

# ENSAIO SOBRE ADOÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDA NA INDÚSTRIA BRASILEIRA: PROPOSTA DE UM ÍNDICE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

## 1. INTRODUÇÃO

A mudança climática é um dos maiores desafios do nosso tempo, impulsionando a necessidade urgente de transição para uma economia de baixo carbono (IPCC, 2021). A indústria é um dos setores que mais consomem energia e, como consequência, um dos maiores responsáveis pelas emissões globais de gases de efeito estufa (Ademollo et al., 2024). Setores como siderurgia, cimento, química, cerâmica e outros intensivos em energia, são particularmente críticos nessa transição, devido à alta demanda por energia térmica gerada pela queima de combustíveis fósseis, como o coque de petróleo e o carvão mineral, que contribuem significativamente para a pegada de carbono industrial (Martínez-Huitl et al., 2024). Globalmente, o uso de combustíveis fósseis é responsável por mais de 75% das emissões de CO<sub>2</sub> na indústria, reforçando a necessidade de alternativas limpas e sustentáveis, como o hidrogênio verde (H<sub>2</sub>V) (IRENA, 2021).

No contexto brasileiro, essa questão é ainda mais desafiadora, pois a indústria de transformação desempenha um papel central na economia do país. Historicamente, o Brasil tem sido dependente de fontes de energia de alta emissão, especialmente o coque de petróleo, que representa uma parte significativa da matriz térmica nas indústrias intensivas em energia. Agora, o país enfrenta uma pressão crescente para adotar práticas mais sustentáveis, alinhadas aos compromissos assumidos no Acordo de Paris e às metas nacionais de redução de emissões (Abdin et al., 2020). Atualmente, cerca de 70% da matriz energética industrial brasileira ainda depende de fontes fósseis, destacando a necessidade urgente de transição para energias mais limpas (IRENA, 2022).

Nesse cenário, o hidrogênio verde surge como uma solução promissora. Produzido através da eletrólise da água, usando eletricidade proveniente de fontes renováveis como a energia solar e eólica, o H<sub>2</sub>V apresenta uma oportunidade única para descarbonizar indústrias de alta emissão. No setor industrial, o H<sub>2</sub>V pode substituir combustíveis fósseis em fornos e caldeiras, proporcionando uma fonte de energia térmica sem emissões de CO<sub>2</sub>. Estudos indicam que a substituição de combustíveis fósseis por H<sub>2</sub>V pode reduzir significativamente as emissões de CO<sub>2</sub>, dependendo da proporção de substituição e da eficiência dos processos industriais envolvidos (Araújo et al., 2024).

O Brasil possui um grande potencial para a produção de energia renovável, especialmente hidrelétrica, solar e eólica, o que o coloca em uma posição estratégica para liderar a transição para uma economia baseada no H<sub>2</sub>V. A adoção dessa tecnologia não apenas contribuiria para a redução das emissões de carbono, mas também poderia aumentar a competitividade da indústria brasileira no cenário internacional, onde a demanda por produtos sustentáveis está em constante crescimento (Chantre et al., 2024; Ganiyu & Martínez-Huitl, 2023). O H<sub>2</sub>V também representa uma oportunidade para o Brasil se destacar como líder global na exportação de produtos industriais de baixo carbono (IRENA, 2021).

Entretanto, a transição para o uso de H<sub>2</sub>V na indústria enfrenta desafios significativos. Os altos custos de produção do hidrogênio verde, a necessidade de desenvolver infraestruturas específicas para armazenamento e transporte de hidrogênio, e as adaptações tecnológicas necessárias para que as indústrias utilizem essa nova fonte de energia são barreiras importantes (de Araújo et al., 2024). Além disso, a ausência de políticas públicas robustas e de incentivos governamentais adequados pode atrasar a adoção do H<sub>2</sub>V, especialmente em setores tradicionais que tendem a resistir a mudanças significativas (Oliveira et al., 2021).

