63.993,01
2048	5.451.452,28	61.575,94	7.684,80	66.296,76
2049	5.647.704,56	67.765,31	7.961,45	68.683,44
2050	5.851.021,93	74.551,94	8.248,06	71.156,05

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para compor a coluna do PIB brasileiro, utiliza-se o valor publicado pelo IBGE (2024), de R\$10,9 trilhões. Considerando que a taxa de câmbio real-dólar, no fechamento do ano de 2023, foi de 4,8407, conforme indica a Ipeadata (2024), do Banco Central do Brasil, conclui-se que o ano de 2023 teve um Produto Interno Bruto de US\$2,25 trilhões. A partir deste ano, considera-se um crescimento anual de 3,6%, conforme estimativa do Goldman Sachs (2003).

Somando as colunas de valor de exportação do minério de ferro com hidrogênio de baixo carbono, e comparando com a projeção do PIB, chegamos no seguinte resultado.

Tabela 15: Comparação dos Cenários 1 e 2.

	<i>Cenário 1: Exportação de H² e Minério de Ferro (sem beneficiamento industrial)</i>		<i>Cenário 2: Exportação de Aço Verde</i>	
<i>Ano</i>	<i>Valor (US\$ Milhões)</i>	<i>Part. (%) dos Produtos em Valor no PIB</i>	<i>Valor (US\$ Milhões)</i>	<i>Part. (%) dos Produtos em Valor no PIB</i>
2023	36,41	0,002%	76,46	0,003%
2024	59,55	0,003%	129,61	0,006%
2025	100,69	0,004%	219,38	0,009%
2026	165,17	0,007%	362,80	0,014%
2027	274,14	0,011%	604,37	0,023%
2028	445,98	0,017%	991,18	0,037%
2029	728,65	0,026%	1.627,39	0,058%
2030	1.264,37	0,044%	2.772,00	0,096%
2031	2.294,14	0,077%	4.850,35	0,162%
2032	3.910,65	0,126%	8.119,92	0,262%
2033	7.168,83	0,224%	14.285,41	0,445%
2034	13.208,59	0,398%	25.132,35	0,756%
2035	23.926,86	0,695%	43.607,00	1,267%
2036	25.792,13	0,723%	44.908,96	1,259%
2037	27.792,08	0,752%	46.178,76	1,250%
2038	29.727,15	0,777%	47.409,91	1,239%
2039	31.949,09	0,806%	48.818,79	1,231%
2040	34.364,26	0,837%	49.959,06	1,216%
2041	37.462,48	0,880%	51.757,59	1,216%
2042	40.850,26	0,926%	53.620,86	1,216%
2043	44.565,68	0,976%	55.551,21	1,216%
2044	48.637,26	1,028%	57.551,05	1,216%
2045	53.105,01	1,083%	59.622,89	1,216%
2046	58.005,96	1,142%	61.769,32	1,216%
2047	63.372,49	1,204%	63.993,01	1,216%
2048	69.260,73	1,271%	66.296,76	1,216%
2049	75.726,76	1,341%	68.683,44	1,216%
2050	82.800,00	1,415%	71.156,05	1,216%
Total	776.995,36		950.055,86	

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir dos resultados obtidos, observa-se como um produto com maior beneficiamento industrial pode ajudar o Brasil a internalizar sua geração de valor, além de descarbonizar setores extremamente emissores, como o da siderurgia. Nos primeiros anos da análise, o valor de exportação do aço verde é maior que o dobro do valor da exportação de seus insumos. Apesar de os últimos três anos da análise não demonstrarem vantagem do aço

