



# ROTAS PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO SUSTENTÁVEL NO BRASIL

Análise ambiental e econômica

# SUMÁRIO

1

CONTEXTO

2

USOS

3

FORMAS DE PRODUÇÃO

4

EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

5

HIDROGÊNIO NA TRANSIÇÃO  
ENERGÉTICA JUSTA

6

VIABILIDADE ECONÔMICA

7

RECOMENDAÇÕES PARA O AVANÇO DO  
HIDROGÊNIO SUSTENTÁVEL NO BRASIL

# CONTEXTO

O hidrogênio pode contribuir na luta contra a emergência climática e pela transição energética em segmentos onde há mais dificuldades, como no caso do setor de transportes. Nele, a utilização da eletricidade é limitada, seja pela necessidade de conexão constante à rede elétrica, seja pela incapacidade de armazenar em baterias energia suficiente para garantir a autonomia necessária. Por essa razão, os setores de aviação, de transporte marítimo e até automotivo estão desenvolvendo tecnologias que permitam a utilização de combustíveis sustentáveis, como o hidrogênio.

**O hidrogênio é um combustível que não emite poluentes na sua utilização,**

**podendo ser produzido a partir de fontes renováveis de energia e com baixa pegada de carbono, diferentemente da gasolina, diesel e outros combustíveis fósseis.** Isso contribui para a melhora da qualidade do ar nas grandes cidades brasileiras e, conseqüentemente, para a diminuição das doenças respiratórias. Nesse sentido, ele é uma opção melhor do que biocombustíveis, os quais emitem poluentes durante sua utilização.

A adoção em larga escala do hidrogênio nos transportes depende da capacidade de produção a custos acessíveis, com baixa pegada de carbono e o desenvolvimento de infraestrutura para transporte e distribuição.



SOLAR



EÓLICA



ETANOL

**POR ESSA RAZÃO, É ANALISADA A SEGUIR A APTIDÃO DO BRASIL PARA PRODUZIR HIDROGÊNIO A PARTIR DE TRÊS ENERGIAS RENOVÁVEIS E ABUNDANTES NO PAÍS: SOLAR, EÓLICA E ETANOL**

# USOS

O hidrogênio é um **ótimo vetor energético pela versatilidade com que pode ser usado em setores diversos**, da geração de energia e transportes até a produção de alimentos. No entanto, ele ganhou destaque com a necessidade da transição energética, pois pode contribuir de forma expressiva para a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e gasto energético em equipamentos que se valem de combustíveis fósseis como sua principal fonte de energia, como a produção de aço e cimento.

Na mesma linha, o hidrogênio pode ser usado em caminhões, ônibus e outros veículos pesados que usam o diesel como principal combustível. No Brasil, em 2021, as

emissões ligadas a essas categorias de veículos foram de 105 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> (SEEG, 2022)<sup>1</sup>. O país possui experiências anteriores ligadas ao uso de hidrogênio como combustível, conforme apresentado na publicação **“Hidrogênio: Cenário e Potencial deste Combustível no Brasil”**, do WWF-Brasil.

O hidrogênio também pode beneficiar comunidades com acesso restrito à energia por meio do uso de células a combustível que o utilizam para alimentar baterias, suprimindo demandas locais que não podem ser atendidas por outras fontes renováveis.

<sup>1</sup> Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa <https://plataforma.seeg.eco.br/sectors/energia>

## ALGUNS DOS USOS DO HIDROGÊNIO



**Matéria-prima** para a indústria química



**Insumo** para a produção de gases presentes em cadeias produtivas de aço, alumínio e cimento



**Combustível de transportes pesados**, como caminhões de mineração, longa distância, navios e aviação



**Armazenamento sazonal** de energia elétrica



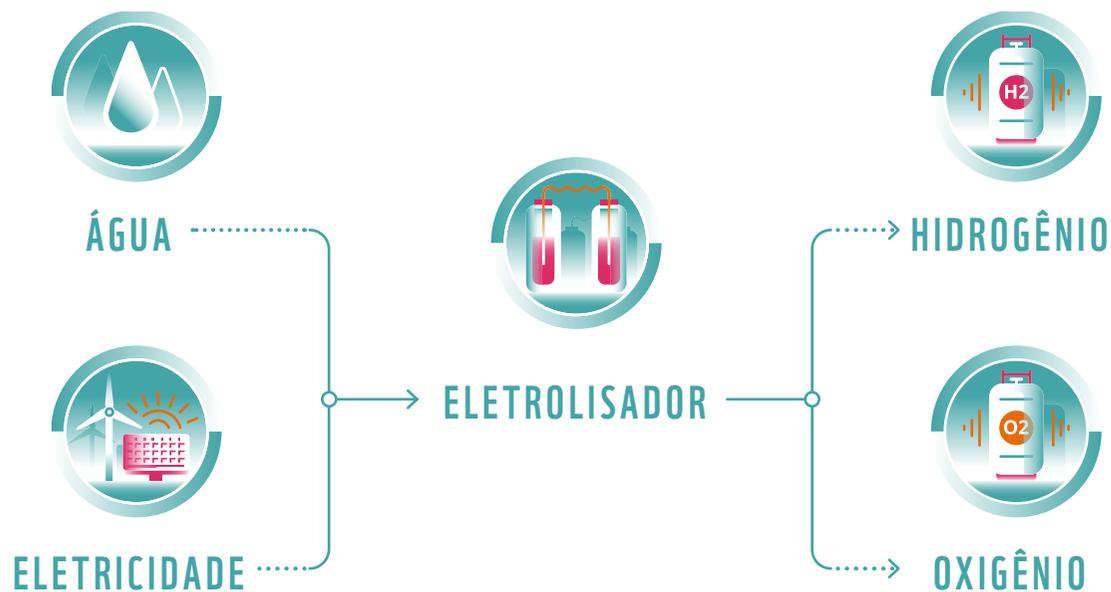
**Outros locais sem fontes renováveis** ou capacidade e eletrificação suficiente

