

O hidrogênio renovável como alternativa na descarbonização de processos industriais no setor siderúrgico: Uma análise em termos de eficiência energética, custo e emissões de gases de efeito estufa

ELERT, Daiane Bierhalz¹

elert.daiane@gmail.com¹

¹Univervisade Católica de Petrópolis, IPETEC, Petrópolis/RJ.

Informações do Artigo

Palavras-chave:

Hidrogênio

Eficiência energética

Descarbonização

Resumo:

O hidrogênio apresenta-se como uma das alternativas mais efetivas para a descarbonização industrial, incluindo processos conhecidos por serem altamente poluidores e eletrointensivos, a exemplo da indústria siderúrgica. Neste estudo analisou-se a utilização do hidrogênio como substituto de insumos energéticos na siderurgia, sob a ótica da eficiência energética, por meio de revisão bibliográfica de trabalhos e artigos científicos publicados nos últimos anos. Os resultados apontam que as alternativas mais sustentáveis e eficientes de produção do hidrogênio ainda são mais caras quando comparadas aos métodos atuais que utilizam combustível fóssil, de duas a três vezes maior, requerendo reduções significativas nos preços do eletrolisador e da eletricidade de origem renovável para se tornarem competitivas no mercado. No setor siderúrgico, vislumbra-se a adição de hidrogênio no gás redutor nos processos que utilizam altos-fornos (BF-BOF), mas ainda há limitações de caráter físico que impedem esta solução apresentar reduções significativas para o setor. A tecnologia de redução direta do ferro (DRI) naturalmente emite menos gases de efeito estufa, mas ainda é um processo mais custoso e possui pouca representatividade no setor. Em um processo de DRI baseado em gás, até 30% do gás natural pode ser diretamente substituído por hidrogênio sem alterar o processo. O processo DRI baseado em gás pode ser adaptado para operar com 100% de hidrogênio com pequenas modificações no equipamento. O H₂ azul é atualmente a melhor opção para substituir o gás natural na produção de DRI, sendo confiável, disponível tecnicamente e relativamente acessível na maioria dos mercados.

Abstract

Hydrogen emerges as one of the most effective alternatives for industrial decarbonization, including processes known to be highly polluting and energy-intensive, such as the steel industry. This study examines the use of hydrogen as a substitute for energy inputs in steelmaking, focusing on energy efficiency, through a review of literature and scientific articles published in recent years. The results indicate that the most sustainable and efficient alternatives for hydrogen production are still more expensive when compared to current methods using fossil fuels, typically two to three times higher, requiring significant reductions in the prices of electrolyzers and renewable electricity to become competitive in the

market. In the steel sector, the addition of hydrogen to the reducing gas in blast furnace-basic oxygen furnace (BF-BOF) processes is envisaged, but there are still physical limitations preventing this solution from providing significant reductions for the sector. Direct iron reduction (DRI) technology naturally emits fewer greenhouse gases, but it remains a more costly process with limited representation in the sector. In a gas-based DRI process, up to 30% of natural gas can be directly replaced by hydrogen without altering the process. The gas-based DRI process can be adapted to operate with 100% hydrogen with minor equipment modifications. Blue hydrogen is currently the best option to replace natural gas in DRI production, being reliable, technically available, and relatively accessible in most markets.

1. Introdução

Embora o potencial do hidrogênio (H_2) como vetor energético seja reconhecido há décadas, o desenvolvimento da economia do hidrogênio enfrentou diversos desafios simultâneos em todos os componentes de sua cadeia de valor, além da necessidade de políticas públicas estratégicas que fundamentassem seu desenvolvimento (BRANDON; KURBAN, 2017). No entanto, observa-se que, recentemente, o avanço nas ações e compromissos firmados pelos países no intuito de mitigar os agentes causadores das mudanças climáticas, bem como consolidar o desenvolvimento de uma economia mais sustentável, tem impulsionado às pesquisas e o fomento da utilização do H_2 , quando produzido a partir de fontes renováveis, como alternativa para a descarbonização de vários setores da economia.

Cabe ressaltar que a ampla utilização do hidrogênio obtido de fontes renováveis, chamado neste estudo de hidrogênio renovável, seja como substituto de combustíveis fósseis em processos industriais ou como fonte primária para geração de eletricidade ainda não é uma realidade. No entanto, considerando as recentes mudanças no cenário geopolítico em virtude da guerra entre Rússia e Ucrânia, o processo de introdução do hidrogênio renovável na matriz energética, principalmente na Europa, está

sendo acelerado no intuito de diminuir a dependência dos combustíveis fósseis, principalmente o gás natural, de origem russa (CASTRO et al. 2023).

