

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

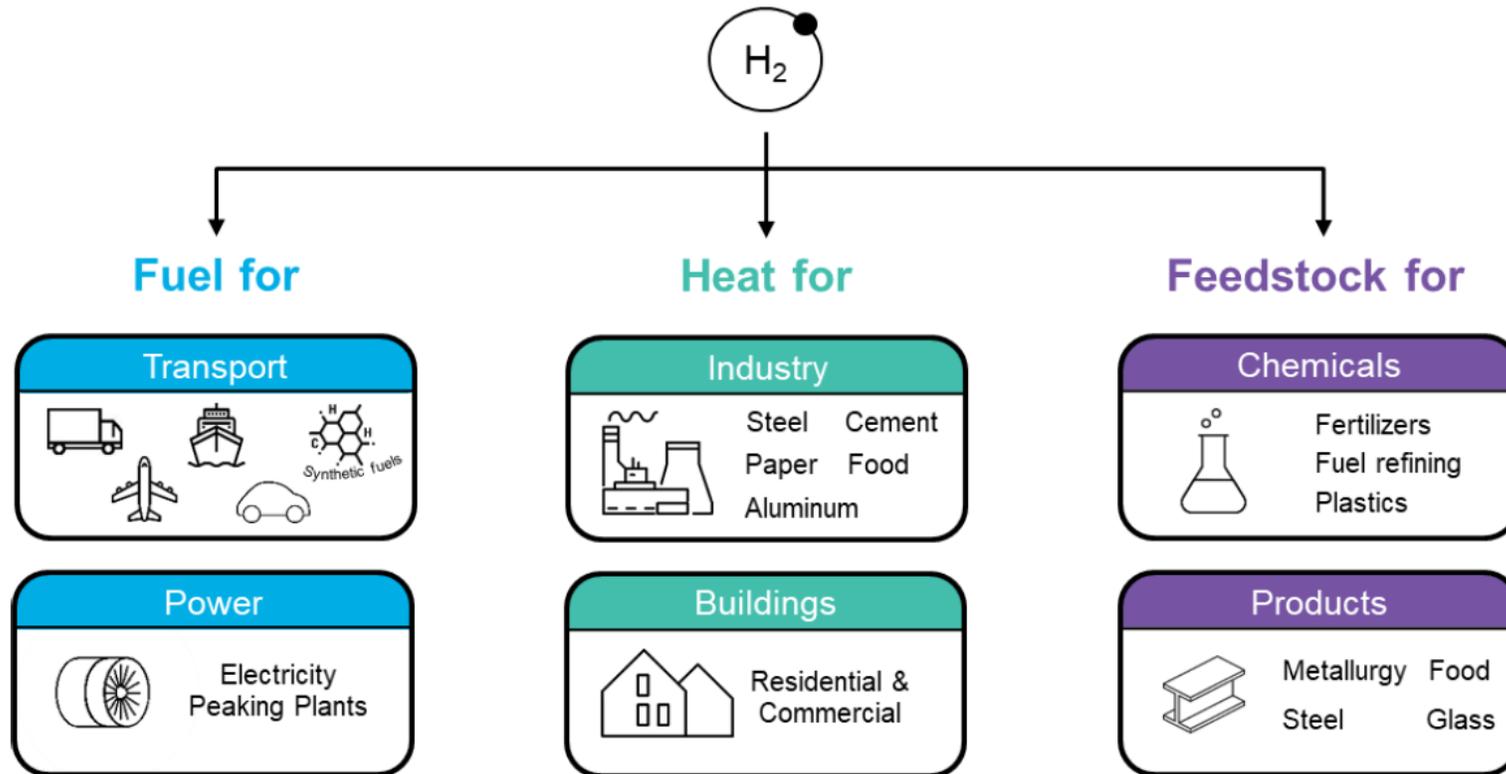


Research Centre for
Greenhouse Gas Innovation

FIESP
Mesa Redonda sobre Hidrogênio Sustentável
11 AGOSTO 2023

Por que o hidrogênio (H₂)?

Potencial de ser o elemento chave da transição energética



Source: BloombergNEF

Cores do H₂

Matérias-primas, tecnologias e emissões de GEE

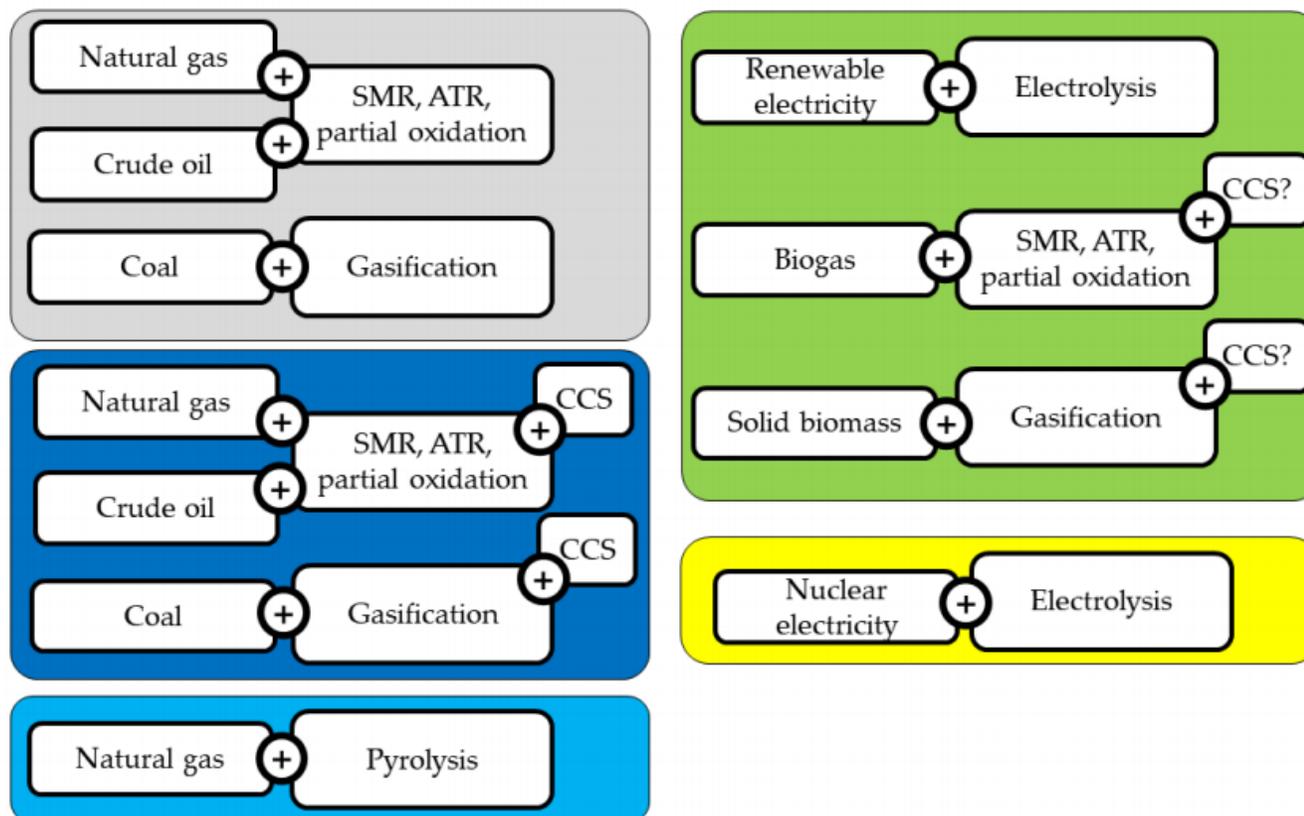


Figure 1. Different hydrogen generation pathways divided by colour. SMR: steam methane reforming, ATR: autothermal reforming, CCS: carbon capture and sequestration.