verde frente aos seus insumos, o valor total de exportação do Cenário 2 permanece mais vantajoso para a economia brasileira, tanto em termos econômicos, quanto na transição para uma economia de baixo carbono. Essa inversão de representatividade no PIB, percebida a partir de 2027, se dá pelo constante aumento do preço do minério de ferro, por este ser um recurso finito. Além disso, o preço do minério não foi considerado como variável de influência no preço do aço verde, para fins de simplificação das análises e definição dos cenários.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A cadeia do hidrogênio de baixo carbono, apesar de incipiente, já se demonstrou muito relevante para a transição energética global. Com um potencial de compor e descarbonizar setores já estabelecidos e de extrema importância para a economia mundial, o hidrogênio de baixo carbono deve seguir uma tendência de crescimento acelerado, impulsionado pelas pressões nacionais e internacionais de atenção às mudanças climáticas. Para o Brasil, que apresenta ótimas condições de geração de energia renovável, explorar o hidrogênio de baixo carbono significa ir além de seu uso como vetor energético. Neste contexto, o trabalho em questão utilizou de dois cenários hipotéticos para comprovar o benefício da internalização da cadeia do hidrogênio de baixo carbono, tanto por um viés econômico, analisado quantitativamente, quanto por um viés de emissões de carbono, analisado qualitativamente.

Os desafios encontrados para elaborar este trabalho se resumiram a dois principais aspectos. Em primeiro, a dificuldade de encontrar projeções, por se tratar de uma cadeia ainda não estabelecida, com fatores comerciais e tecnológicos ainda em desenvolvimento. Subsequentemente, destaca-se também o desafio de definir o recorte de análise e os fatores de influência entre projeções, visto que as estimativas realizadas são multifatoriais e dependem de cenários futuros com alta imprevisibilidade. Contudo, os resultados indicam que o foco da cadeia do hidrogênio renovável no beneficiamento industrial de outros produtos traz vantagens para o Brasil. Na primeira década da análise, o valor de exportação do aço verde superou em mais que o dobro da exportação dos seus insumos, e permaneceu mais vantajoso até 2047; de modo geral, o valor total de exportação no Cenário 2 se mostrou 22,3% maior que o Cenário 1. Portanto, apesar dos desafios e incertezas, os resultados indicam que investir em tecnologias e processos de produção de baixo carbono é uma estratégia vantajosa para o Brasil, impulsionando a economia e promovendo a sustentabilidade.

Fica como sugestão para trabalhos futuros o entendimento de iniciativas que podem acelerar o desenvolvimento da cadeia do hidrogênio de baixo carbono no Brasil, e sua relação com cadeias adjacentes.

Reitera-se que os potenciais ganhos para o Brasil de internalizar a geração de valor, exportando produtos com maior complexidade industrial, vão além dos apresentados neste estudo. Isso ocorre devido ao fato de que os cenários definidos representam apenas um recorte do valor que pode ser gerado pela economia do hidrogênio brasileiro, mantendo esta estratégia, o Brasil pode se beneficiar do uso do hidrogênio renovável em outras cadeias, como a de mineração, transportes e combustíveis, fertilizantes e amônia, metanol, entre outras.

Intrínseco ao aumento do Produto Interno Bruto e do superavit da balança comercial, destaca-se também outros fatores afetados positivamente pela cadeia do hidrogênio com foco no mercado interno, como a renda populacional brasileira, a geração de emprego e o estímulo ao desenvolvimento de novas tecnologias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. ANEEL aprova Chamada para projetos de hidrogênio no contexto do Setor Elétrico. Brasília: ANEEL, 2024. Disponível em: [https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/aneel-aprova-chamada-para-projetos-de-hidrogenio-no-contexto-do-setor-eletro#:~:text=As%20regras%20para%20a%20Chamada,P%C3%BAblica%20\(CP18%2F2023\)](https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/aneel-aprova-chamada-para-projetos-de-hidrogenio-no-contexto-do-setor-eletro#:~:text=As%20regras%20para%20a%20Chamada,P%C3%BAblica%20(CP18%2F2023).). Acesso em: 25 mar. 2024.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Anuário Estatístico 2023. 2023. Disponível em: https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2023/07/AcoBrasil_Anuario_2023.pdf. Acesso em: 05 jun. 2024.

BELLONA. Hydrogen-DRI for Steel in a Resource-Constrained Europe. 2023. Disponível em: <https://network.bellona.org/content/uploads/sites/3/2023/07/HYDROGEN-DRI-FOR-STEEL-IN-A-RESOURCE-CONSTRAINED-EUROPE-V3-1-1-1.pdf>. Acesso em: 8 mai. 2024.