Portanto, embora os desafios sejam consideráveis, as oportunidades oferecidas pelo hidrogênio verde para a descarbonização industrial são promissoras. Este artigo explora esses fatores, analisando os principais direcionadores e desafios para a viabilidade do H<sub>2</sub>V na

indústria brasileira e global. O artigo examina a viabilidade econômica do hidrogênio verde (H2V) na indústria, focando em como fatores como tecnologias, o aumento dos preços dos combustíveis fósseis e o mercado de créditos de carbono influenciam sua adoção. A pesquisa destaca como a queda nos custos de eletricidade renovável e os avanços tecnológicos tornam o H2V competitivo em setores de alta intensidade energética (Oliveira et al., 2021). O artigo também propõe um modelo teórico que quantifica essa viabilidade, integrando custos de produção e tecnologias de adaptação industrial (IRENA, 2021).

## **2. FUNDAMENTAÇÃO E DISCUSSÃO**

### **2.1. Viabilidade Econômica do Hidrogênio Verde**

O hidrogênio verde (H2V) é produzido por meio da eletrólise da água, um processo no qual a eletricidade de fontes renováveis, como solar e eólica, é utilizada para dividir as moléculas de água ( $H_2O$ ) em oxigênio ( $O_2$ ) e hidrogênio ( $H_2$ ). Este processo não gera emissões de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), tornando o H2V uma fonte de energia limpa e sustentável. Diferente do hidrogênio cinza, que é obtido a partir de combustíveis fósseis e resulta na emissão de grandes quantidades de  $CO_2$ , o H2V surge como uma alternativa central na descarbonização de setores industriais que demandam grandes quantidades de energia térmica (IRENA, 2021).

O H2V tem o potencial de ser utilizado em uma ampla variedade de setores industriais, principalmente naqueles que dependem de processos que requerem calor de alta intensidade, como a siderurgia, a produção de cerâmica e o setor químico. Nessas indústrias, o H2V pode substituir combustíveis fósseis tradicionais, como o carvão e o gás natural, proporcionando uma fonte de energia térmica que não gera emissões diretas de  $CO_2$  (Martínez-Huitle et al., 2024).

A adoção do H2V em setores industriais intensivos em energia também poderia contribuir significativamente para a redução das emissões globais de carbono, que é uma das exigências do Acordo de Paris. Com o avanço das políticas de regulamentação ambiental e o crescimento do mercado de créditos de carbono, a utilização do H2V pode se tornar cada vez mais atraente para os grandes consumidores de energia (IRENA, 2021).

A viabilidade do H2V está diretamente relacionada ao custo de produção, que depende fortemente do custo da eletricidade renovável utilizada no processo de eletrólise. Estudos sugerem que à medida que os preços da energia renovável continuam a cair e as tecnologias de eletrólise se tornam mais eficientes, o custo de produção do hidrogênio verde pode se equiparar ao do hidrogênio cinza e outros combustíveis fósseis (Oliveira et al., 2021).

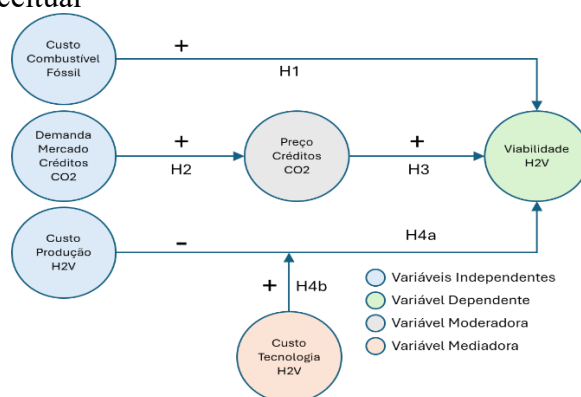
No entanto, apesar do potencial de longo prazo, o custo inicial para a implementação do H2V ainda é uma barreira significativa. O alto custo dos eletrolisadores e a necessidade de adaptação da infraestrutura industrial para utilizar o hidrogênio são desafios que precisam ser superados para que o H2V se torne viável em larga escala (Martínez-Huitle et al., 2024).