Global cost of hydrogen production

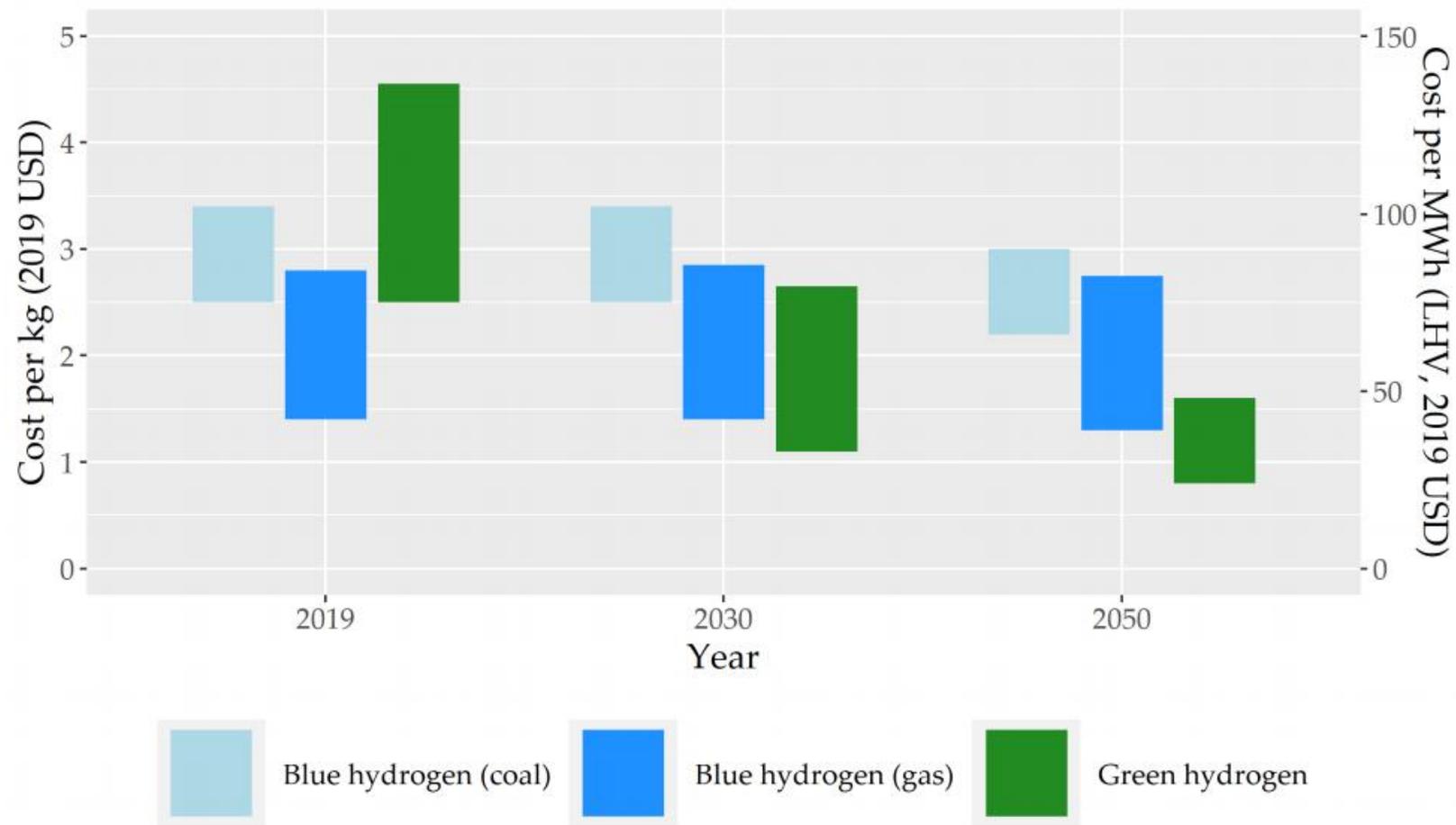
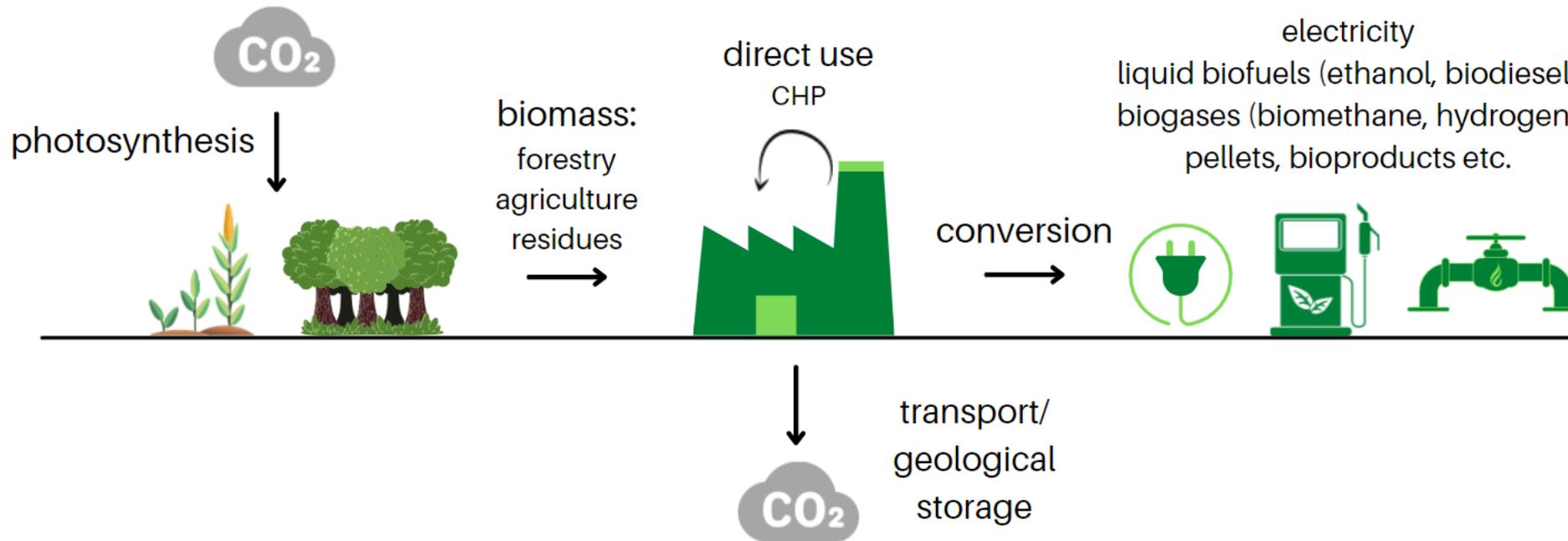


Figure 2. Estimation of future hydrogen costs for different pathways. Energy figures based on hydrogen lower heating value (LHV). Authors' elaboration on BNEF data, 2020 [14].