BRASIL. Ministério da Economia. Publicações e Dados Consolidados - Balança Comercial. Disponível em: https://balanca.economia.gov.br/balanca/publicacoes_dados Consolidados/pg.html. Acesso em: 28 abr. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Caderno 2: Pesquisa e Produção Mineral. 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/pnm-2050/estudos/caderno-2-pesquisa-e-producao-mineral/EstudosMSWordPNM2050Caderno220221116_Vol.I.pdf. Acesso em: 25 mai. 2024.

CNI. Confederação Nacional das Indústrias. Hidrogênio Sustentável: Perspectivas e Potencial para a Indústria Brasileira. Brasília: CNI, 2022. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2022/08/CNI-hidrogenio-verde-sustentavel-13ago2022.pdf>

COPERNICUS. 2023 is the hottest year on record, with global temperatures close to the 1.5°C limit. Copernicus, 9 jan. 2024. Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2023-hottest-year-record>. Acesso em: 5 jun. 2024.

DE OLIVEIRA, Rosana Cavalcante. **Panorama do hidrogênio no Brasil.** IPEA. Texto para Discussão, 2022.

DELLITE. **Perspectivas Globais para o Hidrogênio Verde 2023: Energizando o caminho para a descarbonização.** DELLOITE, 2023. Disponível em: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/br/Documents//about-deloitte/Deloitte.sumario-executio-hidrogenio.pdf>

DNV. Det Norske Veritas. **Hydrogen Forecast to 2050: Energy Transition Outlook 2022.** Høvik, Noruega: DNV AS, 2022. Disponível em: <https://www.dnv.com/focus-areas/hydrogen/forecast-to-2050.html>.

EDP. **Producir energía através do hidrogênio.** 2023. <https://www.edp.com/es/innovacion/flexnconfu-producir-energia-atraves-do-hidrogenio>

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Hidrogênio Cinza: Produção a partir da reforma a vapor do gás natural.** 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrog%C3%A3o%20Cinza.pdf>

FGV Energia. **Hidrogênio de Baixo Carbono: a importância dos avanços em questões estruturantes.** 2023. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_hidrogenio_-_digital_28_02_24.pdf. Acesso em: 25 mar.2024.

FRANCISCHETTI, Carlos Eduardo; PADOVEZE, Clóvis Luís; GIULIANI, Antonio Carlos. **Resgate histórico da relação exponencial sobre os juros compostos.** Revista da FAE, v. 10, n. 1, 2007. Disponível em: <https://revistafae.fae.emnuvens.com.br/revistafae/article/view/321>. Acesso em: 05 mai. 2024.

FROST & SULLIVAN. **Growth Opportunities in Electrolyzer Technologies for Hydrogen Production in Emerging Markets:** R&D of Alternative and Innovative Materials to Drive Future Growth Potential of Electrolyzer Technologies for Green Hydrogen Production. 2023.

GESEL. A Economia do Hidrogênio: Transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil. Rio de Janeiro: GESEL, 2023. Disponível em: https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/04/livro_economia_do_h2.pdf

GIZ. Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde. 2021. Disponível em: https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user_upload/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2h.pdf.

GOLDMAN SACHS. Dreaming with BRICs: The Path to 2050. Goldman Sachs Global Economics Paper No. 99, 2003. Disponível em: <https://globaltrends.thedialogue.org/publication/dreaming-with-brics-the-path-to-2050/>. Acesso em: 5 jun. 2024.

HALL, W. et al. Green Steel through Hydrogen Direct Reduction: A study on the role of hydrogen in the Indian iron and steel sector. New Delhi: The Energy and Resources Institute (TERI), 2021.

HYDROGEN COUNCIL. Hydrogen Insights 2021: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness. 2021. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2021/>. Acesso em: 8 abr. 2024.

IEA. Hydrogen in Latin America: From near-term opportunities to large-scale deployment. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/hydrogen-in-latin-america>

IEA. International Energy Agency. Global Hydrogen Review 2022. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>.