### **2.2. Desenvolvimento do Modelo Teórico**

A viabilidade do H2V na indústria depende de uma série de fatores inter-relacionados que influenciam diretamente sua competitividade em relação aos combustíveis fósseis. O custo de produção do H2V, a demanda por créditos de carbono, e o custo das tecnologias necessárias para sua implementação são variáveis que afetam a viabilidade dessa transição. Adicionalmente, o mercado de créditos de carbono tem um papel fundamental ao incentivar financeiramente as indústrias a reduzir suas emissões, tornando o H2V uma alternativa mais atraente (IRENA, 2021).

A Figura 1 ilustra as principais variáveis que influenciam a viabilidade do H2V, considerando os fatores econômicos, como o custo de combustíveis fósseis e o mercado de créditos de  $CO_2$ , bem como os custos tecnológicos e de produção envolvidos na transição.

Figura 1 – Modelo Conceitual



Fonte: autores.

A transição para o H2V na indústria é moldada pela interação de variáveis econômicas e tecnológicas. A seguir, são desenvolvidas hipóteses com base nessa teorização para explorar como essas variáveis interagem e afetam a adoção do H2V.

O custo dos combustíveis fósseis, como o petróleo e o gás natural, é um fator crítico que influencia a decisão das indústrias de buscar alternativas energéticas mais limpas. À medida que o preço dos combustíveis fósseis aumenta devido à volatilidade dos mercados globais ou à implementação de políticas de restrição, o H2V torna-se uma alternativa mais competitiva. Indústrias intensivas em energia podem reduzir seus custos operacionais e emissões ao substituir os combustíveis fósseis pelo H2V (Oliveira et al., 2021). Esse cenário sugere que o aumento dos preços dos combustíveis fósseis impulsionaria a viabilidade do H2V, tornando-o uma escolha economicamente vantajosa. Formula-se assim a hipótese 1 (H1): "O aumento no custo dos combustíveis fósseis aumenta a viabilidade do H2V nas indústrias."

O mercado de créditos de carbono desempenha um papel crucial na redução das emissões industriais. À medida que a demanda por créditos de CO2 aumenta, o preço desses créditos também tende a subir, criando um incentivo financeiro para as empresas investirem em tecnologias que reduzam suas emissões, como o H2V. Esse incentivo financeiro pode compensar os custos iniciais elevados do H2V, tornando-o mais viável economicamente em setores industriais que buscam evitar penalidades por emissões excessivas (IRENA, 2021). Assim, a elevação no preço dos créditos de carbono favorece a adoção do H2V, oferecendo uma solução econômica e sustentável para a redução das emissões de CO2. Portanto, considera-se a hipótese 2 (H2): "O aumento na demanda por créditos de CO2 impulsiona o preço dos créditos de carbono, melhorando a competitividade do H2V."

O custo de produção do H2V está diretamente ligado ao custo da eletricidade renovável utilizada no processo de eletrólise. À medida que o custo da energia solar e eólica diminui globalmente, a produção de H2V se torna mais barata e, conseqüentemente, mais competitiva em relação aos combustíveis fósseis (Oliveira et al., 2021). O avanço tecnológico e as economias de escala também contribuem para a redução dos custos de produção do H2V. Portanto, a queda no custo de produção aumenta a viabilidade do hidrogênio verde, especialmente em países com abundância de fontes renováveis, como o Brasil (IRENA, 2021). Deste modo, enuncia-se a hipótese 3 (H3): "A redução nos custos de produção do hidrogênio verde, impulsionada pela queda nos preços da eletricidade renovável, aumenta sua viabilidade."