# FORMAS DE PRODUÇÃO

## ELETRÓLISE DA ÁGUA COM ENERGIA SOLAR E EÓLICA

É a rota mais discutida mundialmente para a produção de hidrogênio renovável. Ela consiste em uma reação eletroquímica na qual moléculas de água são quebradas com a passagem de corrente elétrica, resultando em moléculas dos gases hidrogênio e oxigênio (ao lado). Na análise aqui apresentada, foi considerado o eletrolisador de membrana de troca de prótons (PEM, na sigla em inglês), dada sua disponibilidade comercial e flexibilidade operacional, capaz de comportar fontes de eletricidade intermitentes.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA ELETRÓLISE DA ÁGUA

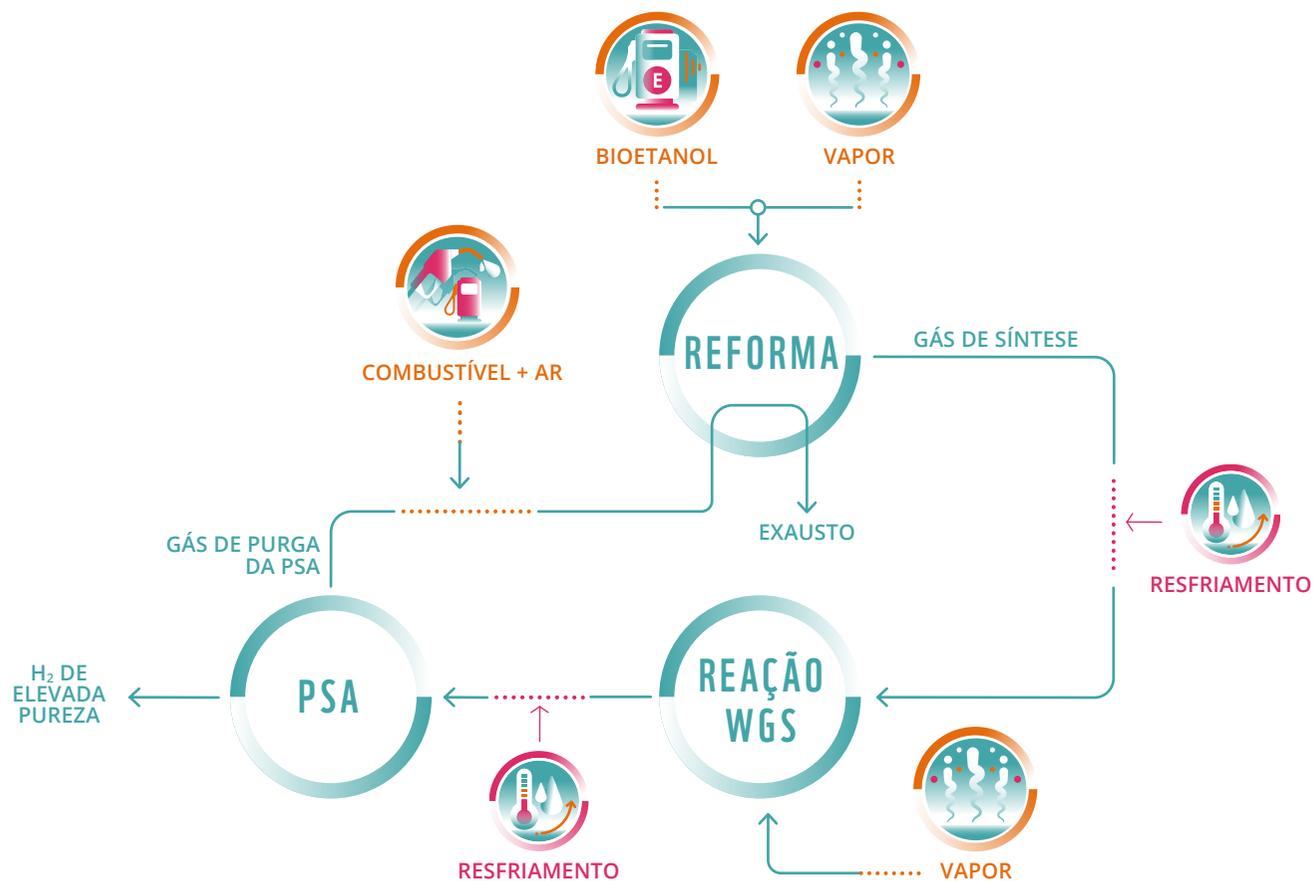


# FORMAS DE PRODUÇÃO

## REFORMA A VAPOR DE ETANOL

A reforma a vapor é o processo mais empregado para produção de hidrogênio em escala industrial; atualmente a matéria-prima mais usada é o gás natural, um combustível fóssil e não renovável. Por meio de catalisadores