

# Hidrogênio da biomassa no estado de São Paulo

**Prof. Suani Coelho**

*colaboração de Danilo Perecin*

Instituto de Energia e Ambiente

Universidade de São Paulo

Comissão Especial para Estudo, Avaliação e Acompanhamento das  
Iniciativas e Medidas Adotadas para Transição Energética –  
Fontes Renováveis e Produção de Hidrogênio Verde no Brasil (CEENERGIA)  
**Câmara dos Deputados**

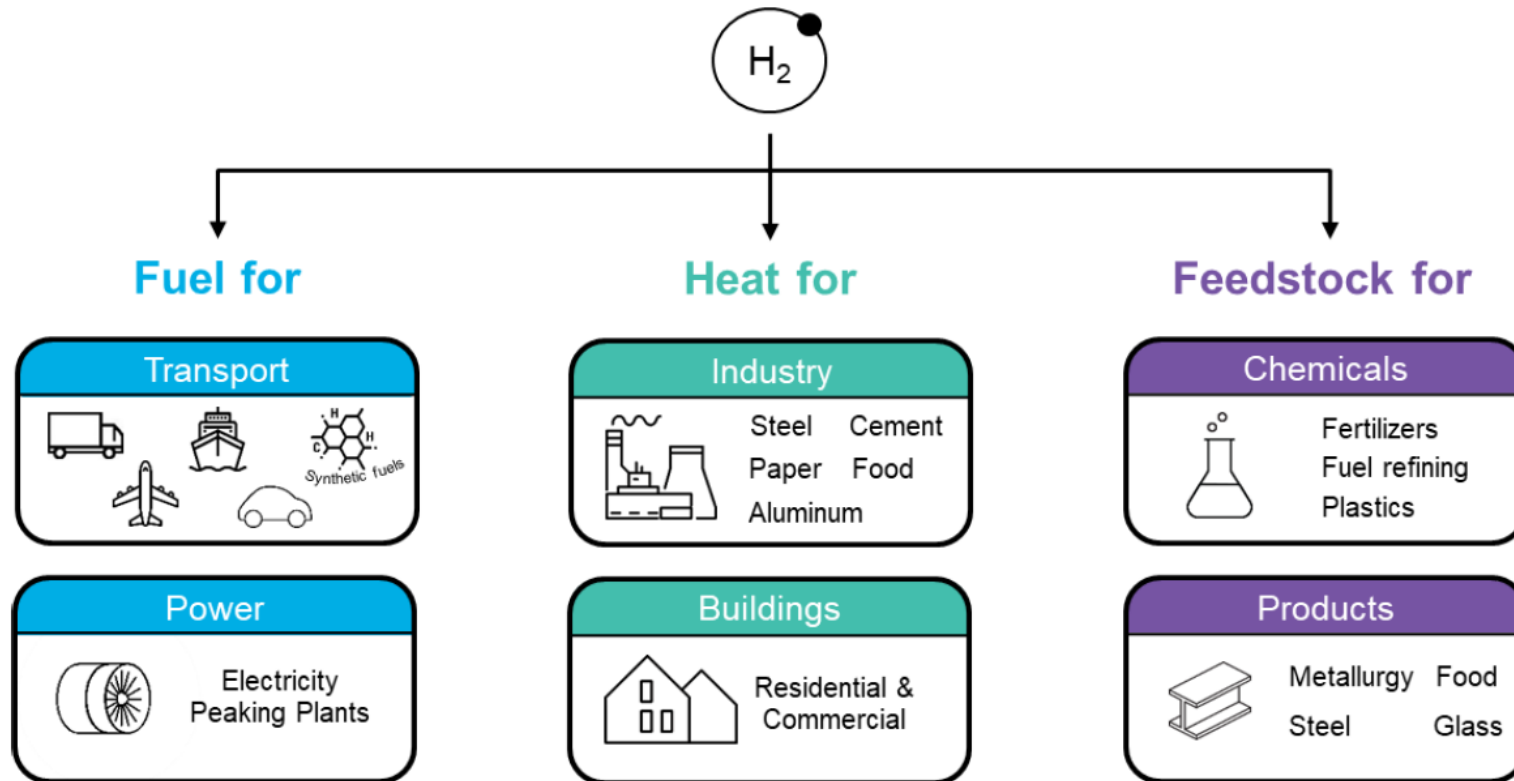


Research Centre for  
Greenhouse Gas Innovation

**FIESP**  
**Mesa Redonda sobre Hidrogênio Sustentável**  
11 AGOSTO 2023

# Por que o hidrogênio (H<sub>2</sub>)?

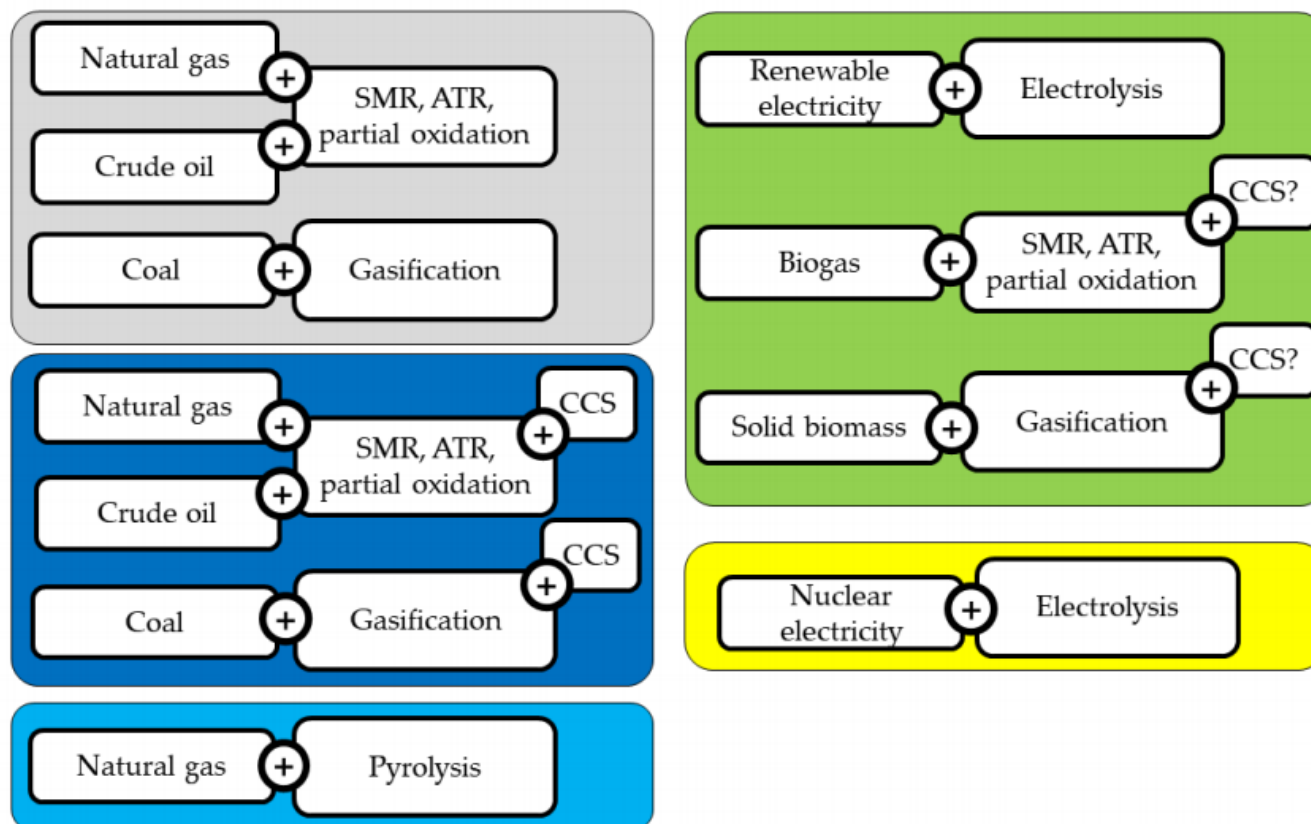
Potencial de ser o elemento chave da transição energética