Com a introdução de uma nova alternativa energética na matriz, uma série de questionamentos surgem em virtude da complexidade e desconhecimento sobre os possíveis impactos desta mudança e sua real contribuição em comparação às alternativas utilizadas nos processos existentes. Neste contexto, existe uma infinidade de aspectos que podem ser analisados para tal avaliação comparativa nos quais figuram, por exemplo, custo, eficiência e emissão de carbono.

A produção de commodities como o aço, cimento, vidro, alumínio, produtos químicos, plásticos, metais não ferrosos, papel e celulose, entre outras requerem o uso intensivo de energia e são responsáveis por 1/3 das emissões globais anuais de gases de efeito estufa (BATAILLE et al. 2018). No entanto, a descarbonização industrial ainda é considerada um imenso desafio dado a relativa falta de alternativas para redução das emissões, atualmente disponíveis, para setores "difíceis de descarbonizar", como siderurgia, cimento e produtos químicos. Neste contexto, o hidrogênio oferece uma possível solução para esse problema, pois é um combustível abundante e denso em energia, capaz de atender às necessidades

energéticas da indústria, assim como fornecer armazenamento de energia de longa duração” (GRIFFITHS et al. 2021).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho consiste na análise da viabilidade, eficiência energética e sustentabilidade da utilização do hidrogênio renovável no setor siderúrgico por meio de revisão bibliográfica de estudos contendo dados experimentais e teóricos referentes ao tema. O estudo justifica-se pela importância da compreensão do papel deste vetor energético na descarbonização da indústria em questão e pela necessidade de comparação entre os processos atuais e os propostos em um cenário de utilização sustentável dos recursos energéticos.

De posse desses dados, objetiva-se apresentar uma análise comparativa com foco na identificação dos processos cuja utilização do hidrogênio renovável se apresenta como uma solução viável para descarbonização do setor.

2. Referencial Teórico

De forma a apresentar os conceitos envolvidos na utilização do hidrogênio renovável como alternativa para a descarbonização da indústria, serão abordados os seguintes temas como referencial teórico deste trabalho, a serem dispostos nas seções subsequentes:

- O hidrogênio e sua cadeia de valor;
- Métodos de produção de hidrogênio;
- Utilização do hidrogênio na indústria siderúrgica.

2.1 O Hidrogênio e sua cadeia de valor

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante do universo, compreendendo aproximadamente 89% de todos os átomos. Na Terra, é encontrado principalmente na água e nos combustíveis fósseis, como o gás natural, o carvão mineral e o petróleo (ATKINS et al., 2018). Considerando que o poder calorífico representa a medida da energia liberada durante sua oxidação, ou combustão, indicando que quanto maior o poder calorífico, mais energia é gerada

durante esse processo, o hidrogênio merece posição de destaque. Segundo SANTOS (2005), o poder calorífico do hidrogênio é um dos mais altos (141,86 KJ/g) quando comparado a outros combustíveis como o metano (55,53 KJ/g), gasolina (47,5 KJ/g) e metanol (19,96 KJ/g), na condição de temperaturas superiores à 25°C e 1 atm.

A cadeia de valor para um vetor energético, como o hidrogênio, refere-se ao conjunto de atividades relacionadas à produção, distribuição e consumo desse recurso. Isso inclui desde a extração ou geração do hidrogênio até sua utilização final como fonte de energia, passando pelo armazenamento, transporte e comercialização. A cadeia de valor do hidrogênio abrange todas as etapas envolvidas, desde a produção, até a aplicação final em diversos setores, como transporte, indústria e residências, conforme apresentado no Anexo A.

2.2 Métodos de produção de hidrogênio

Os processos de produção de hidrogênio se dividem basicamente em eletrolíticos, fotolíticos e termoquímicos. Na eletrólise, a água é decomposta em hidrogênio e oxigênio usando energia elétrica ou térmica. Os processos fotolíticos usam a energia da luz, enquanto os termoquímicos transformam matérias-primas em hidrogênio através de reações químicas, como gaseificação de biomassa e reforma a vapor (BRAGA, 2014). O Anexo B representa essas principais rotas de produção.

Em virtude dessas diferentes rotas, foram estipuladas diferentes classificações para o hidrogênio seguindo uma escala de cores e, apesar de não haver uma homogeneidade na literatura, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) adotou as seguintes diretrizes para o contexto brasileiro, conforme Anexo C.