IEA. International Energy Agency. Global Hydrogen Review 2023. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/8d434960-a85c-4c02-ad96-77794aaa175d/GlobalHydrogenReview2023.pdf>.

IEA; IRENA; UNSD; Banco Mundial; OMS. Tracking SDG 7: The Energy Progress Report 2023. Washington, DC: Banco Mundial, 2023.

IFP - Innovation Energy Environment. **Potential biomass mobilization for biofuel worldwide, in Europe and in France, Panorama.** IFP Energies Nouvelles. 2007.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities.** 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em: 25 mar. 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Green Hydrogen: A guide to policy making.** 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen-A-guide-to-policy-making>. Acesso em: 26 mar. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produto Interno Bruto (PIB).** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php>. Acesso em: 06 jun. 2024.

IPEADATA. **IGP-DI - Índice Geral de Preços - Disponibilidade Interna.** Disponível em: <http://www.ipeadata.gov.br/ExibeSerie.aspx?stub=1&serid=38590&module=M>. Acesso em: 26 mai. 2024.

IPEADATA. **Metodologia IGP-DI.** Disponível em: <http://www.ipeadata.gov.br/doc/METODOLOGIA%20IGP-DI.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2024.

MAKRIDAKIS, Spyros; WHEELWRIGHT, Steven C.; HYNDMAN, Rob J. **Forecasting: Methods and Applications.** 3. ed. 2008. Disponível em: <https://pdfcoffee.com/makridakis-wheelwright-amp-hyndman-forecasting-methods-and-applications-3rd-ed-2-pdf-free.html>. Acesso em: 8 mai. 2024.

MILLNER, Robert et al. **MIDREX H2: The Ultimate Low-CO2 Ironmaking and Its Place in the New Era of Green Steel.** 2023. Disponível em: https://www.primetals.com/fileadmin/user_upload/landing_pages/2021/Green_Steel/Publications/downloads/AISTech_2021_MIDREX_H2_Final.pdf. Acesso em: 8 mai. 2024.

MME. **Plano Nacional do Hidrogênio: Plano de Trabalho Trienal 2023-2025.** Brasília: MME, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/PlanodeTrabalhoTrienalPNH2.pdf>

NETO, R. L.; MOREIRA, J. R. S. **Geração E Combustão Do Hidrogênio Obtido Através Do Processo De Eletrólise Da Água.** 2007.

ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL. **Global Annual to Decadal Climate Update: 2024-2028.** Genebra: WMO, 2023. Disponível em: https://library.wmo.int/viewer/68910/download?file=WMO_GADCU_2024-2028_en.pdf&type=pdf&navigator=1. Acesso em: 25 mar. 2024.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Climate change and health.** 2021. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>. Acesso em: 25 mar. 2024.

PETERNELLI, Luiz. **Capítulo 9: Regressão Linear Simples.** 2004. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/176798/mod_resource/content/1/Cap%C3%ADtulo%20-%20Regress%C3%A3o%20Linear%20Simples.pdf. Acesso em: 08 mai. 2024.

PINHO, Tiago Serra. **Produção de Hidrogénio através da Gasificação da Biomassa.** 2011. Dissertação de Mestrado. Instituto Politecnico do Porto (Portugal).

ROSSI, Daniel. **Influência da proporção entre as vazões de oxigênio e gás natural do sistema de injeção na eficiência energética de um forno elétrico a arco.** 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SECRETARIA DO COMÉRCIO EXTERIOR. Ministério da Economia. **Exportações Brasileiras de Minério de Ferro.** Disponível em: https://balanca.economia.gov.br/balanca/publicacoes_dados_consolidados/pg.html. Acesso em: 28 mai. 2024.

SIEMENS ENERGY. **Power-to-X: The crucial business on the way to a carbon-free world.** 2021. Disponível em: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offering/technical-papers/download-power-to-x.html>. Acesso em: 29 mai. 2024.