e aporte de energia, converte-se vapor d'água e um hidrocarboneto ou álcool em hidrogênio e dióxido de carbono (ao lado). Uma vantagem da utilização de álcoois como matéria-prima é o fato dessa reação exigir menos energia. Além disso, o uso do etanol feito a partir de biomassa permite que o hidrogênio resultante seja renovável.

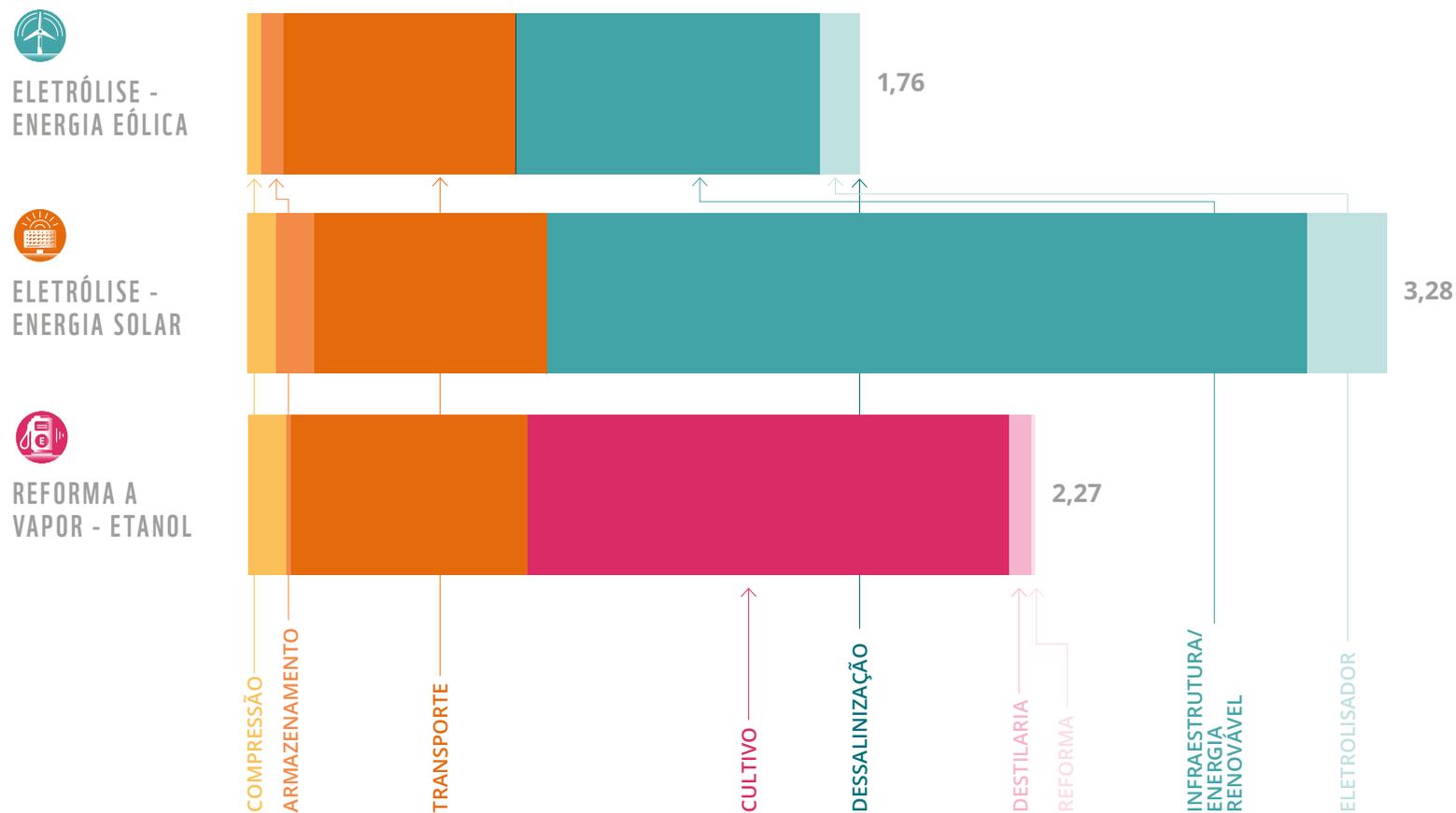
DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA REFORMA A VAPOR COM ETANOL



# EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

A intensidade de carbono do hidrogênio produzido (kg de CO<sub>2e</sub>/kg de H<sub>2</sub>) para cada uma das rotas quando utilizadas no Brasil são as seguintes<sup>2</sup> (ao lado):

**EMISSÃO DE CO<sub>2E</sub> POR ROTA TECNOLÓGICA** (KgCO<sub>2eq</sub> / KgH<sub>2</sub>)



<sup>2</sup> WWF-Brasil - Alternativas inovadoras para combustíveis sustentáveis - Análise comparativa da produção de hidrogênio. Escopo Energia, 2022.

