

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LUIZA LUPE RODRIGUES CAMARGO

**USO DE H₂V EM ACIARIAS: PERSPECTIVAS E DESAFIOS PARA SIDERURGIA
SUSTENTÁVEL**

**Bagé
2024**

LUIZA LUPE RODRIGUES CAMARGO

**USO DE H₂V EM ACIARIAS: PERSPECTIVAS E DESAFIOS PARA SIDERURGIA
SUSTENTÁVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia de Energia da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientadora: Dra. Sabrina Neves da Silva

**Bagé
2024**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo (a) autor (a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

C813u Camargo, Luiza Lupe Rodrigues
USO DE H₂V EM ACIARIAS: PERSPECTIVAS E DESAFIOS PARA
SIDERURGIA SUSTENTÁVEL / Luiza Lupe Rodrigues Camargo.
73 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)-- Universidade Federal do Pampa,
ENGENHARIA DE ENERGIA, 2024.
"Orientação: Sabrina Neves da Silva".

1. Aço Verde. 2. Hidrogênio Verde. 3. Matriz Energética. 4. Siderurgia. 5.
Transição Energética.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

LUIZA LUPE RODRIGUES CAMARGO

**USO DE H₂V EM ACIARIAS: PERSPECTIVAS E DESAFIOS PARA SIDERURGIA
SUSTENTÁVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para o Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 17 de dezembro de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dra. Sabrina Neves da Silva
Orientadora
UNIPAMPA

Prof. Msc. Daniele Ferreira Lopes
UNIPAMPA

Prof. Dr. Luciano Vieceli Taveira
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **SABRINA NEVES DA SILVA** PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR, em 16/12/2024, às 09:50, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUCIANO VIECELI TAVEIRA** PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR, em 17/12/2024, às 15:21, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **DANIELE FERREIRA LOPES**, PROFESSOR MAGISTERIO SUPERIOR - SUBSTITUTO, em 17/12/2024, às 15:49, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1627475** e o código CRC **6C02E20F**.

Dedico este trabalho aos meus pais, pois é graças ao esforço deles que eu tenho o privilégio de poder concluir uma faculdade federal.

AGRADECIMENTOS

Finalizar uma graduação sempre foi um sonho, mas muitas vezes, cheguei a duvidar da minha capacidade. Não foi fácil e nunca será, são inúmeras as adversidades pelo caminho, mas hoje entendo, que sem elas não saberíamos dar o valor real às nossas conquistas.

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre me guiar e me manter firme nos meus objetivos. Agradeço aos meus pais, Eva e Ronaldo Camargo, por dedicarem cada segundo de suas vidas a mim, pelo esforço incansável e por me proporcionarem condições para que eu pudesse chegar até aqui, sem que me faltasse nada.

Agradeço ao meu companheiro, Patrick, por ser meu ponto de equilíbrio e me ajudar em inúmeros desafios. Agradeço à minha orientadora, a Professora Dr^a. Sabrina Neves da Silva por ter aceitado me acompanhar neste projeto. Onde se mostrou disponível em todos os momentos, empenhada para me guiar nas dificuldades que iam surgindo ao longo do percurso.

“O conhecimento é a única coisa que ninguém
pode tirar de você.”

Paulo Coelho

RESUMO

No contexto de transição energética, os países vêm assumindo compromissos e metas, a exemplo da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) e do Acordo de Paris de 2015, com a finalidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) a fim de mitigar as mudanças climáticas e consolidar o desenvolvimento sustentável. Nesse ponto, o hidrogênio verde desempenha um papel crucial para substituir os combustíveis fósseis. Aliado a esse panorama, a indústria siderúrgica precisa se adequar às metas globais de redução de emissões decorrentes do processo de produção de aço. Com base nesses aspectos, este trabalho tem como objetivos investigar o conceito de aço verde e seu estado da arte, os desafios e projeções para a siderurgia sustentável. Maior ênfase será dada ao cenário brasileiro, destacando suas peculiaridades, desafios e vantagens frente ao processo de descarbonização mundial. Na análise do estado da arte, escopo desta etapa do trabalho, verificou-se que a redução direta do minério de ferro por hidrogênio verde juntamente com uso do forno a arco elétrico para produção de aço se mostra bastante eficaz em reduzir as emissões de gases do efeito estufa. Porém, verificou-se que essas tecnologias, tenham potencial para transformar o panorama tecnológico da indústria siderúrgica e ter um impacto significativo na redução das emissões, a experiência prática é limitada a projetos iniciais ou em escala piloto. Além disso, ainda faltam modelos de negócios estabelecidos, dificultando a viabilidade comercial dessas e tornando ainda mais desafiadora a sua implementação em larga escala.

Palavras-Chave: Hidrogênio; Hidrogênio verde; Aço verde; Descarbonização; Transição energética.

ABSTRACT

In the context of energy transition, countries have been undertaking commitments and goals, such as the United Nations' 2030 Agenda and the 2015 Paris Agreement, aiming to reduce greenhouse gas emissions to mitigate climate change and promote sustainable development. At this point, green hydrogen plays a crucial role in replacing fossil fuels. In tandem with this scenario, the steel industry needs to align with global emission reduction targets in steel production processes. Based on these aspects, this work aims to investigate the concept of green steel, its state of the art, challenges, and projections for sustainable steelmaking. Greater emphasis will be placed on the Brazilian scenario, highlighting its peculiarities, challenges, and advantages in the global decarbonization process. In the analysis of the state of the art, within the scope of this work, it was found that the direct reduction of iron ore by green hydrogen, along with the use of electric arc furnaces for steel production, proves to be quite effective in reducing greenhouse gas emissions. However, it was observed that while these technologies have the potential to transform the technological landscape of the steel industry and have a significant impact on emission reduction, practical experience is limited to initial projects or pilot scale. Moreover, established business models are still lacking, posing challenges to the commercial viability of these technologies and making their large-scale implementation even more challenging.

Keywords: Hydrogen; Green hydrogen; Green steel; Decarbonization; Energy transition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 ^a – Matriz energética mundial.....	17
Figura 1 ^b – Matriz energética brasileira.....	18
Figura 2 – Participação das fontes renováveis na matriz energética.....	18
Figura 3 ^a – Matriz elétrica mundial.....	20
Figura 3 ^b – Matriz elétrica brasileira.....	20
Figura 4 – Investimentos em tecnologias avançadas de descarbonização (US\$ bilhões).....	24
Figura 5 – Produção de H ₂ e seus meios.....	28
Figura 6 – Representação do processo de reforma a vapor de metano.....	30
Figura 7 – Esquema geral da gaseificação com duplo estágio de reação.....	31
Figura 8 – Síntese do processo do aço verde via o processo de eletrólise.....	32
Figura 9 – Esquema da produção de H ₂ V.....	34
Figura 10 – Estimativas de representatividade do H ₂ na matriz energética até 2050.....	35
Figura 11 – Produção mundial de aço bruto por processo.....	37
Figura 12 – Produção de ferro-gusa e de aço pela rota de alto forno.....	39
Figura 13 – Projeção do uso final de energia no segmento siderúrgico.....	40
Figura 14 – Processo de produção do aço verde via redução direta (H-DRI).....	42
Figura 15 – Como funciona o processo de conversão de energia em gás.....	49
Figura 16 – Resultados dos cenários.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Participação percentual de renováveis nas matrizes energética e elétrica em 2030 em diferentes cenários.....	21
Tabela 2 – Fator de emissão do carvão metalúrgico.....	55
Tabela 3 – Caracterização de quatro cenários e seus resultados relacionados ao fator de emissão do coque, que tem três valores (inferior, padrão e superior).....	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação do H ₂ em escala de cores.....	26
Quadro 2 – Iniciativas recentes na siderurgia verde.....	44
Quadro 3 – Estado da arte com perspectivas futuras sobre o aço verde.....	50
Quadro 4 – Parâmetros utilizados para o desenvolvimento do cenário.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS

aq - Aquoso

BF - Blast Furnace (alto-forno)

C - Carbono

CH₄ - Gás metano

CO - Monóxido de Carbono

CO₂ - Dióxido de Carbono ou Gás Carbônico

°C - Graus Celsius

e^- - Elétron

E° - Notação para o potencial padrão de redução de uma reação eletroquímica

Ecel - Potencial padrão de redução

Fe - Ferro

g - Grama

H - Hidrogênio

H₂ - Gás hidrogênio

H₂O - Molécula de água

H₂V - Hidrogênio Verde

H-DRI - Hydrogen-based Direct Reduced Iron

Hot DRI - Ferro reduzido direto quente

K - Kelvin

Kg - Quilograma

KJmol⁻¹ - Quilojoules por mol

liq - Líquido

Mpa - Megapascal

O - Oxigênio

pH - Potencial hidrogeniônico

Pn - Proporção de combustível

s - Sólido

tCO₂ - Toneladas de dióxido de carbono

thm - Toneladas de metal quente

ton - Toneladas

V - Voltagem

ΔH - Variação de entalpia

LISTA DE SIGLAS

AVB - Aço Verde do Brasil

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CAC - Captura e Armazenamento de Carbono

CCS - *Carbon Capture and Storage*

DC - *Direct Current*

DRI-EAF - *Direct Reduced Iron - Electric Arc Furnace*

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

EPA - Agência de Proteção Ambiental dos EUA

ESMR - *Emissions Steam Methane Reforming*

FEHM - Federação dos Empregados nas Indústrias Metalúrgicas e Mecânicas

GEE - Gases de Efeito Estufa

GLP - Gás Liquefeito de Petróleo

IBP - Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás

IEA - *International Energy Agency*

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

IRENA - *International Renewable Energy Agency*

LD – *Linz-Donawitz*

LOCH - *Liquid Organic Hydrogen Carriers*

MME - Ministério de Minas e Energia

NZE - Net-zero

ONU - Organização das Nações Unidas

PCI - Poder Calorífico Inferior

PDE - Plano Decenal de Expansão de Energia

PNE - Plano Nacional de Energia

PNHL - Programa Nacional do Hidrogênio

PtG - *Power-to-Gas*

TIG - *Tungsten Inert Gas*

TWh - Terawatt-hora (milhões de milhões de watts-hora)

USGAMP - Unidades de separação de gases por adsorção com modulação da pressão

US\$ - Dólar Americano

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 OBJETIVOS.....	16
1.1.1 Objetivo geral.....	16
1.1.2 Objetivos específicos.....	16
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1 Matriz energética.....	17
2.2 Transição energética.....	22
2.2.1 Descarbonização da matriz energética.....	23
2.3 Hidrogênio: vetor energético.....	25
2.3.1 Classificação e principais métodos para a produção de hidrogênio.....	26
2.3.1.1 Reforma a vapor do metano.....	29
2.3.1.2 Gaseificação.....	31
2.3.1.3 Eletrólise.....	32
2.3.2 Armazenamento e transporte de hidrogênio.....	33
2.4 Hidrogênio verde.....	34
2.5 Aciarias LD e elétrica.....	37
2.6 Emissões de GEE na produção de aço	38
2.7 Aço verde.....	41
2.7.1 Rotas para a produção de aço com baixas emissões.....	43
2.7.2 Potencial brasileiro para a produção de H ₂ V e aço verde.....	45
2.7.3 Marco regulatório.....	47
2.7.3.1 Iniciativas no Brasil.....	47
2.7.3.2 Normas técnicas.....	47
2.7.3.3 Iniciativas de indústrias e associações.....	48
2.7.3.4 Legislações ambientais e de sustentabilidade.....	48
2.7.3.5 Acordo de Paris.....	48
2.7.4 <i>Power-to-Gas</i> e a produção de aço verde.....	49
2.8 Estado da arte.....	50
3 METODOLOGIA.....	53
4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	57
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
REFERÊNCIAS.....	62
APÊNDICE A.....	71

1 INTRODUÇÃO

No contexto da transição energética, as nações têm intensificado esforços para cumprir metas como as estabelecidas na Agenda 2030 das Nações Unidas (ONU) e no Acordo de Paris de 2015. Esses compromissos têm como principal objetivo a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), buscando mitigar os impactos das mudanças climáticas e promover o desenvolvimento sustentável (Silva e Carmo, 2017; Barroso *et al.*, 2017).

Com base nesses aspectos, o hidrogênio (H_2) se apresenta como vetor energético sustentável, com potencial para substituir combustíveis fósseis e atender às premissas da descarbonização (Martins, 2023). No caso do hidrogênio verde (H_2V), o qual é obtido a partir da eletrólise da água utilizando-se fontes de energia renováveis. Em uma perspectiva futura, espera-se que o H_2V desempenhe um papel importante em amplos setores como transporte, indústria e geração de energia (Castro e Leal, 2022).

No contexto brasileiro, destaca-se o elevado percentual de geração de energia proveniente de fontes renováveis, superior a 80%. Esse perfil confere ao Brasil um papel de destaque no mercado global de produção de H_2V , tanto para exportação quanto para o fornecimento de “produtos verdes”, como fertilizantes, aço, amônia e combustíveis (Martins, 2023).

O aço, material essencial para o desenvolvimento industrial, enfrenta desafios no contexto da descarbonização, particularmente na indústria siderúrgica, que é uma das maiores emissoras de GEE. Nesse sentido, o conceito aço verde surge como uma inovação estratégica. Este conceito, que começa a ganhar relevância na literatura científica, baseia-se na utilização do H_2V para a redução do minério de ferro, seguida pelo emprego de fornos a arco elétrico. Essa abordagem se apresenta como uma solução promissora para descarbonizar a indústria siderúrgica, alinhando-se às metas globais de redução de emissões.

Nesse viés, este trabalho tem como objetivo investigar o estado da arte do "aço verde" e estimar os valores para emissões de CO_2 em diferentes cenários, incluindo a substituição do coque por H_2V . Além de explorar seus desafios e projeções, bem como seu potencial impacto na consolidação de uma siderurgia sustentável nas próximas décadas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo investigar o conceito de aço verde e seu estado da arte, a redução das emissões de CO₂, os desafios e projeções para a siderurgia sustentável.

1.1.2 Objetivos Específicos

Instigar o estado da arte sobre aço verde;

Estudar as tecnologias para alcançar uma produção de aço mais limpa;

Analisar a eficiência energética e os aspectos econômicos relacionados ao uso do H₂V para produção de aço verde considerando o cenário brasileiro;

Investigar as emissões de toneladas de dióxido de carbono por tonelada de metal quente.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

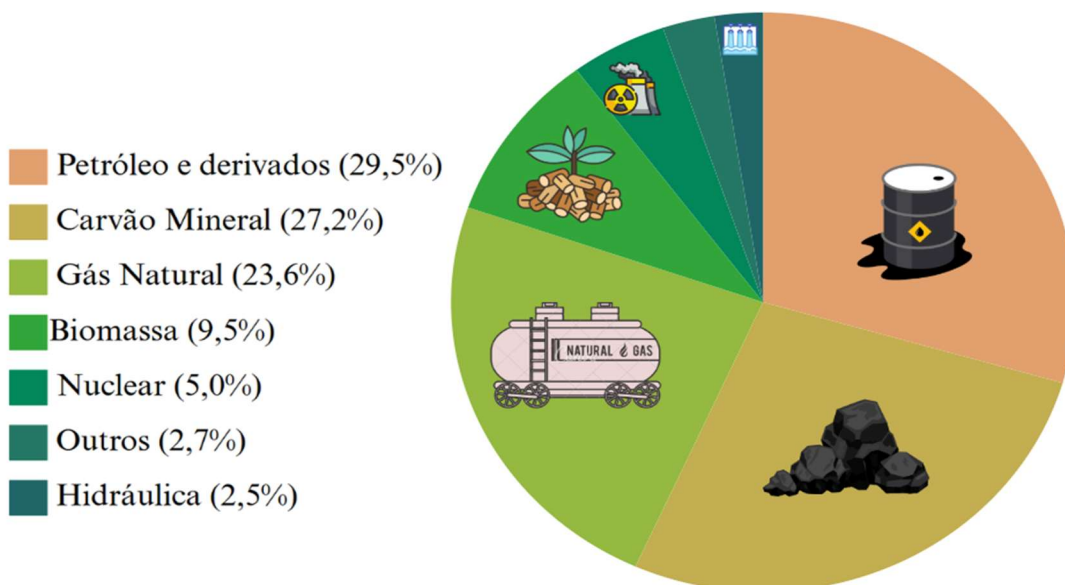
Neste capítulo serão abordados tópicos sobre a matriz energética brasileira, H₂V e redução da emissão de carbono para a geração de aço verde em indústrias siderúrgicas.

2.1 Matriz energética

A matriz energética mundial é predominantemente composta por fontes não renováveis, com cerca de 80% de sua energia proveniente de petróleo e seus derivados (29,5%), carvão mineral (27,2%) e gás natural (23,6%), enquanto as fontes renováveis, como a energia hidráulica, representam apenas 2,5% (BEN, 2023). Em contraste, a matriz energética brasileira destaca-se pela elevada participação de fontes renováveis, que correspondem a 48,4% da oferta total, sendo a energia hidrelétrica a principal, representando 58,7% da geração elétrica nacional.

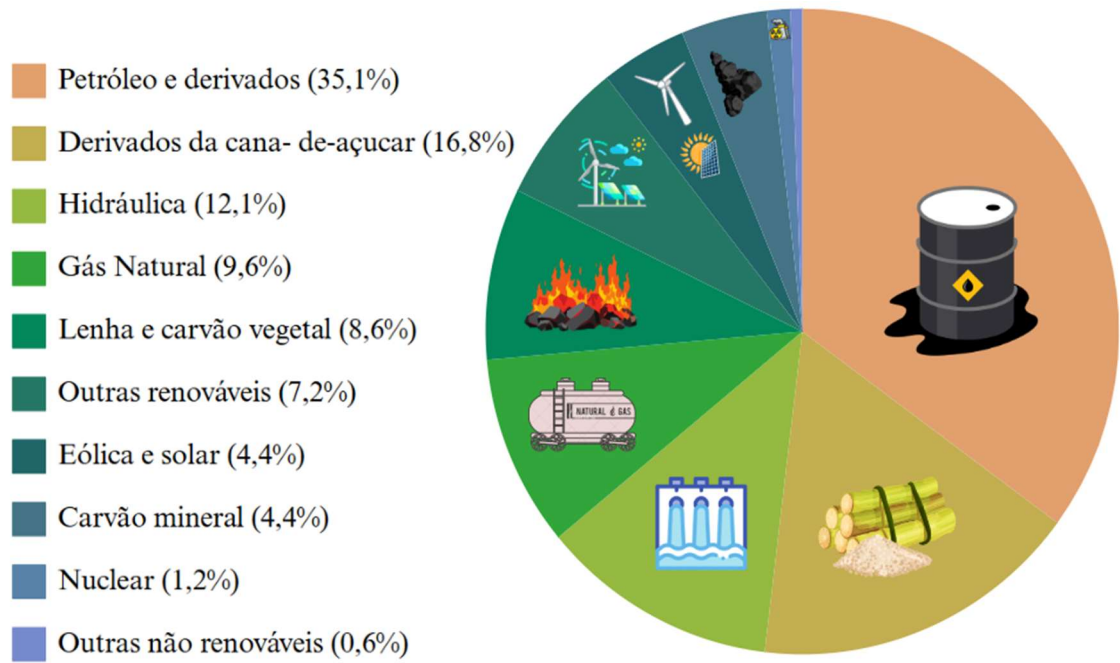
Além disso, o Brasil é o segundo maior produtor mundial de energia hidrelétrica, contribuindo com 9,2% da geração global, e apresenta crescente participação de fontes como biomassa, energia eólica e solar, em linha com os objetivos de sustentabilidade e descarbonização. Apesar dessa liderança, o país ainda depende parcialmente de combustíveis fósseis, como petróleo (29,8%) e gás natural (12,2%), o que evidencia tanto avanços quanto desafios no processo de transição energética sustentável. A seguir, na Figura 1 mostra os dados das matrizes energéticas mundial e nacional.