Especificamente para o caso da eletrólise, outro ponto importante a considerar refere-se a fonte de energia elétrica para o processo de decomposição da molécula da água (H_2O) em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2). Neste contexto, foram levantadas algumas opções:

energia eólica, energia fotovoltaica e energia hidrelétrica (aproveitando a água vertida turbinável) (BRAGA,2014).

2.3 Utilização do hidrogênio na indústria siderúrgica

No setor industrial, atualmente o hidrogênio é principalmente utilizado na indústria química e petroquímica, destacando-se nas refinarias pela substituição do carbono na produção de amônia e metanol. Além disso, é mencionado seu potencial nas indústrias de ferro e aço, onde pode contribuir para a neutralização do carbono durante o processo de redução do minério de ferro (CASTRO et al, 2023).

Segundo dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2023), a evolução do uso de hidrogênio nessas aplicações será determinada pela dinâmica de mercado nesses setores. Ainda segundo publicação do IEA (2023), em 2022, dos 53 Mt de hidrogênio utilizado na indústria, 60% foram para amônia, 30% para metanol e 10% para o processo de redução direta na indústria siderúrgica.

Atualmente, o hidrogênio é majoritariamente produzido a partir de combustíveis fósseis sem redução de emissões. Embora a captura de carbono seja prática comum em alguns setores, a maior parte do CO₂ capturado é liberada, resultando em 680 Mt de emissões de CO₂ provenientes da produção industrial de hidrogênio em 2022, um aumento de 2% em relação a 2021.

O potencial técnico e econômico do hidrogênio na indústria varia conforme o segmento. Refino e fertilizantes são grandes consumidores, enquanto indústrias que queimam gás natural e carvão, como siderurgia, metalurgia e cerâmica, têm potencial significativo para adoção de hidrogênio sustentável (CNI, 2022).

Voltando a atenção para o setor siderúrgico, Fan e Friedmann (2021) apontam três processos de produção dominantes neste setor, os quais contribuíram para 99,6% da produção de aço mundial: o alto-forno - forno básico de oxigênio (BF-BOF), que envolve a

redução do minério de ferro a ferro-gusa; o forno elétrico a arco (EAF) que utiliza arco elétrico para aquecer materiais como ferro-gusa e sucata de aço, sendo a eletricidade sua única fonte de energia, sendo predominante na reciclagem de aço; produção de ferro diretamente reduzido (DRI) reduz o minério de ferro no estado sólido, utilizando gases redutores como gás natural ou carvão. O carbono é o principal combustível e agente redutor empregado nas indústrias siderúrgicas. Aproximadamente 95% do aço mundial é produzido pela redução de minérios de ferro em alto-forno, enquanto cerca de 5% são obtidos por meio de redução direta e forno elétrico a arco (GONORING et al. 2014).

Na siderurgia, a etapa de redução do minério de ferro é responsável pela maioria das emissões de CO₂, com o alto-forno, a coqueria e a planta de sinterização representando cerca de 70% dessas emissões. Essas etapas também são onde há maior consumo de combustíveis fósseis. Reduzir essa dependência é crucial para mitigar as emissões de CO₂ na produção de aço (FERREIRA, 2019).

O potencial para minimizar ainda mais as emissões de CO₂ com atualizações de equipamentos e otimização de operações é limitado. Neste sentido, a busca por uma fonte de calor baixo carbono e o redutor de baixo carbono para BF especificamente, como H₂ e biomassa, representam alternativas para descarbonizar esses processos. Como a oportunidade de eletrificação mais importante na indústria siderúrgica, a produção de EAF é intrinsecamente de baixo carbono em comparação com a rota integrada BF-BOF e é mais fácil de ser modificada. Estudos demonstram que a pegada de carbono por tonelada de aço EAF pode ser tão baixa quanto 0,23 a 0,46 toneladas de CO₂, dependendo do tipo de ferro (ferro-gusa ou sucata), fontes de eletricidade e eficiências. Isso corresponderia apenas a 10% a 20% das operações convencionais de BF-BOF. Uma instalação típica de EAF tem capacidade de

produção de aço de cerca de 1 Mt, em comparação com uma instalação típica de 3 Mt ou grande capacidade de uma usina integrada BF-BOF, exigindo menos capital inicial para investir em modificações. (FAN & FRIEDMANN, 2021).