Repensando os sistemas de bioenergia atuais para produzir H₂ e emissões negativas (com BECCS)



H₂

(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**

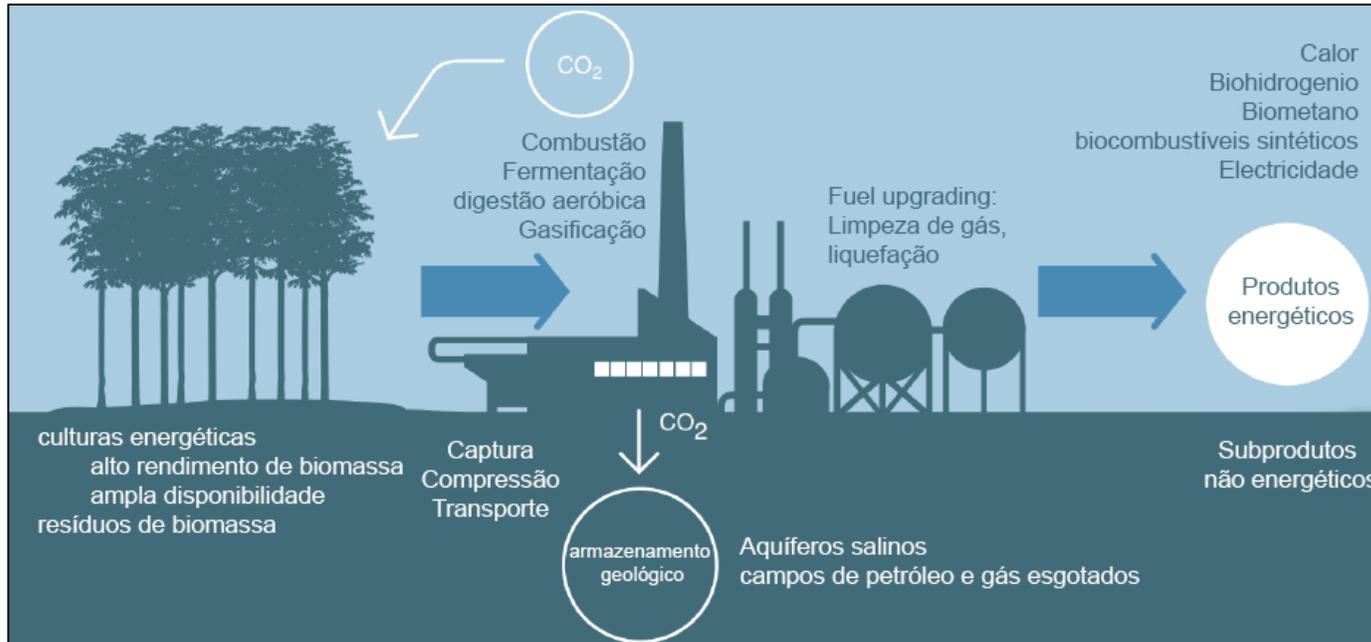
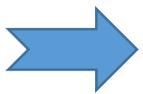


Figura - As possibilidades de um sistema de BECCS



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^a. Dr^a. SUANI T. COELHO, Yanis Targui, 2023

FONTES DE CAPTAÇÃO DE CO₂

(Yanis Targui, EPUSP, 2023)

Processo de fermentação:

- **Fermentação do caldo** para produção de etanol (9% do C da cana)
- CO₂ liberado pelo processo **quase puro** para a captura
- Potencial de captura de 27,7 MtCO₂/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 CO₂ na **purificação/upgrading do biogás**



Figura 5: Processo de fermentação



Figura 6: Bagaço da cana

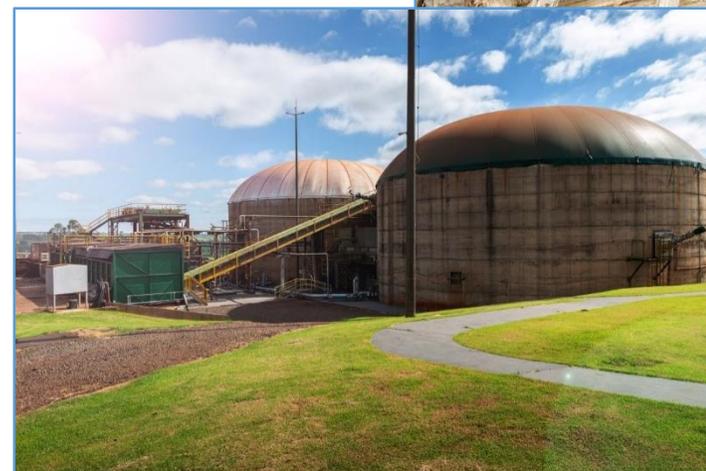
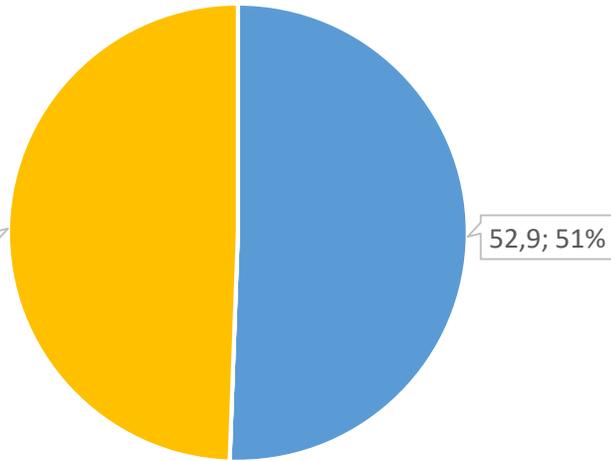


Figura 7: Biodigestor de vinhaça

Captura da fermentação

(Yanis Targui, EPUSP, 2023)