Figura 1^a- Matriz energética mundial



Fonte: Adaptado de BEN, 2024.

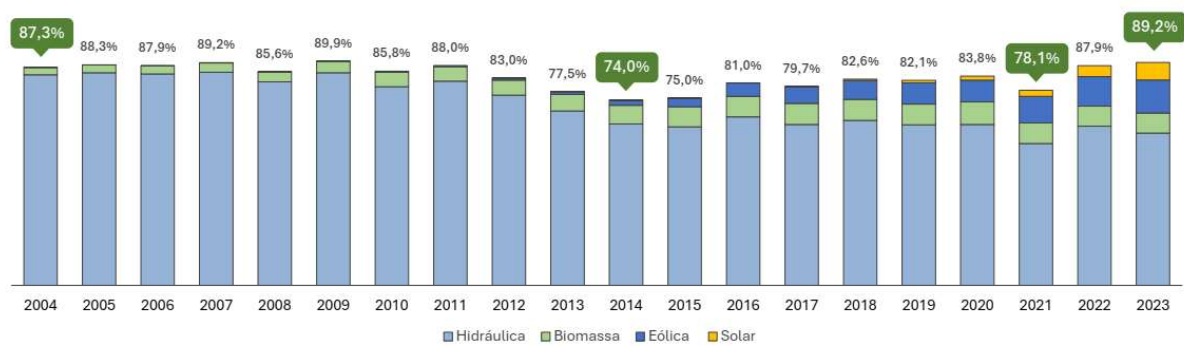
Figura 1^b- Matriz energética brasileira



Fonte: Adaptado de BEN, 2024.

Ademais, nos últimos 20 anos, a participação das fontes renováveis na Oferta Interna de Energia (OIE) do Brasil se manteve em níveis elevados, alcançando 49,1% em 2023. Esse dado destaca que o país tem adotado estratégias eficazes para a transição energética, incorporando novas fontes renováveis em sua matriz energética. Conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 - Participação das fontes renováveis na matriz energética



Fonte: BEN, 2024.

A partir da Figura 2, observa-se a evolução da matriz energética renovável no Brasil entre 2004 e 2023, destacando a predominância da energia hidráulica, que variou entre 74% (2014) e 89,2% (2023). Apesar disso, observa-se o crescimento significativo das energias eólica e solar a partir de 2015, refletindo esforços na diversificação e sustentabilidade. A biomassa manteve uma participação estável ao longo do período. A dependência total de fontes renováveis oscilou, com uma queda mais expressiva entre 2013 e 2015, mas voltou a crescer nos anos seguintes, consolidando a matriz brasileira como uma das mais limpas do mundo.

A expansão da matriz energética brasileira nos próximos anos está sendo amplamente discutida em relatórios e projeções da Empresa de Pesquisa Energética (EPE). As previsões apontam para um crescimento robusto da demanda de energia, impulsionado por setores-chave como petróleo, gás natural, etanol e eletricidade, acompanhados de um aumento considerável no consumo energético. O planejamento indica que a capacidade instalada de geração e distribuição de energia poderá dobrar até 2030, especialmente nos segmentos de petróleo, gás natural e eletricidade (EPE, 2024; Tolmasquim, 2018).

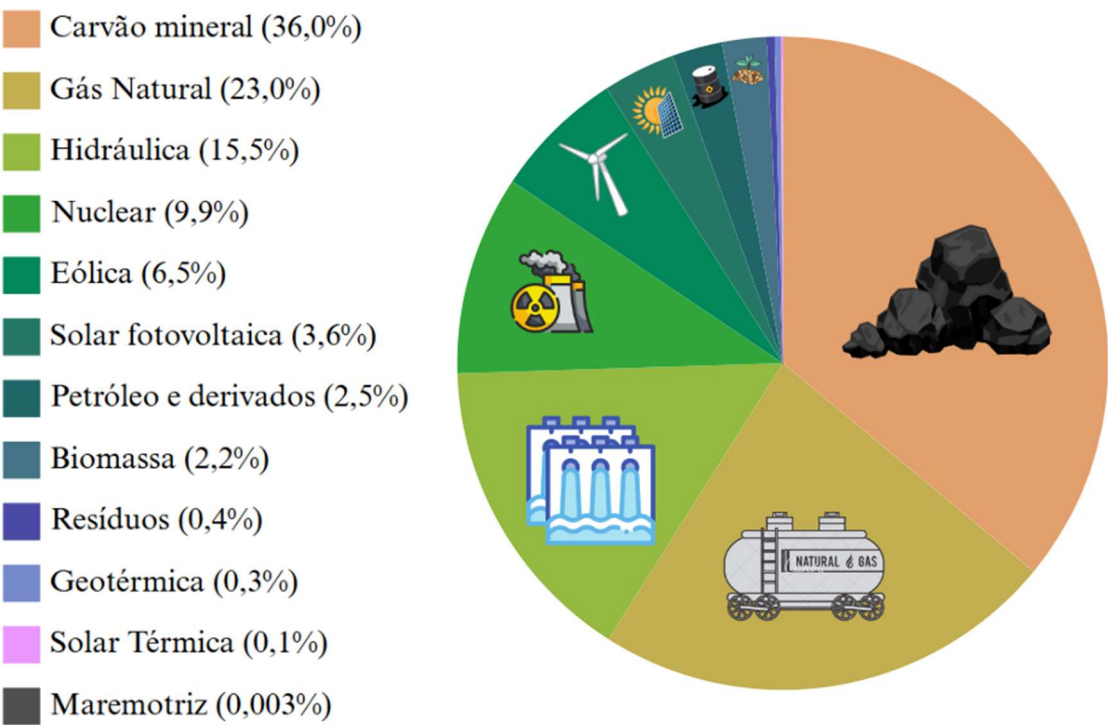
Apesar de ser considerada uma fonte estável e sendo a mais utilizada no Brasil, investir somente em grandes hidroelétricas fragiliza a segurança energética do país. De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar, a capacidade de geração tem diminuído, resultando em um aumento do custo da energia e no risco de apagões. A diversificação da matriz energética é uma das formas de aumento da segurança energética, sendo um cenário propício para o investimento na utilização de outras fontes renováveis (Pereira, 2017).

É importante ressaltar que matriz energética e matriz elétrica são conceitos diferentes. A diferença entre matriz energética e matriz elétrica consiste no seguinte: a matriz energética é a soma das fontes de energia (ou recursos energéticos) utilizadas para atender a demanda por todos os tipos de energia, incluindo combustíveis como petróleo, gás natural e carvão, usados em setores como transporte e indústria. Enquanto a matriz elétrica engloba as fontes empregadas apenas na geração de energia elétrica no país, como hidrelétricas, termelétricas, eólicas, solares, e outras fontes renováveis ou não renováveis (Portal Solar, 2023).

Portanto, a matriz elétrica é uma parte da matriz energética, focada na produção de eletricidade, enquanto a matriz energética é mais abrangente e inclui outras formas de energia para diferentes finalidades (TekEnergy, 2024).

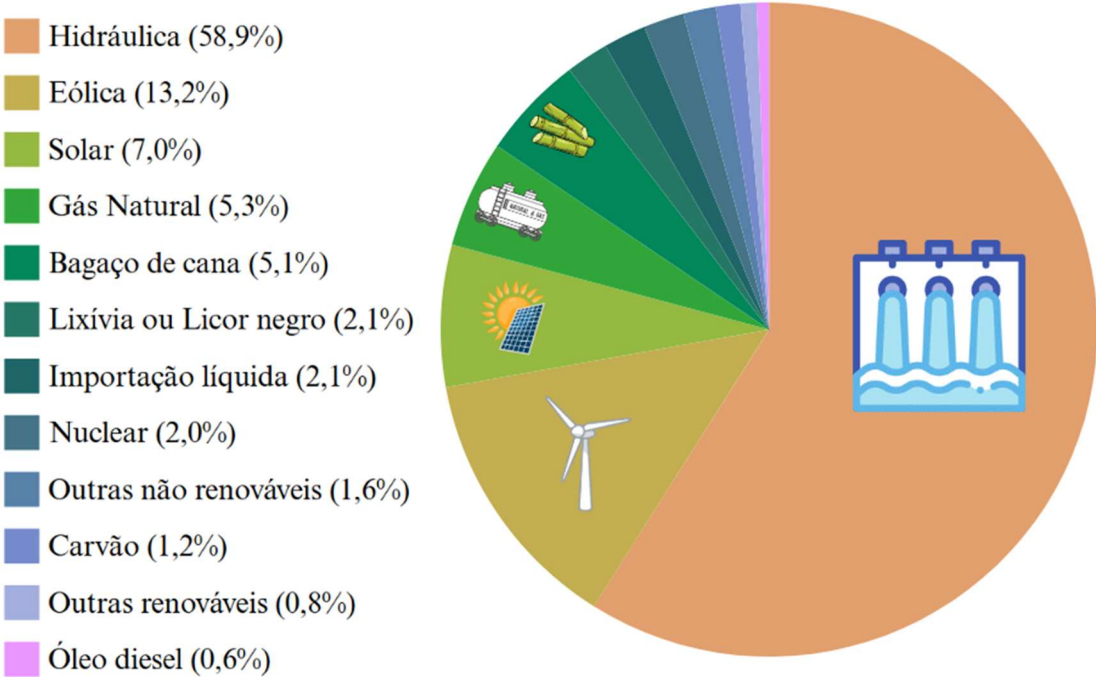
A Figura 3 mostra o panorama da matriz elétrica mundial (3^a) e da matriz elétrica brasileira (3^b) de acordo com o BEN de 2024 (BEN, 2024).

Figura 3^a: Matriz elétrica mundial



Fonte: Adaptado de BEN, 2024.

Figura 3^b: Matriz elétrica brasileira



Fonte: Adaptado BEN, 2024.

Net-zero (NZE) e o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) são dois cenários que projetam a participação percentual de fontes renováveis na matriz energética e elétrica brasileira em 2030. É importante destacar que o conceito de Net-zero (NZE) refere-se ao equilíbrio entre a quantidade de gases de efeito estufa emitida e a quantidade removida da atmosfera. Isso significa calcular as emissões de carbono para reduzir ao máximo as emissões de gases e compensar aquelas que não podem ser eliminadas, uma vez que, na realidade, nem sempre é possível cortar completamente as emissões de carbono (EDP, 2024).

Já o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) é um plano de longo prazo elaborado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) para planejar a expansão da infraestrutura energética do país, considerando a demanda futura e o uso crescente de fontes renováveis, alinhando-se com as metas de sustentabilidade e a transição para uma economia de baixo carbono. Ambos os conceitos estão interligados, com o PDE contribuindo para o cumprimento da meta de net-zero ao promover a expansão de fontes limpas e renováveis de energia (PDE, 2023).

Pela visão de Delgado (2022) a previsão para os anos de 2030 e 2050 da participação percentual de renováveis nas matrizes energética e elétrica terá dois cenários, mostrados na Tabela 1.

Tabela 1- Participação percentual de renováveis nas matrizes energética e elétrica em 2030 em diferentes cenários

Percentual de renováveis nas matrizes energética e elétrica		
% Renováveis	Matriz Energética	Matriz Elétrica
NZE 2050 (IEA)	30 %	61%
PDE 2030 (EPE)	48%	85%

Fonte: Adaptado Delgado, 2022.

Analisando-se os cenários, percebe-se que o autor estima, para o NZE 2050, a participação das fontes renováveis na matriz energética mundial seria de 30% em 2030, enquanto na matriz elétrica seria de 61%. Esse cenário considera a meta de emissões líquidas zero até 2050, ou seja, a redução das emissões de GEE a níveis muito baixos, com a

compensação das emissões remanescentes por meio de sumidouros de carbono (Delgado, 2022).

Por outro lado, no cenário PDE 2030, a participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira seria de 48% em 2030, enquanto na matriz elétrica seria de 85%. Esse cenário é uma projeção do governo brasileiro para a expansão da oferta de energia no país nos próximos dez anos, considerando aspectos como a demanda energética, a diversificação da matriz energética, a segurança energética, a eficiência energética, a sustentabilidade ambiental e a competitividade econômica (Delgado, 2022).

2.2 Transição energética

A transição energética é uma mudança de paradigma que envolve não só a geração de energia, mas também o consumo e o reaproveitamento dela. O conceito parte da migração de matrizes energéticas poluentes como combustíveis fósseis à base de carvão ou petróleo para fontes de energia renováveis, como hidrelétricas, eólicas, solares e à base de biomassas (Engie, 2022).

A consolidação de uma economia de baixo carbono exigirá dos países inovações e transformações na forma como produzem e consomem a energia. Globalmente, esse processo é conhecido como transição energética (VEJA *Insights*, 2022).

Na prática, consiste em uma transformação na forma como o mundo produz, transmite, distribui e consome energia. Os sistemas energéticos serão redesenhados nas próximas décadas, o que afetará a geopolítica, os negócios, os governos, a sociedade e os indivíduos (E+ Transição Energética, 2020).

As medidas para eliminar as distorções de mercado que favorecem os combustíveis fósseis, acopladas com incentivos para soluções para a transição energética, facilitarão as alterações necessárias nas estruturas de financiamento. Isso envolverá a interrupção dos subsídios aos combustíveis fósseis e a mudança dos sistemas fiscais para refletirem os custos ambientais, da saúde e sociais negativos do sistema energético baseado nos combustíveis fósseis. As políticas monetárias e fiscais, incluindo as políticas de preços do carbono, irão melhorar a competitividade das soluções relacionadas com a transição (IRENA, 2021).

O Brasil é um país que está avançado em sua transição energética. Com uma matriz energética com aproximadamente metade da sua energia primária oriunda de fontes renováveis,

se caracteriza como uma das matrizes mais convergentes com uma economia de baixo carbono, com uma renovação três vezes acima da média mundial (Szklo *et al.*, 2023).

O H₂ apresenta uma versatilidade importante no contexto da transição energética para uma economia de baixo carbono, podendo ser utilizado diretamente como fonte de energia de baixo ou nulo carbono (a depender de seu processo de produção, com captura ou oriundo de fontes renováveis), em setores de difícil descarbonização ou como vetor para armazenamento de energia, viabilizando maior entrada das renováveis intermitentes como a eólica e a solar (Szklo *et al.*, 2023).

O principal desafio é como produzir H₂ para usos atuais e futuros a custos próximos dos atuais, mas com baixa emissão de CO₂. Dentro do setor hoje no *hotspot* para aplicação de H₂V, estão: transporte pesado, aquecimento urbano ou a descarbonização de certos processos industriais, como a siderurgia (Squadrito *et al.*, 2023).

No âmbito das indústrias siderúrgicas, o caminho mais promissor para promover a transição energética é utilizar o H₂V, suprido com energia renovável, combinado com suprimento de energia renovável na produção do aço pela rota de redução direta (H-DRI) do ferro associada a um forno de arco elétrico. Esse caminho é capaz de contribuir com mais de 95% de redução de emissões (Botelho e Bezerra, 2022).

2.2.1 Descarbonização da matriz energética

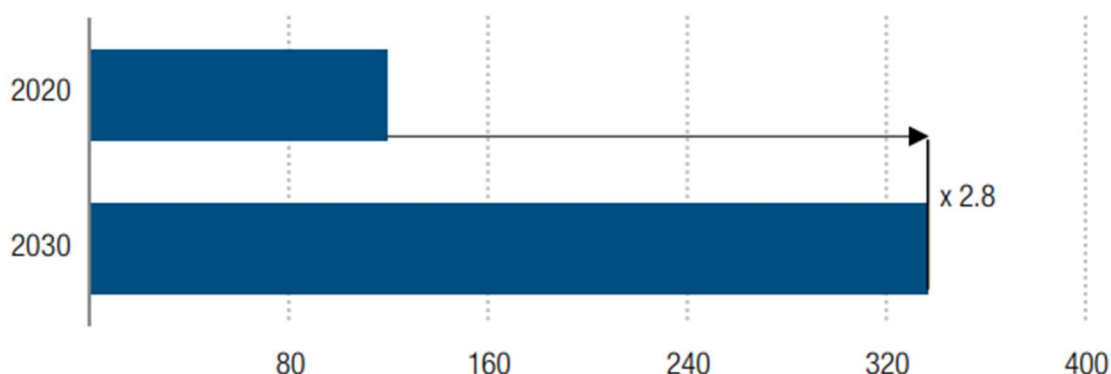
A descarbonização é o objetivo central do setor energético, que visa à redução das emissões de CO₂ para que os países sejam capazes de atingir as metas de neutralidade do carbono até 2050. Para tanto, está em desenvolvimento a substituição, ou redução, do uso dos recursos energéticos fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, por fontes renováveis, com destaque às energias eólica e solar. O H₂V é uma das soluções para a descarbonização, especialmente para países que possuem potencial de recursos renováveis baixo frente ao desafio da descarbonização (Gesel, 2021).

Tecnologias de descarbonização são aquelas que permitem a redução das emissões de gases de efeito estufa, principalmente o CO₂, que é o principal responsável pelo aquecimento global. Essas tecnologias incluem, por exemplo, a geração de energia renovável, a captura e armazenamento de carbono (CAC), a eletrificação de transportes, a eficiência energética, entre outras (Figueiredo *et al.*, 2023).

A descarbonização enfrenta ao menos três grandes desafios. O primeiro decorre da tendência esperada de crescimento na demanda de serviços energéticos em cada um desses segmentos, ou seja, mantendo tudo como está, a tendência seria de ampliação das emissões e não de diminuição. Segundo, para algumas aplicações as soluções tecnológicas ainda precisam de desenvolvimento e escala e, por último, mas não menos importante, seus custos de implantação ainda são elevados e mecanismos de financiamento e incentivo ainda se mostram aquém do necessário (Szklo *et al.*, 2023).

A Figura 4 apresenta a necessidade de aumentar os investimentos em tecnologias avançadas de descarbonização nos próximos anos para permitir a transição energética rumo a um futuro mais sustentável e com emissões líquidas zero (Delgado, 2022).

Figura 4: Investimentos em tecnologias avançadas de descarbonização (US\$ bilhões)



Fonte: Elaboração IBP a partir de dados da IEA, *World energy outlook*, 2021.

Os investimentos em tecnologias avançadas de descarbonização precisam quase triplicar entre 2020 e 2030, passando de cerca de 80 bilhões de dólares em 2020 para cerca de 240 bilhões de dólares em 2030. Esse aumento é necessário para que as tecnologias de descarbonização sejam ampliadas e aprimoradas, permitindo a redução das emissões de gases de efeito estufa de forma mais eficiente e econômica (Delgado, 2022).