O gás redutor usado na produção de DRI é o syngas, derivado da gaseificação do carvão ou da SMR. Aumentar a fração de H_2 no gás redutor é mais simples para a produção de DRI do que substituir o carvão pulverizado por H_2 em um BF. Em um processo de DRI baseado em gás, até 30% do gás natural pode ser diretamente substituído por hidrogênio sem alterar o processo. O processo DRI baseado em gás pode ser adaptado para operar com 100% de hidrogênio com pequenas modificações no equipamento, e essa abordagem tem sido explorada (FAN & FRIEDMANN, 2021).

3. Metodologia da Pesquisa

Este capítulo descreve em detalhe a metodologia adotada para abordar as questões da pesquisa por meio de revisão bibliográfica de estudos existentes sobre a temática objetivo do artigo. Esse detalhamento das ações aplicadas no processo de pesquisa visa facilitar o entendimento e a utilização dos resultados pelos leitores interessados. Em resumo, a metodologia consistiu em três fases: Planejamento, Execução e Análise. A Figura 1 abaixo apresenta a estruturação da pesquisa realizada no âmbito deste estudo:

Figura 1 – Resumo da metodologia de pesquisa



Fonte: Elaboração própria

4. Resultados e Discussões

No intuito de analisar as potencialidades do hidrogênio renovável como fonte alternativa para descarbonização da indústria,

como foco na siderurgia, foram coletados dados de eficiência, custo e emissões de GEE tanto nos processos de produção quanto de utilização do hidrogênio e comparados com as metodologias mais empregadas nos processos existentes. Considerando que as condições associadas à etapa de armazenamento e transporte do hidrogênio não diferem em virtude da fonte de obtenção deste, não foram considerados dados relativos à essa etapa da cadeia de valor do hidrogênio.

4.1 Análise da etapa de produção do hidrogênio

Considerando o aspecto de eficiência no processo, para diferentes tecnologias de produção do hidrogênio, segundo comparativo apresentado por Castro et al.(2023), a eletrólise da água utilizando eletrolisadores com a tecnologia de membranas cerâmicas ou óxidos sólidos (SOEC), seguido da reforma a vapor, apresentam os melhores resultados, faixas de 75-90% e 74-85%, respectivamente.

Tal resultado obtido para a tecnologia de reforma a vapor é corroborado pelas eficiências apresentadas no estudo de BRAGA (2014), indicado valores de 72% para reforma a vapor do gás natural, 73% para o etanol e 68% para o biogás. De forma similar, o mesmo estudo aponta uma eficiência de 84,4% para o processo de eletrólise, o qual se enquadra na faixa apresentada por Castro et al (2023).

Ainda no estudo apresentando por BRAGA (2014), mais especificamente para o processo da eletrólise, é abordada a questão da eficiência energética considerando não somente a tecnologia empregada como método de obtenção do hidrogênio, mas também a eficiência de obtenção da energia elétrica para o processo. Neste sentido, verificou-se que o processo de eletrólise que utiliza eletricidade proveniente de usinas hidrelétricas apresenta o melhor desempenho, 80% de eficiência. No entanto, os processos que utilizam energia eólica e fotovoltaica, são os mais prejudicados em virtude da baixa eficiência de conversão de energia em

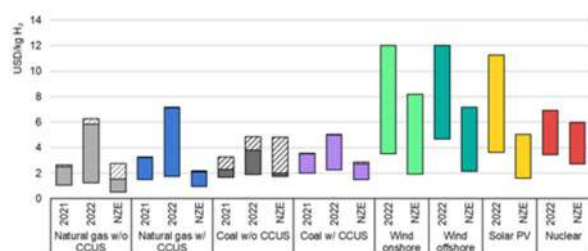
eletricidade, resultando em 29,5% e 11,8% de eficiência energética, respectivamente.

Em relação aos custos associados à produção do hidrogênio, este pode variar com a tecnologia e a região. Os parâmetros de análise encontrados nos estudos indicam a possibilidade de apresentação dos custos como uma função do montante produzido de H_2 ou ao consumo de eletricidade necessário para sua produção.

Segundo BRAGA (2014), os processos que utilizam a reforma a vapor ainda se mostram mais atraentes do ponto de vista econômico (0,34 a 0,56 US\$/kWh), com especial atenção para o etanol (0,34 US\$/kWh). A título de exemplo, os custos calculados para produção do hidrogênio por eletrólise com energia proveniente de geração eólica, fotovoltaica e hidrelétrica foram, respectivamente, 0,97; 1,07 e 0,90 US\$/kWh. Cabe salientar que nesta análise de BRAGA (2014) foram considerados fatores como custo de investimento, operação e manutenção do sistema, o qual é a base para o cálculo do custo nivelado do hidrogênio (LCOH). Não foram considerados custos associados à armazenagem e transporte do H_2 .