## ANÁLISE DE CICLO DE VIDA (ACV) E SUA IMPORTÂNCIA PARA O CÁLCULO DE EMISSÕES ORIUNDAS DO HIDROGÊNIO

Para avaliar o benefício que cada opção pode oferecer para o combate das mudanças climáticas, é preciso calcular o nível de emissões que elas proporcionam considerando não apenas a sua operação, mas todo o seu ciclo de vida (o que compreende processos desde a extração de recursos necessários para a produção do hidrogênio até a sua entrega em postos de abastecimento). Isso é importante porque, embora a fase de produção possa ser responsável pela maior parte das emissões de CO<sub>2</sub>, aspectos logísticos relacionados à localização das plantas de produção, aos tipos de modais de transporte e aos locais de abastecimento também influenciam as emissões de CO<sub>2</sub> ao longo da cadeia. Esse cálculo

é realizado por meio da **Análise do ciclo de vida (ACV)**, uma metodologia consagrada na avaliação da intensidade de carbono de diversos produtos e serviços, sendo inclusive utilizada pelo RenovaBio para calcular a intensidade de carbono dos biocombustíveis produzidos nas usinas participantes.

Cana-de-açúcar  
que pode ser  
transformada  
em etanol e  
outros produtos





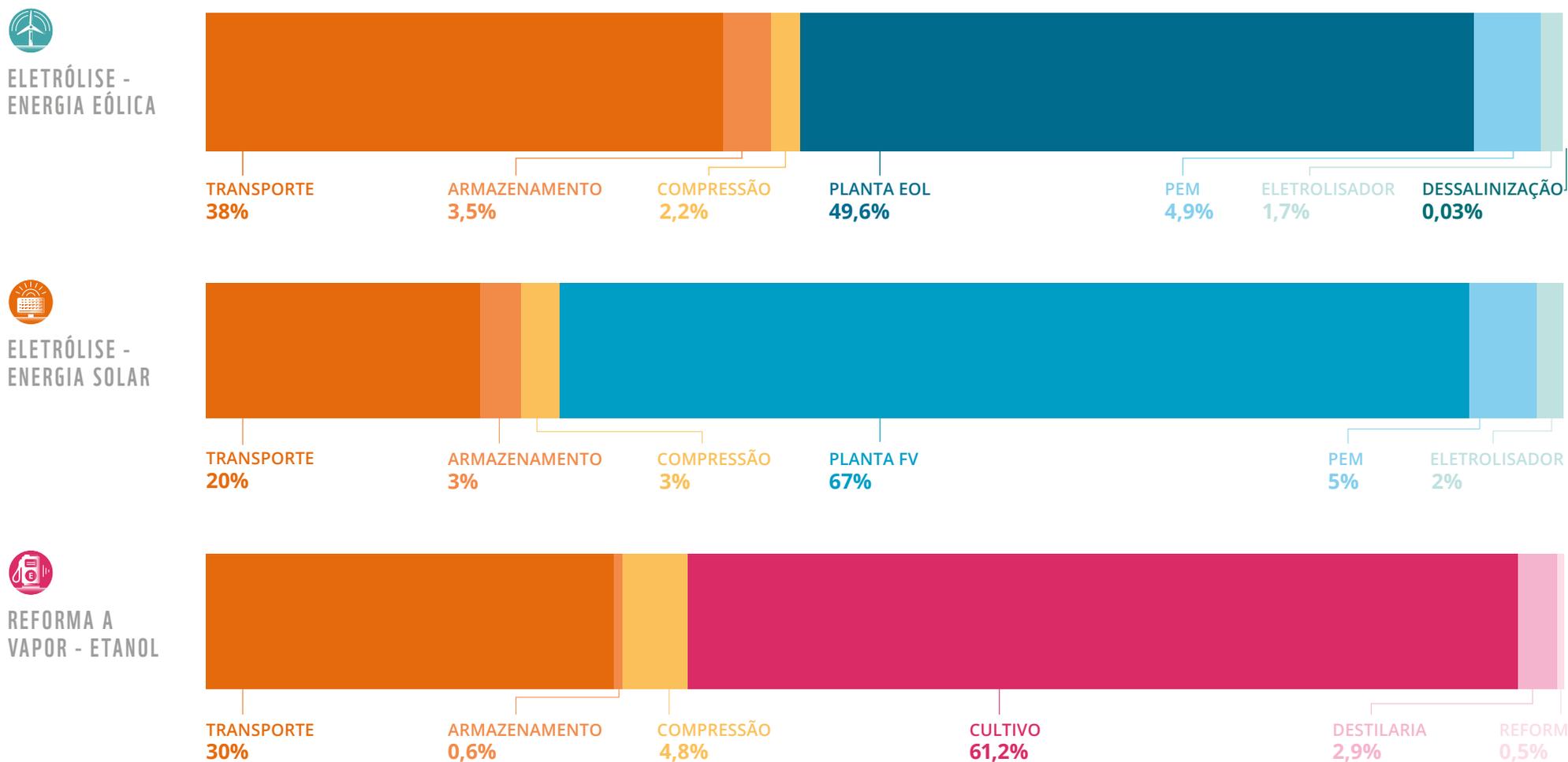
**A intensidade de carbono é muito dependente da produção de energia elétrica e de etanol.** Como as fontes de energia são renováveis, as emissões dependem principalmente dos materiais e processos associados aos materiais que compõem o sistema de geração. Por essa razão, ela é menor na eletrólise com energia eólica, que apresenta maior fator de capacidade que a energia solar, e consegue aproveitar melhor suas instalações. Isso pode ser observado nas figuras da página a seguir.

