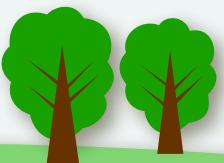


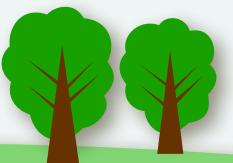
# Energias renováveis, sustentabilidade e hidrogênio verde

Flaviano Williams Fernandes  
Instituto Federal do Paraná, campus Iraty



# Sumário

- Motivação
- ODS
- Pt-X
- H<sub>2</sub>V
- Ensino, pesquisa e extensão
- Apêndice
  - Desafios do H<sub>2</sub>V
  - Teoria
  - Resultados



# Motivação

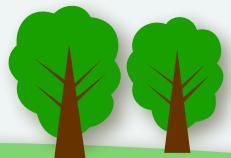
## Acordo de Paris em 2015

Ficou estabelecido por diversos países que o aumento da temperatura deverá estar bem abaixo de 2 °C. Preferencialmente não poderá atingir o limite de 1,5 °C até 2030, e para isso acontecer as emissões de carbono deverão ser reduzidas pela metade até esta data.

*“Agora a Terra está 1,1 °C mais quente desde a Revolução Industrial...*

*... com base nos atuais planos climáticos nacionais, o aquecimento global deverá atingir cerca de 3,2 °C até o final do século.”*

Nações Unidas Brasil



# Motivação

## Consequências

- Temperaturas elevadas;
- Tempestades severas mais frequentes;
- Aumento da seca e escassez de água;
- Perda de espécies;
- Escassez de comida;
- Maior risco à saúde;
- Um oceano mais quente e maior ameaçando cidades litorâneas;
- Aumento da probreza e imigração.

Nações Unidas

O que você procura? Microfone Search icon

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)

Assuntos > Notícias e eventos > Notícias > Estudo aponta que enchentes de 2024 foram maior desastre natural da história do RS e sugere caminhos para futuro com eventos extremos mais frequentes

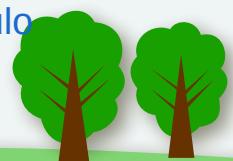
Estudo aponta que enchentes de 2024 foram maior desastre natural da história do RS e sugere caminhos para futuro com eventos extremos mais frequentes

Levantamento realizado por instituições de ensino e pesquisa, órgãos públicos, associações profissionais e outras entidades indica maior ocorrência e agravamento de enchentes especialmente na região Sul.