Source: BloombergNEF

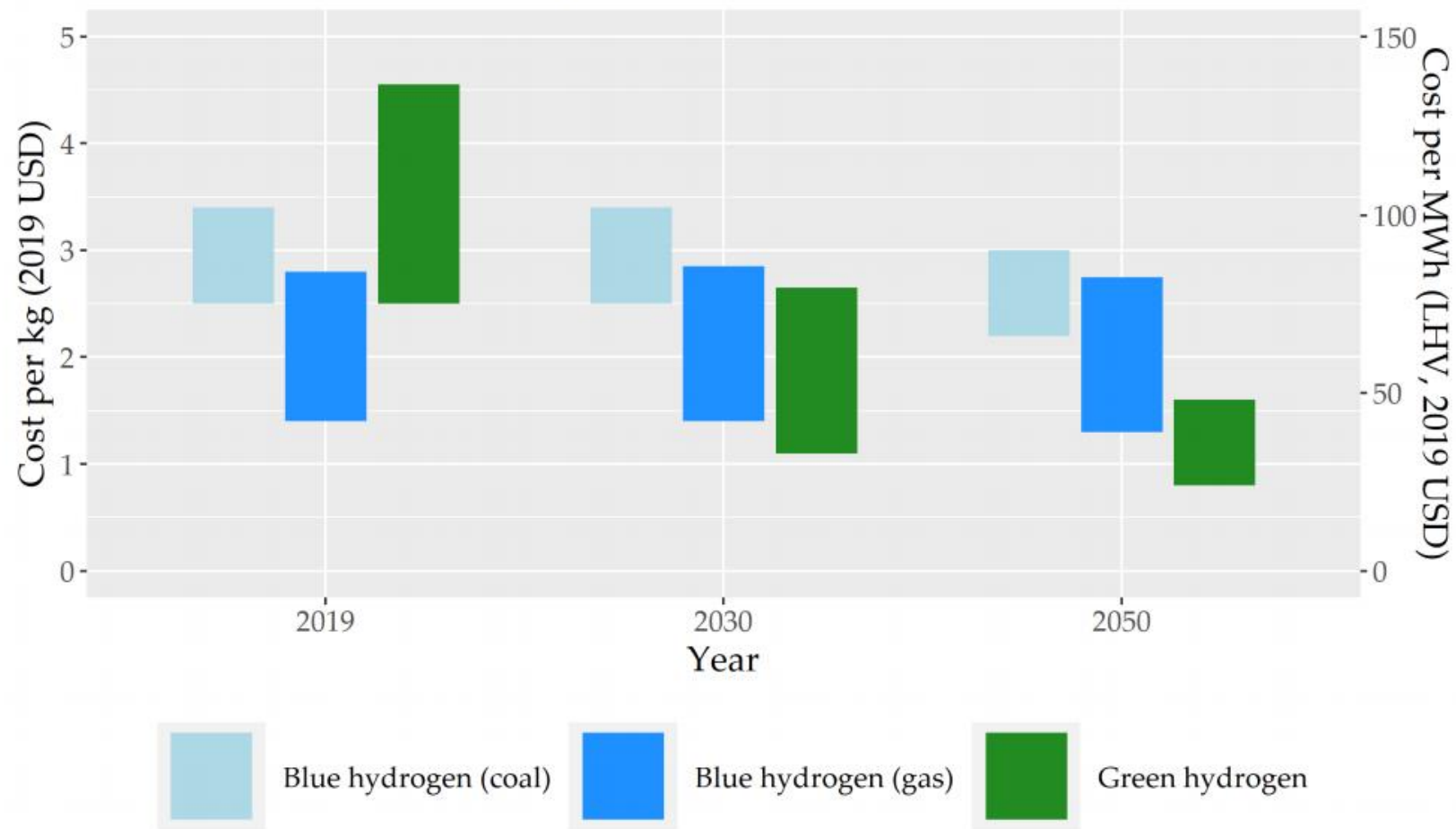
# Cores do H<sub>2</sub>

## Matérias-primas, tecnologias e emissões de GEE



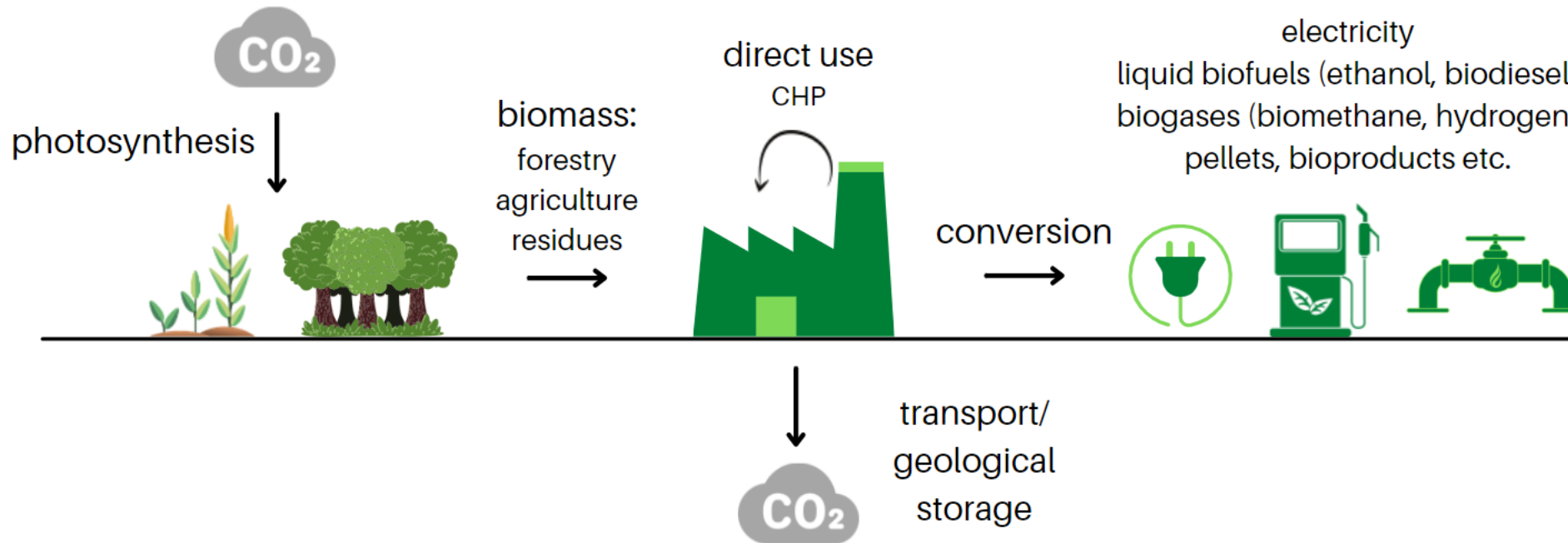
**Figure 1.** Different hydrogen generation pathways divided by colour. SMR: steam methane reforming, ATR: autothermal reforming, CCS: carbon capture and sequestration.

## Global cost of hydrogen production



**Figure 2.** Estimation of future hydrogen costs for different pathways. Energy figures based on hydrogen lower heating value (LHV). Authors' elaboration on BNEF data, 2020 [14].

# Repensando os sistemas de bioenergia atuais para produzir H<sub>2</sub> e emissões negativas (com BECCS)



H<sub>2</sub>

(Vetor energético sem carbono – potencial para maximizar BECCS)

# BECCS - BECCUS

## Apresentação sistemas BECCUS e potencial do Brasil (Yanis Targui, EPUSP, 2023)

- NETs : tecnologias de **emissões negativas** em carbono

### BECCUS

**BECCS:** Bioenergia com Captura e Armazenamento do Carbono

**BECCU:** Bioenergia com Captura e Utilização de Carbono

### Principais preocupações :

- investimento importante
- Falta de **exemplos comerciais**
- Mercado do carbono** não bastante desenvolvido

### Vantagens:

- Potencial de **mitigação para região sem desmatamento**
- Desenvolvimento socioeconômico rural
- Melhor qualidade do ar
- Contribuição nas políticas de **redução das emissões**

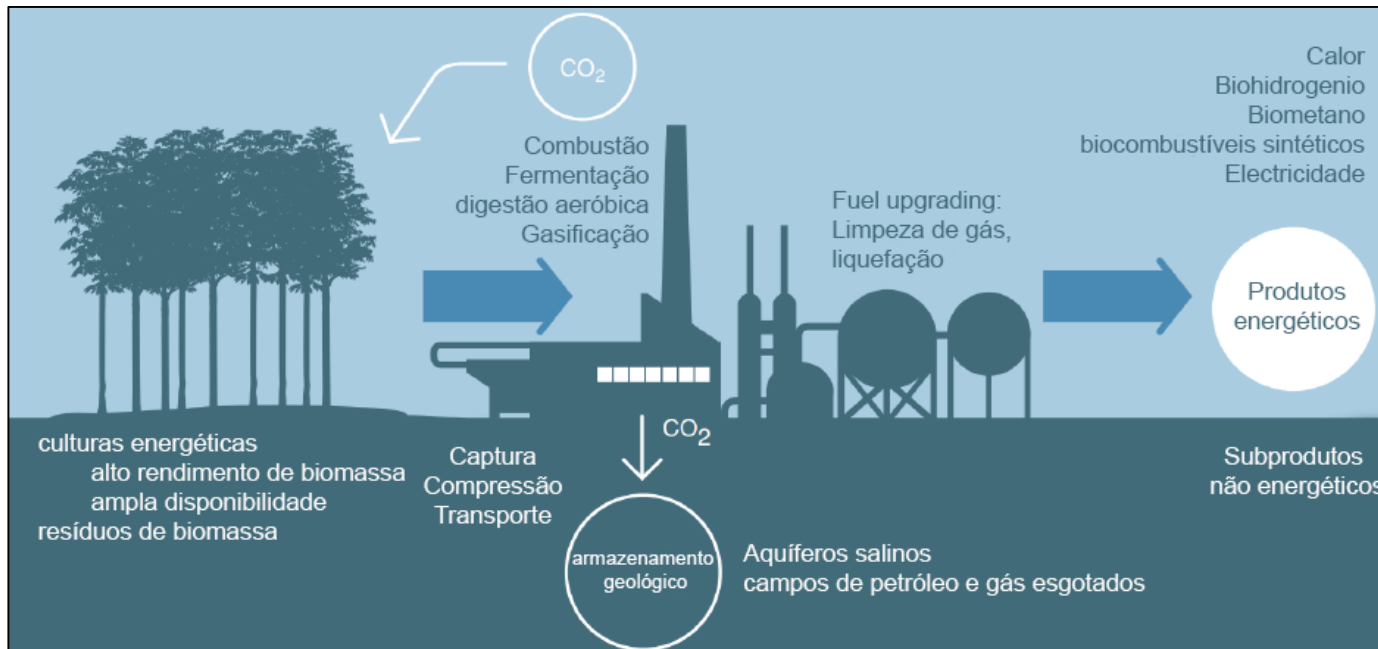
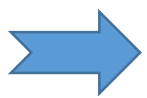


Figura - As possibilidades de um sistema de BECCS



Prioridade **para sistemas de bioenergia já em operação:** mais chances de produzir emissões negativas