STAFFELL, Iain et al. **The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system.** Energy & Environmental Science, v. 12, n. 2, p. 463-491, 2019.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE

(UNFCCC). **The Paris Agreement.** Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>. Acesso em: 8 abr. 2024.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **What is the United Nations Framework Convention on Climate Change?** Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-convention/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change>. Acesso em: 8 abr. 2024.

UNITED NATIONS. **The Sustainable Development Goals Report 2023.** New York: United Nations, 2023. Disponível em: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/>. Acesso em: 8 abr. 2024.

VELLARDO, R. **Rotas Tecnológicas e Potencial de Produção de H₂ de Baixo Carbono no Brasil.** EPE. Rio de Janeiro. 2023. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-758/H2_Pipeline%20\(1\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-758/H2_Pipeline%20(1).pdf). Acesso em: 22 mai. 2024.

WUPPERTAL INSTUT. **Global Steel at a Crossroads: Insights from the latest industry trends.** 2021. Disponível em: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021-06_IND_INT_GlobalSteel/A-EW_298_GlobalSteel_Insights_WEB.pdf. Acesso em: 22 mai. 2024.

Apêndice A – Fórmulas e Ferramentas

A.I Taxa de Crescimento Anual Composto

Em diversos momentos da análise, por conta da imaturadade da cadeia estudada, as informações disponíveis se restringiam a estimativas de um ano específico. A fim de se obter cenários comparativos com valores ano a ano, foi utilizada a fórmula de taxa de crescimento anual composto, que deriva da fórmula de valor futuro.

O valor futuro representa o valor resultante de uma série de crescimento composto em um determinado período de tempo. Francischetti, Padoveze e Giuliani (2007) afirmam que podemos calcular o valor futuro pela fórmula a seguir:

$$VF = VP \cdot (1 + i)^n$$

Onde:

VF = Valor futuro

VP = Valor presente

i = Taxa de juros constante

n = Período

Da mesma forma, quando se objetiva encontrar a taxa de crescimento entre um valor inicial e o valor final, num determinado período de tempo, pode-se rearranjar a fórmula citada para encontrar a taxa de crescimento (i), conforme demonstrado a seguir:

Dividindo ambos os lados por VP :

$$\frac{VF}{VP} = (1 + i)^n$$

Tirando a raiz enésima de ambos os lados:

$$\left(\frac{VF}{VP}\right)^{\frac{1}{n}} = (1 + i)$$

Subtraindo 1 de ambos os lados:

$$i = \left(\frac{VF}{VP}\right)^{\frac{1}{n}} - 1$$

Normalmente, estas fórmulas são aplicadas para cálculos financeiros. Entretanto, elas podem ser utilizadas para encontrar uma taxa de crescimento em qualquer contexto que se

tenha um valor incial (ou valor presente – VP), um valor final (ou valor futuro – VF) e o período em que o crescimento acontece.

A.II Regressão Linear

Segundo Peternelli (2004), a regressão linear é um método estatístico que busca modelar a relação entre uma variável dependente Y e uma ou mais variáveis independentes X . No caso mais simples, conhecido como regressão linear simples, que será utilizado adiante, consideramos apenas uma variável independente. A relação entre as variáveis é expressa pela equação de uma linha reta:

$$Y = a + b_1 \cdot X + e$$

Onde:

- Y é a variável dependente que desejamos prever ou explicar;
- X é a variável independente que usamos como base para a previsão;
- a é o intercepto da regressão, representando o valor esperado de Y quando X é zero;
- b é o coeficiente de regressão que indica a mudança esperada em Y quando X é zero;
- e é o termo de erro, que captura a variabilidade em Y não explicada por X

Para determinar a , b , e e , devemos seguir:

Passo 1: Cálcular média de X e Y

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$$

Passo 2: Calcular o coeficiente angular b , dado por:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

Passo 3: Calcular a interceptação a , dada por:

$$a = \bar{Y} - b \cdot \bar{X}$$

Passo 4: Calculamos o erro amostral da regressão

Primeiro, encontramos os valores previstos \bar{Y}_i :

$$\bar{Y}_i = a + b \cdot X_i$$

Depois, calculamos a soma dos quadrados dos resíduos:

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2$$

Finalmente, o erro amostral da regressão e é dado por:

$$e = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2}{n - 2}}$$

A.III Média Móvel

Segundo Makridakis (2008), A média móvel é uma ferramenta estatística amplamente utilizada em finanças e economia para suavizar séries temporais e identificar tendências subjacentes. Esta pode ser usada para fazer previsões ao estender a tendência identificada para períodos futuros.