O H₂ oferece novas possibilidades de descarbonização do setor de transporte, com a inserção de veículos elétricos que não dependam de baterias que têm alto custo, demandam recargas constantes e produzem impactos ambientais negativos. Já é possível, por exemplo, utilizar combustíveis líquidos, como o etanol, em uma célula de combustível que produz H₂ e,

a partir dele, energia elétrica, sem a necessidade de bateria e sem emissão de carbono, tendo apenas água e calor como subprodutos do processo (Ant *et al.*, 2022).

2.3 Hidrogênio: vetor energético

Hidrogênio, o primeiro elemento da tabela periódica, é o elemento menos complexo e o elemento mais abundante no universo. O H_2 está presente na água, que abrange mais de 60% da superfície do planeta. Aparece em diferentes formas de plantas, animais, seres humanos, combustíveis fósseis, e outros compostos químicos (Camila e Oliveira, 2011).

A molécula do H_2 apresenta temperaturas de fusão e ebulição muito baixas o que justifica o seu estado gasoso na temperatura ambiente. A propriedade mais interessante a ser estudada é o seu poder de combustão. Essa substância química é capaz de queimar da mesma forma que se queima Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), e a chama pode atingir a temperatura de $2.400^{\circ}C$, ultrapassando a temperatura do gás natural e da gasolina ao sofrerem combustão (Fernanda e Araújo, 2021).

Assim como o Brasil, diversos países vêm apresentando estratégias para o desenvolvimento da “Economia do Hidrogênio”. Segundo a EPE (2021), a perspectiva futura para uso do H_2 como vetor energético é crescente, impulsionada pela necessidade de os países aderirem à descarbonização, necessária para o cumprimento das metas do Acordo de Paris (2016), tratado mundial que tem como objetivo a redução do aquecimento global (EPE, 2021).

O H_2 pode ser produzido por diferentes rotas, a partir de combustíveis fósseis como o carvão e gás natural, sem ou com captura de carbono, e pelo processo de eletrólise, integrado a energias renováveis como solar e/ou eólica, sendo classificado como hidrogênio cinza, azul e verde, respectivamente (Paiva, 2022).

Os principais métodos de produção de H_2 incluem processos como reforma a vapor de gás natural (Steam Methane Reforming - SMR), gaseificação de biomassa, eletrólise da água, entre outros como bioquímico, radioquímico e termoquímico. No entanto, o método mais utilizado globalmente ainda é a reforma a vapor do metano ou gás natural, representando cerca de 95% da produção de H_2 . O hidrogênio produzido é amplamente utilizado em indústrias de refino de petróleo, produção de amônia (utilizada na fabricação de fertilizantes) (Viola, 2015. EPE, 2024).

A maior parte do H_2 é produzida a partir de combustíveis fósseis, o chamado hidrogênio cinza, com emissões de CO_2 . Quando o carbono gerado no processo é capturado, neutralizando as emissões, temos o hidrogênio azul. Só o H_2 produzido de fontes renováveis

não emite carbono, sendo chamado de H_2V , produzido pela quebra da molécula de água em oxigênio e hidrogênio, usando eletricidade de fontes solar e eólica (Ant *et al.*, 2022). A classificação dos tipos de H_2 e os métodos de produção, armazenamento e transporte serão abordados nos tópicos seguintes.

2.3.1 Classificação e principais métodos para produção de H_2

Existem diversas tecnologias disponíveis para a produção de H_2 , contudo, nem todas são sustentáveis. Foi estabelecido um sistema de classificação por cores para distinguir os tipos de produção, considerando o impacto ambiental e as emissões geradas por cada método (Compostcheira, 2023):

Quadro 1 – Classificação do H_2 em escala de cores

Cor	Classificação	Resumo do processo de produção do H_2
	Hidrogênio preto	Gaseificação do carvão mineral sem captura, utilização e armazenamento de carbono. O preto é produzido por carvão betuminoso.
	Hidrogênio marrom	Gaseificação do carvão mineral sem captura, utilização e armazenamento de carbono. O marrom é produzido por linhito.
	Hidrogênio cinza	É o tipo mais produzido atualmente e envolve a reação do gás natural com vapor de água a altas temperaturas, resultando em H_2 e dióxido de carbono (CO_2) como subprodutos.
	Hidrogênio azul	Derivado de combustíveis fósseis por meio de tecnologias de captura e armazenamento de carbono. Cerca de 75% do H_2 produzido atualmente vem da reforma a vapor do gás natural.
	Hidrogênio turquesa	Produzido por pirólise a partir do gás natural, mas ainda um combustível fóssil e, como tal, não isento de emissões.
	Hidrogênio verde	Via eletrólise da água com energia de fontes renováveis (particularmente, energias solar e eólica). Este processo não emite CO_2 e, portanto, não contribui para o aquecimento global.

Cor	Classificação	Resumo do processo de produção do H_2
	Hidrogênio musgo	Produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa, com ou sem captura, utilização e armazenamento de carbono.
	Hidrogênio rosa	Fonte de energia nuclear.
	Hidrogênio amarelo	Energia da rede elétrica, composta de diversas fontes.
	Hidrogênio branco	Extração de hidrogênio natural ou geológico.

Fonte: Adaptado de EPE, 2021.

Embora a produção de hidrogênio cinza seja relativamente econômica e amplamente utilizada, este método é altamente intensivo em carbono, contribuindo para as emissões de gases de efeito estufa. Segundo o estudo de IEA (2021), cerca de 95% do H_2 produzido globalmente é cinza, o que representa um desafio significativo para a descarbonização de processos industriais. O hidrogênio azul pode ser uma solução inicial (menos poluente que o cinza), enquanto a capacidade de produção de H_2V e o armazenamento para indústrias como a siderúrgica entram em operação. No entanto, o hidrogênio azul não elimina completamente as emissões de carbono, apenas as reduz.

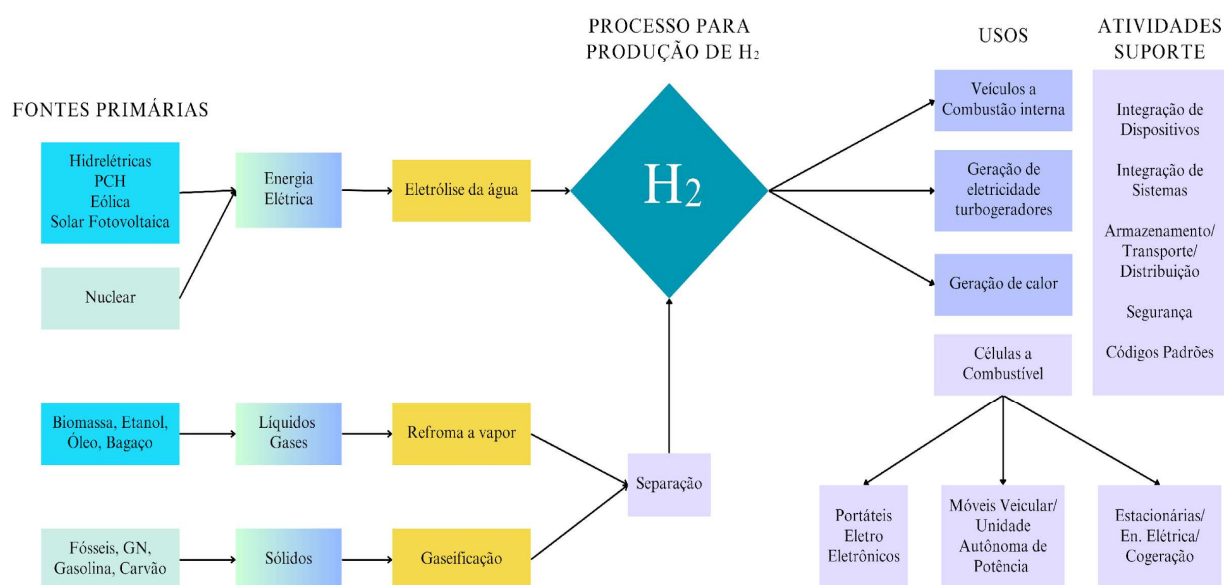
De acordo com o relatório da IRENA (2020), o H_2V não apenas tem o potencial de reduzir as emissões relacionadas à produção de energia, mas também pode desempenhar um papel fundamental na descarbonização de setores difíceis de abater, como a indústria química e metalúrgica. Um tópico com ênfase no H_2V será apresentado nos próximos capítulos.

Segundo IEA, o emprego de cores para se referir às rotas de produção ou relacionar com termos como "hidrogênio sustentável", "de baixo carbono" ou "limpo" para descrever diversas vias de produção pode gerar confusão ao se considerar os níveis potenciais de emissões de cada rota. A Agência propõe então classificar conforme critérios fundamentados na avaliação da intensidade de emissões durante o ciclo de vida da produção de H_2 (Epbr, 2023).

Na sua mais recente atualização, o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂), lançado pelo governo brasileiro, adotou a expressão "hidrogênio de baixa emissão" para classificar hidrogênios provenientes de fontes renováveis, energia nuclear e fontes fósseis com tecnologias de captura de carbono (PNH₂, 2022).

A Figura 5 apresenta as principais tecnologias para produção e uso do H₂ a partir de fontes primárias (Bezerra, 2021):

Figura 5– Produção de H₂ e seus meios



Fonte: Adaptado Bezerra, 2021.

Além das formas tradicionais de produção de hidrogênio, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas para aumentar a eficiência e a sustentabilidade da produção. Estas incluem:

Hidrogênio a partir de biocombustíveis: O H₂ pode ser produzido através da gaseificação de biomassa ou da fermentação anaeróbica, resultando em uma alternativa renovável e de baixo impacto ambiental.

Fotólise da água: Essa técnica utiliza a luz solar para dividir moléculas de água em H₂ e oxigênio, sendo uma área de pesquisa em crescimento que busca aumentar a eficiência da conversão solar em energia química.

Produção a partir de rejeitos industriais: Alguns processos industriais geram resíduos que podem ser convertidos em hidrogênio, promovendo a economia circular e a redução de resíduos.

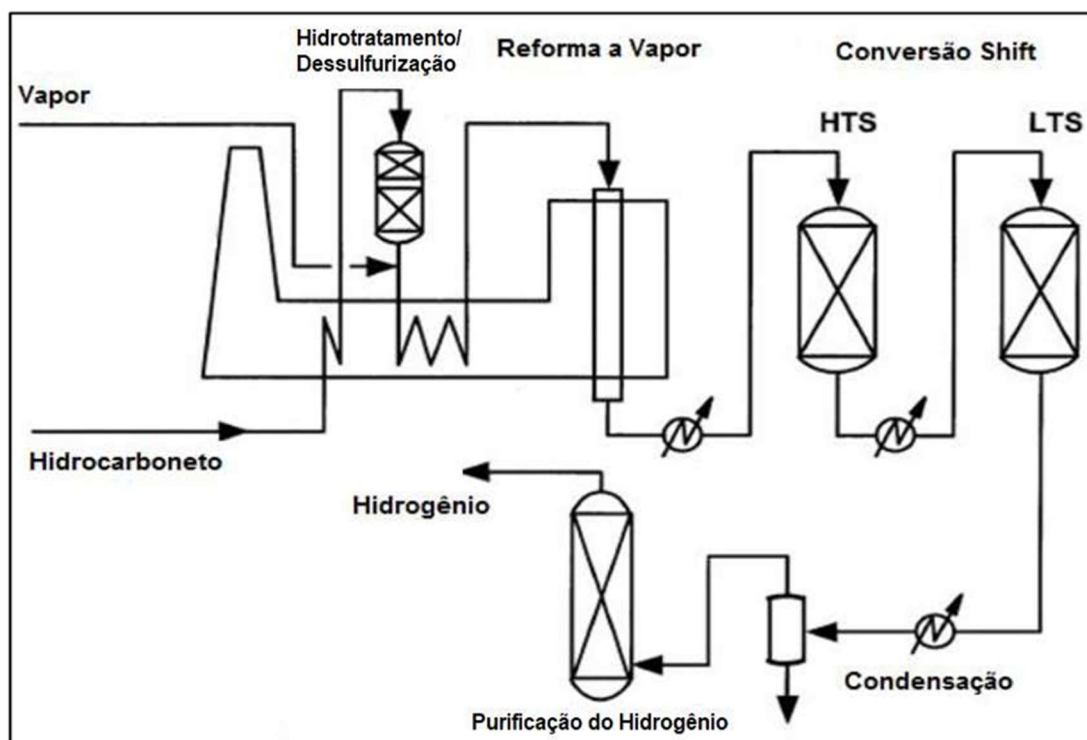
2.3.1.1 Reforma a vapor do metano

A produção de H_2 a partir de gás natural é realizada majoritariamente a partir de reforma a vapor, sendo este também o processo de produção de H_2 mais utilizado mundialmente. A reforma a vapor é um processo bastante maduro, caracterizando-se como uma das principais rotas tecnológicas de produção de H_2 no curto prazo (Souza, 2018; Olateju *et al.*, 2017; Speight, 2020a; U.S. Doe, 2021a). O processo se baseia, tipicamente, na reação catalítica em reator tubular a altas temperaturas de um hidrocarboneto com a água resultando em gás de síntese, uma mistura de H_2 e CO, com presença também de CO_2 (Chemical Engineering, 2017).

Este processo apresenta elevada eficiência térmica, em torno de 80% (calculado em relação às energias equivalentes do gás natural consumido e do H_2 produzido), e elevado rendimento na produção de H_2 , de aproximadamente 74% (Olateju *et al.*, 2017; Souza, 2018, Velazquez Abad e Dodds, 2017).

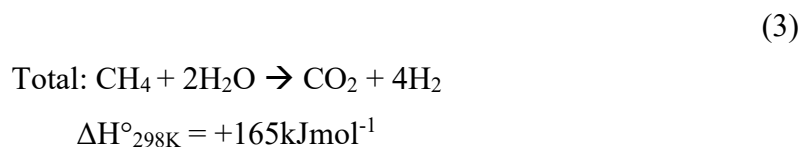
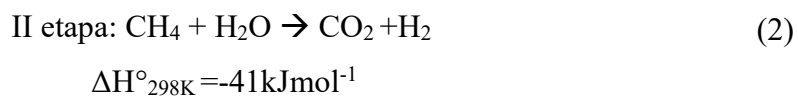
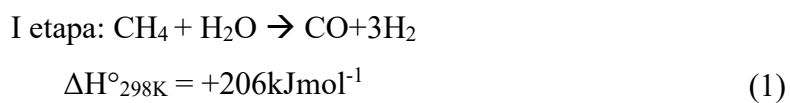
A Figura 6 ilustra uma planta de reforma a vapor de metano, que é utilizada para produzir hidrogênio. O processo começa com a alimentação de gás natural, que é pré-aquecido antes de entrar no reformador. Uma parte do gás passa por hidrotratamento para remover compostos de enxofre, evitando o envenenamento dos catalisadores. Após isso, vapor d'água é adicionado à corrente tratada. A mistura é então introduzida no reformador, onde, a altas temperaturas (750 a 900 °C) e na presença de um catalisador à base de níquel, o metano é convertido em hidrogênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono. O processo continua até atingir o equilíbrio das reações químicas, resultando em uma mistura rica em hidrogênio com alta pureza (Villaça, 2018).

Figura 6 – Representação do processo de reforma a vapor de metano



Fonte: Villaça, 2018.

A reação possui como reagentes uma mistura de vapor e hidrocarbonetos como o gás natural, sendo também empregado a nafta e o gás liquefeito de petróleo. Na primeira etapa da reação é formado o monóxido de carbono (CO) e o gás hidrogênio, em seguida o CO (g) é convertido em dióxido de carbono (CO₂ (g)) na presença de água, apresentado nas equações abaixo (Paiva, 2022).

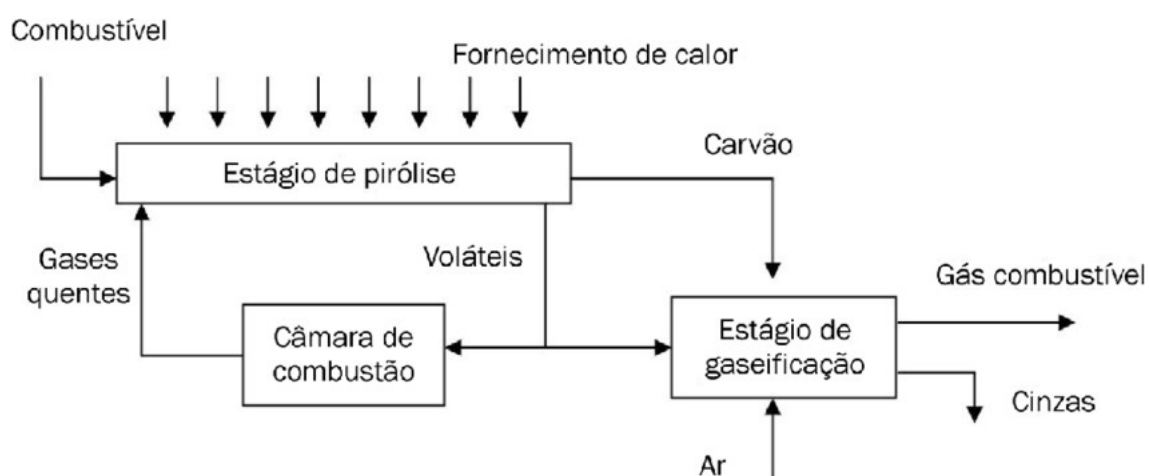


2.3.1.2 Gaseificação

A gaseificação é um processo exclusivo que transforma qualquer material à base de carbono, tais como resíduos sólidos urbanos, em energia sem queimá-lo. Em vez disso, esses materiais são convertidos em um gás através da criação de uma reação química. Esta reação combina os materiais à base de carbono (conhecidos como matérias-primas) com pequenas quantidades de ar ou oxigênio, quebrando-as em moléculas simples, principalmente uma mistura de monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H), e removendo poluentes e impurezas (Oliveira, 2016).

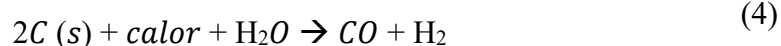
O aspecto geral da gaseificação pode ser definido como a conversão termoquímica de um material sólido ou líquido (que tenha carbono em sua composição) em um produto gasoso combustível (Gás de Síntese) (GTC, 2014).

Figura 7 - Esquema geral da gaseificação com duplo estágio de reação



Fonte: Venturi, 2012.