Fonte: APLICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE BECCUS NA INDÚSTRIA DA CANA DE AÇUCAR NO BRASIL. PHA 3521, EPUSP, Projeto de formatura 2, Orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. SUANI T. COELHO, Yanis Targui, 2023

# FONTES DE CAPTAÇÃO DE CO<sub>2</sub>

(Yanis Targui, EPUSP, 2023)

## Processo de fermentação:

- **Fermentação do caldo** para produção de etanol ( 9% do C da cana)
- CO<sub>2</sub> liberado pelo processo **quase puro** para a captura
- Potencial de captura de 27,7 MtCO<sub>2</sub>/ano (6,5% emissões setor energia)

## Processo de combustão:

- **Bagaço:** resíduo do processo de moagem da cana (32% do C da cana)
- **Palha:** fica no campo mas pode ser aproveitada (36% do C da cana)
- Colocados em caldeiras para **produzir bioeletricidade por combustão**

## Processo de biodigestão:

- **Vinhaça:** Obtido após da destilação que extrai o etanol do mosto de cana
- **Torta de filtro:** Obtido após da filtragem mecânica do caldo
- Decomposição dos resíduos por **biodigestão para produzir biogás**
- Potencial de captura do CO<sub>2</sub> na **purificação/upgrading do biogás**



Figura 5: Processo de fermentação



Figura 6: Bagaço da cana

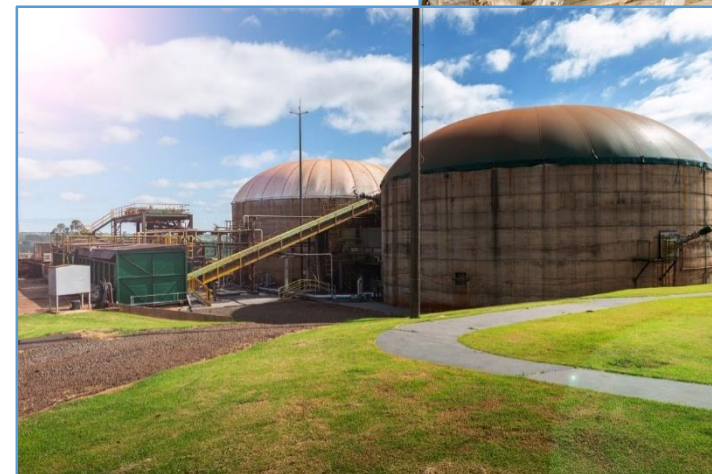
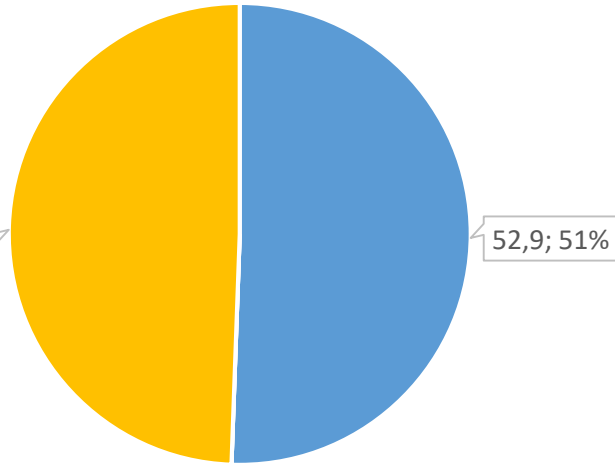


Figura 7: Biodigestor de vinhaça

# Captura da fermentação

(Yanis Targui, EPUSP, 2023)



## Repartição do CAPEX

- Unidade de compressão (M R\$)
- Transporte e armazenamento (M R\$)

	cenario 1 (Y. Targui, 2023)	(Valencia e Walter. 2018)	(MARACCINI. 2021)
Capacidade de moagem (Mt/ano)	1,6	2	4
CO2 capturado (MtCO2/ano)	0,1	0,13	0,77
CAPEX (M R\$)	120,8	73	100
MVP (R\$/tCO2)	301	123	111

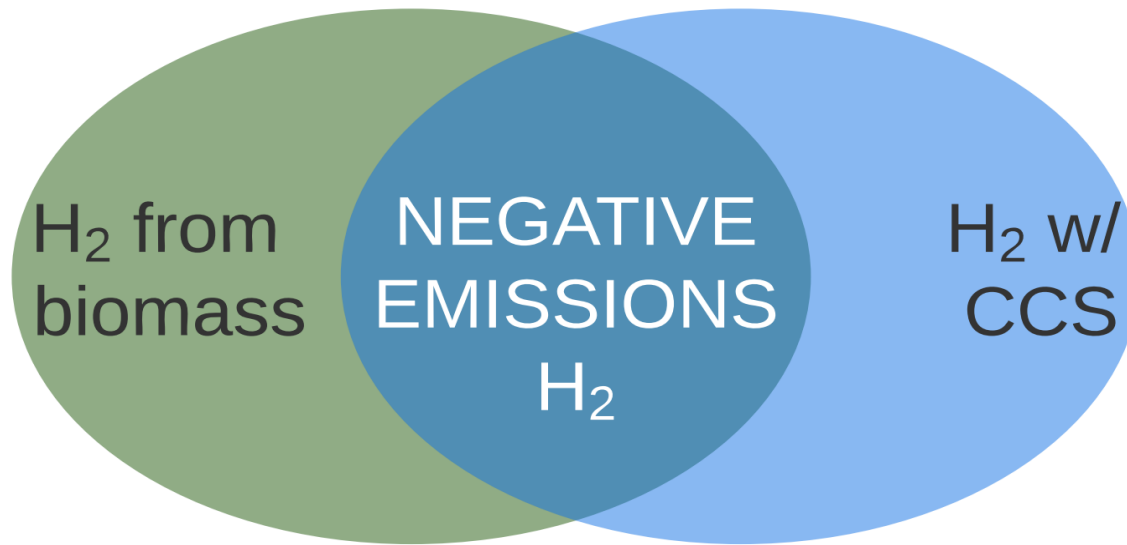
**Tabela 7 – Indicadores econômicos**

Custo CAPEX com taxas (M R\$)	120,8
Custo OPEX total (M R\$)	3,5
Preço mínimo do credito CBIO (R\$/tCO2)	298
Custo CAPEX por tCO2 capturado (R\$/tCO2)	1 206

**Tabela 8 – Comparação do cenário 1 com outros estudos**



# Emissões negativas (BECCS): contribuição única do H<sub>2</sub> da biomassa



Bioenergia + H<sub>2</sub> + CCS:  
Maximização de valor

# Por que H<sub>2</sub> para o Brasil?



## • Demanda por fertilizantes:

- O Brasil é um importante produtor agrícola (soja, milho, cana)
- Fertilizantes chegam a representar **30%** dos custos dos principais cultivos (Mato Grosso)
- Aumento para 9,2 Mt de fertilizantes nitrogenados importados em 2018 (**2x 2008**)
- **Mais de 80%** dos fertilizantes usados no Brasil são **importados**



## • Próximo passo da transição energética:

- **Grande potencial da biomassa + eletricidade renovável**
- Frete rodoviário no Brasil
- **Veículos pesados a diesel:**
  - Difícil de descarbonizar
  - H<sub>2</sub> limpo pode ser usado na produção de biocombustíveis (diesel verde – HVO, e como intermediário do metanol para o biodiesel)
- **Elevada eficiência das células a combustível a H<sub>2</sub>**

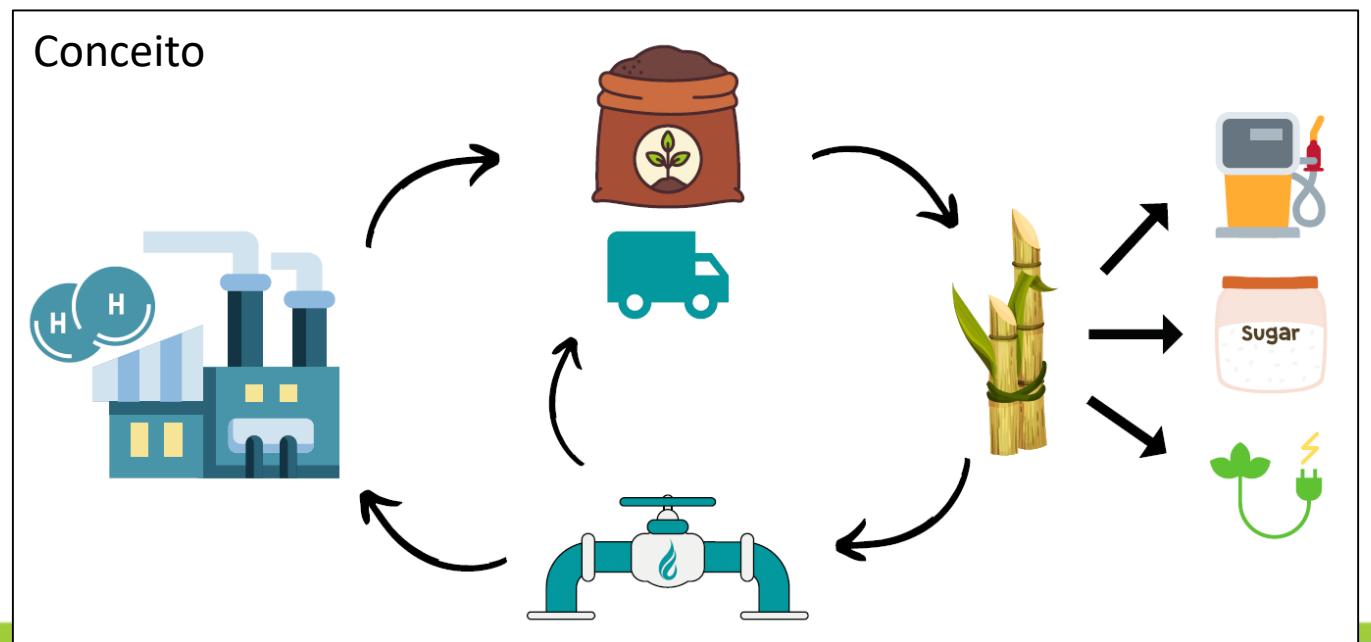


Fonte para os dados de fertilizantes: EPE (2019)