Repartição do CAPEX

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

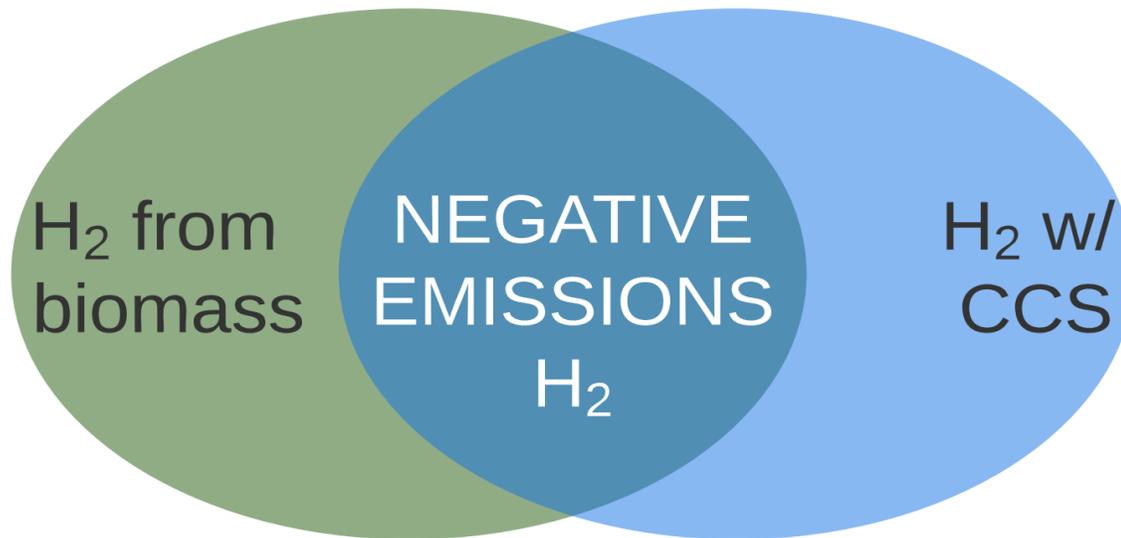
	cenario 1 (Y. Targui, 2023)	(Valencia e Walter. 2018)	(MARACCINI. 2021)
Capacidade de moagem (Mt/ano)	1,6	2	4
CO2 capturado (MtCO2/ano)	0,1	0,13	0,77
CAPEX (M R\$)	120,8	73	100
MVP (R\$/tCO2)	301	123	111

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 H₂ da biomassa



Bioenergia + H₂ + CCS:
Maximização de valor

Por que H₂ 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
 - H₂ 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 H₂**

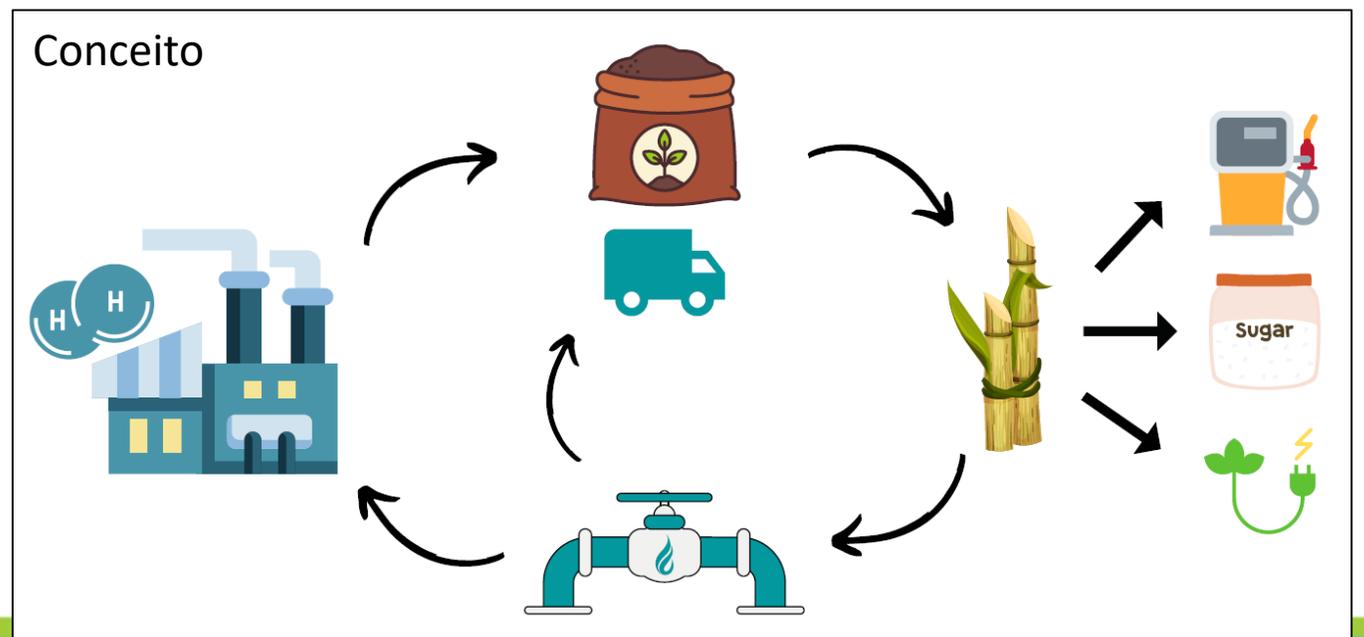


Fonte para os dados de fertilizantes: EPE (2019)

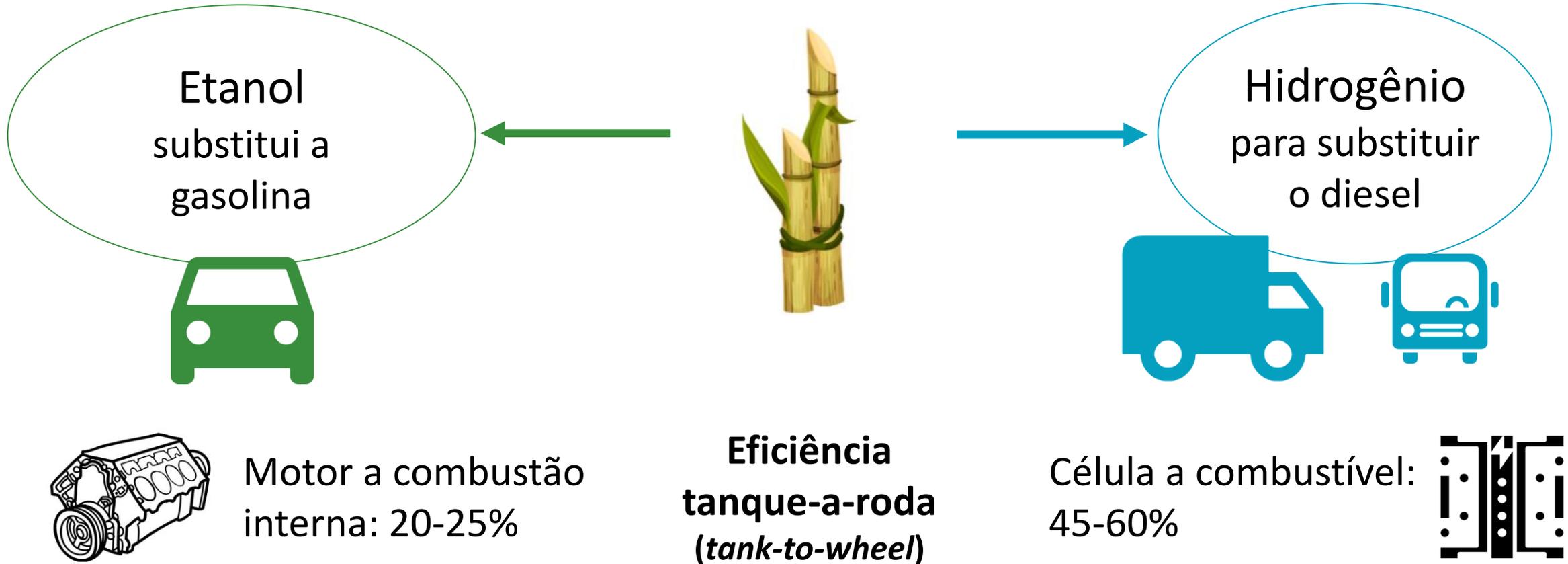
Biometano: o elo de baixo carbono entre as indústrias de cana-de-açúcar e de fertilizantes