O processo de gaseificação pode ser representado pela equação 4:

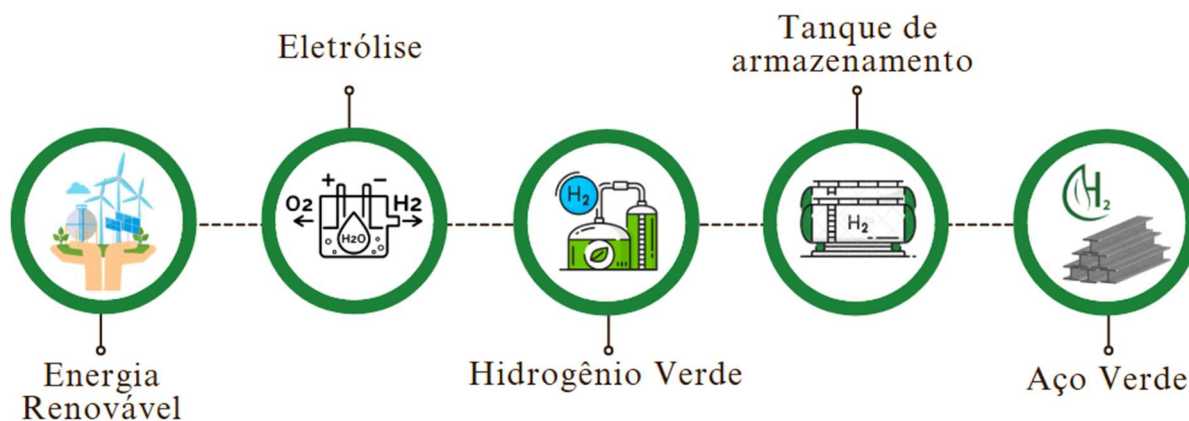


2.3.1.3 Eletrólise

O primeiro experimento de eletrólise da água com coleta do gás oxigênio e hidrogênio, ocorreu no século XVIII pelo pesquisador alemão Johann Wilhelm Ritter. Com o desenvolvimento de separadores (separação dos produtos catódicos e anódicos), foi possível iniciar a produção em escala industrial, obtendo como principal aplicação a síntese de amônio na indústria de fertilizantes (Grigorie; Fateev, 2017).

Essa técnica de produção de hidrogênio remete ao processo mais antigo da produção do gás, que tem como base a quebra da molécula de água, que está inserida em um sistema contendo dois eletrodos conectados a uma fonte de energia elétrica DC (Paiva, 2022).

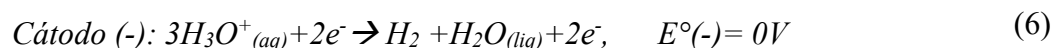
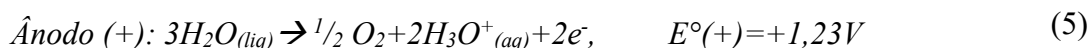
Figura 8: Síntese do processo do aço verde via o processo de eletrólise



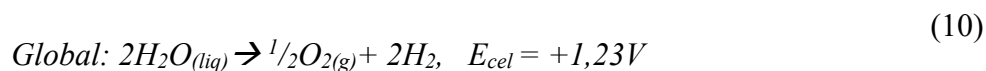
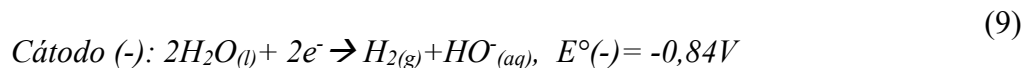
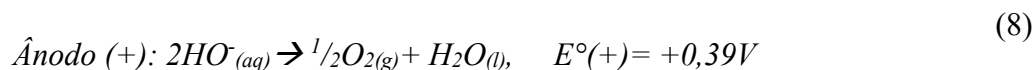
Fonte: Autora, 2024.

A eletrólise é uma reação química não espontânea. Assim, para que ela ocorra é necessária uma fonte externa de energia. A reação ocorre em meio ácido ou alcalino, como apresentado nas reações 5 a 7, em meio ácido e 8 a 10, em meio alcalino (Paiva, 2022).

Reações em um meio ácido:



Reações em um meio alcalino:



A principal diferença entre as reações no meio ácido e alcalino, são os valores dos potenciais dos eletrodos. Sendo assim, quando os eletrodos (anódico e catódico), estão imersos no mesmo eletrólito, o potencial da célula de equilíbrio é +1,23 V e a tensão necessária para separar a molécula da água independe do potencial hidrogeniônico (pH) (Paiva, 2022).

2.3.2 Armazenamento e transporte de hidrogênio

O setor do H₂ vem investindo em pesquisas das quais visem formas de utilizar, armazenar e transportar o H₂ que sejam viáveis economicamente. Para fazer com que o uso do H₂ se torne cada vez mais acessível e com maior aplicabilidade são necessárias formas eficientes de armazenamento (Paiva, 2022).

A baixa densidade de energia do hidrogênio significa que pode ser muito caro transportá-lo por longas distâncias. Porém, o armazenado em moléculas maiores, podem ser mais facilmente transportados por meio de gasodutos, por exemplo, o que pode reduzir custos aos usuários finais. Embora dutos sejam uma escolha vantajosa a longo prazo, este depende de uma demanda suficientemente grande, sustentada e localizada (Abreu, 2022).

Porém, a distribuição hoje geralmente depende de caminhões que transportam hidrogênio como gás ou líquido. Já se o hidrogênio precisa ser enviado para outro país, ele geralmente deve ser liquefeito ou transportado como amônia ou em transportadores de LOHC (IEA, 2019).

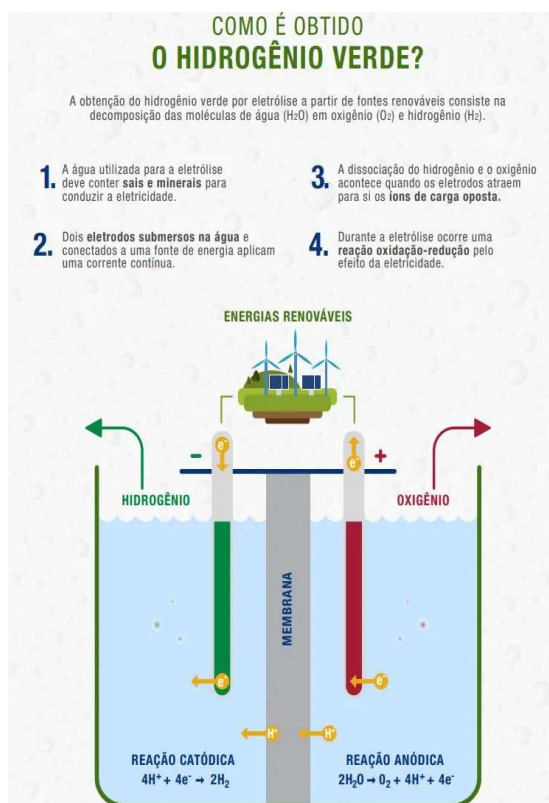
O armazenamento pode ser feito em sua forma: gasosa (gás comprimido em elevada pressão), líquida (em condições criogênicas) ou sólida (adsorvidos em superfície). No estado gasoso, o gás é armazenado em reservatórios de aço ou alumínio, que precisam estar e ser mantidos em ótimas condições, para que não haja vazamentos (Paiva, 2022).

A pressão dentro desses reservatórios é elevada, entre 35-70 megapascal (MPa), elas precisam ser altas devido à baixa densidade do gás. No estado líquido, o armazenamento é feito em vasos criogênicos que podem possuir uma região interna revestida de uma forro metálico reforçado com fibra de carbono, em temperaturas de 20 K (Kelvin), abaixo de seu ponto de ebulição. No estado sólido, o armazenamento é feito por meio de adsorção na superfície de materiais como nanotubos de carbono, minerais com estrutura interna porosa, como zeólitas, estruturas orgânicas, metálicas entre outros (Szklo *et al.*, 2023).

2.4 Hidrogênio verde

Já foi apresentado que a obtenção do hidrogênio via eletrólise da água consiste na decomposição da H_2O , necessitando de uma fonte de energia para que a reação ocorra, esta energia pode, inclusive, ser derivada de combustíveis fósseis. Nesse sentido, para que o hidrogênio seja considerado verde a energia utilizada na eletrólise da água deverá ser de origem renovável (como a solar, a eólica e a hídrica). No infográfico representado na Figura 9 é mostrado esquematicamente como ocorre a produção de H_2V .

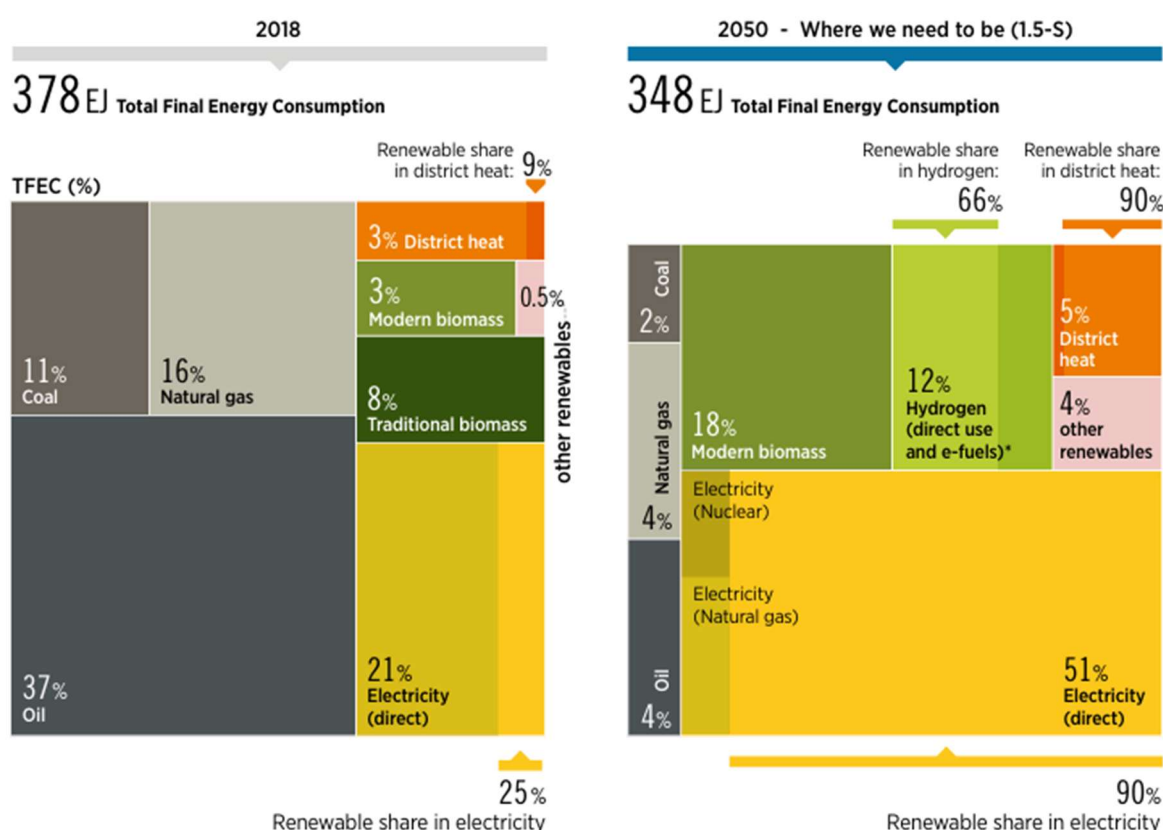
Figura 9: Esquema da produção de H_2V



Fonte: Compostcheira, 2023.

Estimativas do *International Renewable Energy Agency's* (IRENA, 2021), sobre a perspectiva mundial de transições energéticas (*World Economic Forum, 2022*), indicam que o hidrogênio e seus produtos derivados constitui aproximadamente 12% do consumo final de energia até 2050, com cerca de 66% derivados de fontes de energia renovável (H₂V) e 33% provenientes de combustíveis fósseis com tecnologia de captura de carbono (hidrogênio azul). As estimativas da representatividade do hidrogênio na matriz energética até 2050, apresentadas pelo IRENA, estão representadas na Figura 10.

Figura 10 - Estimativas de representatividade do H₂ na matriz energética até 2050



Fonte: *World Energy Transitions Outlook: IRENA, 2021*.

Com isso, tem sido cada vez mais defendido nos fóruns sobre a questão climática que o H₂V quando produzido a partir de fontes renováveis constitui uma das alternativas mais promissoras para descarbonizar o setor energético. Em uma Nota Técnica da Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE, 2021), intitulada “Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio”, além dos mercados mais consolidados como o de fertilizantes, refino

de petróleo e usos como gases industriais e hospitalares, novos mercados para o hidrogênio poderão ser desenvolvidos nos segmentos de transporte, geração elétrica, armazenamento de energia e processos industriais tais como a indústria cimenteira e a siderurgia, entre outros.

Ainda segundo a mesma nota da EPE, o hidrogênio pode ser utilizado como uma fonte de energia de baixo ou zero carbono, dependendo do método de produção, sendo aplicável em setores de difícil eletrificação e como vetor para armazenar energia. Isso possibilita uma maior integração de fontes renováveis variáveis, como a energia eólica e solar. Nesse contexto, o hidrogênio é considerado um recurso capaz de facilitar a interligação entre os mercados de combustíveis, energia elétrica, setor industrial e outros (EPE 2021).

Os países com disponibilidade e potencial de recursos energéticos renováveis apresentam pré-condições para serem criadas cadeias produtivas de H₂V, gerando oportunidades econômicas e ampliando a segurança energética e a capacidade de descarbonização dos setores de difícil redução de emissões (ESMAP, 2020).

Em função das projeções de oferta crescente de energia proveniente de recursos renováveis, a produção do H₂V, via eletrólise da água, vem recebendo atenção analítica no contexto internacional (Abdin *et al.*, 2019).

Reitera-se, assim, que o H₂V, tende a ser decisivo para atingir as metas de redução de emissões de GEE, especialmente em setores produtivos de maior complexidade energética, como os setores da indústria e de transporte, os quais, juntos, correspondem a cerca de 45% das emissões relacionados à energia em todo o mundo (SGOBBI *et al.*, 2016; IEA, 2020a).

Assim, o H₂ pode ajudar a enfrentar vários desafios energéticos críticos, oferecendo maneiras de descarbonizar uma gama de setores incluindo transporte de longa distância, produtos químicos, ferro e aço, em que está provado ser difícil reduzir as emissões de forma significativa. Também pode ajudar a melhorar a qualidade do ar e fortalecer a segurança energética (Bezerra, 2021).

O H₂V também pode desempenhar um papel importante na produção de aço verde. A siderurgia é um setor que contribui significativamente para as emissões de carbono devido ao uso intensivo de carvão na produção de aço. No entanto, ao substituir o carvão pelo H₂V como fonte de energia, é possível reduzir drasticamente as emissões de carbono associadas à produção de aço. Essa transição para o aço verde é uma abordagem promissora para tornar a indústria siderúrgica mais sustentável e alinhada com os objetivos de combate às mudanças climáticas.

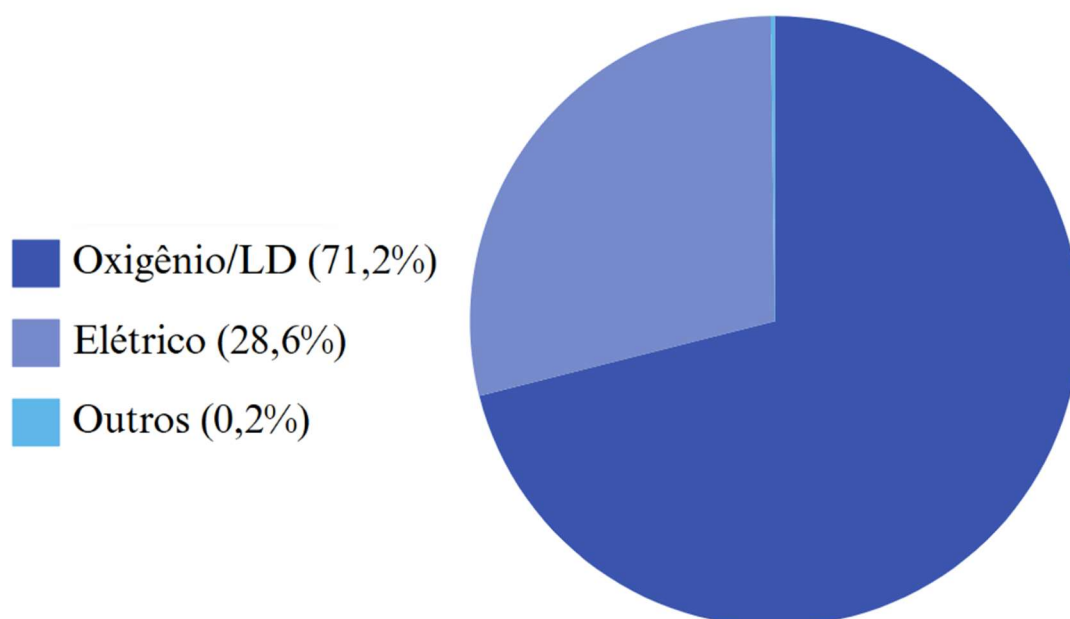
2.5 Aciarias LD e elétrica

As aciarias são unidades industriais destinadas à produção de aço a partir de ferro-gusa, sucata metálica ou minério de ferro. Os principais processos incluem o conversor a oxigênio básico (aciaria LD) e o forno elétrico a arco (aciaria elétrica), cuja escolha depende de fatores como eficiência energética, disponibilidade de sucata e exigências ambientais. Esses processos abrangem desde o tratamento das matérias-primas até a produção de aço em formatos específicos, atendendo a setores como construção civil, automotivo e energético (World Steel Association, 2021).

A etapa de aciaria é responsável pela obtenção do aço e compreende a fusão das matérias-primas, o refino do aço e sua solidificação. O aço solidificado, na forma de tarugos, segue para o processo de laminação (Vares, 2016).

Os dados mais recentes indicam que, em 2023, a produção mundial de aço bruto foi amplamente dominada pela aciaria LD, que representou cerca de 71,2% do total. A aciaria elétrica foi responsável por aproximadamente 28,6% da produção, enquanto outros métodos de produção tiveram uma participação marginal. Esse padrão está alinhado com a tendência do Brasil, que utiliza predominantemente minério de ferro como matéria-prima, dada a abundância desse recurso no país, o que favorece o uso de métodos como o de H₂ para a produção de aço (Aço Brasil, 2023; World Steel Association, 2021).

Figura 11: Produção mundial de aço bruto por processo



Fonte: Adaptado de Aço Brasil, 2023.

Nesse contexto, a introdução do H₂V nas aciarias representa uma alternativa promissora para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e minimizar a pegada de carbono do setor. O uso do H₂V no processo de redução do ferro oferece uma rota mais limpa, já que, ao invés de gerar CO₂, a reação com o hidrogênio resulta em vapor d'água como subproduto, representando um avanço significativo que será abordado nos próximos capítulos.