As emissões na construção e logística dos equipamentos para produção de energia também são consideradas na ACV

Por outro lado, a **produção de hidrogênio por meio do etanol é fortemente impactada pelas emissões no cultivo da cana-de-açúcar**, pois nele são empregados fertilizantes nitrogenados, corretivos de solo e herbicidas que apresentam elevada pegada de carbono. Além disso, o maquinário que utiliza óleo diesel como combustível também contribui significativamente para as emissões de CO<sub>2</sub>e (figura da página a seguir).

É importante observar que **não foram consideradas no cultivo da cana as emissões provenientes da mudança do uso do solo, diretas ou indiretas**, pois elas variam de acordo com a propriedade em que se faz o cultivo. Apesar disso, é certo que o cálculo dessas emissões será exigido pelo comprador do hidrogênio, especialmente o destinado à exportação.

EMIÇÃO DE CO<sub>2</sub>EQ POR QUILOGRAMA DE HIDROGÊNIO DA ROTA:



## EMISSÕES PROVENIENTES DA MUDANÇA DIRETA E INDIRETA DO USO DO SOLO

A preocupação com a bioenergia reside no fato de que ela depende da biomassa, que, independentemente de sua forma de produção, é oriunda do solo. Dessa maneira, o solo necessariamente passa por uma mudança em relação ao seu estado natural, o que implica emissões de carbono e perda de biodiversidade.

Essa mudança pode ser **direta**, quando afeta o local onde é produzida a biomassa, ou **indireta**, quando ela desloca a produção de outros cultivos para localidades **diversas**, frequentemente fronteiras agrícolas ou até mesmo florestas e áreas nativas.



Mudança no uso do solo é a atividade que mais gera gases de efeito estufa no Brasil

**MENSURAR E IMPEDIR A MUDANÇA DO USO DO SOLO NO CULTIVO DA CANA PARA PRODUÇÃO DE ETANOL É FUNDAMENTAL PARA QUE O HIDROGÊNIO PRODUZIDO A PARTIR DELE SEJA SUSTENTÁVEL**

# HIDROGÊNIO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA JUSTA

Para contribuir com uma transição energética justa e inclusiva, a produção de hidrogênio deve considerar seus **impactos socioambientais**, entre os quais estão:



## CONSUMO DE ÁGUA

Em média **são usados 9 litros de água para produzir 1 kg de H<sub>2</sub> por meio da eletrólise**, quantidade que pode se alterar significativamente dependendo da tecnologia e materiais utilizados no eletrolisador. Por sua vez, a produção por meio da reforma do etanol consome cerca de 21,9 litros de água por kg de H<sub>2</sub>. Por essa razão, a produção de hidrogênio não deve ser instalada em regiões com restrições ou escassez hídrica.



## DEMANDA POR MATERIAIS CRÍTICOS

A cadeia de **produção de hidrogênio demanda materiais críticos, como cobre, platina, níquel e até mesmo ouro, causando pressão para o aumento da atividade minerária**, inclusive em áreas ambientalmente sensíveis. Para o cobre, por exemplo, a demanda mundial deve atingir entre 50 e 70 milhões de toneladas ao ano em 2050, conforme estimativas da IRENA.<sup>3</sup>



## COMPETIÇÃO PELO USO DA ÁREA

As fontes renováveis de energia não estão livres de impactar pessoas: o cultivo da cana, a produção de etanol e até mesmo fazendas solares e parques eólicos **podem afetar populações que habitam ou desenvolvem alguma atividade na área de influência dessas fontes de energia**. Essa questão é mais grave quando afeta populações tradicionais ou indígenas.