- Planta de fertilizantes da Yara anunciou contrato para **20 mil m³/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*

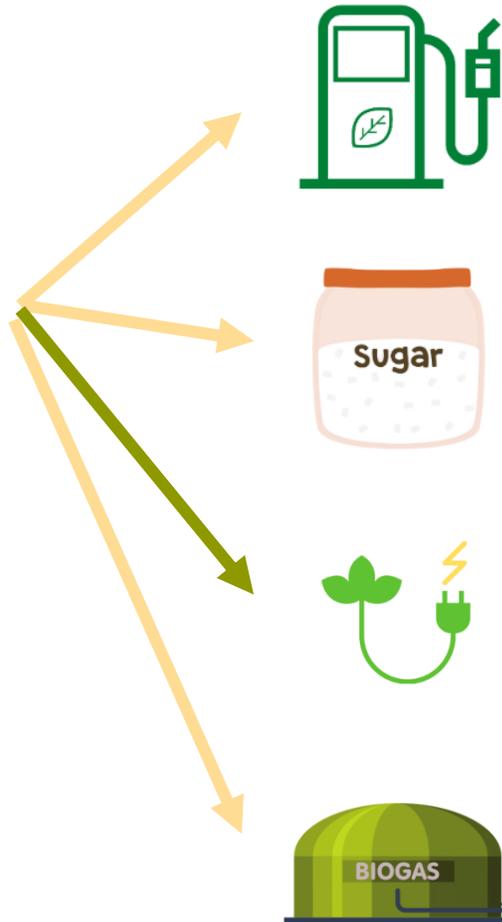


Setor sucroenergético: portfólio de produtos



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

1,1% do Brasil
(851 Mha)



26.8 Mm³ 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
- 1st em exportação líquida
 - 32 Mton (76% da produção nacional)

39 TWh de geração elétrica

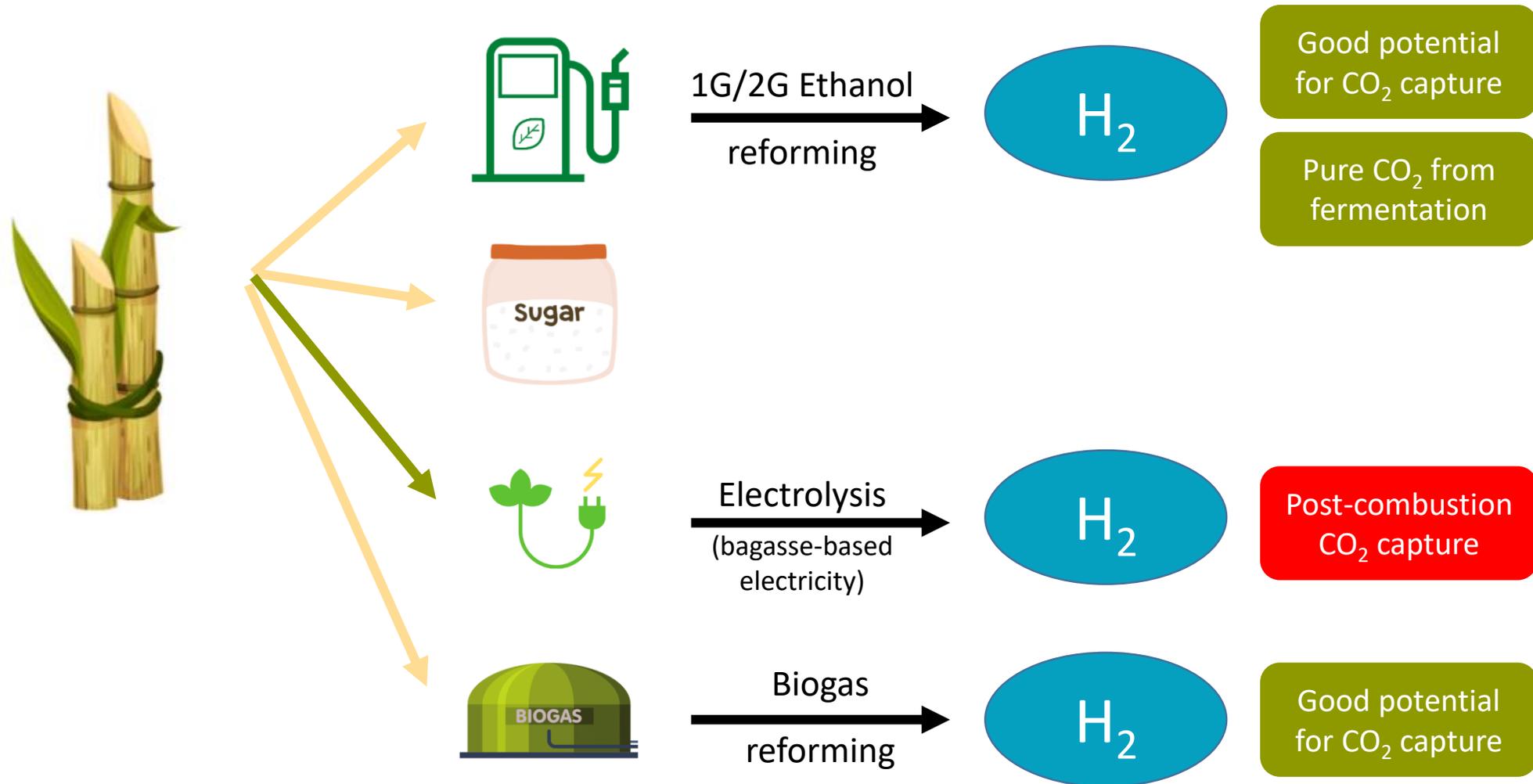
- 6.3% da oferta nacional (626 TWh)
- 16 TWh (41%) para autoconsumo

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 H₂ e BECCS



Potencial de H₂ 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 ₂ (kg/tc)	Potencial H ₂ 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 ³ _{CH₄} /tc	0,92	73,6
Total	-	10.09	807,2

Incentivos adequados



Produção de cana (20/21) = 654 MM t cana
Potencial de hidrogênio = 6.54 MM t H₂

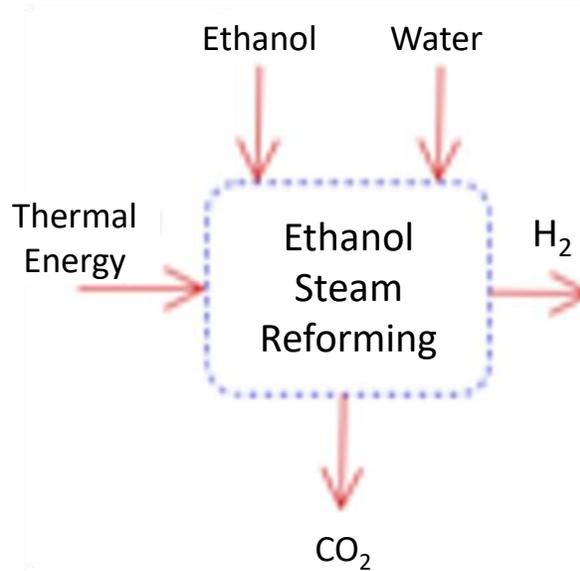
*destilaria anexa típica; destilaria autônoma: ~ 80 l/tc, 10,5 kg H₂/tc