2.6 Emissões de GEE na produção de aço

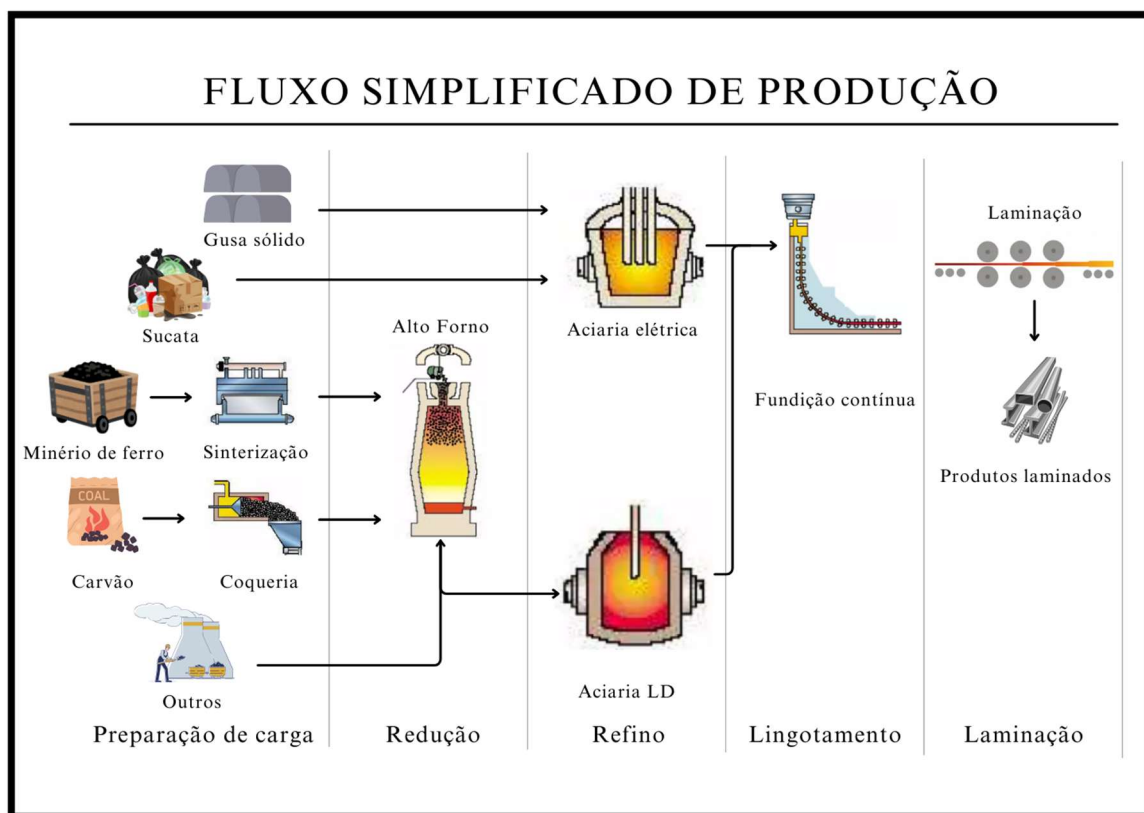
O setor de aço é o segundo maior consumidor industrial de energia. O combustível mais usado no setor siderúrgico é o carvão, representando 74% do uso de energia do setor. Além do carvão, eletricidade e gás natural respondem por quase toda a demanda energética restante (*Internacional Energy Agency*, 2020). Com isso, a indústria siderúrgica é uma das principais fontes de emissões GEE, contribuindo com cerca de 8% das emissões globais de CO₂, tornando-se um dos setores mais intensivos em carbono da economia (Le Quéré *et al.*, 2018).

As emissões da indústria siderúrgica podem ser classificadas em várias fontes: emissões diretas, provenientes de processos de combustão e reações químicas, e emissões indiretas, associadas ao uso de eletricidade. Além das emissões de CO₂, os altos-fornos também geram outros poluentes, como óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de enxofre (SO₂), que contribuem para problemas de qualidade do ar e saúde pública (Liu *et al.*, 2021).

Os dois principais processos de produção de aço são o forno elétrico a arco (EAF) e o alto-forno. O forno elétrico a arco, pode utilizar sucata de aço como matéria-prima, tem um perfil de emissões mais baixo, mas ainda depende da eletricidade gerada a partir de fontes fósseis em muitos locais, exacerbando sua pegada de carbono (Kurland *et al.* 2022).

A rota de alto forno, que utiliza carvão como redutor, é a principal utilizada para produzir o aço. Os produtos obtidos no alto-forno são: ferro-gusa, escória, gás de alto-forno (com alto teor de CO₂) e poeiras (Silva, 2011). A Figura 12 mostra de forma simplificada a rota de alto forno para produção de ferro gusa e aço (Barbosa *et al.*, 2022). Estima-se que para cada tonelada de aço produzido as emissões de CO₂ sejam de duas toneladas (Shahabuddin *et al.*, 2023).

Figura 12: Produção de ferro-gusa e de aço pela rota de alto forno

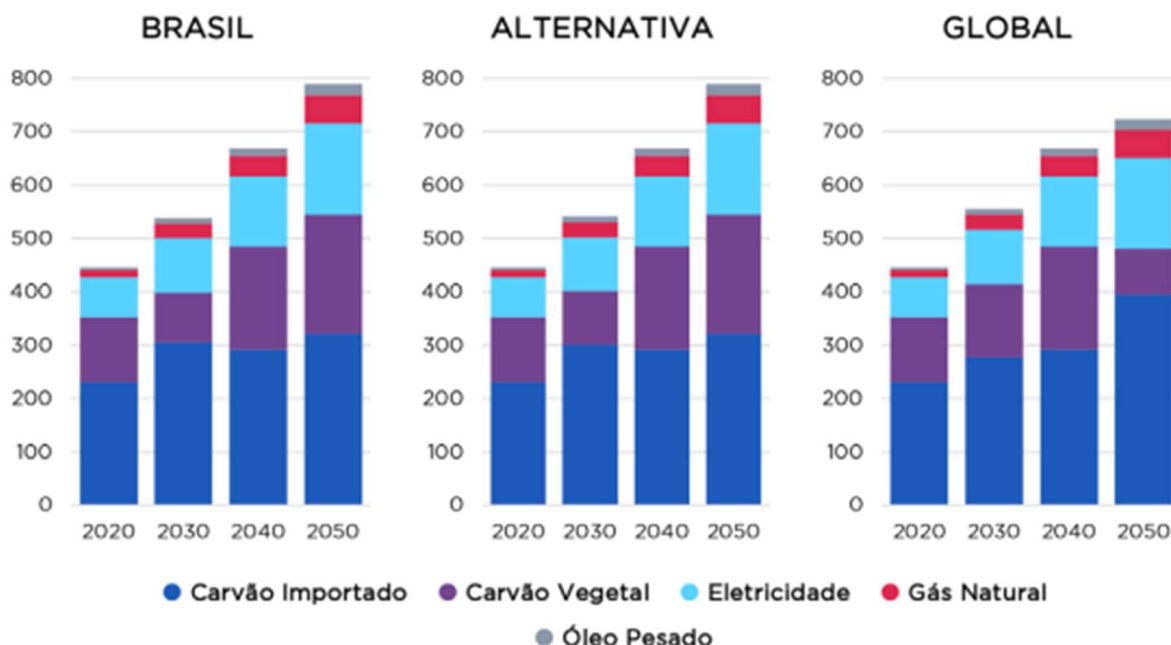


Fonte: Adaptado de Cirineu, 2023.

Considerando-se o desenvolvimento industrial esperado para os próximos anos, tudo indica que a demanda por aço irá aumentar. A projeção, segundo Devlin *et al.* (2023), é de um crescimento no consumo de aço de até 2,19 bilhão de toneladas em 2050 devido à convergência da demanda global de 250 kg per capita prevista para 2080.

Pelo viés de Szklo *et al.* (2023), o uso final de energia no setor siderúrgico terá um aumento até 2030, seguido de uma estabilização e, posteriormente, uma redução até 2050. O aumento até 2030 será devido, principalmente, ao crescimento da produção de aço, enquanto a estabilização e redução subsequentes serão devido a ganhos de eficiência energética e à substituição de parte do consumo de carvão mineral por carvão vegetal. A figura 13, mostra o panorama estimado pelos autores supracitados.

Figura 13: Projeção do uso final de energia no segmento siderúrgico



Fonte: Szklo *et al.*, 2023.

É evidente a contribuição da siderurgia para a economia mundial, contudo, as emissões de CO₂ são altas assim como é elevado o consumo de energia. A utilização dos gases da siderurgia para fornecimento de energia e calor, a captura de CO₂ e a utilização de energia renovável são condições fundamentais a serem consideradas na transição da indústria siderúrgica visando a neutralidade de carbono produzido no processo de produção do aço (XI *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2021).

Como fecho deste capítulo, destaca-se que a sustentabilidade impulsiona o desenvolvimento científico, tecnológico e a inovação. Com isso, surge como alternativa para indústria siderúrgica o “aço verde”. O termo refere-se à produção de aço utilizando tecnologias com menos emissões, integrando práticas de reciclagem e tecnologias mais limpas. A temática será abordada no tópico a seguir e é o foco deste projeto.

2.7 Aço verde

Em complemento ao anteriormente mencionado, reafirma-se que o aço é um componente estrutural fundamental para indústrias, como a da construção civil e a fabricação automotiva (Barbosa, M. O., Silva, P. C. D., e Teixeira, 2022).

Assim, a fabricação do aço, no processo siderúrgico envolve as seguintes etapas: preparação, redução, refino e laminação. A pesquisa abordou a redução, que é o processo de remoção do oxigênio do ferro, que se liga ao carbono geralmente injetando coque no alto-forno para converter o minério de ferro em ferro-gusa. Esse processo representa 90% da emissão de CO₂ de toda a siderurgia (Zhao *et al.*, 2021).

De forma similar, a produção de aço verde pode ser equiparada à geração de energia limpa ou à madeira obtida com certificação ambiental em que funcionalidade ou utilidade do produto e a experiência do consumidor final não são necessariamente afetadas, pois não há vantagens diretas adicionais para o usuário, apesar da boa reputação de produtos fabricados por meio de processos de produção mais sustentáveis. Isso contrasta com outros tipos de "produtos verdes" que se distinguem funcionalmente de seus equivalentes "convencionais" e proporcionam benefícios diretos aos usuários finais, como a economia de energia advinda do uso de veículos de maior eficiência energética (Muslemani *et al.*, 2021).

Desta forma, o termo aço verde que começou a ganhar notoriedade a partir de 2019, tem sido usado para se referir ao aço fabricado com tecnologia inovadora, reutilizado, produzido a partir de sucata e aço convencional com compensação de emissões por meio da retirada de unidades de carbono (Barbosa, M. O., Silva, P. C. D., e Teixeira, 2022).

A transição para o aço verde envolve a implementação de processos como a redução direta de minério de ferro usando hidrogênio (H-DRI), uma abordagem que não apenas reduz drasticamente as emissões de carbono, mas também contribui para a descarbonização da cadeia de valor da siderurgia (Muslemani, 2021).

Nesse processo, o hidrogênio (H₂) é usado como agente redutor para remover o oxigênio do minério de ferro, ao invés do carvão ou gás natural, que são comumente utilizados. O H₂V, quando produzido a partir de fontes renováveis, não gera emissões de CO₂, tornando a produção de ferro e aço significativamente mais limpa e sustentável (Caro & De Meester, 2020; Botelho e Bezerra, 2022).

Países como Suécia e Alemanha estão liderando essa transformação, com projetos piloto em andamento para desenvolver a tecnologia de H-DRI. No Brasil, a indústria siderúrgica também está começando a explorar o potencial do H₂V, que, quando produzido a partir de fontes

renováveis, pode oferecer uma solução sustentável para as emissões do setor (Botelho e Bezerra, 2022).

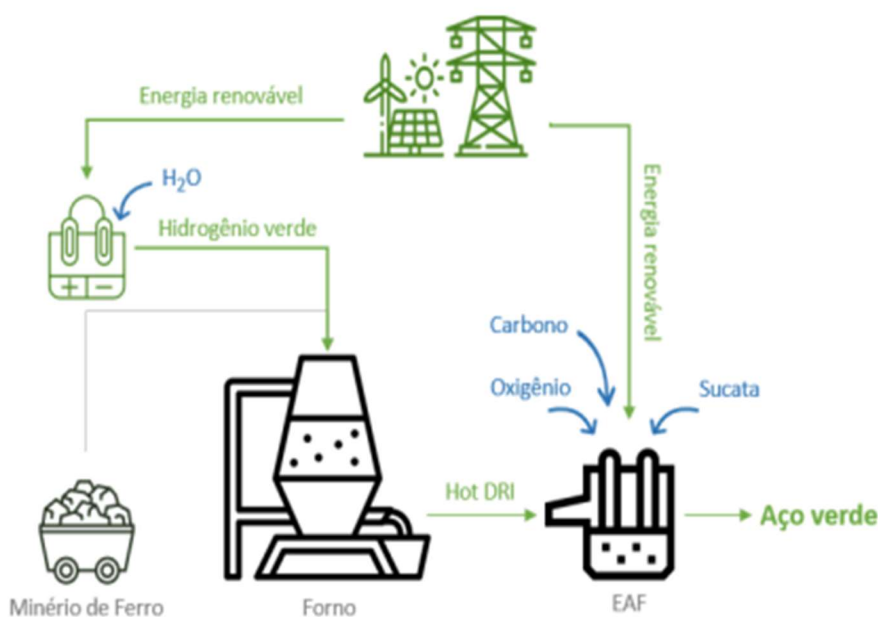
Essa evolução na indústria siderúrgica destaca não apenas a busca por eficiência e competitividade, mas também a responsabilidade ambiental, alinhando-se aos esforços globais para enfrentar as mudanças climáticas (Muslemani, 2021).

Ademais, a produção de aço verde demanda novos recursos: além do gás natural, da sucata e do minério de ferro, a energia renovável para a produção do hidrogênio, e o carvão vegetal, surgem como novos fatores da competitividade industrial (Steel, U. K. 2022).

No Brasil, existem empresas produtoras de aço verde, tal como a Aço Verde do Brasil (AVB, 2021), uma empresa do grupo faroeste, com a filosofia de sustentabilidade e com foco em operações livres de combustíveis fósseis. A empresa investe no setor florestal e na modernização da usina de aços longos. Os principais produtos comercializados são: o fio máquina, vergalhão, tarugo, ferro-gusa, gases do ar e energia (Barbosa, M. O., Silva, P. C. D., e Teixeira, 2022).

Destaca-se que "aço verde" e "aço sustentável" são termos distintos. O primeiro está relacionado às menores emissões de GEE, enquanto segundo à materiais sustentáveis. De modo geral, também engloba outras questões como eficiência energética, eficiência de recursos, circularidade e redução de outros poluentes (Muslemani, 2021). A Figura 14 destaca a produção de aço verde de forma simplificada.

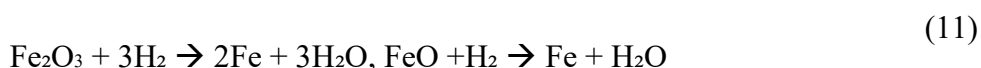
Figura 14: Processo de Produção do Aço Verde via redução direta (H-DRI)



Fonte: Botelho e Bezerra, 2022.

Na produção de aço verde, utiliza-se H_2V na etapa de redução química do minério de ferro e o resultado é o mesmo ferro metálico, porém com emissão de vapor de água, conforme mostra na reação mostrada na Equação 11:

Equação 11:



Em relação aos custos, de acordo com *WoodMackenzie* (2022), a viabilidade comercial do aço verde, em comparação com as rotas convencionais de produção, dependerá do fornecimento de H_2V competitivo, a um custo de cerca de 2 US\$/kg. Isso pode representar um acréscimo de cerca de 100 US\$/ton, aproximadamente 15-20% do custo total de produção.

No que tange aos benefícios associados a esses investimentos, o aço verde oferece uma redução substancial das emissões e abre portas para uma participação mais forte no mercado futuro de baixo carbono, beneficiando tanto o meio ambiente quanto às perspectivas econômicas (Botelho e Bezerra, 2022).

2.7.1 Rotas para a produção de aço com baixas emissões

Visando reduzir as emissões da siderurgia, consideram-se três abordagens principais: a eficiência energética, a substituição do agente redutor do minério de ferro ou do combustível e a captura e armazenamento do carbono (CAC). A eficiência energética compreende as formas para mitigar o consumo de energia no processo de produção atual. A segunda abordagem considera mudar o modo como o aço é feito, adotando para isso rotas tecnológicas que fazem uso de combustíveis e de agentes redutores de menor emissão tal como a substituição do carvão mineral pelo carvão vegetal ou uso do H_2V , conforme explicitado anteriormente. Por fim, as tecnologias de CAC contribuem para alcançar metas em processos de manufatura de aço potencialmente emissivos (E+ Transição Energética, 2020).

Cirineu (2023), analisou estudos que investigaram o potencial de redução das emissões no setor siderúrgico. A autora observou que a capacidade de redução, quando se utiliza práticas de eficiência energética a redução das emissões de CO_2 limitam-se a cerca de 25 a 40% por tonelada de aço bruto produzido. Reduções maiores são atingidas ao utilizar CAC, uso de carvão vegetal ou H_2V como agentes redutores.

No entanto, ainda segundo a visão de Cirineu (2023), essas tecnologias ainda não estão plenamente desenvolvidas ou estão em estágios iniciais ou piloto. Dessa forma, embora o uso dessas tecnologias tenha o potencial de transformar o panorama tecnológico da indústria siderúrgica e ter um impacto significativo na redução das emissões, a experiência prática é limitada. Além disso, a falta de modelos de negócios estabelecidos dificulta a viabilidade comercial dessas tecnologias, tornando ainda mais desafiadora a sua implementação em larga escala.

No quadro 2, são mostradas tecnologias que algumas companhias siderúrgicas estão implementando para reduzir as emissões do processo produtivo do aço.

Quadro 2 - Iniciativas recentes na siderurgia verde

Companhia	Projeto/Tecnologia	Localidade	Meta
Arcelor Mittal	Alto forno + eletrólise para produção de hidrogênio	Bremen, Alemanha	“Fossil free” até 2050
	Alto forno híbrido com ferro reduzido de forma direta, injeção de gás.	Dunkirk, Alemanha	
HYBRIT (SSAB, LKAB e Vattenfall)	Substituição do carvão coque por hidrogênio e eletricidade de origem não fóssil.	Suécia	“Fossil free” até 2045
Liberty Ostrava	Construção de fornos híbridos	República Tcheca	Fornos híbridos construídos até 2022
Rogesa	Hidrogênio no gás coque como agente redutor	Dillingen, Alemanha	Operações iniciadas em 2020

Companhia	Projeto/Tecnologia	Localidade	Meta
Tata Steel	Captura e armazenamento de carbono abaixo do mar do norte; eletrólise da água para produção de hidrogênio e oxigênio	Ijmuiden, Holanda	Neutro em carbono na Europa até 2050
Voestalpine Primetals Tech	Hidrogênio como agente redutor para processar concentrados de minério de ferro	Linz, Austria	Redução de 80% nas emissões de carbono até 2050
Salzitter AG (Salcos project)	Eletrólise/siderurgia baseada em hidrogênio	Wilhelmshaven, Alemanha	2 milhões de toneladas por ano de aço reduzido de forma direta (esperado até o final de 2025)
Celsa, Statkraft e Mo industrial park AS	Eletrólise/ siderurgia baseada em hidrogênio	Noruega	Redução de 50% nas emissões até 2030, descarbonização até 2050

Fonte: Adaptado de Cirineu, 2023.

2.7.2 Potencial brasileiro para a produção de H₂V e aço verde

Nos últimos anos, o Brasil tem emergido na transição para uma economia de baixo carbono, especialmente no que diz respeito à produção de H₂V e aço verde. A combinação de

abundância de recursos renováveis, como energia solar e eólica, e o potencial na indústria de produção de aço favorece o Brasil para impulsionar a descarbonização do setor siderúrgico.

O Brasil, com sua matriz energética diversificada e predominantemente renovável, apresenta um grande potencial para a produção de H₂V. Segundo o estudo de Barreto *et al.* (2022), o país possui a capacidade de produzir cerca de 1.200 TWh de energia solar e eólica até 2050, o que é mais do que suficiente para atender à demanda de eletrólise necessária para a produção de H₂V em larga escala.