No método de média móvel, cada novo dado disponível substitui o mais antigo, mantendo constante o número de dados considerados na análise. Dessa forma, a média é recalculada continuamente com base nos dados mais recentes. Este processo garante que a análise reflete sempre a informação mais atualizada possível, mantendo a quantidade de dados constante ao longo do tempo.

Apêndice B – Memória de Cálculo para Taxa de Crescimento da Produção do Hidrogênio

Dados apresentados em 4.1.1:

- O valor do potencial técnico de forma normalizada, no horizonte de 2023 a 2050 é de 1.783,9Mt/ano de hidrogênio de baixo carbono;
- A produção de hidrogênio de baixo carbono, em 2022, no Brasil, foi de 0,0028 Mt;
- Busca-se calcular a Taxa de crescimento de 2022 a 2050, para que os somatórios anualizado e não anualizado totalizem o mesmo valor.

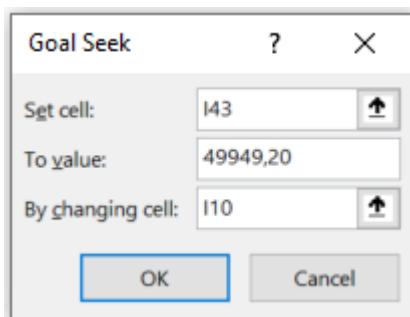
Tabela 16: Estimativa do potencial técnico brasileiro de produção de hidrogênio anualizado.

Taxa de crescimento (2022 a 2050)		t
Ano [i]	Anualizado (Mt)	Não-anualizado (Mt) [n]
2022	-	0,0028
2023	1.783,9	$= n_{2023-1}*(1+t)$
i	1.783,9	$= n_{i-1}*(1+t)$
2050	1.783,9	$= n_{2050-1}*(1+t)$
Total	49.949,20	$\sum_{2022}^{2050} (n_i) = 49.949,20$

Fonte: Elaborada pelo autor.

A célula de total da coluna anualizada representa a soma dos valores de 1.783,9 Mt/ano, de 2023 a 2050, este será o valor de referência na análise Atingir Meta. A célula de Taxa de Crescimento é deixada em branco inicialmente, esta será a célula variada na análise de Atingir a Meta.

Figura 9: Janela de configuração da ferramenta Atingir Meta.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Neste caso, a *Set cell* (I43) representa o Total não-anualizado, que deve atingir o mesmo valor que o total anualizado (valor meta). O software testa valores para a taxa de crescimento (I10) até que a *Set cell* atinja o valor meta. Após rodar a analise, chega-se ao resultado da Taxa de Crescimento de 2022 a 2050 de 76,2%.

Apêndice C – Projeção do índice de inflação IPA-DI

Os dados históricos do IPA-DI, da Brasil Indicadores (2024), estão disponíveis de 1996 a 2023, esses valores suportam a base de cálculo para a projeção do indicador de 2024 a 2050.

Tabela 17: Histórico de Valores do IPA-DI.

Ano	Acumulado no ano	Ano	Acumulado no ano
1996	6,70%	2010	13,83%
1997	7,80%	2011	4,12%
1998	1,51%	2012	9,14%
1999	28,88%	2013	5,06%
2000	12,06%	2014	2,17%
2001	11,88%	2015	11,32%
2002	35,41%	2016	7,73%
2003	6,27%	2017	-2,52%
2004	14,67%	2018	8,73%
2005	-0,96%	2019	9,60%
2006	4,31%	2020	31,73%
2007	9,43%	2021	20,61%
2008	9,80%	2022	4,70%
2009	-4,09%	2023	-5,93%

Fonte: Brasil Indicadores (2024).