Projetos do Gbio: Setor Sucroalcooleiro

PD Beethoven Narváez

São Paulo State (SP)

Reforma a Vapor do Etanol



10⁶ kg H₂/year

1930 x 10⁶ kg H₂/year⁻¹ - São Paulo State

OUTRAS ROTAS PARA HIDROGENIO DA BIOMASSA

H₂ da reforma do biogás: em desenvolvimento



GNR Fortaleza – aterro de Caucaia

- 15% do suprimento da CEGAS distribuidora
- 90.000 m³/dia de biometano de RSU
- **Potencial para 18.000 kg/dia de H₂**

Ceará quer usar biometano para produzir hidrogênio limpo

EPBR, 12 Janeiro 2022

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

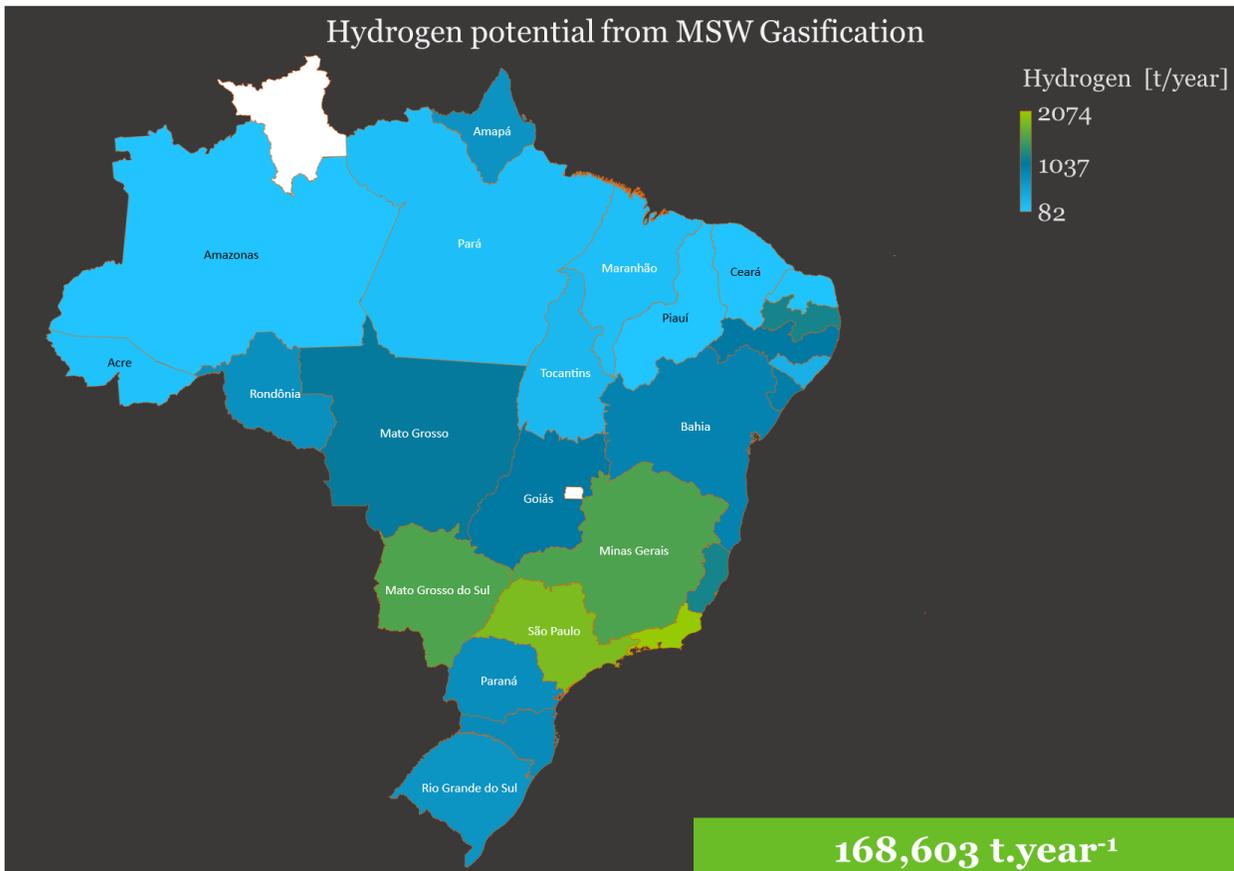
CEGÁS, 19 Fevereiro 2021

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