<sup>3</sup> Critical Materials for the Energy Transition:  
[https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Technical-Papers/IRENA\\_Critical\\_Materials\\_2021.pdf](https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Technical-Papers/IRENA_Critical_Materials_2021.pdf)



## GERAÇÃO DE EMPREGOS

Entre os impactos positivos mais evidentes está a geração de empregos e os efeitos indiretos que ela causa. Frequentemente a **geração de empregos é superestimada no local do empreendimento, como a usina ou fábrica em questão, mas subestimada em outras localidades**: empreendimentos tendem a contribuir de maneira relevante, ainda que silenciosa, para a geração e manutenção de empregos em regiões distantes, mas envolvidas na cadeia de valor.

Fonte: A Critical Case Against Hydrogen Vehicles: a raw materials perspective - PtX Hub (ptx-hub.org)

## MATERIAIS CRÍTICOS

**Alguns materiais críticos ligados à energia eólica, solar e outras fontes renováveis também são usados na cadeia do hidrogênio**, como é o caso do cobre, níquel, cobalto e platina. Ademais, o lítio é empregado em baterias e em tecnologias ligadas ao eletrolisador. Em comum, esses

materiais apresentam emissões significativas de CO<sub>2</sub> no processo de mineração e beneficiamento, assim como a presença concentrada em poucos territórios. Para mitigar esses problemas é preciso aprimorar e desenvolver tecnologias que diminuam a necessidade desses materiais na transição energética.

Tecnologia	Bateria	Célula a combustível	Eletrolisador		
<b>Tipo de tecnologia</b>	<b>NCA</b> <i>(Níquel - Cobalto - Alumínio)</i>	<b>LMO</b> <i>(Óxido lítio e manganês)</i>		<b>PEM</b> <i>(Membrana eletrolítica de polímero)</i>	<b>AEL</b> <i>(Eletrolise alcalina)</i>
<b>Materiais críticos</b>	Lítio  Manganês  Grafite	Lítio  Grafite  Platina  Paládio  Titânio  Estrôncio	Cobalto  Platina  Lítio	Írídio  Platina  Níquel  Níquel Raney  Lítio	Cobalto

# VIABILIDADE ECONÔMICA

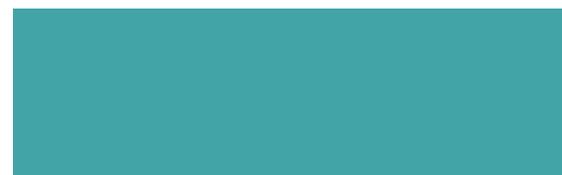
O cálculo do custo de produção de hidrogênio nas opções avaliadas considerou investimentos, custos fixos e variáveis, despesas com a aquisição de combustível (no caso da reforma do etanol) e a margem de lucro, para os quais foram utilizados valores típicos do mercado brasileiro (gráfico ao lado). Os resultados, comparados com preços de vários mercados ao redor do mundo, encontram-se na figura da página a seguir.

## CUSTO DE PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO POR ROTA TECNOLÓGICA NO BRASIL

(USD/KgH<sub>2</sub>)