Para a definição dos valores de IPA-DI de 2024 a 2050, foi utilizada a Média Móvel, tratada no Anexo A. A periodicidade definida para esta análise será de 15 anos, para que a previsão capture tendências de longo prazo, definida como premissa nesse estudo. Durante a análise dos dados, percebe-se que o ano de 2020 apresenta resultado com grande desvio em relação a série histórica, sendo o maior valor acumulado da história do indicador, devido a pandemia da Covid-19, portanto, não será utilizado para a previsão dos dados futuros. O resultado é apresentado na Tabela 18.

Tabela 18: Previsão de Valores do IPA DI, 2024-2050.

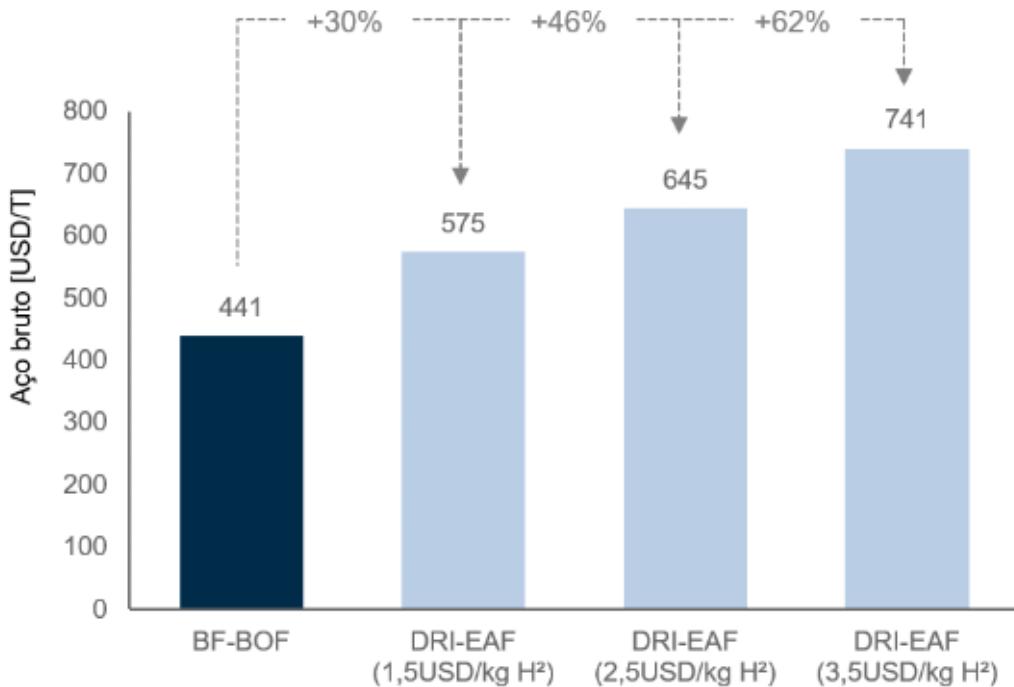
Ano	Acumulado no ano	Ano	Acumulado no ano
1996	6,70%	2024	6,03%
1997	7,80%	2025	6,76%
1998	1,51%	2026	6,25%
1999	28,88%	2027	6,40%
2000	12,06%	2028	6,21%
2001	11,88%	2029	6,29%
2002	35,41%	2030	6,58%
2003	6,27%	2031	6,25%
2004	14,67%	2032	6,14%
2005	-0,96%	2033	6,76%
2006	4,31%	2034	6,62%
2007	9,43%	2035	6,41%
2008	9,80%	2036	6,41%
2009	-4,09%	2037	5,46%
2010	13,83%	2038	5,51%
2011	4,12%	2039	6,27%
2012	9,14%	2040	6,29%
2013	5,06%	2041	6,26%
2014	2,17%	2042	6,26%
2015	11,32%	2043	6,25%
2016	7,73%	2044	6,25%
2017	-2,52%	2045	6,25%
2018	8,73%	2046	6,22%
2019	9,60%	2047	6,22%
2020	-	2048	6,23%
2021	20,61%	2049	6,19%
2022	4,70%	2050	6,16%
2023	-5,93%		

Fonte: Elaborada pelo autor.