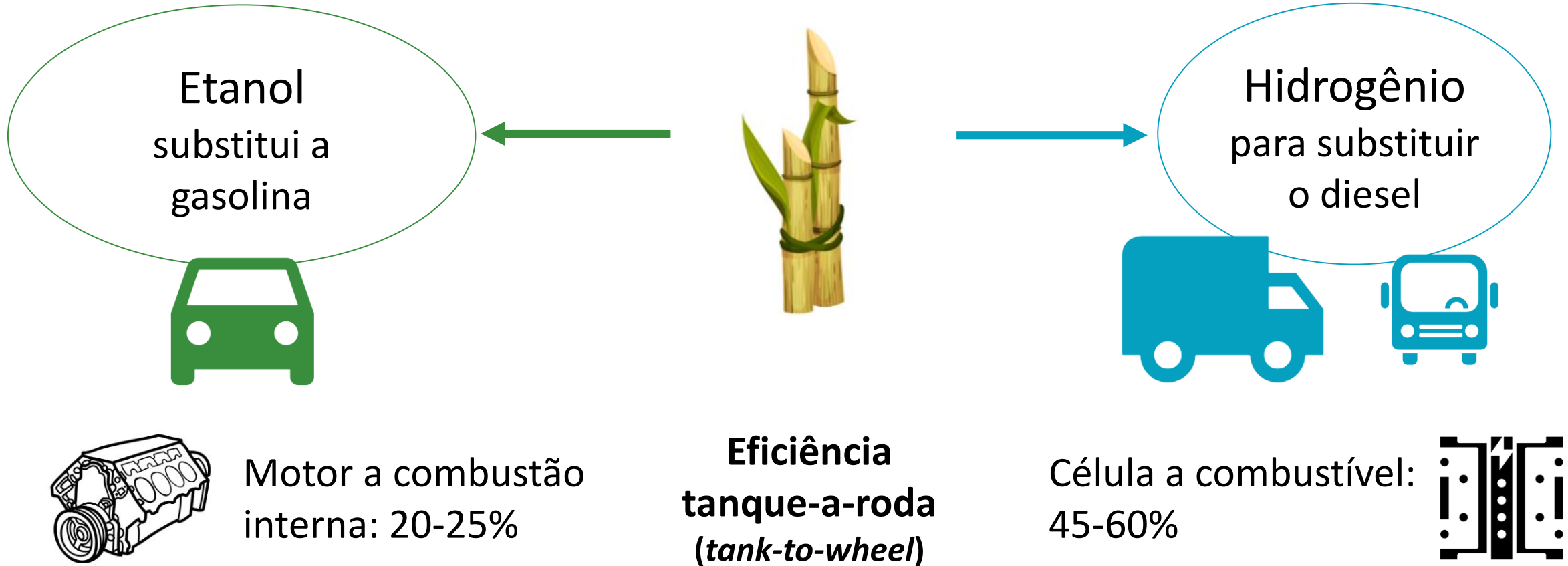
# Biometano: o elo de baixo carbono entre as indústrias de cana-de-açúcar e de fertilizantes

- Planta de fertilizantes da Yara anunciou contrato para **20 mil m<sup>3</sup>/dia** de usina da Raízen
- Substitui **3% do uso de gás natural** atual
- Plano para **100% de biometano até 2030**
- Potencial de biometano para a Yara realizado pelo **GBIO/USP**
- Biometano será injetado na malha de gás da Comgás entregue indiretamente à Yara (mercado livre)
- **Economia circular**: estudos para caminhões a biometano para transportar o fertilizante

Yara Fertilizantes to deliver first Brazilian green ammonia by end-2023



# Do etanol ao hidrogênio: visando *eficiência e veículos pesados*

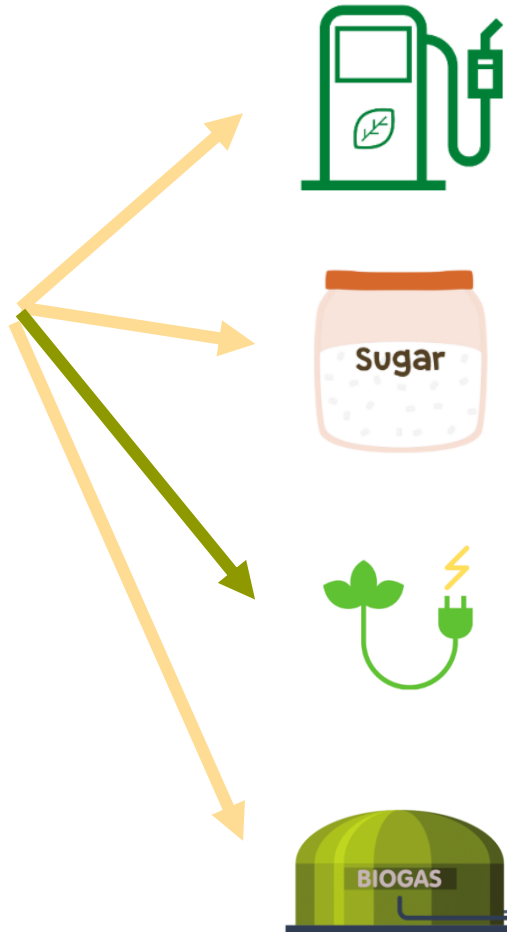


# Setor sucroenergético: portfólio de produtos



**9,4 Mha**  
de área cultivada  
com cana (2019)

**1,1% do Brasil**  
(851 Mha)



## 26.8 Mm<sup>3</sup> de etanol (1G + 2G)

- 38% da demanda energética dos veículos leves

## 42 Mton de açúcar

- 23% da produção global (179 Mton)
- Maior produtor do mundo
- 1<sup>st</sup> em exportação líquida
  - 32 Mton (76% da produção nacional)

## 39 TWh de geração elétrica

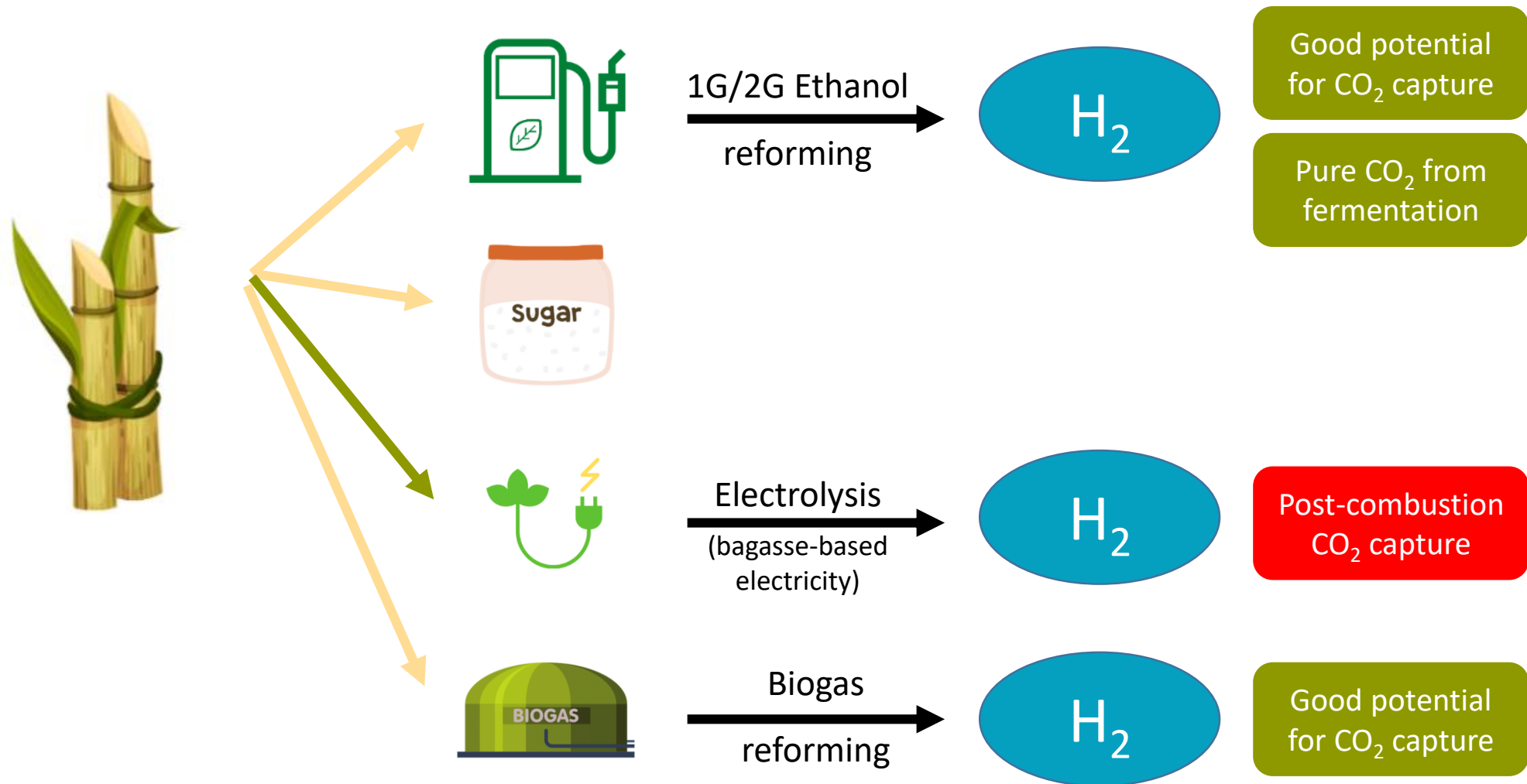
- 6.3% da oferta nacional (626 TWh)
- 16 TWh (41%) para autoconsumo