ELETRÓLISE -  
ENERGIA EÓLICA



5,93



ELETRÓLISE -  
ENERGIA SOLAR



9,52



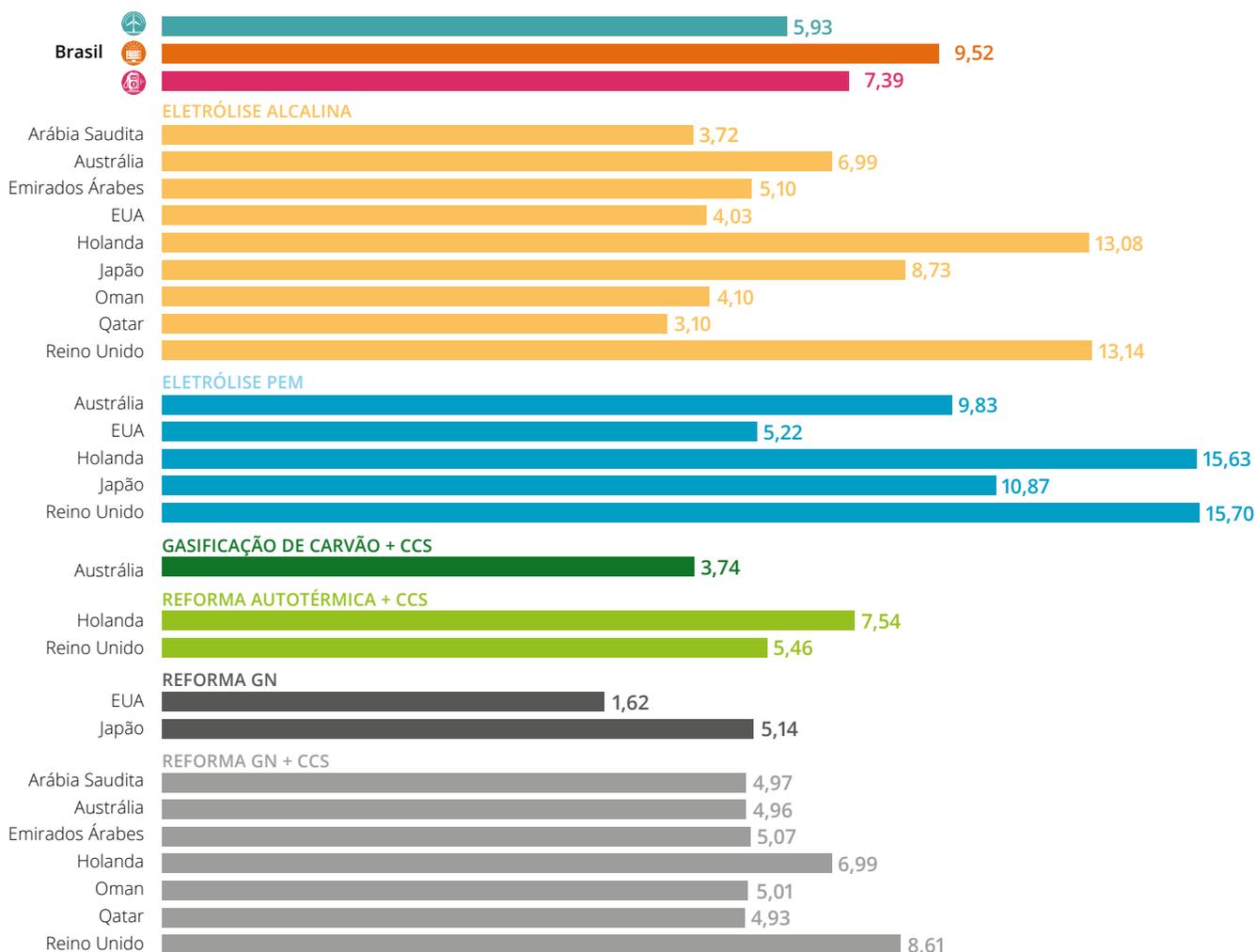
REFORMA A  
VAPOR - ETANOL



7,39

## COMPARAÇÃO COM O MUNDO

(USD/KgH<sub>2</sub>)



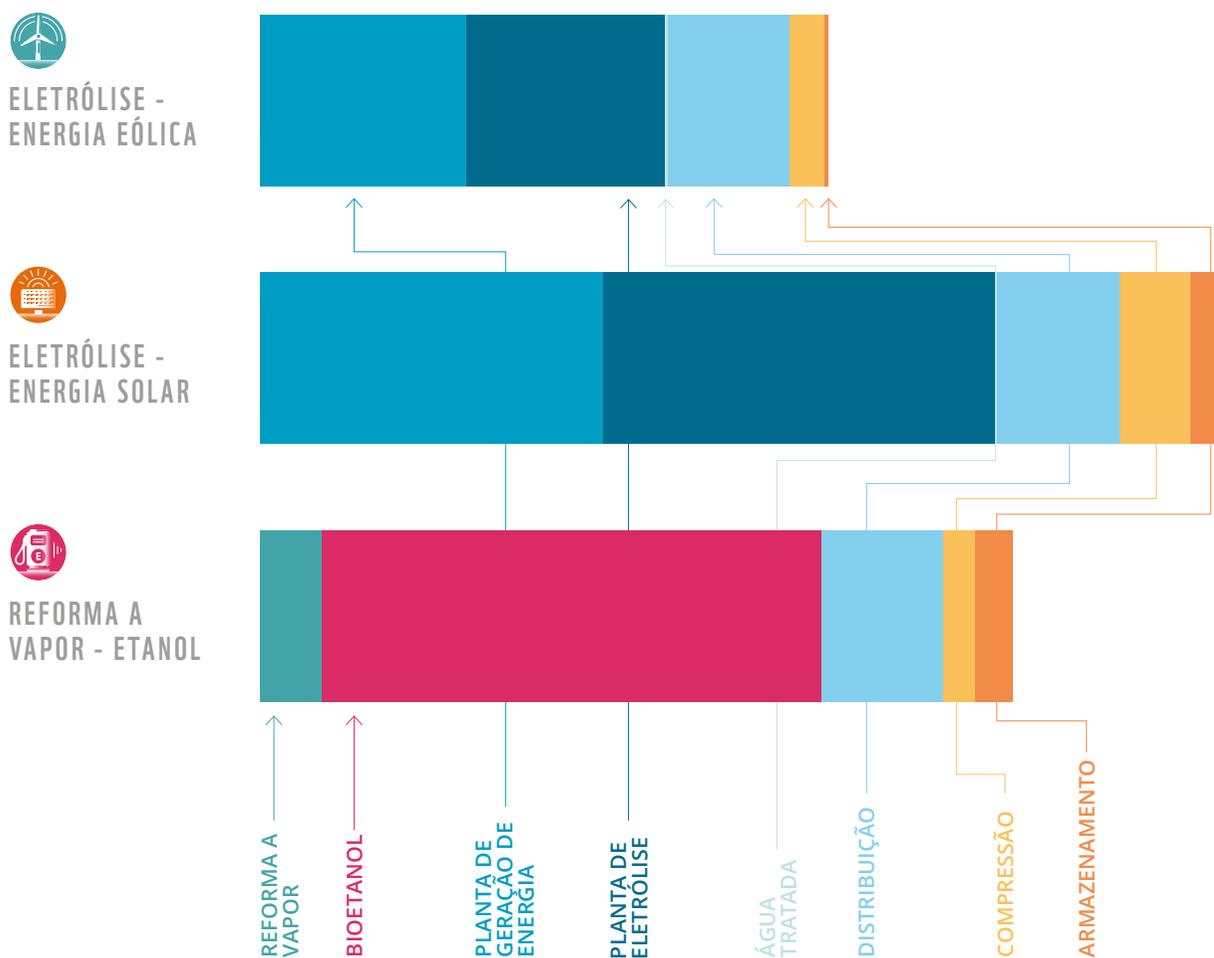
O hidrogênio com menor custo é o produzido por meio da eletrólise da energia eólica (5,93 US\$/kgH<sub>2</sub>), seguido do obtido com a reforma de etanol (7,39 US\$/kgH<sub>2</sub>) e da eletrólise da energia solar (9,52 US\$/kgH<sub>2</sub>). Quando comparados a preços praticados no mercado internacional (S&P, 2022)<sup>4</sup>, observa-se que a produção brasileira pode competir em vários mercados, especialmente quando se considera que a baixa pegada de carbono do hidrogênio brasileiro pode ensejar um prêmio sobre o hidrogênio com maior intensidade de carbono produzido em outros países.