Considerando o custo em termos de montante de H_2 produzido (US\$/kg H_2), em uma análise disponibilizada pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2023) foram apresentados os valores típicos do custo nivelado do hidrogênio, bem como foram apontadas projeções para o cenário de emissões líquidas zero em 2050.

Figura 2 – Custo nivelado do hidrogênio, por rota de produção



Fonte: IEA, 2023.

Nesta análise percebe-se que o custo de produção do hidrogênio proveniente de fontes

renováveis ainda é significativamente mais alto que de fontes de combustíveis fósseis, variando de 3,4 a 12 US\$/kg H_2 .

Considerando as emissões de gases de efeito estufa, BRAGA (2014) aponta o montante de emissões para os processos de eletrólise com fontes renováveis é significativamente baixo, na ordem de: 0,6 – 2,05 – 0,34 kgCO₂(eq)/kg H_2 (eólica – fotovoltaica – hidrelétrica). Em relação aos processos de reforma a vapor do etanol, SILVA (2010) indica emissões da ordem de 0,18 kgCO₂(eq)/kg H_2 , considerando o ciclo do CO₂ desde o plantio da cana-de-açúcar até a produção do etanol reformado para produção do H_2 .

4.2 Análise da etapa de utilização do hidrogênio

Considerando a utilização do hidrogênio, nossa análise está concentrada na indústria siderúrgica no intuito de identificar quais são os impactos em termos de eficiência dos processos, custos e emissões de GEE.

Neste sentido, não foram encontrados estudos comparativos amplos que demonstrem os ganhos/perdas em termos de eficiência nos processos oriundos de uma maior participação do H_2 ou substituição de insumos atualmente utilizados na indústria por este. As informações coletadas concentram-se em apontar qualitativamente possibilidades de atuação em partes do processo de produção do aço e novas tecnologias desenvolvidas que diminuem o impacto em termos de emissões da indústria e custos associados.

BRITO & NEVES indicam que para o processo alto-forno - forno básico de oxigênio (BF-BOF), o redutor utilizado no alto-forno representa o maior custo no processo produtivo e uma área que concentra os esforços da inovação. Segundo a ArcelorMittal Monlevade, o redutor coque corresponde a mais de 55% do custo de produção. A injeção de Carvão Pulverizado, substituindo parte do coque, reduz custos e aumenta a produtividade. O hidrogênio é um

reductor mais eficiente que o monóxido de carbono, resultando em economia energética devido à redução da quantidade de reação direta, que consome considerável energia. Yilmaz et al. mostram que o uso de H_2 como gás reductor auxiliar para BF para substituir parcialmente o CO derivado do carvão ou do coque pode reduzir a emissão de CO_2 em 21,4%.

Fan & Friedmann (2021) indicaram que injeção de H_2 puro no alto-forno através de tuyeres na base do BF substitui 120 kg/t de carvão pulverizado por 27,5 kg/t de H_2 aquecido. Simulações indicam que o estado energético não muda muito quando apenas o gás reductor auxiliar é substituído por H_2 em comparação com o caso de referência com carvão pulverizado, sugerindo menor necessidade de modernização do BF e aplicação universal. Os BFs existentes têm limitações operacionais e de projeto que restringem a substituição e a operação total com H_2 , com uma concentração de 5% a 10% de H_2 na injeção de gás, considerando todas as limitações.

Conforme apontado por RODRIGUES et al., no processo de redução direta (DRI), a ausência de CO_2 na etapa de redução do minério de ferro faz deste processo uma opção promissora para o desenvolvimento de tecnologias que abordem os problemas associados à emissão de gases de efeito estufa na indústria siderúrgica. No experimento foi utilizada uma mistura contendo 10% de hidrogênio e 90% de argônio como fonte redutora e constatado que à medida que o fluxo total de gás reductor aumenta, a taxa de redução também aumenta, o que torna o processo mais eficiente. A redução do minério de ferro com hidrogênio emerge como uma alternativa para mitigar as emissões de gases do efeito estufa, já que apenas água é produzida como produto da reação. Fan & Friedmann (2021) reforçam nos resultados de seu estudo que aumentar a fração de H_2 no gás reductor é mais simples do que substituir o carvão por H_2 em um alto-forno. No processo de produção de DRI com base em gás, até 30% do gás natural pode ser

diretamente substituído por hidrogênio, com ajustes mínimos no equipamento para operar com 100% de hidrogênio.