Estimativas preliminares

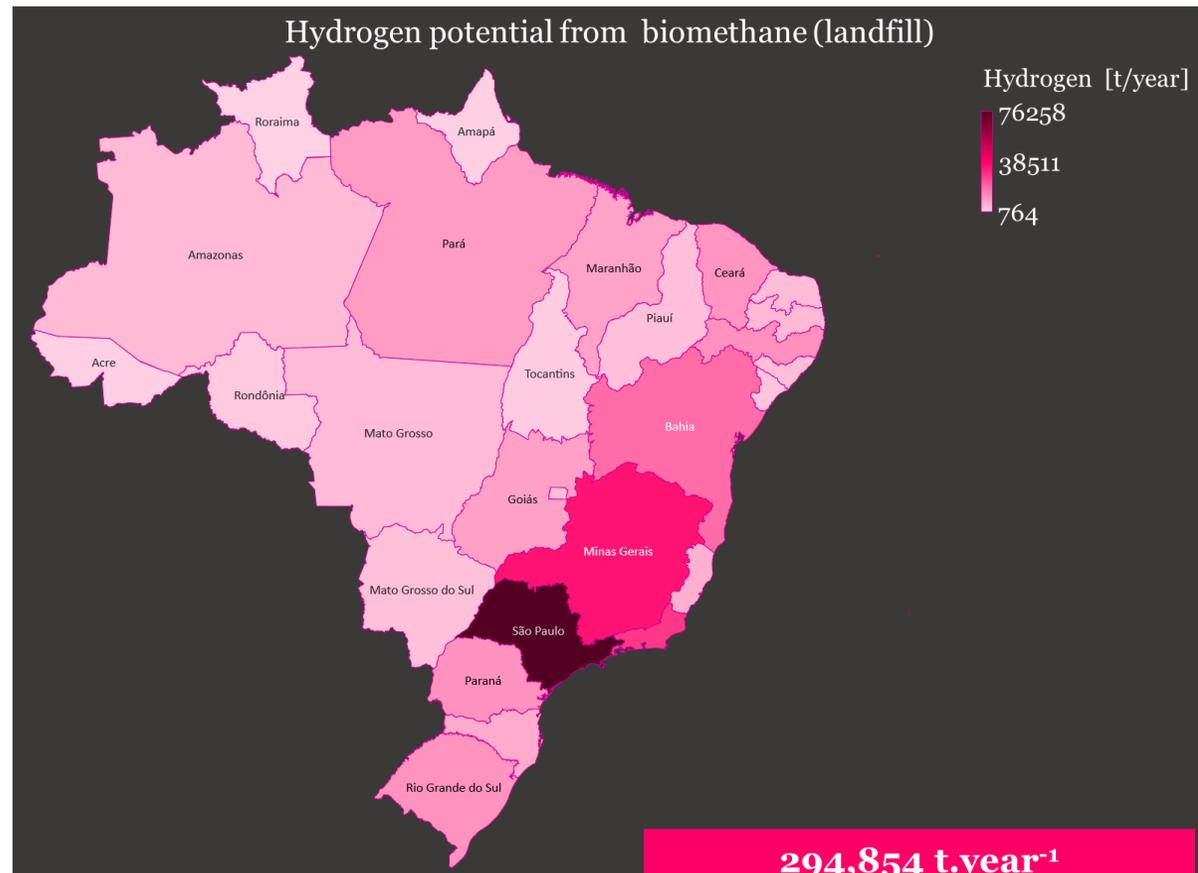
Pos doutoranda Andrea Gutierrez

Hydrogen potential from MSW Gasification



**168,603 t.year⁻¹
Brazil**

Hydrogen potential from biomethane (landfill)



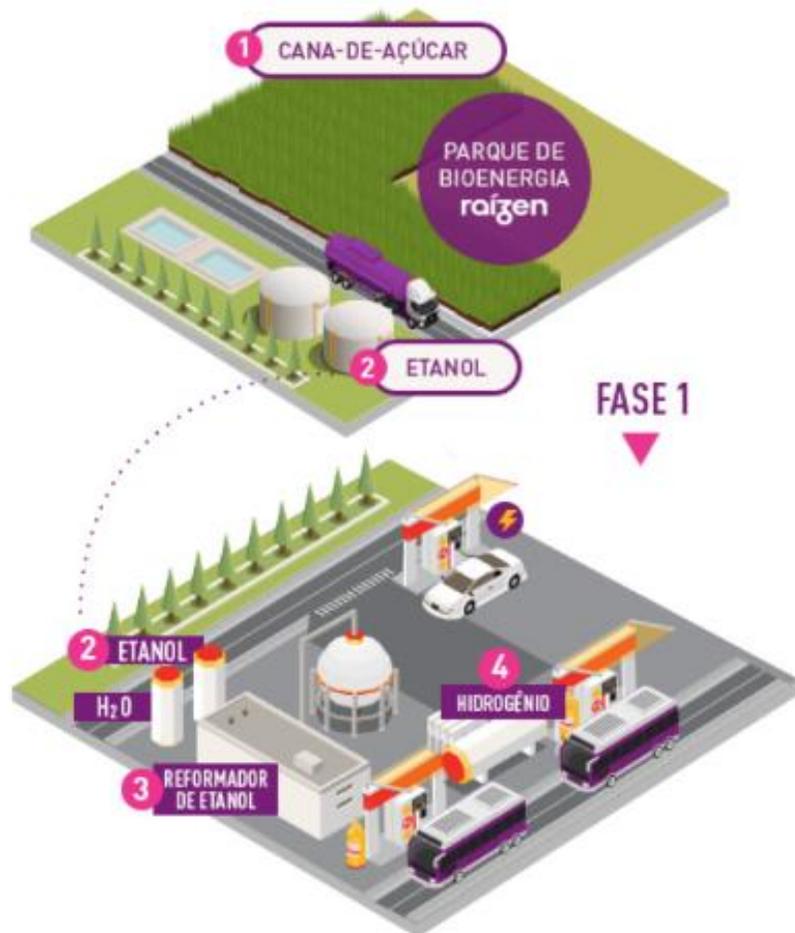
**294,854 t.year⁻¹
Brazil**

Shell, Raízen, Hytron, Senai-CETIQT e RCGI-USP (2023): Parceria para converter etanol em H₂ 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 H₂ *on-site*
 - 1 planta piloto de 4,5 kg H₂/h
 - ca. 38.5 L etanol/h, 45 L água/h
 - Expansão prevista (10 x)
4. H₂ é comprimido e armazenado, pronto para o abastecimento
 - Potencial para abastecer 4 ônibus do campus; 8 km/kg H₂