## Novo produto: Biogás / Biometano

- 2 plantas em escala comercial em operação
  - 1 CHP: 20 MWe
  - 1 de biometano com gasoduto de distribuição dedicado
- Novas plantas em construção

Fontes:  
MapBiomas (2021)  
EPE (2021)  
CONAB (2021)  
USDA (2021)

# Repensando o portfólio com H<sub>2</sub> e BECCS



# Potencial de H<sub>2</sub> do setor sucroenergético no Brasil

Fonte: Coelho, Mascarenhas, Stuchi, Meneghini, 2022

1. Reforma do etanol (1G/2G)
2. Eletrólise da geração elétrica excedente
3. Reforma do biogás

Matéria-prima	Potencial	Potencial H <sub>2</sub> (kg/tc)	Potencial H <sub>2</sub> por área (kg/ha)
Cana	80 t/ha	-	-
Etanol 1G	40 l/tc*	5,25	420
Etanol 2G	23 l/tc	3,03	242,4
Eletricidade excedente	49 kWh/tc	0,89	71,2
Biogás	8,9 Nm <sup>3</sup> <sub>CH<sub>4</sub></sub> /tc	0,92	73,6
<b>Total</b>	-	<b>10.09</b>	<b>807,2</b>

Incentivos adequados

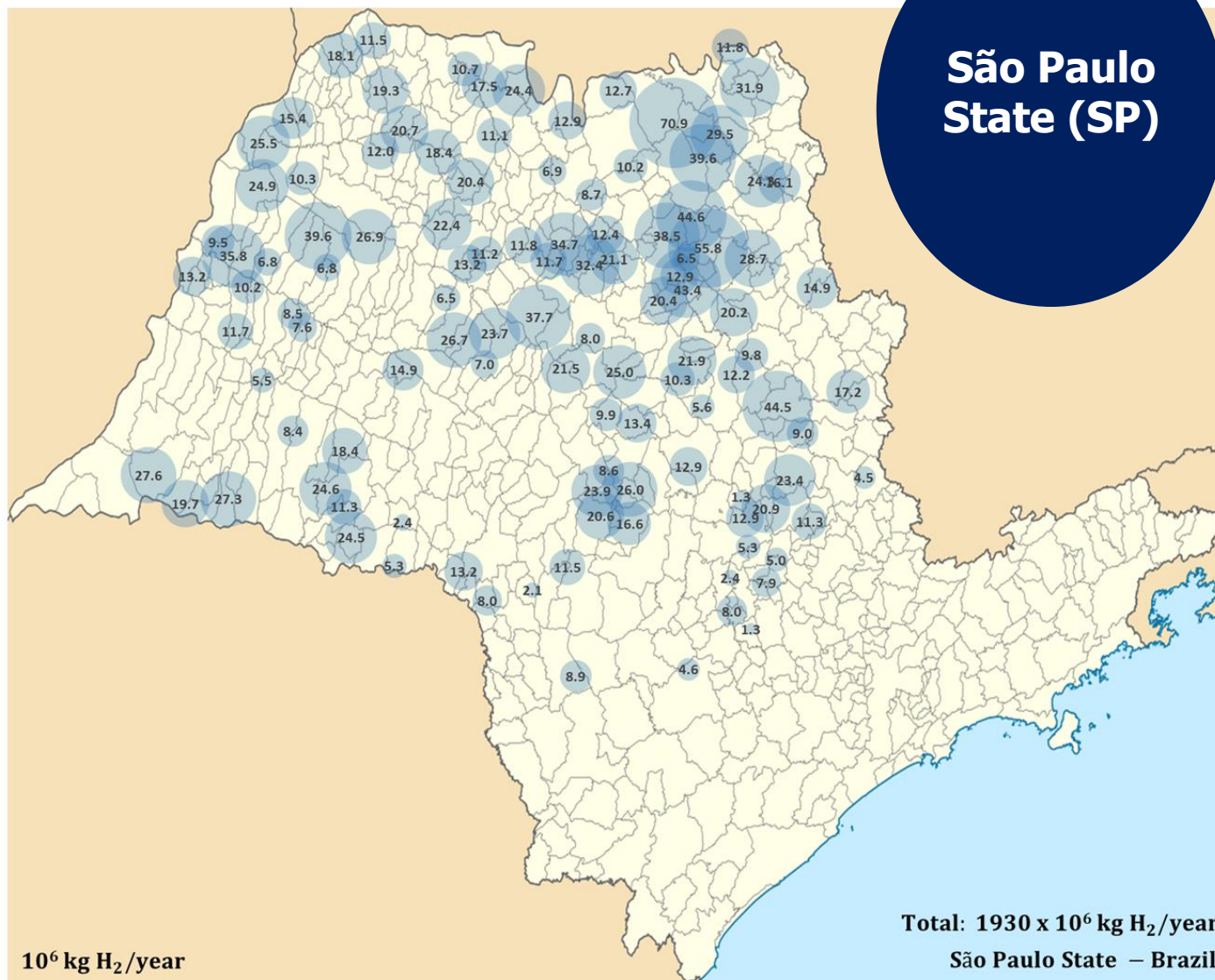
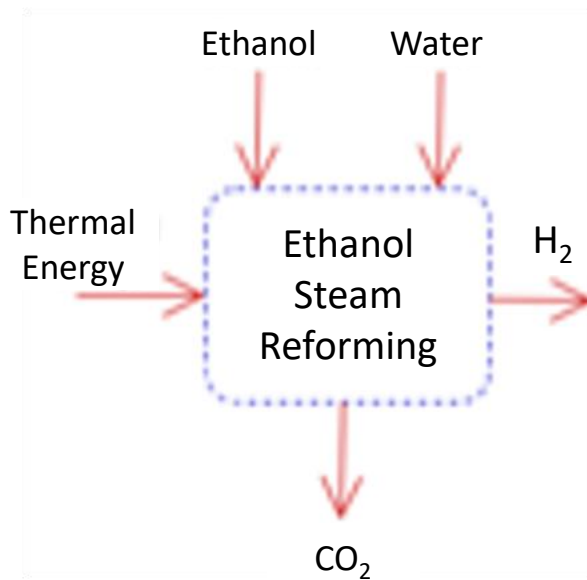


Produção de cana (20/21) = 654 MM t cana  
**Potencial de hidrogênio = 6.54 MM t H<sub>2</sub>**

\*destilaria anexa típica; destilaria autônoma: ~ 80 l/tc, 10,5 kg H<sub>2</sub>/tc

São Paulo State (SP)

Reforma a Vapor do Etanol



1930 x 10<sup>6</sup> kg H<sub>2</sub>/year<sup>-1</sup> - São Paulo State



# **OUTRAS ROTAS PARA HIDROGENIO DA BIOMASSA**

# H<sub>2</sub> da reforma do biogás: em desenvolvimento



GNR Fortaleza – aterro de Caucaia

- 15% do suprimento da CEGAS distribuidora
- 90.000 m<sup>3</sup>/dia de biometano de RSU
- **Potencial para 18.000 kg/dia de H<sub>2</sub>**