Em termos de competitividade, Fan & Friedmann (2021) indicam que a substituição do H_2 de fontes fósseis pelo H_2 verde seria competitiva em custo atualmente se o preço de carbono fosse da ordem US\$ 300 por tonelada de CO_2 , enquanto o H_2 azul é competitivo com um preço de carbono de US\$ 120 por tonelada de CO_2 . Isso indica que o uso de hidrogênio pode ser uma estratégia eficaz para descarbonizar o BF-BOF, mas requereria uma produção global significativa de hidrogênio se fosse implementado em grande escala.

Além disso, as simulações apontaram que substituir o gás natural por H_2 na produção de DRI reduzirá consideravelmente as emissões de CO_2 , embora com custos mais elevados. Há uma diferença de cerca de US\$ 100 por tonelada de DRI entre o H_2 azul e o H_2 verde no custo de produção, mas uma diferença de US\$ 1.000 por tonelada de CO_2 no custo marginal de redução de emissões. O H_2 azul é atualmente a melhor opção para substituir o gás natural na produção de DRI, sendo confiável, disponível tecnicamente e relativamente acessível na maioria dos mercados.

5. Considerações finais

A busca por soluções de descarbonização na indústria siderúrgica tem destacado o potencial do hidrogênio verde e azul como fontes de energia e agentes redutores praticamente neutros em carbono. Com a maioria da produção de aço proveniente de operações BF-BOF e instalações de longa vida útil, a injeção de hidrogênio emerge como uma solução tecnicamente aceitável para a descarbonização de retrofit. No entanto, duas limitações importantes permanecem evidentes: primeiro, a capacidade de descarbonização da injeção de hidrogênio BF-BOF atinge aproximadamente 20%, abaixo do ideal de "descarbonização profunda". Em segundo lugar, o custo do H_2 verde permanece elevado e pouco competitivo em muitos mercados, destacando

a necessidade de reduções significativas nos preços do eletrolisador e da eletricidade zero-carbono para viabilizar economicamente a produção do aço.

Entre as opções mais promissoras para descarbonizar a produção de aço, destacam-se o H₂, biomassa, eletricidade renovável e retrofit de CCS. Contudo, a dificuldade e os altos custos associados à descarbonização da produção BF-BOF sugerem que as emissões desse setor podem persistir por décadas sem tentativas significativas de mitigação. Alternativas maduras, como a fabricação de aço com base em EAF e DRI, apresentam naturalmente menor intensidade de carbono.

Os custos adicionais estimados por tonelada de produção de metal quente refletem o desafio econômico da adoção de tecnologias de descarbonização, com biomassa e hidrogênio figurando como opções mais dispendiosas, apesar de seu valor para a descarbonização profunda. Enquanto isso, CCS e eletricidade renovável surgem como alternativas mais viáveis em termos de custo, embora com um potencial de descarbonização total mais modesto.

Enquanto o hidrogênio verde permanece extremamente caro na maioria dos mercados, o hidrogênio azul emerge como uma alternativa a ser seriamente considerada em uma escala mais ampla. A taxa de redução associada ao aumento do fluxo total de gás redutor e a redução de minério de ferro com hidrogênio destacam-se como estratégias promissoras para minimizar as emissões de gases do efeito estufa, com a produção de H₂O como subproduto da reação. Em suma, embora os desafios econômicos e técnicos permaneçam, as soluções baseadas em hidrogênio oferecem um caminho realista em direção à descarbonização na indústria siderúrgica.