A adoção do hidrogênio verde nas indústrias requer a adaptação de tecnologias existentes para o uso eficiente de H2V. O desenvolvimento de tecnologias mais acessíveis, como novos eletrolisadores mais eficientes ou a adaptação de infraestruturas para o armazenamento e transporte de hidrogênio, é crucial para tornar a transição economicamente viável (Martínez-Huitle et al., 2024). À medida que as tecnologias de H2V evoluem e se tornam

mais baratas, a implementação dessas soluções em indústrias de alta demanda energética será facilitada, promovendo uma transição energética mais rápida e sustentável (Chantre et al., 2024). Formula-se assim a hipótese 4 (H4): "*O desenvolvimento de tecnologias mais baratas para adaptação industrial e uso do H2V facilita a transição energética.*"

### **2.3. Discussão**

A análise dos resultados com base nas hipóteses levantadas oferece uma visão clara das variáveis que influenciam a viabilidade do hidrogênio verde (H2V) na indústria. A seguir, discutimos as quatro hipóteses principais, integrando dados teóricos e empíricos obtidos da revisão literária e de estudos de caso.

#### **Hipótese 1: "O aumento no custo dos combustíveis fósseis aumenta a viabilidade do H2V nas indústrias."**

Essa hipótese é suportada por evidências econômicas e contextuais. Conforme indicado por Oliveira, Beswick, e Yan (2021), o aumento no custo dos combustíveis fósseis, como o petróleo e o gás natural, eleva os custos operacionais de indústrias intensivas em energia. Esses setores, pressionados pelo aumento de custos e pela necessidade de reduzir suas emissões de carbono, passam a buscar alternativas mais econômicas e sustentáveis, como o H2V.

Adicionalmente, o aumento no custo dos combustíveis fósseis impulsiona indústrias a reavaliar suas matrizes energéticas, tornando o H2V uma alternativa atrativa devido à sua capacidade de gerar energia sem emissões de CO<sub>2</sub>. O Brasil, com uma matriz energética baseada em fontes renováveis, tem um potencial significativo para a transição para o hidrogênio verde, o que reforça essa hipótese (IRENA, 2021). Portanto, o aumento dos preços de combustíveis fósseis favorece o H2V, especialmente à medida que políticas governamentais globais tornam o uso desses combustíveis mais caro e restritivo.

#### **Hipótese 2: "O aumento na demanda por créditos de CO2 impulsiona o preço dos créditos de carbono, melhorando a competitividade do H2V."**

A análise do mercado de créditos de carbono mostra que a crescente demanda por créditos de CO<sub>2</sub> eleva os preços, criando um ambiente econômico propício para tecnologias de redução de emissões, como o H2V (IRENA, 2021). Indústrias que são grandes emissoras de CO<sub>2</sub> e operam em países com regulamentações ambientais mais rígidas estão cada vez mais pressionadas a adotar soluções que lhes permitam cumprir metas de emissões.

O hidrogênio verde oferece uma solução eficaz para essas indústrias, que podem reduzir suas emissões e, ao mesmo tempo, evitar custos crescentes associados à compra de créditos de carbono. A adoção de tecnologias de H2V também poderia gerar créditos de carbono que podem ser vendidos no mercado, criando uma oportunidade adicional de receita para essas indústrias (Chantre et al., 2024).

#### **Hipótese 3: "A redução nos custos de produção do hidrogênio verde, impulsionada pela queda nos preços da eletricidade renovável, aumenta sua viabilidade."**

Os custos de produção do H2V estão diretamente ligados aos preços da eletricidade renovável, como solar e eólica. No Brasil, que já tem uma matriz energética predominantemente renovável, a expectativa é que os custos de eletricidade renovável continuem a cair, especialmente com o avanço de tecnologias de armazenamento e transmissão de energia (Oliveira et al., 2021). Essa queda de custos torna o H2V cada vez mais viável como alternativa ao hidrogênio cinza, que depende de combustíveis fósseis.

Conforme os custos de eletricidade renovável caem, também diminui, tornando o H2V mais competitivo em indústrias que buscam reduzir suas emissões e cortar custos operacionais (IRENA, 2021). Esse cenário confirma a hipótese de que a redução nos custos de produção de H2V aumenta sua viabilidade, principalmente em países com abundância de fontes renováveis, como o Brasil.