**Ceará quer usar biometano para produzir hidrogênio limpo**

EPBR, 12 Janeiro 2022

**O Governador do Ceará defende que CEGÁS distribua Hidrogênio Verde no futuro**

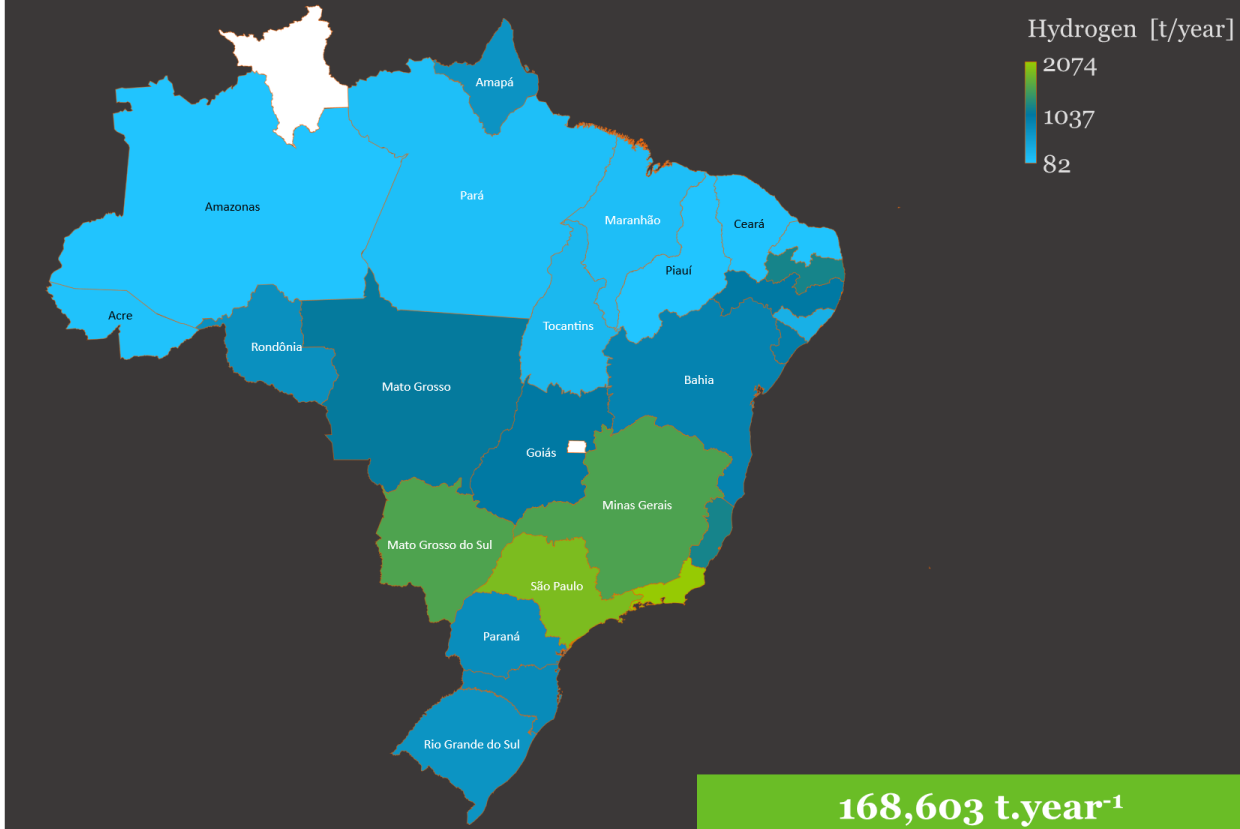
CEGÁS, 19 Fevereiro 2021

# Estudo do Potencial Técnico de produção de Hidrogênio a partir de Resíduos Sólidos Urbano no estado de São Paulo

Estimativas preliminares

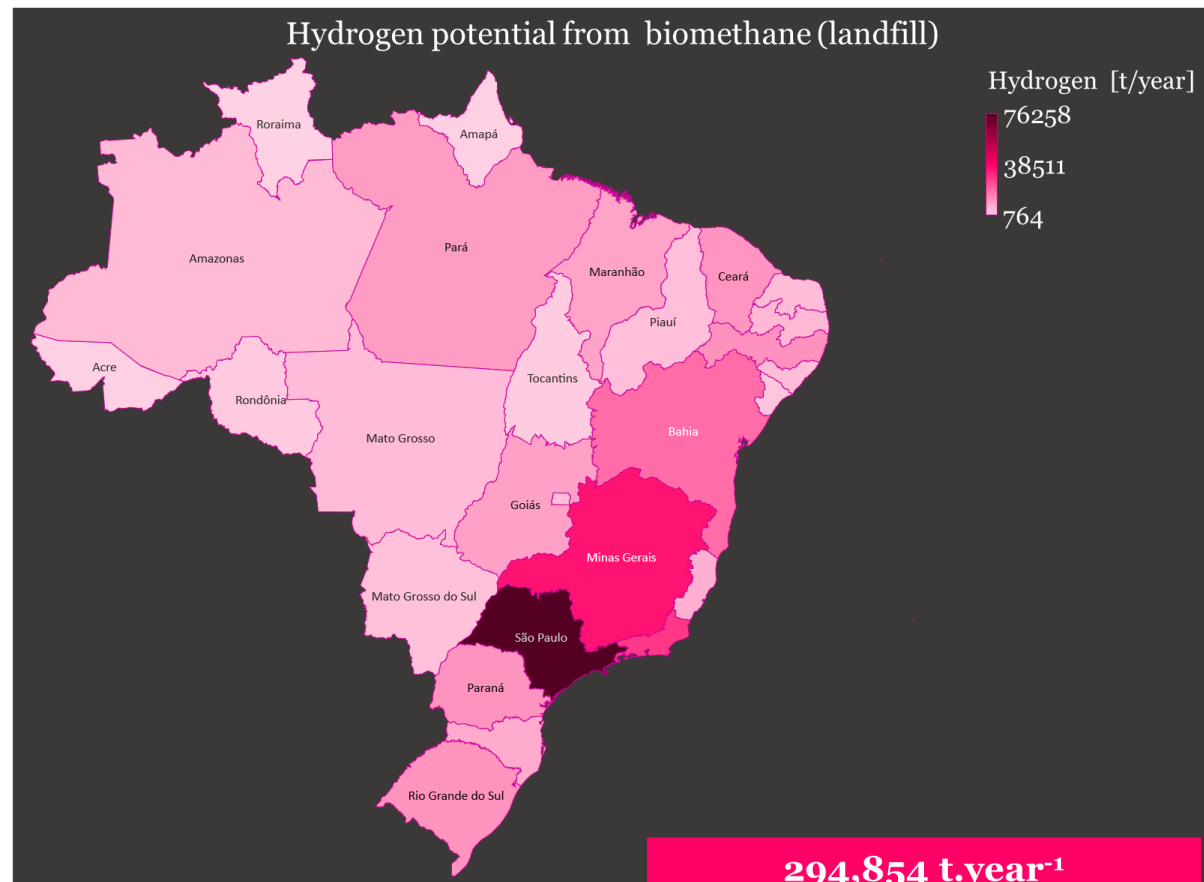
Pos doutoranda Andrea Gutierrez

### Hydrogen potential from MSW Gasification



**168,603 t.year<sup>-1</sup>  
Brazil**

### Hydrogen potential from biomethane (landfill)



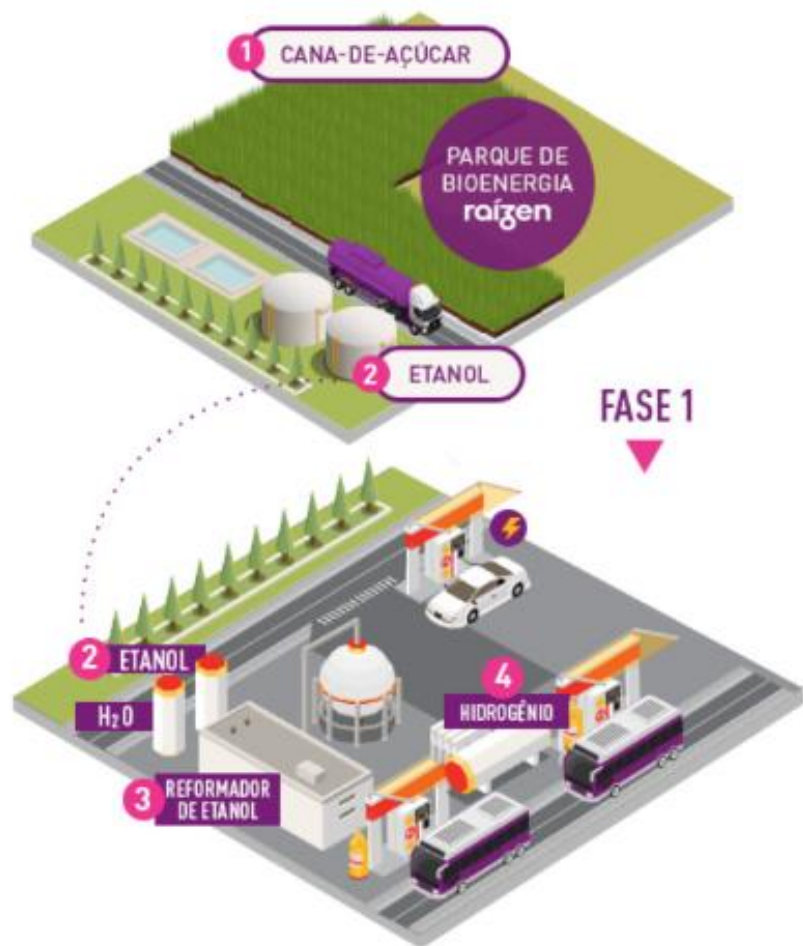
**294,854 t.year<sup>-1</sup>  
Brazil**

# Shell, Raízen, Hytron, Senai-CETIQT e RCGI-USP (2023): Parceria para converter etanol em H<sub>2</sub> que abastecerá ônibus

ESTAÇÃO DE ABASTECIMENTO (HRV)

Cidade Universitária / USP (2023)

🕒 SEPTEMBER 2, 2022



## Quatro etapas:

1. Processamento da cana na usina produzindo etanol (+ açúcar, + eletricidade, + biometano)
2. Etanol é transportado até o posto na USP e é armazenado
3. Reforma a vapor do etanol produz H<sub>2</sub> *on-site*
  - 1 planta piloto de 4,5 kg H<sub>2</sub>/h
  - ca. 38.5 L etanol/h, 45 L água/h
  - Expansão prevista (10 x)
4. H<sub>2</sub> é comprimido e armazenado, pronto para o abastecimento
  - Potencial para abastecer 4 ônibus do campus; 8 km/kg H<sub>2</sub>