Além disso, a localização geográfica do Brasil possibilita a instalação de parques eólicos e solares em áreas com alta incidência solar e ventos constantes, como a região Nordeste. A pesquisa de Silva e Almeida (2021) destaca que o Nordeste do Brasil poderia se tornar um polo de exportação de H₂V, especialmente para mercados europeus que buscam diversificar suas fontes de energia.

Ademais, o H₂V é crucial para produção de aço verde como agente redutor em substituição ao carvão ou gás natural. A indústria siderúrgica brasileira, que já é uma das maiores do mundo, está em uma posição privilegiada para adotar essa transição. Segundo Lima *et al.* (2023), as siderúrgicas brasileiras estão investindo em tecnologias de redução direta de ferro (H-DRI) que utilizam hidrogênio, com o objetivo de reduzir significativamente as emissões de CO₂.

As iniciativas de grandes empresas, como a Usiminas e a Gerdau, que já estão explorando processos de produção de aço a partir de hidrogênio, demonstram o potencial para a transformação da indústria. A Gerdau, por exemplo, anunciou planos para desenvolver uma usina de H₂V com capacidade inicial de 10 MW em sua planta no estado da Bahia (Gerdau, 2022). Tais iniciativas não apenas impulsionam a sustentabilidade da produção de aço, mas também contribuem para a economia circular e a redução de resíduos.

O Brasil possui um imenso potencial para se tornar um líder global na produção de H₂V e aço verde. A combinação de uma matriz energética renovável robusta, recursos naturais abundantes e uma indústria siderúrgica estabelecida oferece uma oportunidade única para a transição para uma economia de baixo carbono. Contudo, o sucesso dessa transição dependerá da implementação de políticas públicas eficazes e do engajamento do setor privado em inovações tecnológicas sustentáveis.

2.7.3 Marco regulatório

No contexto da produção de aço verde para descarbonizar o setor, é fundamental analisar as iniciativas e políticas existentes que visam regulamentar e incentivar práticas sustentáveis na produção de aço. Apesar dos avanços em termos de políticas públicas relacionadas à sustentabilidade, ainda não há uma legislação abrangente que trate especificamente do aço verde e seus critérios técnicos no Brasil.

A seguir, será apresentado um panorama do marco regulatório atual, destacando as políticas, normas técnicas e iniciativas que influenciam a adoção de tecnologias limpas no setor siderúrgico, bem como as perspectivas futuras para a regulamentação dessa prática. As iniciativas disponíveis são:

2.7.3.1 Iniciativas no Brasil

O Brasil possui um arcabouço regulatório que, embora não definido especificamente para o aço verde, abrange aspectos para a sustentabilidade industrial. O Programa Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa e a Política Nacional de Mudança do Clima estabelecem diretrizes para a redução das emissões em várias indústrias, incluindo a siderurgia (Gonçalves *et al.*, 2020). Essas iniciativas visam promover a sustentabilidade e a redução da intensidade de carbono na economia, criando um ambiente favorável para a adoção de tecnologias limpas.

2.7.3.2 Normas técnicas

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) tem desenvolvido normas que abordam a sustentabilidade na produção de aço. Embora ainda não exista uma norma específica que defina o aço verde, as normas de gestão ambiental, como a ISO 14001, são aplicáveis e incentivam as indústrias a adotar práticas sustentáveis. Além disso, a norma ISO 50001, que trata da gestão de energia, pode ser utilizada por siderúrgicas para melhorar a eficiência energética e reduzir as emissões de gases de efeito estufa (De Carvalho *et al.*, 2021).

2.7.3.3 Iniciativas de indústrias e associações

Diversas indústrias, juntamente com associações nacionais e internacionais, têm promovido iniciativas direcionadas à redução da pegada de carbono na produção de aço. A Instituição Brasileira de Siderurgia (IBS), por exemplo, está em discussões sobre a transição para o aço verde, incentivando tecnologias que utilizam H₂ e outras práticas sustentáveis. No cenário internacional, iniciativas como a *Steel Zero*, que visa acelerar a descarbonização da cadeia de valor do aço, e a *Climate Leadership Council*, que promove negociações e acordos sobre práticas sustentáveis, são exemplos de como o setor siderúrgico está se mobilizando para enfrentar os desafios das mudanças climáticas (Andrade *et al.*, 2021).

2.7.3.4 Legislações ambientais e de sustentabilidade

As legislações ambientais no Brasil, como o Código Florestal e a Lei de Política Nacional do Meio Ambiente, criam um quadro normativo que exige das indústrias a adoção de práticas que minimizem os impactos ambientais. Essas leis desempenham um papel fundamental na promoção de um desenvolvimento industrial sustentável, embora não tratem diretamente do aço verde. O incentivo à utilização de tecnologias limpas, como o H₂, pode ser impulsionado por essas legislações, que exigem a redução de emissões (Silva *et al.*, 2022).

2.7.3.5 Acordo de Paris

O Acordo de Paris, assinado em 2015, estabelece metas globais para limitar o aumento da temperatura global e tem um impacto significativo sobre a forma como os países abordam a descarbonização de suas indústrias. O acordo encoraja as nações a adotarem políticas que incentivem a eficiência energética e a utilização de fontes de energia renováveis, impactando diretamente a produção de aço ao exigir uma redução substancial das emissões de carbono (Costa *et al.*, 2022). O comprometimento do Brasil com o Acordo de Paris pode levar à implementação de regulamentações e incentivos específicos para a produção de aço verde, alinhando as metas nacionais às diretrizes globais de sustentabilidade.

Como fecho deste capítulo, ressalta-se que embora existam diretrizes e iniciativas que promovem a sustentabilidade na produção de aço, o marco regulatório específico para o aço verde ainda está em evolução. O desenvolvimento de uma estrutura regulatória clara e

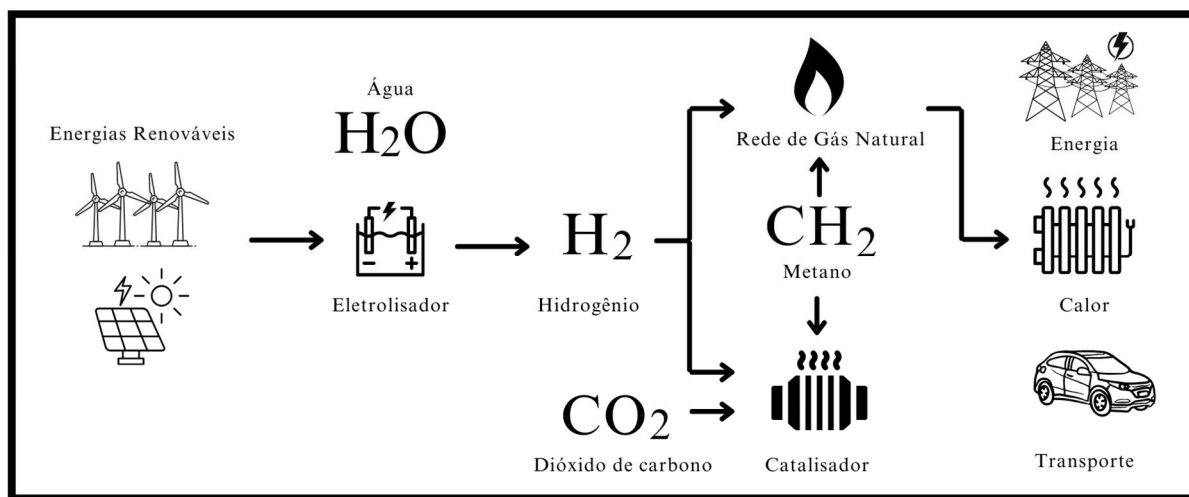
abrangente será crucial para apoiar a transição da indústria siderúrgica em direção a práticas mais sustentáveis e para incentivar o uso de tecnologias, como o H_2 , na produção de aço verde.

2.7.4 *Power-to-Gas* e a produção de aço verde

Neste capítulo, destaca-se a relevância da tecnologia *Power-to-Gas* e sua aplicação potencial na produção sustentável de aço verde por meio do uso de hidrogênio renovável.

O conceito de *Power-to-Gas* (PtG) surge como uma alternativa para a descarbonização da indústria siderúrgica, especialmente no que se refere à produção de aço verde. O processo PtG, em síntese, permite a conversão de eletricidade gerada a partir de fontes renováveis, como solar e eólica, em H_2 através da eletrólise da água, conforme mostra a Figura 15. Esse H_2 pode ser utilizado como agente redutor no processo de fabricação de aço, substituindo o carvão (IRENA, 2020).

Figura 15: Como funciona o processo de conversão de energia em gás



Fonte: Adaptado de C3 Visual Lab, 2018.

A utilização do H_2 produzido por meio do PtG na indústria do aço é particularmente promissora porque, durante a reação de redução do minério de ferro, o H_2 libera apenas vapor d'água como subproduto, ao contrário do CO_2 gerado pelo carvão. Segundo Kurland *et al.* (2022), a adoção de H_2 na produção de aço pode resultar em uma diminuição de até 95% nas emissões de GEE em comparação com os métodos tradicionais. Isso não apenas ajuda a atender

às metas climáticas globais, mas também posiciona o setor siderúrgico como um líder na transição para uma economia de baixo carbono.

Além dos benefícios ambientais, o uso do H₂ produzido a partir do PtG pode trazer vantagens econômicas. A produção de H₂ por meio de fontes renováveis pode ser integrada à rede elétrica, permitindo que o excesso de eletricidade gerada durante períodos de alta produção seja utilizado para gerar H₂, que pode ser armazenado e utilizado posteriormente na produção de aço quando necessário (Lima *et al.*, 2023). Esse sistema não apenas melhora a flexibilidade da rede, mas também garante que a produção de aço seja realizada de maneira contínua e eficiente, mesmo em momentos de baixa geração de energia renovável.

2.8 Estado da arte

Conforme mencionado ao longo deste trabalho, a produção de aço representa uma das atividades industriais mais intensivas em carbono, contribuindo para as emissões globais de GEE's. Diante disso, apresenta-se um estado da arte, mostrado no Quadro 3, para analisar o conjunto de estudos recentes que exploram a viabilidade técnica, econômica e ambiental da integração do H₂ na cadeia produtiva do aço.

Para uma pesquisa abrangente, foram selecionados para o estado da arte, artigos em língua inglesa. Onde foram selecionados 10 artigos, sendo eles os mais qualificados sobre perspectivas futuras do aço verde. As contribuições de diferentes autores fornecem uma base para discutir os desafios e oportunidades que cercam o desenvolvimento de processos de aço verde.

Quadro 3 - Estado da arte com perspectivas futuras sobre o aço verde

Ano	Autor(es)	Título	Resumo	Link
2021	ANDRADE, K. J. M. K. S.; SOUZA, W. J. C.; LIMA, R. A.	<i>Hydrogen as a reducing agent in the iron and steel industry: Current trends</i>	Esta pesquisa analisa a tendência do uso de H ₂ na indústria de ferro e aço, destacando inovações e desafios.	Link
2022	COSTA, C. A. F.; ALVES, D. G.; MENDES, P.	<i>Hydrogen applications in steel production: Challenges and opportunities</i>	O estudo aborda os desafios e oportunidades do uso de H ₂ na produção de aço, incluindo barreiras tecnológicas.	Link

Ano	Autor(es)	Título	Resumo	Link
2021	DE CARVALHO, A. J. D.; CAETANO, L. A.; SIMÕES, R.	<i>Hydrogen-based direct reduction of iron: An overview</i>	O estudo revisa diversos métodos de redução direta de ferro utilizando H ₂ , discutindo viabilidade técnica e econômica.	Link
2023	DIAS, J. F. S.; MARTINS, A. C.; LOPES, F.	<i>Technological innovations in hydrogen-based steel production</i>	O estudo investiga inovações tecnológicas que permitem a utilização de H ₂ na produção de aço, enfatizando a sustentabilidade.	Link
2023	FERREIRA, L. G. M. P.; BARBOSA, T. R.; TEIXEIRA, J.	<i>The potential of hydrogen in decarbonizing the steelmaking industry</i>	Este trabalho discute o potencial do H ₂ para a descarbonização da indústria de aço, evidenciando aspectos econômicos e ambientais.	Link
2023	LIMA, M. A. A. R. de; PEREIRA, R. F. S.; SAMPAIO, D.	<i>Sustainable steelmaking: The role of hydrogen and renewable energy</i>	O artigo descreve como o H ₂ e as energias renováveis podem ser integrados na produção de aço sustentável.	Link
2023	SANTOS, P. A. F.; OLIVEIRA, C. S.; CUNHA, R.	<i>Clean Hydrogen in the Steel Industry: Pathways and Future Perspectives</i>	O artigo analisa os caminhos para a implementação de H ₂ limpo na indústria de aço, abordando perspectivas futuras.	Link
2022	SILVA, R. B.; OLIVEIRA, J. L.; NUNES, D.	<i>Hydrogen production for steelmaking: A green alternative</i>	Este trabalho discute as alternativas verdes para a produção de H ₂ , focando em sua aplicação na indústria do aço.	Link
2021	SOARES, H. M. M.; PEREIRA, A. J.; VAZ, T.	<i>The role of hydrogen in steelmaking: A review</i>	O artigo fornece uma revisão abrangente sobre o papel do H ₂ na produção de aço, incluindo métodos e aplicações.	Link
2023	Wang, C., Walsh, S. D. C., Weng, Z., Haynes, M. W., Summerfield, D., e Feitz, A.	<i>Green steel: Synergies between the Australian iron ore industry and the</i>	Este estudo aborda uma modelagem econômica para avaliar o alinhamento entre os centros de produção de H ₂ e as operações de minério de ferro, o que pode reduzir os	Link

Ano	Autor(es)	Título	Resumo	Link
		<i>production of green hydrogen</i>	custos de produção de aço verde até 2050.	

Fonte: Autora, 2024.

A partir da análise das publicações, observa-se que o uso do H₂ como agente redutor na produção de aço tem emergido como uma alternativa para descarbonizar a indústria siderúrgica, tradicionalmente dependente de métodos que emitem grandes quantidades de carbono. Estudos como os de Gonçalves *et al.* (2020) e Wang *et al.* (2023) destacam que a substituição do coque pelo H₂ pode não apenas reduzir as emissões de CO₂, mas também oferecer um modelo de produção mais sustentável. A integração do H₂ em processos de redução direta de ferro é vista como uma inovação crucial, com a pesquisa de Andrade *et al.* (2021) apontando para a necessidade de políticas públicas que incentivem essa transição. Além disso, Soares *et al.* (2021) fornece uma análise abrangente das diversas aplicações do H₂ na fabricação de aço, evidenciando sua potencialidade como uma solução viável para a descarbonização do setor.

As perspectivas futuras sobre o uso do H₂ na produção de aço estão sendo amplamente discutidas na literatura, com Santos *et al.* (2023) enfatizando a importância de enfrentar desafios técnicos e logísticos para uma adoção efetiva. Ademais, pelo viés de Silva *et al.* (2022) e Costa *et al.* (2022) a necessidade de desenvolver alternativas sustentáveis para a produção de H₂, é essencial para a viabilidade econômica do H₂V na indústria. Além disso, as inovações tecnológicas mencionadas por Dias *et al.* (2023) e o potencial do H₂ para a descarbonização, conforme discutido por Ferreira *et al.* (2023), sugerem um caminho promissor para transformar a indústria do aço em direção a um futuro mais sustentável.

3 METODOLOGIA

Neste estudo, foram analisadas as emissões de CO₂ das principais siderúrgicas brasileiras integradas. A coleta de dados foi realizada por meio de documentos técnicos, como o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), além do Programa Brasileiro do GHG Protocol. Esses documentos foram selecionados devido à sua relevância e confiabilidade, sendo fontes primárias que fornecem dados sobre as emissões das siderúrgicas.

O EIA/RIMA forneceu informações sobre o potencial de emissões das siderúrgicas, detalhando os impactos ambientais previstos nas operações. Já o GHG Protocol disponibilizou dados reais sobre as emissões de CO₂, abrangendo os Escopos 1 (emissões diretas) e 2 (emissões indiretas associadas ao consumo de energia). A análise desses dados permitiu uma comparação entre as estimativas de emissões e os valores efetivamente registrados, possibilitando a avaliação da eficiência das estratégias de controle adotadas pelas empresas.

Essas emissões são calculadas seguindo a norma ISO 14064-1 e foram selecionadas 12 siderúrgicas integradas, com base em relatórios do Instituto Aço Brasil. As informações obtidas do Programa Brasileiro do GHG Protocol apresentam os dados reais das emissões referentes ao Escopo 1 e Escopo 2 das siderúrgicas integradas. As emissões diretas (Escopo 1) correspondem ao CO₂ liberado diretamente por fontes de propriedade ou sob controle das empresas, incluindo atividades de fabricação e queima de combustíveis (CETESB, 2011). O Escopo 1, em conjunto com o Escopo 2 (emissões indiretas provenientes da aquisição de energia) e o Escopo 3 (outras emissões indiretas), é registrado nos inventários corporativos de emissões de CO₂.

O quadro 4 se refere aos fatores de emissão de combustíveis utilizados no processo de produção de ferro-gusa, o primeiro fator de emissão (FE) necessário foi referente à produção de ferro-gusa (FEHM). Esse fator foi calculado a partir das emissões totais de CO₂ da AMT em 2018, disponível no inventário de emissões apresentado no Relatório da ArcelorMittal para o Programa Brasileiro do GHG Protocol (ArcelorMittal, 2018). O valor total de CO₂ foi então dividido pelo volume total de ferro-gusa produzido pela empresa (AMT) naquele ano (Ludgero, 2018). A FEHM obteve 1,83 tCO₂ por tonelada de ferro-gusa (tCO₂/t hm), sendo considerado um valor aceitável.

Quadro 4: Parâmetros utilizados para o desenvolvimento do cenário

Parâmetros	Valor	Unidade	Fonte
Emissões de Escopo 1	22.035.554,84	tCO ₂	Relatório de Sustentabilidade: ArcelorMittal Brasil, 2023
Produção de Aço Bruto (cs)	7.811.500	tcs (tonelada de aço bruto)	Relatório de Sustentabilidade: ArcelorMittal Brasil, 2023
Produtividade de ferro-gusa (thm) por tonelada de aço bruto	1,06	thm/tcs (tonelada de metal quente/tonelada de aço bruto)	ArcelorMittal Tubarão Equilíbrio Energético (Ludgero, 2018)
Produção de Ferro-Gusa	9.646.421	thm	Relatório de Sustentabilidade: ArcelorMittal Brasil, 2023
Consumo de energia no alto-forno (EBF)	0,022075	TJ/thm	ArcelorMittal Tubarão – 2018
Fator de emissão para ferro-gusa (FE_{hm})	1,83	tCO ₂ /thm ((toneladas de CO ₂ por tonelada de ferro-gusa)	ArcelorMittal Tubarão – 2018
Energia para produção de hidrogênio (ESMR)	63,3	KJ/mol H ₂	Muradov, 2001
Massa molar do H ₂ (MH ₂)	2	g/mol H ₂	Muradov, 2001
Fator de emissão para hidrogênio verde (FE^{II})	1,5	Kg CO ₂ /Kg H ₂ (quilogramas de CO ₂ por quilograma de H ₂)	Alvarez <i>et al.</i> (2021)

Fonte: Adaptado de Lopes, 2021.