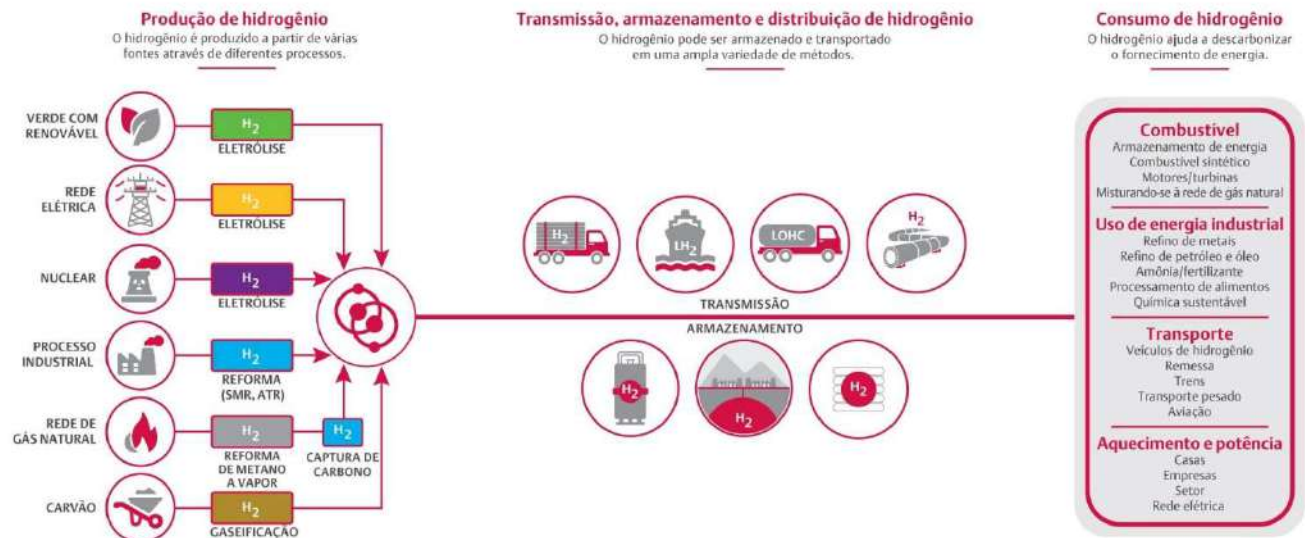
6. Referências

- ATKINS, P.; JONES, L.; LAVERMAN, L., Princípios de Química. [S.l.]: Bookman, 2018.
- BATAILLE, Chris; AHMAN, Max; NEUHOFF, Karsten; NILSSON, Lars J.; FISCHEDICK, Manfred; LECHTENBÖHMER, Stefan; SOLANO-RODRIGUEZ, Baltazar; DENIS-RYAN, Amandine; STIEBERT, Seton; WAISMAN, Henri; SARTOR, Oliver; RAHBAR, Shahrzad. A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement. *Journal of Cleaner Production*, n.187, p. 960-973, 2018.
- BMW. Energy Partnerships and Energy Dialogues. 2019 Annual Report. Berlin: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2020.
- BRAGA, L., Aspectos técnicos econômicos e ecológicos de processos de produção de hidrogênio. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Guaratinguetá. 2014
- BRANDON, N.P.; KURBAN, Z. Clean energy and the hydrogen economy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v 375, n. 2098, 20160400, 2017.
- BRITO, H.L., NEVES, J.T.R. Impactos da Inovação na empresa siderúrgica AcellorMittal Monlevade: Estudo de caso. XVI Seminários em Administração (SEMEAD). 2013;
- CASTRO, N.; BRAGA, S.L.; PRADELLE, F.; CHAVES, A.C.; CHANTRE, C.. A economia do hidrogênio: Transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil. E-papers, 2023.
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). Hidrogênio Energético no Brasil: Subsídios para políticas de competitividade: 2015-2025. CGEE. 2015.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). Hidrogênio Sustentável: perspectivas e potencial para a indústria brasileira. CNI. Brasília. 2022.