Fonte: ANA



Fonte: Sesc São Paulo

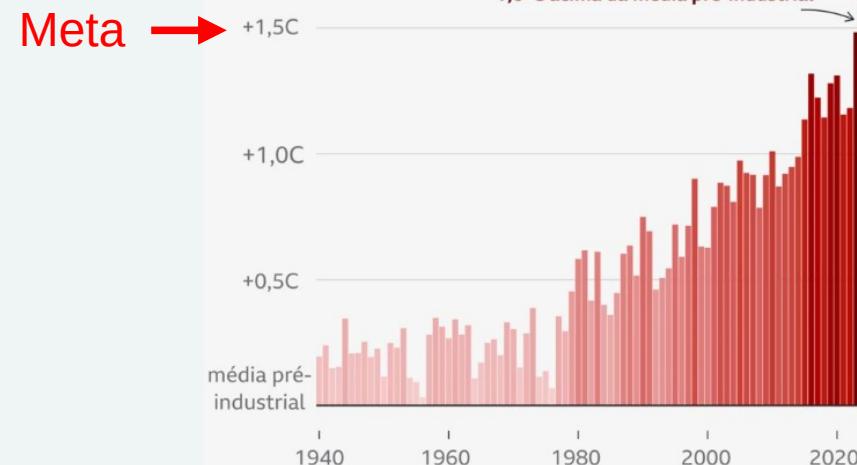


# Motivação

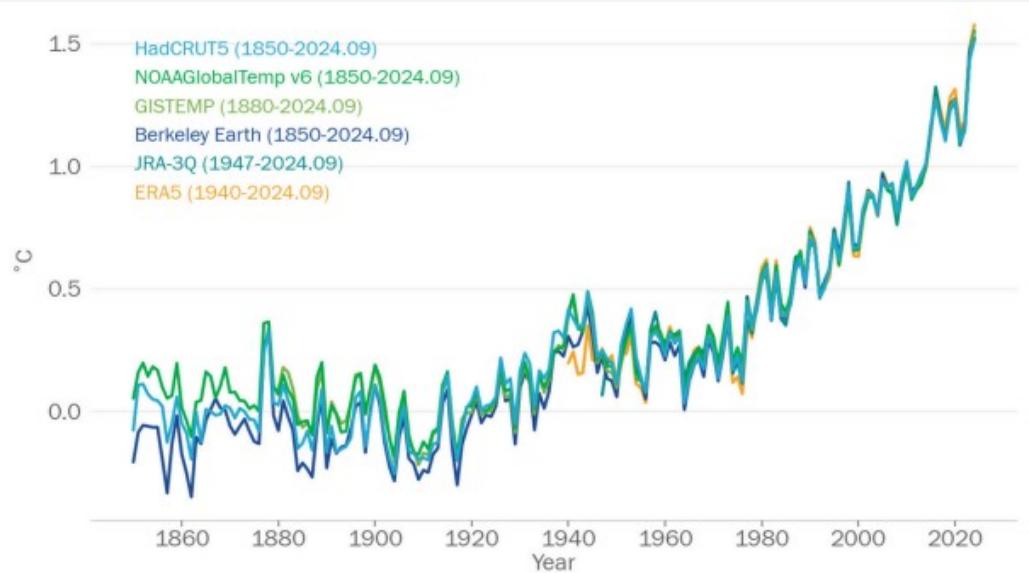
## Consequências

2024 foi o primeiro ano com aquecimento acima de 1,5°C

Temperatura média global por ano, comparada com a média pré-industrial (1850-1900)



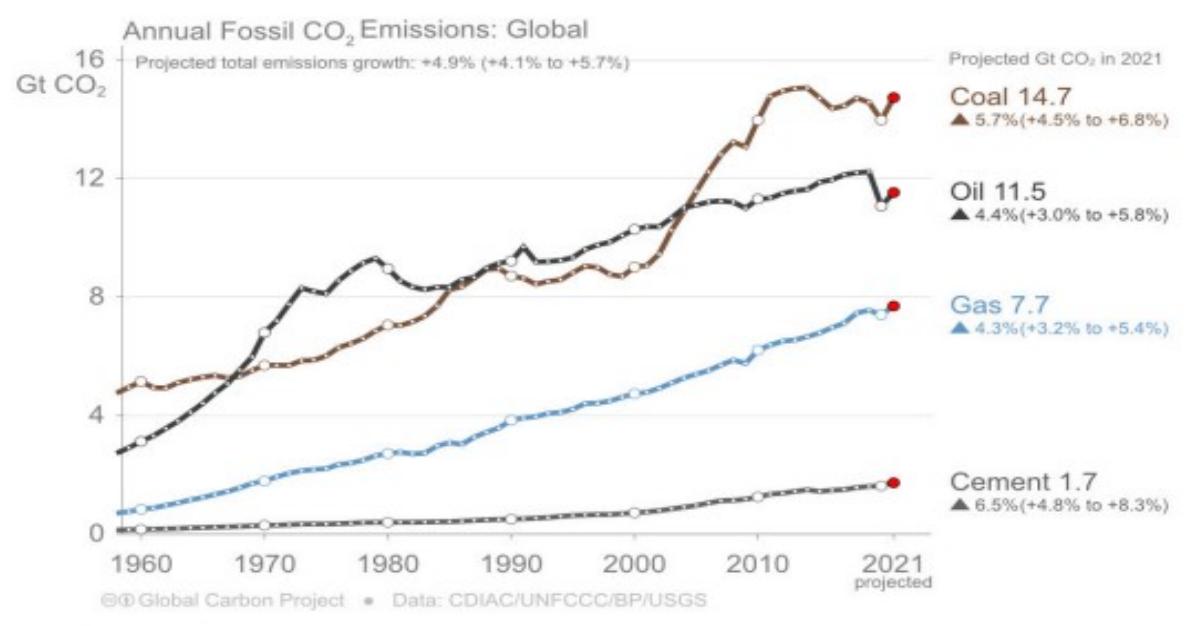
Fonte: BBC News



Fonte: World Meteorological Organization

# Motivação

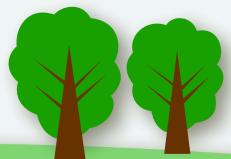
## Principais fontes emissoras de CO<sub>2</sub>



“Brasil é o 5º maior emissor de gases do efeito estufa.”