#### **Hipótese 4: "O desenvolvimento de tecnologias mais baratas para adaptação industrial e uso do H2V facilita a transição energética."**

A última hipótese aborda os desafios tecnológicos relacionados à implementação do H2V. Embora o custo inicial de infraestrutura e adaptação seja uma barreira, o desenvolvimento contínuo de novas tecnologias, como eletrolisadores mais eficientes e métodos de armazenamento mais seguros, facilita a transição para o uso de hidrogênio verde (Martínez-Huitle et al., 2024). A disponibilidade dessas tecnologias a preços mais acessíveis permitirá que as indústrias adotem o H2V sem incorrer em custos proibitivos.

Além disso, países como o Brasil, que já possuem infraestruturas de energia renovável bem estabelecidas, podem adaptar suas instalações para suportar a produção e o uso de hidrogênio verde de forma mais rápida e econômica (IRENA, 2021). A combinação de avanços tecnológicos e a redução de custos com adaptação industrial demonstra que o H2V tem potencial para se consolidar como a principal fonte de energia limpa em várias indústrias.

#### 2.4. Sintetizando as Hipóteses

Para representar as hipóteses H1, H2, H3, H4a e H4b de forma matemática, propõe uma fórmula que modele a viabilidade do hidrogênio verde ( $IV_{H2V}$ ) na indústria. Esta fórmula irá considerar o impacto do aumento dos custos dos combustíveis fósseis (H1), o aumento na demanda e no preço dos créditos de carbono (H2), a redução dos custos de produção do H2V (H3), e o desenvolvimento de tecnologias para adaptação industrial (H4a e H4b).

O estudo propõe uma fórmula geral para o **Índice de Viabilidade do H2V** ( $IV_{H2V}$ ) pode ser expressa como:

$$IV_{H2V} = \frac{(C_{FF} + P_{CO2})}{(C_{Prod} + C_{Tec-a} + C_{Tec-b})}$$

$C_{FF}$  (H1): À medida que o custo dos combustíveis fósseis aumenta, o H2V se torna mais competitivo.

$P_{CO2}$  (H2): Um aumento no preço dos créditos de carbono incentiva as indústrias a adotar o H2V, tornando-o mais viável.

$C_{Prod}$  (H3): O custo de produção do H2V depende dos custos de eletricidade renovável. À medida que esses custos diminuem, a viabilidade do H2V aumenta.

$C_{Tec-a}$  (H4a): Representa o custo das tecnologias de produção de H2V, como eletrolisadores.

$C_{Tec-b}$  (H4b): Representa o custo das tecnologias de armazenamento e transporte de hidrogênio, essenciais para o uso eficiente do H2V.

Um  $IV_{H2V}$  alto indica uma viabilidade maior do hidrogênio verde na indústria, ou seja, o H2V se torna uma alternativa atraente aos combustíveis fósseis. Quando o numerador  $C_{FF} + P_{CO2}$  aumenta e o denominador  $C_{Prod} + C_{Tec-a} + C_{Tec-b}$  diminui, a viabilidade do H2V é maior. Se o denominador for muito elevado, indicando custos de produção ou tecnologias muito altos, o  $IV_{H2V}$  será baixo, sugerindo que o hidrogênio verde não é economicamente viável naquele contexto. Essa fórmula sintetiza as hipóteses teóricas em um modelo quantitativo, permitindo uma análise da viabilidade do hidrogênio verde com base em variáveis econômicas e tecnológicas.

### 3. CONCLUSÃO

O H2V é apontado como uma solução viável para a descarbonização de indústrias de alta intensidade energética. Fatores econômicos, tecnológicos e regulatórios, como o crescimento do mercado de créditos de carbono, o aumento dos custos dos combustíveis fósseis e a redução dos custos de eletricidade renovável e das tecnologias de eletrólise, são fundamentais para acelerar essa transição (IRENA, 2021). O Brasil, com sua matriz energética predominantemente renovável, está estrategicamente posicionado para se tornar um dos principais produtores globais de H2V, atendendo tanto à demanda interna quanto ao crescente mercado de exportação de energia limpa (Oliveira et al., 2021).