**Investimento de R\$ 50 milhões (Shell via PD&I ANP)**

**Lançamento em 10/AGO/2023**

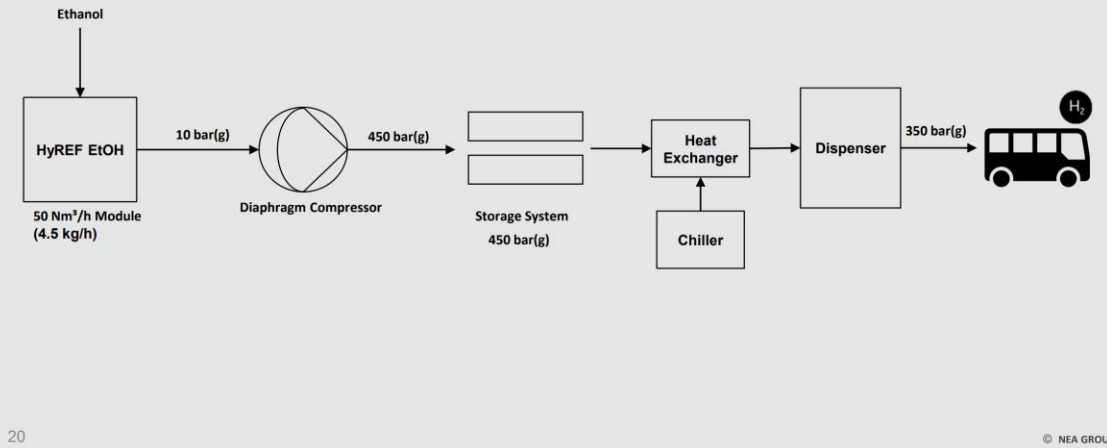
**Previsão de operação: 2º sem/2024**

# Shell, Raízen, Hytron, Senai-CETIQT e RCGI-USP (2023)



em

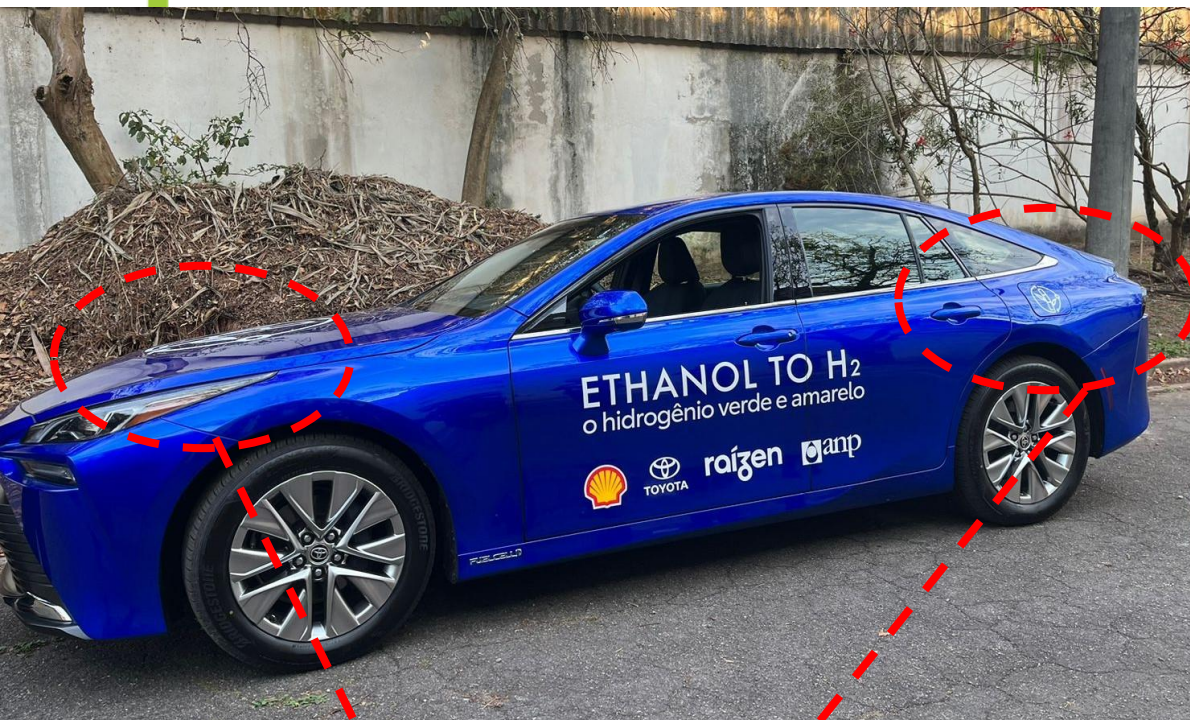
## Ethanol for H<sub>2</sub> Production Phase 1



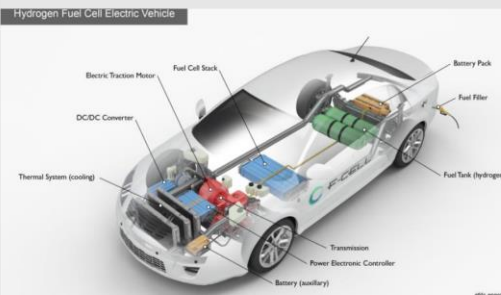
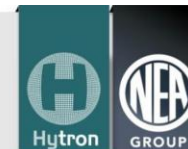
Lançamento em 10/AGO/2023

# Ethanol to H<sub>2</sub> – Mirai Toyota in Brazil

🕒 SEPTEMBER 2, 2022



## CHARACTERISTICS WITH THE USE OF ETHANOL



- ✓ 7.6 liters of ethanol produces 1 kg of H<sub>2</sub> (Hytron Reformer)
- ✓ H<sub>2</sub> storage in the car ranges from 5 kg to 7.5 kg H<sub>2</sub>
- ✓ Autonomy: 1,360 km with 5,65 kg H<sub>2</sub> (Toyota Mirai Record)
- ✓ **ETHANOL Consumption: ~43 liters**
- ✓ 43 liters of Ethanol → 1,360 km (~31,6 km/L)
- ✓ Refueling time: 6 min

**THIS IS JUST THE BEGINNING!**

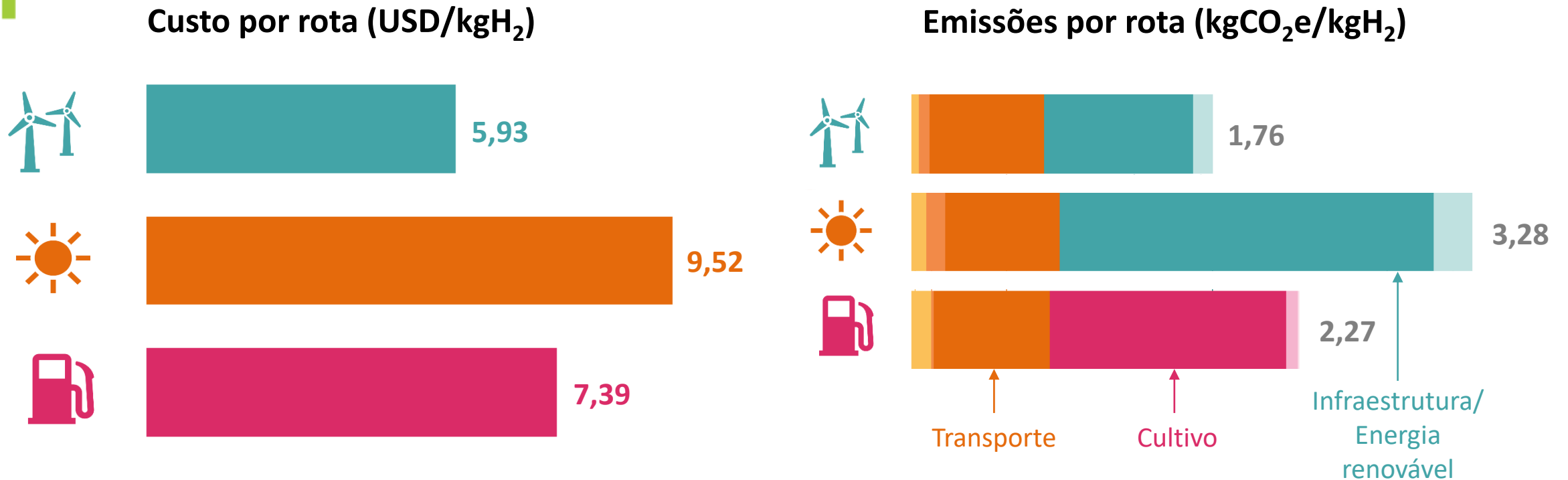
17

© NEA GROUP

240 km/kg H<sub>2</sub>



# Custos e emissões: reforma do etanol vs. eletrólise



H<sub>2</sub> da reforma do etanol é competitivo e de baixo carbono, segundo estudo da WWF-Brasil (2023)

Estudo da McKinsey (2021) também indica competitividade atual

Fonte das figuras:  
adaptado da WWF-Brasil (2023)



# Research Centre for Greenhouse Gas Innovation

**OBRIGADA!**

[suani@iee.usp.br](mailto:suani@iee.usp.br)

[www.iee.usp.br/gbio](http://www.iee.usp.br/gbio)

 [usp.br/rcgi](http://usp.br/rcgi)

 [linktr.ee/rcgi](https://linktr.ee/rcgi)

## ACKNOWLEDGMENTS:

The authors gratefully acknowledge the support of the RCGI – Research Centre for Greenhouse Gas Innovation, hosted by the University of São Paulo (USP) and sponsored by FAPESP – São Paulo Research Foundation (2020/15230-5 and 2014/50279-4) and Shell Brasil, and the strategic importance of the support given by ANP (Brazil's National Oil, Natural Gas and Biofuels Agency) through the R&DI levy regulation.