- EMERSON. Levando o hidrogênio da tabela periódica para o mercado. Disponível em: <https://www.emerson.com/pt-br/expertise/automation/roadmap-to-industrial-sustainability/taking-hydrogen-from-the-periodic-table-to-the-market>. Acesso em: 25 fev 2024.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio: revisão 1. 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20%282%29.pdf. Acesso em: 25 fev. 2024.
- FAN, Z.; FRIEDMANN, S.J.. Low-Carbon Production of iron and steel: technology options, economic assessment, and policy. *Joule* 5, 829-862, 2021.
- FERREIRA, S.L., Produção de gás redutor através da gaseificação do biochar produzido a partir da conversão termoquímica de biomassa para fins siderúrgicos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (URGS). 2021
- GONORING, T.B.; JÚNIOR, A.R.F.; VIEIRA, E.A.; NASCIMENTO, R.C. Comparação da redução da hematita(Fe_2O_3) de alta pureza por gás de hidrogênio e por plasma frio de hidrogênio. 440 Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias Primas. 2014.
- GRIFFITHS, Steve; SOVACOO, Benjamin K.; KIM, Jinsoo; BAZILIAN, Morgan; URATANI, Joao M., Industrial decarbonization via hydrogen: A critical and systematic review of developments, socio-technical systems and policy Options. *Energy Research & Social Science*, n. 80, 2021.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Carbon Capture, Utilisation and Storage. 2023. IEA. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage#how-does-ccus-work>. Acesso em: 05 dez. 2023.
- LIMA, A.C.O., Hidrogênio Verde: Principais perspectivas do cenário energético no nordeste brasileiro. Universidade Federal do Ceará. 2023
- PARRA, D.; VALVERDE, L.; PINO, F.J.; PATEL, M. K. A review on the role, cost and value of hydrogen energy systems for deep decarbonization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 101, p. 279-297, 2019.
- RODRIGUES, G. F.; JUNCA, E.; TELLES, V.B.; ESPINISA, D.C.R., Redução das emissões de gases de efeito estufa através do uso de hidrogênio na siderurgia. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 21, 2011.
- SANTOS, V; OHARA, A. Desafios e Oportunidades para o Brasil com o Hidrogênio Verde. 2021. Disponível em: <https://br.boell.org/pt-br/2021/05/21/desafios-e-oportunidades-para-o-brasil-com-o-hidrogenio-verde>. Acesso em: 25 fev. 2024.
- SANTOS, F. M.; SANTOS, F. A. O combustível “hidrogênio”. 2005. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/3032/303226515014.pdf>.
- SAZALI, N. Emerging Technologies by hydrogen: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 38, 18753-18771, 2020.
- SILVA, M.E., Análise experimental da reforma a vapor de etanol: aspectos técnicos, econômicos e ecológicos. Universidade Estadual Paulista (UNESP).Guaratinguetá. 2010.

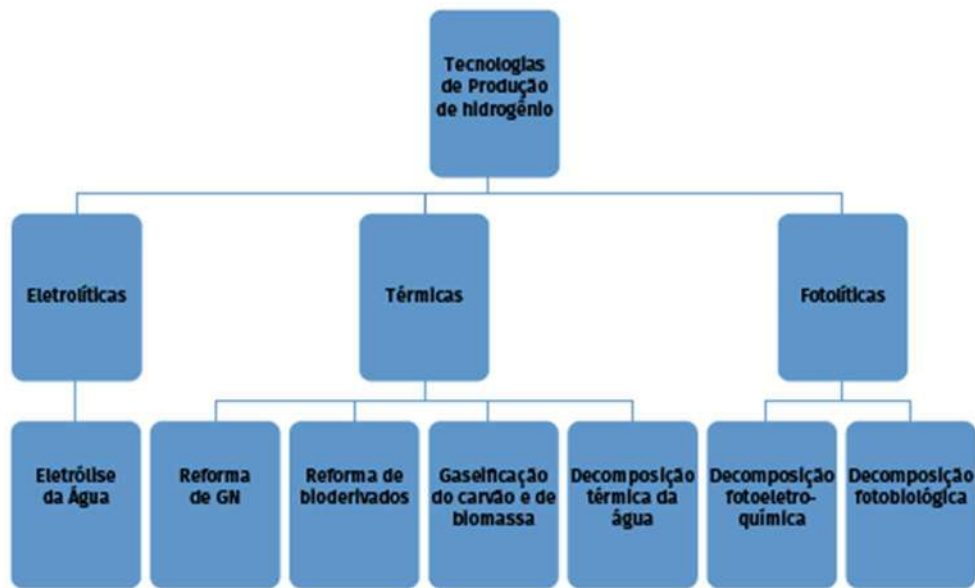
7. Anexos

ANEXO A – Cadeia de Valor do Hidrogênio












Fonte: EMERSON (2023)

ANEXO B – Tecnologias e rotas de produção de hidrogênio



Fonte: CASTRO (2023)

ANEXO C – Classificação do hidrogênio por fonte e/ou rota de produção

Cor	Classificação	Descrição
	Hidrogênio preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem CCUS
	Hidrogênio marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS
	Hidrogênio cinza	Produzido por reforma a vapor do gás natural, sem CCUS
	Hidrogênio azul	Produzido por reforma a vapor do gás natural (eventualmente, também de outros combustíveis fósseis), com CCUS
	Hidrogênio verde	Produzido via eletrólise da água com energia de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar)
	Hidrogênio branco	Produzido por extração de hidrogênio natural ou geológico
	Hidrogênio turquesa	Produzido por pirólise do metano, sem gerar CO ₂
	Hidrogênio musgo	Produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa, com ou sem CCUS
	Hidrogênio rosa	Produzido com fonte de energia nuclear

Fonte: EPE (2021)