<sup>4</sup> S&P. "Platts Hydrogen Price Wall." 2022. Disponível em: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/PlattsContent/assets/files/en/specialreports/energy-transition/platts-hydrogen-price-wall/index.html>

É possível observar a composição desses custos na figura a seguir. No hidrogênio produzido a partir de energia solar e eólica, a planta de eletrólise representa a maior parcela dos custos, enquanto no produzido pela reforma do etanol, é o próprio etanol que representa a maior despesa. A análise de sensibilidade a diversas variáveis encontra-se em Escopo Energia, 2022.<sup>5</sup>

**COMPOSIÇÃO DOS CUSTOS DAS ROTAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO**

(USD/KgH<sub>2</sub>)



<sup>5</sup>WWF-Brasil - Alternativas inovadoras para combustíveis sustentáveis - Análise comparativa da produção de hidrogênio. Escopo Energia, 2022.

# RECOMENDAÇÕES PARA O AVANÇO DO HIDROGÊNIO SUSTENTÁVEL NO BRASIL

O Brasil pode aproveitar suas fontes renováveis de energia para instituir uma cadeia de hidrogênio sustentável no país, fornecendo hidrogênio para consumo interno e externo a preços competitivos, gerando emprego e renda.

É importante ter em vista que a demanda futura se concentrará no hidrogênio com baixa intensidade de carbono e baixo impacto socioambiental: o crescimento da demanda de hidrogênio será alavancado pela necessidade de uma transição energética justa e inclusiva em direção a uma sociedade carbono neutro. Ademais, a oferta de hidrogênio

de origem fóssil e de elevada pegada de carbono já existe e é atendida a preços baixos por países produtores de gás natural.

Assim, recomenda-se para o Programa Nacional do Hidrogênio e outras iniciativas governamentais, privadas ou conjuntas:

- **Fomentar a pesquisa e desenvolvimento** das tecnologias para produção e uso de hidrogênio sustentável no Brasil, focando nas alternativas de baixo impacto socioambiental e baixa pegada de carbono;



**A DEMANDA FUTURA  
SE CONCENTRará  
NO HIDROGÊNIO COM  
BAIXA INTENSIDADE  
DE CARBONO E  
BAIXO IMPACTO  
SOCIOAMBIENTAL**

- **Estimular a oferta de hidrogênio**, produzido a partir de fontes renováveis, para uso no Brasil e para exportação, considerando as vocações nacionais e a necessidade de uma transição energética justa e inclusiva;
- **Classificar o hidrogênio pela sua intensidade de carbono** e não pelas cores, pois as rotas de produção indicadas por estas não indicam as emissões incorridas nelas;
- **Incorporar os custos das emissões de gases de efeito estufa nos setores que utilizam hidrogênio**, seja como combustível ou matéria-prima;
- **Implantar projetos-piloto** para utilização de veículos a hidrogênio no Brasil, notadamente no transporte público em grandes cidades.



Fazenda de  
geração eólica, em  
Santa Catarina



**Realização**

WWF-Brasil

**Diretor Executivo**

Mauricio Voivodic

**Gerente de Ciências**

Mariana Napolitano

**Especialista de Conservação**

Ricardo Junqueira Fujii

**Consultora em Energia**

Samara Santos

**Analista de Engajamento**

Maíra Teixeira

**Projeto Gráfico e Editorial,  
Ilustrações e Infográficos**

Laboota

**Fotos**

Shutterstock