O segundo fator necessário refere-se aos combustíveis utilizados no coque, no hidrogênio azul e no hidrogênio verde no processo de produção de ferro-gusa. O H₂V, como já demonstrado, está livre de emissões de CO₂ (WSA, 2021b). Já o hidrogênio azul possui um fator de emissão a ser considerado, pois não é completamente um combustível isento de carbono

(*H-Vision*, 2019). No entanto, o fator de emissão do H₂V em toneladas de CO₂ por terajoules (FE^{II} verde H₂) precisa ser determinado para possibilitar seu uso no desenvolvimento do cenário.

Assim, a Equação 12 apresenta o método utilizado para calcular esse fator de emissão, que consiste em multiplicar a massa molar do H₂ pelo FE^{II} verde H₂ e, em seguida, dividir pela energia necessária para a produção de H₂ via reforma de metano a vapor.

Equação 12:

$$\begin{aligned} FE^I_{\text{verde H}_2} &= \{[(E_{\text{SMR}})^{-1} * M_{\text{H}_2} * FE^{\text{II}}_{\text{verde H}_2}]/1000\} \\ FE^I_{\text{verde H}_2} &= 47,39 \text{ t CO}_2/\text{TJ} \end{aligned} \quad (12)$$

Posteriormente, o fator de emissão do coque foi extraído de fontes como a Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA) e o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Estes relatórios fornecem fatores de emissão do coque divididos em três categorias: "Fator de Emissão Padrão", "Superior" e "Inferior". Além disso, os fatores de emissão utilizados estão associados ao combustível "Carvão Coque" e referem-se apenas às emissões de CO₂ (Tabela 2).

Tabela 2: Fator de emissão do carvão metalúrgico

Fator de emissão do carvão metalúrgico		
Fator de Emissão	Carvão de Coque (tCO ₂ /TJ)	Referência
Mais baixo	87,5	EPA (2023)
Padrão	95,0	IPCC (2023)
Superior	102,1	EPA (2023)

Fonte: Adaptado de EPA e IPCC, 2023.

As equações utilizadas para calcular os valores de emissão de CO₂ por tonelada de metal quente gerada por H₂ (13) e coque (14), que foram somados às emissões de ferro-gusa (FEHM) para encontrar os valores finais de CO₂/thm (15).

$$E_{H_2} = P_n \times E_{BF} \times FE_{verde\ H_2}^I \quad (13)$$

$$E_{coque} = P_n \times E_{BF} \times FE_{coque} \quad (14)$$

$$E_{total(tCO_2/t\ hm)} = E_{coque} \times FE_{hm} \times E_{H_2} \quad (15)$$

A utilização de dados quantitativos, como os apresentados nas equações acima, permitiu uma avaliação precisa dos fatores de emissão associados ao uso do H₂V na produção de aço, destacando sua eficiência energética e viabilidade econômica.

Além disso, a pesquisa incluiu uma análise do contexto brasileiro, considerando suas particularidades e desafios na transição para uma siderurgia mais sustentável. Essa abordagem metodológica fundamenta as discussões apresentadas ao longo do trabalho e a formulação de práticas para a implementação de tecnologias limpas na indústria.

4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os valores para emissões de CO₂ em diferentes cenários de produção de aço, incluindo a substituição de coque por H₂V, podem ser aproximados com base em estudos sobre a descarbonização da indústria siderúrgica. De acordo com o Fórum Econômico Mundial e a McKinsey, o uso de H₂V, embora viável, requer grandes investimentos e depende de preços competitivos de eletricidade renovável e do H₂. A emissão de CO₂ pode ser significativamente reduzida ao usar H₂V em vez de coque, com um potencial de diminuição de até 90% das emissões, dependendo da tecnologia empregada e do processo de produção, como o uso de fornos elétricos a arco (EAF) em vez de altos-fornos convencionais.

Esses valores são estimados e variam dependendo de fatores como a eficiência da produção e o mix de energia utilizado para produzir o H₂V. Para resultados precisos, foi necessário basear-se em dados reais de estudos de emissões para esses cenários. Mas fontes indicam que, em comparação ao coque, o H₂V pode reduzir as emissões de 1,8 a 3,7 tCO₂ por tonelada de aço produzido.

No primeiro cenário, todo o combustível usado no alto forno era coque, e o poder calorífico inferior não foi considerado separado da coca. No segundo cenário foi usado 100% de H₂V, as emissões de CO₂ praticamente desaparecem, pois, o H₂V não gera emissões diretas de CO₂. No entanto, para considerar a possibilidade de pequenas emissões indiretas (por exemplo, de processos de transporte ou de uma produção não totalmente otimizada), o valor padrão é estimado em 0,10 tCO₂/thm e o valor superior em 0,20 tCO₂/thm.

O mesmo foi assumido para os cenários 3 e 4, que adicionaram o H₂ como combustível auxiliar, reduzindo significativamente as emissões de CO₂. Os cenários consideraram que injetando H₂ quente no alto forno, como combustível, é considerada a melhor tecnologia alternativa. Uma vez que essa tecnologia não só reduz as emissões de CO₂, mas também melhora a eficiência térmica do processo, proporcionando uma produção de aço mais sustentável e alinhada às exigências ambientais contemporâneas.

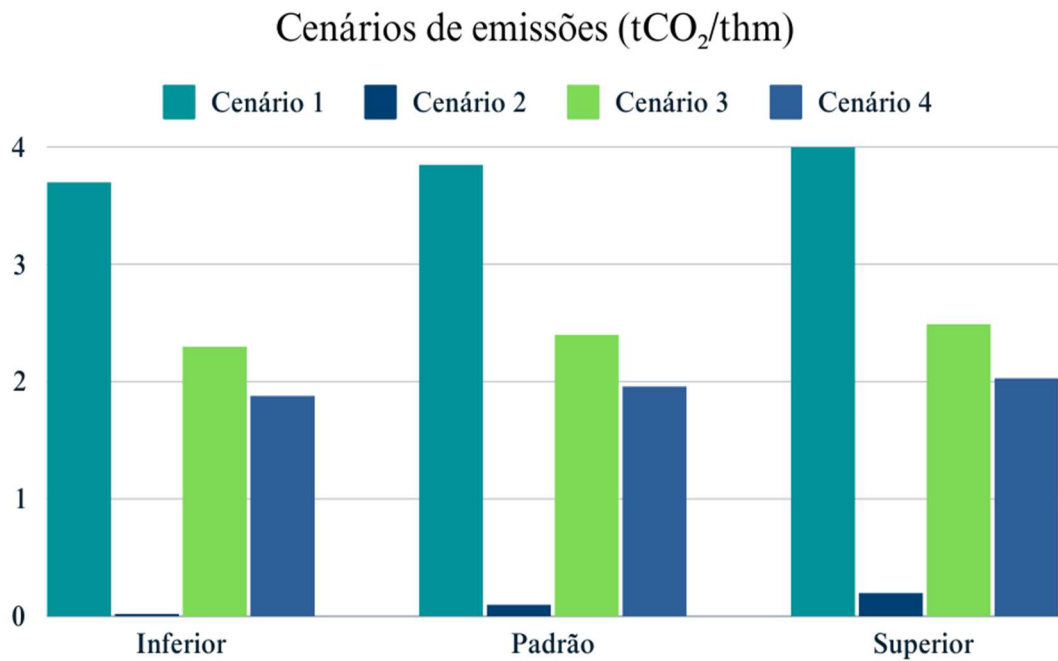
Tabela 3: Caracterização de quatro cenários e seus resultados relacionados ao fator de emissão do coque, que tem três valores (inferior, padrão e superior)

Emissões (tCO ₂ /thm)					
Cenário	Combustível	P_n (%)	Inferior	Padrão	Superior
1	Coque	100	3,70	3,85	4,00
2	H_2V	100	0,02	0,10	0,20
3	Coque	60	2,30	2,40	2,49
	H_2V	40			
4	Coque	50	1,88	1,96	2,03
	H_2V	50			

Fonte: Autora, 2024.

O Cenário 1, que utiliza 100% coque, tem emissões padrão de 3,85 tCO₂/thm. Quando comparado com os outros cenários, as reduções em emissões de CO₂ são significativas. No Cenário 2, as emissões caem drasticamente para 0,10 tCO₂/thm, resultandoquadr em uma redução de 97,4% em relação ao Cenário 1. O Cenário 3 apresenta emissões de 2,40 tCO₂/thm, com uma redução de 37,7% em comparação com o Cenário 1. No Cenário 4, as emissões caem para 1,96 tCO₂/thm, o que representa uma redução de 49,2% em relação ao Cenário 1. O que representa como a substituição parcial ou total do coque pelo H₂V pode resultar em reduções expressivas nas emissões de CO₂.

Figura 16: Resultados dos cenários descritos na Tabela 3, comparando o uso do H₂V



Fonte: Autora, 2024.

Com isso, a expressão "aço verde" tem ganhado proeminência no contexto industrial devido à crescente demanda por práticas sustentáveis. Essa abordagem técnica envolve a implementação de tecnologias inovadoras, como o uso de H₂V na produção de aço, o que resulta na redução significativa das emissões de GEE.

A substituição do coque por H₂V, proveniente de fontes de energia renováveis, representa uma estratégia eficaz para diminuir a pegada de carbono associada à produção de aço, com um potencial de redução de até 90% quando comparado aos métodos tradicionais. Além disso, o 'aço verde' também envolve a seleção criteriosa de ligas metálicas de baixo impacto ambiental, muitas vezes provenientes de fontes recicladas, contribuindo para a sustentabilidade do setor siderúrgico.

A soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) destaca-se como uma técnica essencial na manipulação do aço verde, garantindo uma união precisa e controlada entre os materiais. O corte a laser, com sua precisão milimétrica, permite a modelagem intrincada do aço, facilitando a criação de peças com complexidade geométrica.

No tratamento do aço verde, a patinização é comumente utilizada para conferir à superfície uma aparência envelhecida e esteticamente única. Paralelamente, a galvanização a quente desempenha um papel crucial na proteção contra a corrosão, garantindo a durabilidade do material em diversas aplicações.

Apesar dos avanços, desafios persistentes incluem a busca por métodos mais eficientes na produção de aço verde, a otimização de processos de tratamento e a definição de padrões que garantam a qualidade e sustentabilidade do material. A compreensão contínua desses aspectos técnicos é crucial para impulsionar a evolução do aço verde como uma alternativa viável e ecologicamente responsável na indústria metalúrgica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como conclusão, o conceito de aço verde e a utilização do H₂V emergem como uma resposta crucial aos desafios ambientais enfrentados pela indústria siderúrgica. Ao adotar práticas sustentáveis, como a reciclagem de materiais, a eficiência energética e a redução das emissões, a produção de aço verde busca equilibrar as demandas da sociedade moderna com a preservação do meio ambiente. Essa abordagem não apenas contribui para a mitigação das mudanças climáticas, mas também promove a eficiência econômica a longo prazo. Com avanços contínuos em tecnologias limpas e inovações na cadeia de produção, o aço verde se posiciona como um pilar fundamental para um futuro industrial mais sustentável e responsável.

A análise dos cenários de produção de aço indicou que a substituição do coque por H₂V pode resultar em uma redução significativa das emissões de CO₂, com potencial de diminuição de até 90% em comparação aos métodos tradicionais.

Os resultados demonstraram que, embora a implementação do H₂V exija investimentos substanciais e uma infraestrutura adequada, os benefícios a longo prazo, como a eficiência energética e a melhoria da imagem corporativa, superam os desafios iniciais. A combinação de dados quantitativos e uma análise abrangente das implicações ambientais e sociais reforça a necessidade de um compromisso coletivo para transformar a siderurgia em um setor sustentável e economicamente viável. Além disso, com a análise do contexto brasileiro destacamos o potencial do país, que já conta com uma matriz energética predominantemente renovável, para se tornar um líder na produção de H₂V e aços verdes.

Por fim, é evidente que a colaboração entre as indústrias, pesquisadores e formuladores de políticas é crucial para fomentar a inovação e garantir uma transição leve para uma siderurgia mais limpa. A continuidade das pesquisas e o desenvolvimento de tecnologias que viabilizem o uso do H₂V são essenciais para consolidar um futuro sustentável para a indústria do aço, promovendo a redução das emissões, mas também o fortalecimento da economia e a criação de empregos em setores de tecnologia limpa. Assim, esta pesquisa contribui para o entendimento das oportunidades e desafios associados à produção de aço sustentável, servindo como um ponto de partida para futuras investigações e ações no campo da siderurgia verde.

REFERÊNCIAS

- E+ **Transição Energética** (2020). Disponível em: <https://emaisenergia.org/wp-content/uploads/2020/05/ETransicaoEnergeticaBrasileira.pdf> Acesso em: 06 nov. 2023.
- Abdin, Z., Zafaranloo, A., Rafiee, A., Mérida, W., Lipiński, W., e Khalilpour, K.R. (2019). *Hydrogen as an energy vector. Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Hydrogen-as-an-energy-vector-Abdin-Zafaranloo/b701332e342ee3db76f0bd5ac9ed150ce6c257db>. Acesso em: 26 nov. 2023.
- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **Principais estatísticas mundiais de energia**. Paris: Agência Internacional de Energia, 2016. Disponível em: <https://www.iea.org/>. Acesso em: 19 nov. 2023.
- ALVES, Sandro de Carvalho. **Reforma a vapor do metano para produção de hidrogênio: estudo termodinâmico e protótipo de modelo matemático de reator com membrana**. 2005. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15269>. Acesso em: 15 nov. 2023.
- ANDRADE, K. J. M. K. S.; SOUZA, W. J. C.; LIMA, R. A. *Hydrogen as a reducing agent in the iron and steel industry: Current trends. Materials Science and Engineering: A*, v. 815, p. 141-154, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927010621000330>. Acesso em: 07 nov. 2024.
- Ant, C. I. O., Lopes pesquisador, N. I. O., e Agroenergia, E. (2022). Artigo: **Transição energética e desenvolvimento durável**. 5–7. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1149213/1/Transicao-energetica-e-desenvolvimento.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2023.
- BARABAN, D. **Net Zero: entenda o conceito e sua importância para as empresas**. Disponível em: <https://solucoes.edp.com.br/blog/net-zero-significado/>. Acesso em: 07 nov. 2024.
- BARBOSA, M. O.; SILVA, P. C. D.; TEIXEIRA, R. L. P. **Aço verde e a sustentabilidade na produção de ferro-gusa**. Revista Brasileira de Iniciação Científica, 2022. Disponível em: <https://periodicoscientificos.itp.ifsp.edu.br/index.php/rbic/article/view/720>. Acesso em: 24 set. 2024.
- BARRETO, L. *et al.* **Renewable energy potential in Brazil: A comprehensive analysis of solar and wind energy**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 156, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032121006259>. Acesso em: 07 nov. 2024.

Barroso-, A. M. R., Felipe, L., Alves, L., e Meireles, M. R. G. (2017). **Obtenção do Hidrogênio verde a partir de energias renováveis**. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021_CDS_212.pdf. Acesso em: 20 oct. 2023.

BEZERRA, Francisco Diniz. **Hidrogênio Verde: Nasce um gigante no setor de energia**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 6, n.212, dez. 2021. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/handle/123456789/1109>. Acesso em: 10 nov. 2023.

Botelho, V., e Bezerra, L. R. (2022). **O potencial do hidrogênio verde para descarbonização da siderurgia e as oportunidades**. 1–5. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/o_potencial_do_hidrogenio_verde.pdf. Acesso em: 11 nov. 2023.

Camila, A., e Oliveira, R. De. (2011). **O USO DO HIDROGÊNIO COMO FONTE ENERGÉTICA**. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2011_TN_WIC_143_902_18877.pdf. Acesso em: 24 out. 2023.

Caro, D., & De Meester, B. (2020). *Hydrogen in the iron and steel industry: Technologies and pathways to decarbonisation*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(27), 13656-13667. Disponível em: <https://j.ijhydene.2020.03.093.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2024.

Castro, N. De, e Leal, L. M. (2022). **Hidrogênio verde no Brasil: Uma visão geral de projetos e principais stakeholders**. Disponível em: <https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/03/Artigo-n%C2%B0-10-GESEL-AHK-Economia-do-hidrogenio-no-Brasil-visao-geral-de-projetos-e-principais-stakeholders.pdf>. Acesso em: 20 oct. 2023.

CASTRO, Nivalde De; SANTOS, Vitor; AQUINO, Thereza. **O Brasil e as estratégias da Alemanha para o Hidrogênio Verde**. GESEL, 2021. Disponível em: https://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/23_Castro301.pdf. Acesso em: 23 nov. 2023.

Chemical Engineering Journal (2017). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/chemical-engineering-journal>. Acesso em: 07 nov. 2024.

Cirineu, G. (2023). DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS "AÇO VERDE ": estado da arte, desafios e perspectivas para a siderurgia sustentável no Brasil". Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/18562/Grace%20Regina%20Ferreira%20Cirineu.pdf?sequence=1>. Acesso em: 24 out. 2023.

Compostcheira, (2023) **O que é Hidrogênio Verde?** Disponível em: <https://compostcheira.eco.br/o-que-e-hidrogenio-verde/amp/>. Acesso em: 25 nov. 2023.

COSTA, C. A. F.; ALVES, D. G.; MENDES, P. ***Hydrogen applications in steel production: Challenges and opportunities***. *Hydrogen*, v. 3, n. 4, p. 580-596, 2022. Disponível em: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/2022_steel.pdf. Acesso em: 07 nov. 2024.

DE CARVALHO, A. J. D.; CAETANO, L. A.; SIMÕES, R. ***Hydrogen-based direct reduction of iron: An overview***. *Metals*, v. 11, n. 3, p. 341, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/11/3/341>. Acesso em: 07 nov. 2024.

Delgado, F. (2022). **ENERGIA A crise do setor de óleo e gás e os desafios da transição energética brasileira**. Disponível em: https://ibre.fgv.br/sites/ibre.fgv.br/files/arquivos/u65/04ce2022_fernanda_delgado.pdf. Acesso em: 06 nov. 2023.

DEVLIN, Alexandra *et al.* ***Global green hydrogen-based steel opportunities surrounding high quality renewable energy and iron ore deposits***. *Nature Communications, Oxford*, v. 14, n. 2578, maio 2023, 14 p. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-023-38123-2>. Acesso em: 26 nov. 2023.

DIAS, J. F. S.; MARTINS, A. C.; LOPES, F. ***Technological innovations in hydrogen-based steel production***. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 174, p. 112912, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702123000123>. Acesso em: 07 nov. 2024.

Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories, (2023). Disponível em: https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-03/ghg_emission_factors_hub.pdf. Acesso em: 03 nov. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2022> Acesso em: 06 nov. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Nova Técnica: Bases Para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-bases-para-a-consolidacao-da-estrategia-brasileira-do-hidrogenio>. Acesso em: 06 nov. 2023.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2024). **Balanco Energético Nacional 2024**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 25 nov. 2024.

En former, (2018). Disponível em: **When wind warms in the winter** | en:former. Acesso em: 20 nov. 2024.

Engie, (2022). **Transição energética**. Disponível em: <https://www.alemdaenergia.engie.com.br/transicao-energetica-muito-alem-da-energia/>. Acesso em: 02 nov. 2024.