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

Lançamento em 10/AGO/2023

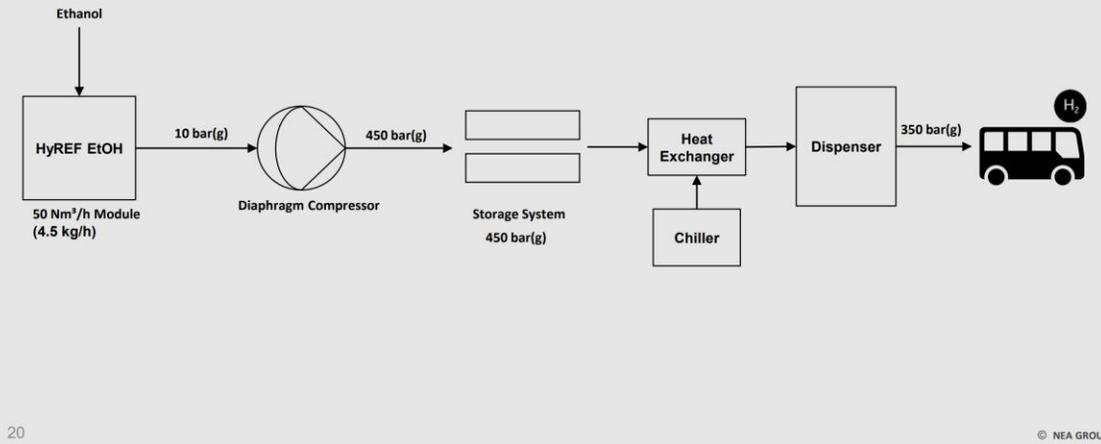
Previsão de operação: 2º sem/2024

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



em

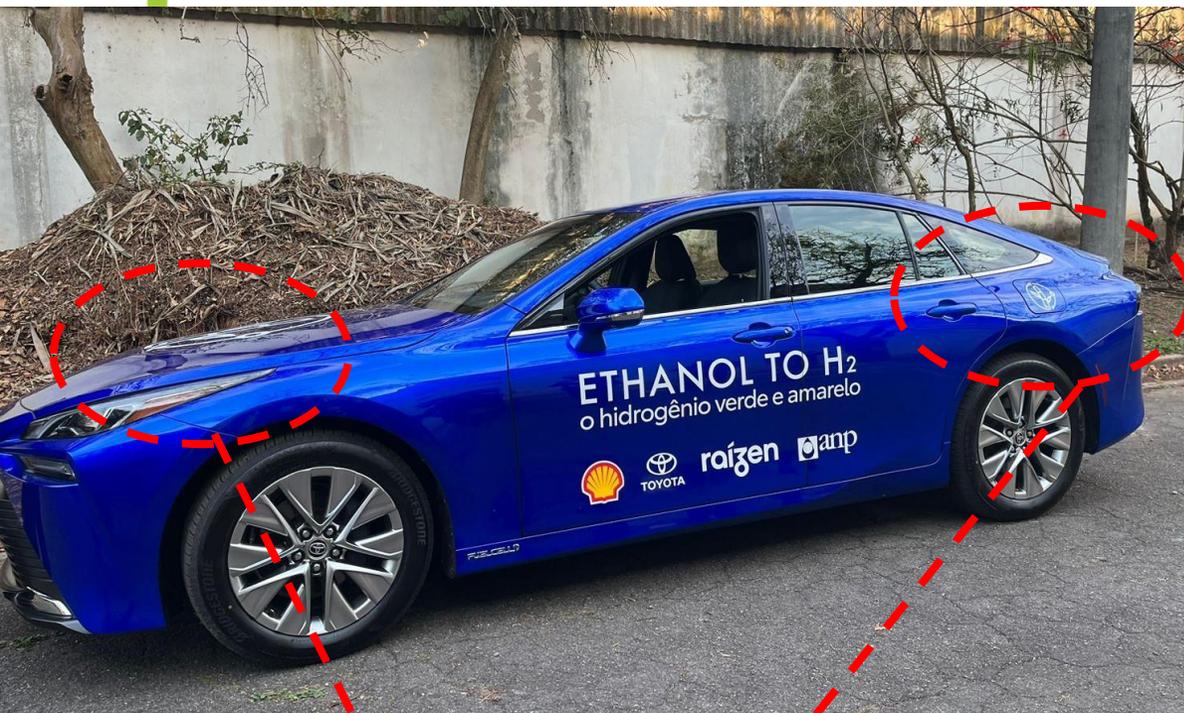
Ethanol for H₂ Production Phase 1



Lançamento em 10/AGO/2023

Ethanol to H₂ – Mirai Toyota in Brazil

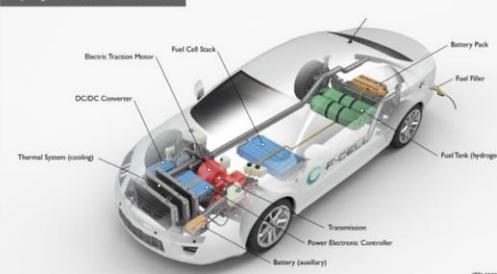
🕒 SEPTEMBER 2, 2022



CHARACTERISTICS WITH THE USE OF ETHANOL



Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle



- ✓ 7.6 liters of ethanol produces 1 kg of H₂ (Hytron Reformer)
- ✓ H₂ storage in the car ranges from 5 kg to 7.5 kg H₂
- ✓ Autonomy: 1,360 km with 5,65 kg H₂ (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

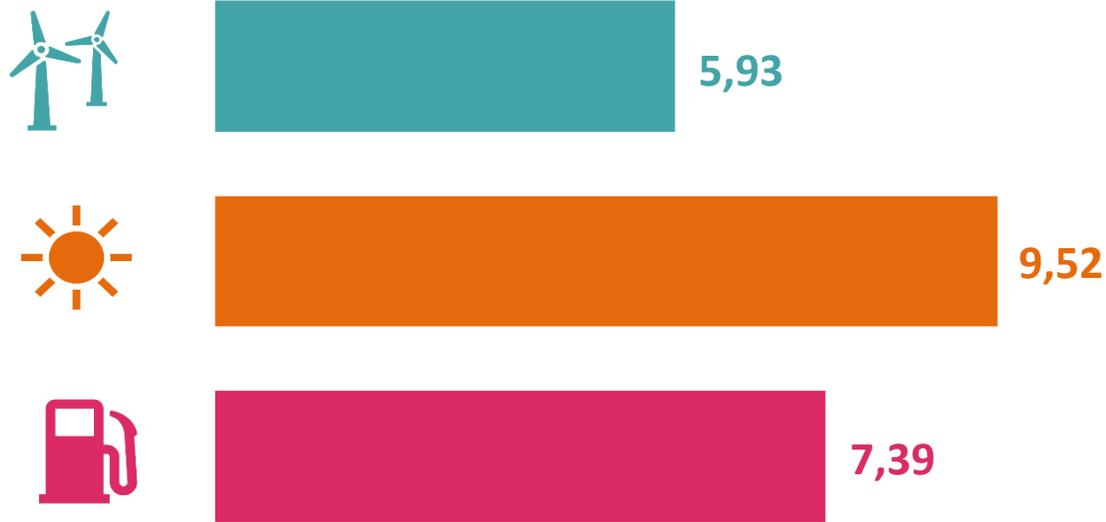
© NEA GROUP

240 km/kg H₂

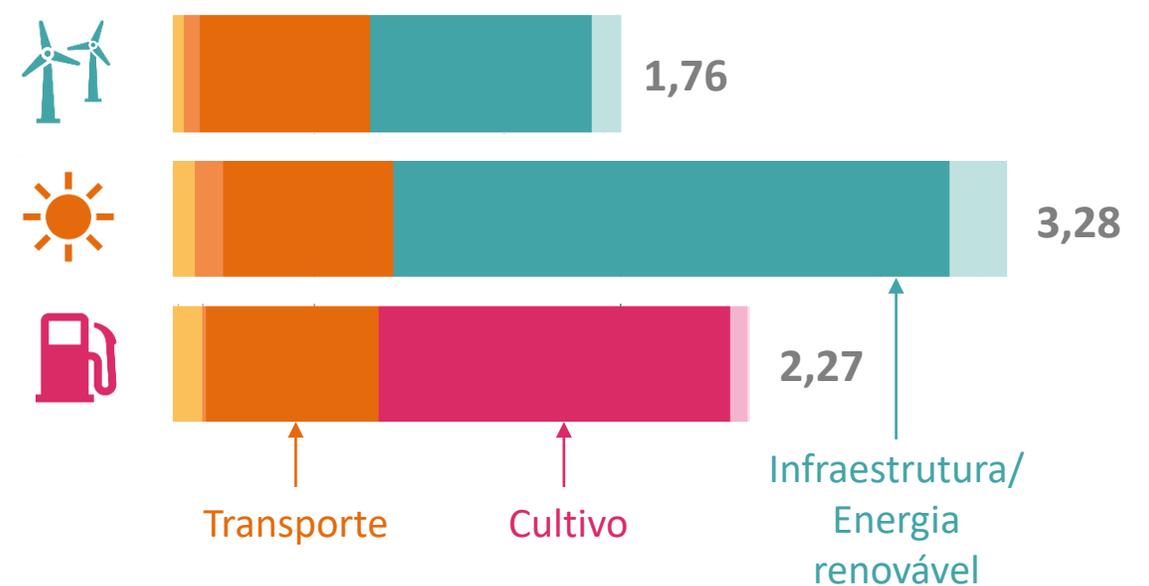


Custos e emissões: reforma do etanol vs. eletrólise

Custo por rota (USD/kgH₂)



Emissões por rota (kgCO₂e/kgH₂)



H₂ 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

www.iee.usp.br/gbio

 usp.br/rcgi

 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 (H₂) 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 H₂ 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

Edelman

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

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

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 Laura Brizuela laura.brizuela@usp.br
Communication.rcgi@usp.br Telefone: 2648-6142 / (11)989371776.

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