No entanto, para que essa transição ocorra de forma eficaz, o desenvolvimento de políticas públicas voltadas para o incentivo de investimentos em infraestrutura será essencial. A criação de incentivos governamentais que apoiem a inovação tecnológica e a adoção do H2V nas indústrias também desempenhará um papel importante na viabilização dessa nova fonte de energia (Chantre et al., 2024). Apesar dos desafios técnicos e econômicos, como a necessidade de infraestrutura adequada para o armazenamento e transporte de hidrogênio, esses obstáculos podem ser superados com o avanço da tecnologia e com o desenvolvimento de mecanismos de financiamento que tornem essa transição mais acessível para as indústrias (Martínez-Huitle et al., 2024).

As principais limitações discutidas no artigo incluem a falta de dados empíricos robustos que comprovem a viabilidade do H2V em larga escala em setores industriais específicos, como siderurgia, química e cerâmica. Além disso, os altos custos iniciais de produção e a adaptação de infraestrutura tecnológica são desafios a serem superados. Embora o modelo teórico forneça uma base sólida para avaliar a viabilidade do H2V, é necessário aprofundar a análise das variáveis que afetam a adoção em diferentes contextos industriais (IRENA, 2021). Outro ponto pouco explorado no estudo são as implicações logísticas e tecnológicas relacionadas ao armazenamento e transporte do hidrogênio, que representam desafios críticos para sua implementação em larga escala (Martínez-Huitle et al., 2024).

Pesquisas futuras podem se concentrar em projetos-piloto que avaliem a adoção do H2V em indústrias no Brasil e no exterior, além de explorar como os avanços em tecnologias de eletrólise e eletrolisadores mais eficientes podem reduzir os custos de produção. Estudos adicionais sobre o impacto regulatório e os incentivos governamentais também são essenciais para facilitar essa transição, assim como a otimização das cadeias de suprimento para o transporte e armazenamento do hidrogênio (Oliveira et al., 2021).

## REFERÊNCIAS

- Abdin, Z., Zafaranloo, A., Rafiee, A., Mérida, W., Lipiński, W., & Khalilpour, K. R. (2020). Hydrogen as an energy vector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109787.
- Ademollo, A., Mati, A., Pagliai, M., & Carcasci, C. (2024). Exploring the role of hydrogen in decarbonizing energy-intensive industries: A techno-economic analysis of a solid oxide fuel cell cogeneration system. *Journal of Cleaner Production*, 469, 143254.
- Chantre, C., Eliziário, S. A., Pradelle, F., Católico, A. C., Dores, A. M. B., & Serra, E. T. (2024). Hydrogen economy development in Brazil: An analysis of stakeholders' perception. *Sustainable Production and Consumption*, 34, 26-41.
- de Araújo, R. F., Gonçalves, L. C., & Pereira, J. M. (2024). Substitution of fossil fuels with green hydrogen: Potential for CO2 reduction in industrial processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49(10), 10544-10554.
- Ganiyu, S. O., & Martínez-Huitle, C. A. (2023). Electrochemical technologies for water treatment: Principles and challenges. *Current Opinion in Electrochemistry*, 41, 100834.
- IRENA (International Renewable Energy Agency). (2021). *Green Hydrogen: A guide to policy making*. IRENA. <https://www.irena.org/publications/2021/May/Green-Hydrogen-A-guide-to-policy-making>
- Martínez-Huitle, C. A., Rodrigo, M. A., Sirés, I., & Scialdone, O. (2024). A critical review on latest innovations and future challenges of electrochemical technology for the abatement of organics in water. *Applied Catalysis B: Environmental*, 328, 122430.
- Oliveira, A. M., Beswick, R. R., & Yan, Y. (2021). A green hydrogen economy for a renewable energy society. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 33, 100701.