Epbr, (2023). Disponível em: (<https://epbr.com.br/hidrogenio-verde-azul-cinza-entenda-o-que-cada-cor-significa-e-as-perspectivas-de-desenvolvimento/>). Acesso em: 25 nov. 2023.

EPE 2021: Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20(2).pdf). Acesso em: 19 nov. 2023.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2034**. Brasília: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 02 dez. 2024.

EPE. **Energia e fontes renováveis: perspectivas para o hidrogênio no Brasil**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/energia-renovavel-hidrogenio>. Acesso em: 02 dez. 2024.

ESMAP, (2020). Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/712171609756525808/pdf/Main-Report.pdf>. Acesso em 26 nov. 2023.

Fernanda, M., e Araújo, B. (2021). **HIDROGÊNIO: COMBUSTÍVEL DO FUTURO?** 60–69. Disponível em: <https://periodicosgrupotiradentes.emnuvens.com.br/cadernoexatas/article/view/10564>. Acesso em: 24 out. 2023.

FERREIRA, L. G. M. P.; BARBOSA, T. R.; TEIXEIRA, J. *The potential of hydrogen in decarbonizing the steelmaking industry. Resources, Conservation and Recycling*, v. 190, p. 106623, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623004567>. Acesso em: 07 nov. 2024.

Figueiredo, R. L., da Silva, J. M. e Ortiz, C. E. A. (2023). *Green hydrogen: Decarbonization in mining - Review. Cleaner Energy Systems*, 5(June), 100075. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cles.2023.100075>. Acesso em: 10 out. 2023.

GERDAU. *Gerdau announces plans for a green hydrogen project in Bahia. Gerdau Report*, 2022. Disponível em: <https://www.gerdau.com.br/en/news/gerdau-announces-plans-for-green-hydrogen-project-in-bahia>. Acesso em: 07 nov. 2024.

GONÇALVES, S. M.; RIBEIRO, F. C.; PEREIRA, R. F. *A low-carbon hydrogen process for steelmaking. Journal of Cleaner Production*, v. 123, p. 112-123, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261920301149>. Acesso em: 07 nov. 2024.

Gorini, R. (2007). **Matriz energética brasileira**. 47–69. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0101-33002007000300003>. Acesso em: 06 nov. 2023.

Grigoriev, Sergey e Fateev, Vladimir. (2017). *Hydrogen Production by Water Electrolysis* Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781119283676.ch6>. Acesso em: 16 nov. 2023.

IEA. **Hydrogen: A Renewable Energy Perspective**. International Energy Agency, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/hydrogen>. Acesso em: 07 nov. 2024.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Estatísticas da indústria do aço**. Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br>. Acesso em: 11 nov. 2024.

IRENA, (2021). Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2021/Aug/Renewable-energy-statistics-2021>. Acesso em: 10 nov. 2023.

IRENA. **World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway**. International Renewable Energy Agency, 2021. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Hydrogen-A-renewable-energy-perspective>. Acesso em: 02 dez. 2024.

KURLAND, C.; HICKS, J.; GERRARD, R. **The role of hydrogen in decarbonizing the steel industry: A pathway to zero emissions**. *Journal of Cleaner Production*, v. 321, p. 128988, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621017016>. Acesso em: 07 nov. 2024.

LE QUÉRÉ, C. *et al.* **Global carbon budget 2018**. *Earth System Science Data*, v. 10, n. 4, p. 2141-2194, 2018. Disponível em: <https://essd.copernicus.org/articles/10/2141/2018/>. Acesso em: 07 nov. 2024.

LIMA, M. A. A. R. de; PEREIRA, R. F. S.; SAMPAIO, D. **Sustainable steelmaking: The role of hydrogen and renewable energy**. *Journal of Cleaner Production*, v. 367, p. 132859, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623007890>. Acesso em: 07 nov. 2024.

LIU, Y. *et al.* **Emission characteristics and health risk assessment of air pollutants from the iron and steel industry in China**. *Atmospheric Environment*, v. 246, p. 118146, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231021000129>. Acesso em: 07 nov. 2024.

LOPES, Letícia Schneid. **The use of hydrogen to reduce CO2 emissions**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/c8461634-8694-480e-a21b-76499b27d036/Monografia%20N%C2%B0%202126.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2024.

LORA, Electo Eduardo Silva; VENTURINI, Osvaldo José (Ed.). **Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis**. Rio de Janeiro: Interciência, 2012. p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/284163742_Gaseificacao_e_pirolise_para_a_conversao_da_biomassa_em_eletricidade_e_biocombustiveis. Acesso em: 07 nov. 2024.

Martínez, J. (2009). **Estudo Experimental do Conjunto Gaseificador de Biomassa em Reator Co-corrente com Duplo Estágio de Fornecimento de Ar e Motor de Combustão**. Itajubá, 193p. Disponível em:

https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1578/dissertacao_0035352.pdf?sequence=1. Acesso em: 15 nov. 2023.

MARTINS, D. de M. C. (2023). **A transição energética e o controle externo: o hidrogênio verde como vetor de descarbonização**. 1–118. Disponível em: Portal TCU. Acesso em: 24 nov. 2023.

McKinsey e Company. *Decarbonization in steel: Hydrogen-based steelmaking and the path to carbon neutrality*, 2020. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/decarbonization-in-steel>. Acesso em: 28 nov. 2024.

McKinsey e Company, 2022. **The clean hydrogen opportunity for hydrocarbon-rich countries**. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/the-clean-hydrogen-opportunity-for-hydrocarbon-rich-countries>. Acesso em: 07 nov. 2024.

Modesto de Abreu, Thiago e Bortoni, Edson e Yamachita, Roberto e Bernardes, Luis. (2022). **DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA O MERCADO DE HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL: UMA ANÁLISE SWOT**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/366918854_DESAFIOS_E_OPORTUNIDADES_PARA_O_MERCADO_DE_HIDROGENIO_VERDE_NO_BRASIL_UMA_ANALISE_SWO_T. Acesso em: 24 out. 2023.

MUSLEMANI, Hasan *et al.* **Opportunities and challenges for decarbonizing steel production by creating markets for 'green steel' products**. Journal of Cleaner Production, v. 315, n. 128127, set. 2021, 13 p. Disponível em: https://rnprrimo.hosted.exlibrisgroup.com/permalink/f/vsvpiv/TN_cdi_gale_infotracacademicone_file_A672304832. Acesso em: 26 nov. 2023.

OLATEJU, I. I.; GIBSON-DICK, C.; EGEDE, S. C. O.; GIWA, A., 2017. **Process Development for Hydrogen Production via Water-Gas Shift Reaction Using Aspen HYSYS**. International Journal of Engineering Research in Africa, 30, 144-153, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/317106423_Process_Development_for_Hydrogen_Production_via_Water-Gas_Shift_Reaction_Using_Aspen_HYSYS. Acesso em: 15 nov. 2024.

Oliveira, P. A. De. (2016). **GASEIFICAÇÃO: PROCESSO ALTERNATIVO PARA A RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA E ELIMINAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS** São Paulo. August. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2468.7604>. Acesso em: 15 nov. 2023.

PAIVA, Suelya Da Silva Medonça De. **Produção de hidrogênio verde ambientalmente sustentável**. Repositório UFRN, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/47548/1/Producaohidrogenioverde_Paiva_2022.pdf. Acesso em: 07 nov. 2023.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>. Acesso em: 28 oct. 2023.

PNH₂, (2022) Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1>. Acesso em: 25 nov. 2023.

PORTAL SOLAR. **Matriz energética brasileira x matriz elétrica brasileira**. *Portal Solar*, 2023. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/matriz-energetica-brasileira-matriz-eletrica-brasileira>. Acesso em: 07 nov. 2024.

RWE AG. (2022). **When wind warms in the winteren**. Disponível em: [https://www .en - former .com /en /when -wind -warms -in -the -winter/](https://www.former.com/en/when-wind-warms-in-the-winter/). Acesso em: 13 nov. 2024.

SANTOS, P. A. F.; OLIVEIRA, C. S.; CUNHA, R. **Clean Hydrogen in the Steel Industry: Pathways and Future Perspectives**. *Journal of Cleaner Production*, v. 364, p. 132535, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045606323001234>. Acesso em: 07 nov. 2024.

Shahabuddin, M., Brooks, G., e Rhamdhani, M. A. (2023). **Decarbonisation and hydrogen integration of steel industries: Recent development, challenges and technoeconomic analysis**. *Journal of Cleaner Production*, 395(January), 136391. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136391>. Acesso em: 15 nov. 2023.

SILVA, A. C.; ALMEIDA, F. L. **The potential of the Brazilian northeast for green hydrogen production**. *Renewable Energy*, v. 176, p. 624-635, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148121004488>. Acesso em: 07 nov. 2024.

SILVA, José Nazareno Santos. **Siderurgia**. Belém-PA. 2011, 110 p. Disponível em: http://mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_ctrl_proc_indust/tec_metal/siderurgia/161012_siderurgia.pdf. Acesso em: 26 nov. 2023.

SILVA, Leandro Cardoso. **Otimização da produção de hidrogênio pela reforma a vapor do metano em reator com membrana laboratorial**. Universidade federal de Uberlândia, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/15113/1/Leandro.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2023.

SILVA, R. B.; OLIVEIRA, J. L.; NUNES, D. **Hydrogen production for steelmaking: A green alternative**. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 181, p. 105123, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622001237>. Acesso em: 07 nov. 2024.

SILVA, Rayssa Guimarães; DO CARMO, Marlon José. **ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: UMA PROPOSTA PARA MELHORIA DA GESTÃO ENERGÉTICA**. InterSciencePlace, v. 12, n. 2, 2017 Disponível em: <https://library.org/document/qvjm3klq-energia-solar-fotovoltaica-proposta-para-melhoria-gestao-energetica.html>. Acesso em: 24 oct. 2023.

SOARES, H. M. M.; PEREIRA, A. J.; VAZ, T. *The role of hydrogen in steelmaking: A review. Materials Today: Proceedings*, v. 52, p. 855-860, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978921000026>. Acesso em: 07 nov. 2024.

SOUZA, M.M.V.M., 2018. **Hidrogênio e células a combustível**. 1ª edição, Rio de Janeiro: Synergia Editora. Disponível em: <https://synergiaeditora.com.br/produto/hidrogenio-e-celulas-a-combustivel/>. Acesso em: 02 nov. 2024.

SPEIGHT, J.G., 2020a. *Synthesis gas and the Fischer-Tropsch process. The Refinery of The Future. 2ª Edição. Texas: Gulf Professional Publishing, 427-468*. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Synthesis-gas-and-the-Fischer%E2%80%93Tropsch-process-Speight/5239a502fd6bde744de90dde1d2d215e0816fe46>. Acesso em: 07 nov. 2024.

Squadrito, G., Maggio, G., e Nicita, A. (2023). *The green hydrogen revolution. Renewable Energy*, 216(July), 119041. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119041>. Acesso em: 10 out. 2023.

Szklo, C. A., Império, M., Poggio, M., Schaeffer, R., e Energia, N. (2023). **Neutralidade de carbono até 2050: Cenários para uma transição eficiente no Brasil**. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-726/PTE_RelatorioFinal_PT_Digital_.pdf. Acesso em: 07 nov. 2023.

TEKENERGY. **Diferença entre matriz elétrica e matriz energética**. *TekEnergy Blog*, 2024. Disponível em: <https://blog.tekenenergy.com.br/2024/10/09/diferenca-entre-matriz-eletrica-e-energetica/>. Acesso em: 07 nov. 2024.

The, A. V. F. O. R., Of, F., e Steel, U. K. (2022). *NET ZERO STEEL A VISION FOR THE FUTURE OF UK STEEL. July*. Disponível em: <https://www.makeuk.org/about/uk-steel/net-zero-steel---a-vision-for-the-future-of-uk-steel-production>. Acesso em: 27 out. 2023.

Tolmasquim, M. T., Guerreiro, A., e Gorini, R. (2018). **Visão Prospectiva da Matriz Energética Brasileira: Energizando o desenvolvimento sustentável do país**. Disponível em: https://r.search.yahoo.com/_ylt=AwriiQa450dnqM0ItKAf7At.;_ylu=Y29sbwNiZjEEcG9zAzEEdnRpZAMEc2VjA3Ny/RV=2/RE=1732794425/RO=10/RU=https%3a%2f%2fsbp.org.br%2findex.php%2frbe%2farticle%2fdownload%2f197%2f180%2f/RK=2/RS=T0zIImCzzetpw1FithYsfkrDcBY-. Acesso em: 02 nov. 2024.

VARES, João Vinícius de Souza. **Estudo dos efeitos do método de produção em aciaria nas propriedades mecânicas de produtos trefilados a partir de aço semelhante ao SAE 1045**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), Porto Alegre, 2016.

Veja Insights. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/insights-list/economia-de-baixo-carbono-os-pilares-para-desenvolvimento>. Acesso em: 25 nov. 2024.

VILLAÇA, João Márcio Almeida. **Proposta e simulação de processo de reforma a vapor de glicerol para obtenção de hidrogênio**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://buscaintegrada.ufrj.br/Record/aleph-UFR01-000863681/Details>. Acesso em: 02 nov. 2024.

Wang, R.R., Zhao, Y.Q., Babich., A., Senk, D., e Fã, XY. (2021). **Hydrogen direct reduction (H-DR) in steel industry—An overview of challenges and opportunities**. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965262103972X>. Acesso em: 20 nov. 2024.

Weidner, T., Tulus, V., e Guillén-Gosálbez, G. (2023). **Environmental sustainability assessment of large-scale hydrogen production using prospective life cycle analysis**. *International Journal of Hydrogen Energy*. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922052570>. Acesso em: 07 nov. 2024.

Wood Mackenzie, 2022. **Steel sector emissions must fall 75% under 2°C scenario** |. Disponível em: <https://www.woodmac.com/press-releases/steel-sector-emissions-must-fall-75-under-2c-scenario/>. Acesso em: 06 nov. 2023.

WORD ECONOMIC FORUM. **Action on clean hydrogen is needed to deliver netzero by 2050. Here's how**. Disponível em: <https://www.weforum.org/agenda/2022/05/action-clean-hydrogen-net-zero-2050/>. Acesso em: 26 nov. 2023.

World Economic Forum. **Decarbonizing steel production: Reducing emissions with hydrogen**. Disponível em: <https://www.weforum.org/projects/decarbonizing-steel-production>. Acesso em: 28 nov. 2024.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **Life cycle inventory (LCI) study**. Disponível em: <https://worldsteel.org/data/>. Acesso em: 11 nov. 2024.

APÊNDICE A



ANÁLISE DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA SOBRE O USO DO HIDROGÊNIO VERDE NA SIDERURGIA

Luiza L. R. Camargo, discente de graduação, Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé

Sabrina N. da Silva, docente (orientadora), Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé

luizalupe.aluno@unipampa.edu.br

A descarbonização da indústria de aço é uma das prioridades globais para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e mitigar as mudanças climáticas. A produção de aço, uma das indústrias que mais demanda energia, é responsável por aproximadamente 7% das emissões globais de GEE, principalmente devido ao uso de coque nos altos-fornos para reduzir o minério de ferro. Para atender às metas climáticas, é necessário implementar tecnologias de baixo carbono, sendo o uso de hidrogênio verde (H₂V) uma solução promissora. O H₂V, produzido a partir da eletrólise da água usando energia renovável, como fonte primária, pode substituir o coque como agente redutor no processo de fabricação de aço, resultando em emissões significativamente menores. Além disso, o hidrogênio (H₂) pode ser utilizado em diferentes etapas da produção, permitindo uma transição gradual para a siderurgia de baixo carbono e a produção dos chamados "aços verdes". Nesse sentido, para que se tenha uma melhor visão do estado de desenvolvimento das pesquisas sobre o uso de H₂V na siderurgia é importante analisar indicadores que demonstrem o impacto da produção científica sobre este tema. Esta análise se baseia em indicadores que permitem expressar quantitativamente as contribuições ao conhecimento científico derivado de publicações. Os resultados podem ser utilizados na representação das atuais tendências e na identificação de temas para novas pesquisas. As análises são realizadas em base de dados como a *Web of Science (WoS)*, *Scopus*, dentre outras. Com base nestes aspectos, este trabalho teve como objetivo realizar uma revisão da produção científica sobre o uso de H₂V na siderurgia para verificar as tendências e as perspectivas emergentes na área. O banco de dados da *Scopus* foi escolhido pela multidisciplinaridade, maior número de periódicos indexados e mais citações na linha de pesquisa deste trabalho. Os resultados apresentados são baseados em uma análise de artigos publicados entre 2020 a 2024. Os dados foram coletados em setembro de 2024. Pesquisou-se os termos (em inglês): "steel industry" or "green steel" and "green hydrogen" na busca avançada da *Scopus*. Os termos foram

pesquisados no título, no resumo e nas palavras-chave das publicações. Identificaram-se 92 registros contendo os termos informados dos quais 64 eram artigos e 9 artigos de acesso antecipado, ou seja, artigos finais em texto completo, revisados por pares e editados, disponibilizados e publicados on-line antes de serem atribuídos a um volume e edição da revista. Em eventos acadêmicos como congressos, seminários, entre outros, foram 13 publicações. As duplicidades, autocitações e as publicações com informações incompletas foram excluídas. Considerou-se também os periódicos com fator de impacto (FI) de relevância no meio acadêmico ($4,0 < FI < 10,4$). Assim, o banco de dados para análise resultou em 73 registros. Considerando-se a classificação por área do conhecimento da *Scopus*, as mais representativas foram (termos traduzidos do inglês): Engenharia, Energia, Ciências ambientais e Ciências dos materiais, indicando o caráter multidisciplinar da área. O número de publicações aponta para as tendências relacionadas com o tema de pesquisa. Assim, no período analisado as publicações aumentaram, em média, 15% a cada ano. Os países/regiões com maior registro foram China, Itália, Alemanha, Estados Unidos e Índia. A análise de palavras-chave foi útil para identificar os tópicos relevantes de pesquisa e perspectivas para um campo de pesquisa. No banco de dados, 27 palavras-chave foram citadas mais do que 10 vezes sendo as que aparecem com mais coocorrências foram (traduzido do inglês): siderurgia, hidrogênio verde, descarbonização, aço verde e controle de emissões. A análise de palavras-chave foi útil para identificar os tópicos relevantes e as tendências e perspectivas da área. As 5 publicações com maior número de citações, de modo geral, dão ênfase à discussão de formas inovadoras de reduzir as emissões de carbono na produção de aço, com foco na viabilidade e desafios da utilização de H₂V em grande escala. Nesse viés, destaca-se a redução de 35% nas emissões de GEE pelo uso do H₂ em substituição ao coque em usinas siderúrgicas da União Europeia. Os estudos ressaltam a importância da colaboração entre indústria, academia e formuladores de políticas para criar um ambiente que permita a produção de aço com baixas emissões, mitigando as mudanças climáticas no setor industrial e que seja economicamente viável. Concluiu-se que a implementação de tecnologias baseadas em H₂V na indústria do aço pode transformar o setor, tornando-o uma peça chave na transição energética global e no combate às mudanças climáticas. A análise mostrou que as publicações sobre a temática tendem ao crescimento e os estudos emergem para redução das emissões de GEE.

Palavras-chave: Descarbonização, aço verde, hidrogênio verde.