## **Estação de abastecimento de hidrogênio para Pesquisa & Desenvolvimento será construída na USP**

*Projeto pretende validar etanol como vetor para gerar hidrogênio renovável*

**São Paulo, 10 de agosto de 2023** – Nesta quinta-feira, na Cidade Universitária da USP, na capital paulista, foi dado o pontapé para a construção da primeira estação experimental de abastecimento de hidrogênio (H<sub>2</sub>) renovável do mundo a partir do etanol. A planta-piloto ocupará uma área de 425 metros quadrados e terá capacidade de produzir 4,5 quilos de H<sub>2</sub> por hora, dedicada ao abastecimento de até três ônibus e um veículo leve. O projeto de Pesquisa & Desenvolvimento tem investimento total de R\$ 50 milhões da Shell Brasil, obtido com recursos da cláusula de PD&I da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Como parceiros, participam no desenvolvimento da estação a Hytron, a Raízen, o SENAI CETIQT, a Universidade de São Paulo, através do Centro de Pesquisa para Inovação em Gases de Efeito Estufa (RCGI). Ainda, para testar a viabilidade desse projeto, as partes assinaram um memorando de entendimento junto com a Toyota. A previsão é de que a estação experimental esteja operando no segundo semestre de 2024.

“O objetivo desse projeto inovador é tentar demonstrar que o etanol pode ser vetor para hidrogênio renovável, aproveitando a logística já existente da indústria. A tecnologia poderá ajudar a descarbonizar setores que consomem energia proveniente de combustíveis fósseis”, afirmou o presidente da Shell Brasil, Cristiano Pinto da Costa.

No conjunto de equipamentos que serão instalados no local, haverá um reformador a vapor de etanol desenvolvido e fabricado pela empresa Hytron. É nesse equipamento que irá ocorrer a conversão do etanol em hidrogênio por meio de um processo químico chamado ‘reforma a vapor’, que é quando o etanol, submetido a temperaturas e pressões específicas, reage com água dentro de um reator. “Estamos unindo a tecnologia brasileira pioneira da Hytron para demonstrar uma solução disruptiva, onde o hidrogênio produzido do etanol passa a ter um papel ainda mais relevante e de elevado impacto para a transição energética do país e do mundo”, aponta Daniel Lopes, Diretor Comercial da Hytron.

Ao longo do funcionamento da estação experimental, os pesquisadores vão validar os cálculos sobre as emissões e custos do processo de produção de hidrogênio. “Nossa estimativa no

momento é de que o custo da produção de hidrogênio a partir de etanol é comparável ao custo do hidrogênio de reforma do gás natural no contexto brasileiro. Já as emissões são comparáveis ao processo que realiza a eletrólise da água alimentada com energia elétrica proveniente de fonte eólica”, afirma Julio Meneghini, diretor científico do RCGI.

O etanol necessário para a produção de hidrogênio será fornecido pela Raízen, maior produtora global de etanol da cana-de-açúcar. Hoje, o deslocamento do etanol do local de produção até o destino é feito em caminhões-tanque, que têm capacidade para armazenar 45 mil litros, o equivalente a aproximadamente 6.000 kg de hidrogênio. Esse mesmo veículo conduzindo como carga hidrogênio comprimido conseguiria transportar somente 1.500 kg de hidrogênio, ou seja, 4 vezes menos. Outro ganho trazido por essa solução é a facilidade de se replicar a tecnologia globalmente, devido ao baixo custo de transporte do biocombustível. O CEO da Raízen, Ricardo Mussa, acredita “que o hidrogênio renovável produzido a partir do etanol terá uma participação relevante na matriz energética nas próximas décadas, principalmente por reduzir significativamente os desafios envolvidos no transporte e distribuição do produto, que pode aproveitar a infraestrutura do etanol já existente nos postos, garantindo o abastecimento de veículos de forma rápida, sustentável e segura”.

O Instituto SENAI de Inovação em Biossintéticos e Fibras do SENAI CETIQT irá fazer simulações computacionais para tornar o equipamento mais eficiente, identificando oportunidades de aperfeiçoamento e aumentando a taxa de conversão do etanol em hidrogênio renovável. “Estamos entusiasmados em fazer parte deste projeto revolucionário. Com nosso foco em soluções avançadas e bioeconomia, trabalharemos em estreita colaboração com os parceiros para otimizar o reformador de etanol, contribuindo para tornar essa tecnologia promissora uma realidade para o Brasil e o mundo”, afirma João Bruno Bastos, gerente do Instituto.

O hidrogênio produzido na estação vai abastecer os ônibus cedidos pela Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (EMTU/SP). Eles vão circular exclusivamente dentro da cidade universitária. Para testar a performance do hidrogênio, a Toyota cedeu ao projeto o ‘Mirai’ - primeiro veículo a hidrogênio do mundo comercializado em larga escala, cujas baterias são carregadas a partir da reação química entre hidrogênio e oxigênio na célula combustível (Fuel Cell Electric Vehicle). “O Brasil é um país com forte vocação para biocombustíveis. Entendemos o hidrogênio como uma fonte de energia limpa e renovável, que tem um papel importante nos esforços para reduzir as emissões de CO2. A parceria neste projeto é o primeiro passo da empresa para testar o uso dessa nova tecnologia

no país. Temos interesse e disposição para trabalhar em conjunto com o governo do Estado para viabilização do transporte sustentável com uso do hidrogênio renovável a partir do etanol” destaca Rafael Chang, presidente da Toyota do Brasil.

**Para mais informações:**

**Assessoria de Imprensa Shell Brasil**

[imprensa@shell.com](mailto:imprensa@shell.com)

**Edelman**

[assessoria-shell@edelman.com](mailto:assessoria-shell@edelman.com)

Vídeo da simulação de estação de reabastecimento de hidrogênio a partir de etanol vista por drone:

<https://www.youtube.com/watch?v=IVGZhX7Lncw>

**CERIMÔNIA DE LANÇAMENTO DA PLACA INAUGURAL  
DA ESTAÇÃO DE REABASTECIMENTO DE HIDROGÊNIO (Ethanol to H2)**

**Data:** 10 de agosto – 14h

**Local:** USP - Auditório da Poli- Mecânica, Mecatrônica e Naval - Av. Prof. Mello Moraes, 2231

**A G E N D A**

**1. ABERTURA DO EVENTO NO AUDITÓRIO para todos os convidados 14:15**

**Cerimônia – ordem:**

**1.1 Abertura - 10 minutos**

Vídeo do Projeto Ethanol da Shell

Depois do vídeo, palavras Prof. Julio Romano Meneghini – Diretor Executivo & Científico do RCGI

**1.2 Chamada das autoridades e representantes das empresas para o palco 30 minutos 14:25**

Marcopolo - Renato Machado Florence - Gerente de Planejamento e Desenvolvimento

Toyota do Brasil - Rafael Chang - Presidente

Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (Senai-CETIQT) – Gustavo Leal – Diretor de Operações do SENAI Nacional

Hytron - Marcelo Luiz Moreira Veneroso – Presidente da NEA BRASIL e CEO da HYTRON

Raízen - Ricardo Dell Aquila Mussa – CEO

Conselho de Administração da Cosan e da Raízen - Rubens Ometto - Presidente

Shell - Cristiano Pinto da Costa – Presidente Shell Brasil

Research Centre for Greenhouse Gas Innovation (RCGI) – Julio Romano Meneghini – Diretor Executivo & Científico

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - Marco Antonio Zago - Presidente

Secretaria de Estado de Ciência, Tecnologia e Inovação - Vahan Agopyan – Secretário

Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) – Daniel Maia – Diretor

Universidade de São Paulo (USP) - Carlos Gilberto Carlotti Júnior - Reitor

Governo do Estado de São Paulo - Tarcísio Gomes de Freitas - Governador

**1.3 Palavras para as autoridades (3 minutos cada):**

1. Raízen – Ricardo Dell Aquila Mussa - CEO
2. Shell - Cristiano Pinto da Costa – Presidente Shell Brasil
3. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - Marco Antonio Zago - Presidente
4. Secretaria de Estado de Ciência, Tecnologia e Inovação - Vahan Agopyan - Secretário
5. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) – Daniel Maia – Diretor
6. Universidade de São Paulo (USP) - Carlos Gilberto Carlotti Júnior - Reitor

**1.4 Placa, entrega de chaves e maquete 15 minutos (5 para cada) 14:55**

7. Marcopolo entrega maquete do ônibus

(Governador, Secretário, FAPESP, USP, RCGI, Marcopolo, EMTU)

8. Toyota realiza a entrega simbólica da chave do Mirai

(Governador, Secretário, USP, RCGI, FAPESP, Toyota)

9. Descerramento da placa inaugural

(Governador, Secretário, USP, RCGI, ANP, FAPESP, Shell, Raízen, Senai, Hytron e Toyota)

## 1.5 Palavras do Governador

10. Governador do Estado de São Paulo - Tarcísio Gomes de Freitas

<b>COLETIVA DE IMPRENSA (Governador + representantes das instituições e empresas)</b>	<b>30 minutos</b>	<b>15:10</b>
<b>Coffee break na saída do Auditório</b>	<b>20 minutos</b>	<b>15:10</b>
Público poderá seguir para o Mirai e o ônibus e na entrada do prédio		
<b>2. DEMONSTRAÇÃO do Toyota “Mirai” movido à hidrogênio</b>	<b>10 minutos</b>	<b>15:40</b>
<b>3. DEMONSTRAÇÃO do ônibus movido à hidrogênio</b>	<b>10 minutos</b>	<b>15:50</b>
<b>4. ENCERRAMENTO DO EVENTO</b>		<b>16:00</b>

OBS: O evento será transmitido ao vivo nos canais de YouTube do RCGI e da USP  
<https://www.youtube.com/watch?v=An6qL1PjdfY>

Contatos: Karen Mascarenhas [karenmascarenhas@usp.br](mailto:karenmascarenhas@usp.br) Laura Brizuela [laura.brizuela@usp.br](mailto:laura.brizuela@usp.br)  
[Communication.rcgi@usp.br](mailto:Communication.rcgi@usp.br) Telefone: 2648-6142 / (11)989371776.

Abaixo, mapa com o local do evento e de cada atividade.