Apêndice D – Memória de cálculo da equação do preço do aço verde em função do preço do hidrogênio de baixo carbono

Dados apresentados em 4.3.1:

Figura 8: Custos de Opex BF-BOF versus H² DRI-EAF.



Fonte: Wuppertal Instut (2021), adaptada pelo autor.

Passo 1: Calcular média de X e Y, dados por:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$$

Dados:

- $X = [1,5; 2,5; 3,5]$
- $Y = [575; 645; 741]$

Número de Observações: 3

Média de X :

$$\bar{X} = \frac{1,5 + 2,5 + 3,5}{3} = \frac{7,5}{3} = 2,5$$

Média de Y :

$$\bar{Y} = \frac{575 + 645 + 741}{3} = \frac{1961}{3} = 653,67$$

Passo 2: Calcular o coeficiente angular b , dado por:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

Calculando $\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})$:

$$\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y}) = (1,5 - 2,5) \cdot (575 - 653,67) + (2,5 - 2,5) \cdot (645 - 653,67) + (3,5 - 2,5) \cdot (741 - 653,67)$$

$$\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y}) = (-1) \cdot (-78,67) + (0) \cdot (-8,67) + (1) \cdot (87,33)$$

$$\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y}) = 78,67 + 87,33$$

$$\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y}) = 166$$

Calculando $\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$:

$$\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = (1,5 - 2,5)^2 + (2,5 - 2,5)^2 + (3,5 - 2,5)^2$$

$$\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = (-1)^2 + (0)^2 + (1)^2$$

$$\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = 1 + 0 + 1 = 2$$

Finalmente, calculamos o coeficiente angular b :

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} = \frac{166}{2} = 83$$

Passo 3: Calcular a interceptação a , dada por:

$$a = \bar{Y} - b \cdot \bar{X}$$

$$a = 653,67 - 83 \cdot 2,5$$

$$a = 653,67 - 207,5 = 446,17$$

Passo 4: Calcular o erro amostral da regressão:

Primeiro, encontramos os valores previstos \bar{Y}_i :

$$\bar{Y}_i = a + b \cdot X_i$$

- Para $X_1 = 1,5$

$$\bar{Y}_i = 446,17 + 83 \cdot 1,5 = 446,17 + 124,5 = 570,67$$

- Para $X_2 = 2,5$

$$\bar{Y}_i = 446,17 + 83 \cdot 2,5 = 446,17 + 207,5 = 653,67$$

- Para $X_3 = 3,5$

$$\bar{Y}_i = 446,17 + 83 \cdot 3,5 = 446,17 + 290,5 = 736,67$$

Depois, calculamos a soma dos quadrados dos resíduos:

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2$$

- Para $Y_1 = 575$

$$(Y_i - \bar{Y}_i)^2 = (575 - 570,67)^2 = 4,33^2 = 18,7489$$

- Para $Y_2 = 645$

$$(Y_i - \bar{Y}_i)^2 = (645 - 653,67)^2 = -8,67^2 = 75,1689$$

- Para $Y_3 = 741$

$$(Y_i - \bar{Y}i)^2 = (741 - 736,67)^2 = 4,33^2 = 18,7489$$

Somando os termos:

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}i)^2 = 18,7489 + 75,1689 + 18,7489 = 112,6667$$

Finalmente, o erro amostral da regressão e é dado por:

$$e = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}i)^2}{n-2}} = \pm \sqrt{\frac{112,6667}{3-2}} = \pm \sqrt{112,6667} = \pm 10,61$$

Conclui-se a equação do preço do aço verde (US\$/t), em função do preço do hidrogênio de baixo carbono (US\$/kg).

$$\text{Preço Aço Verde} = 446,17 + 83 \cdot \text{Preço H}^2 \pm 10,61$$