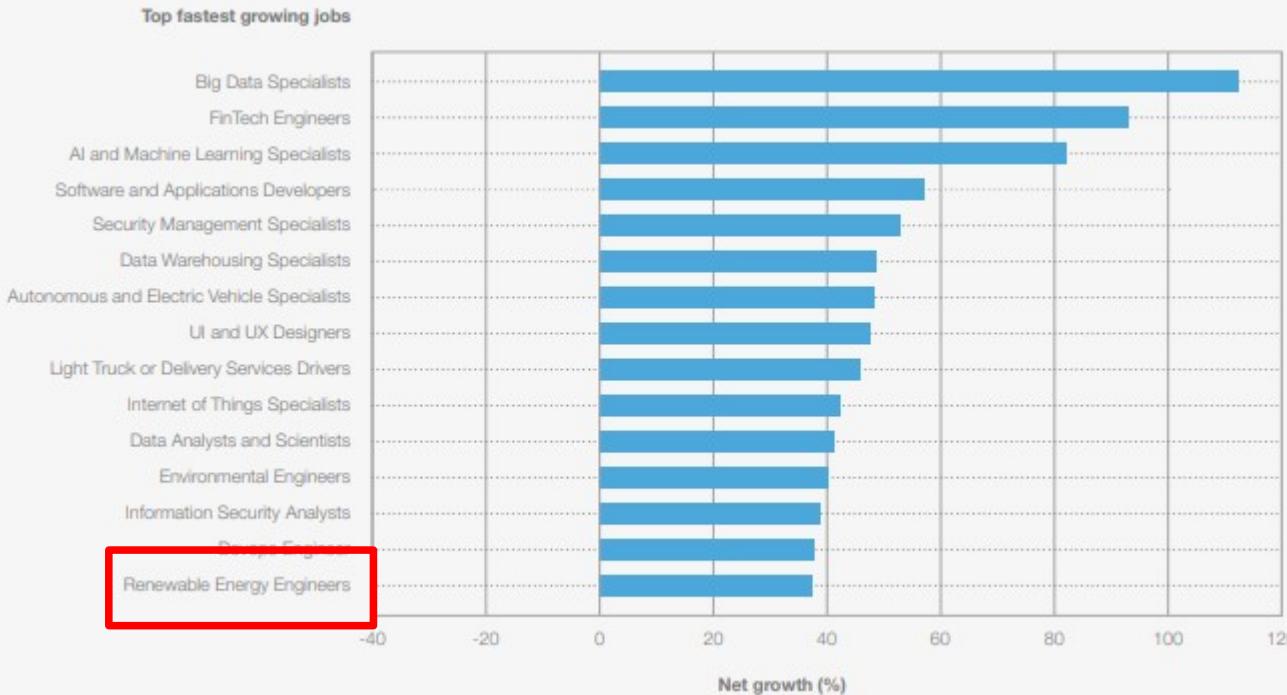
CNN Brasil

Fonte: [Global Carbon Project](#)

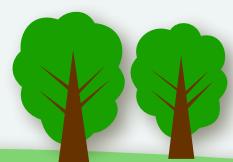


# Motivação

Uma profissão do futuro



O relatório de profissões do futuro de 2025 publicado pela World Economic Forum cita a profissão de **engenheiro em energias renováveis** entre as 15 profissões de maior crescimento até 2030.

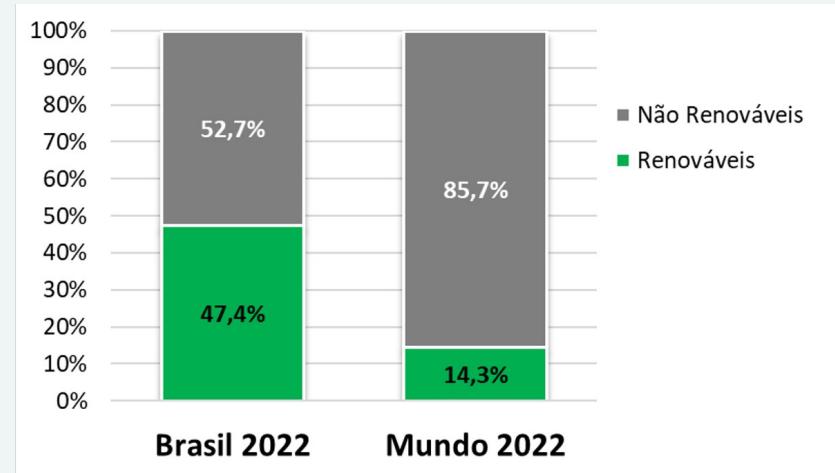
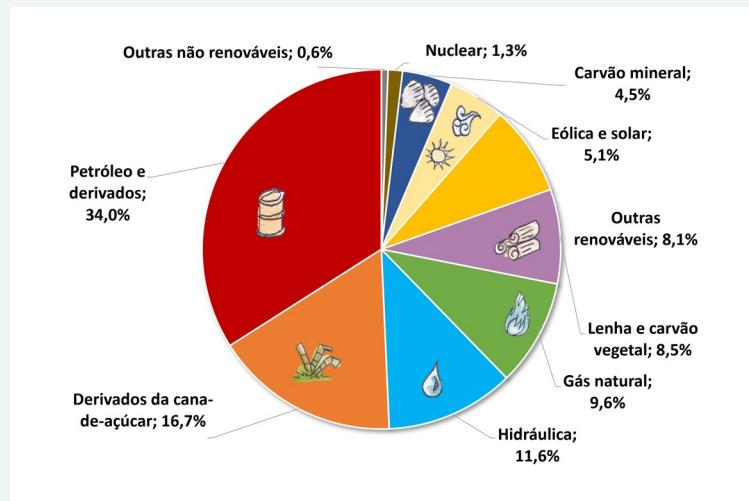


Fonte: [World Economic Forum](#)  
Flaviano Williams Fernandes

# Motivação

## Potencial energético do Brasil

Cerca de 50 % das formas de energia produzidas no Brasil são do tipo renováveis



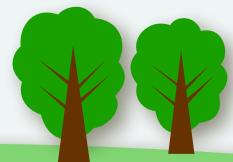
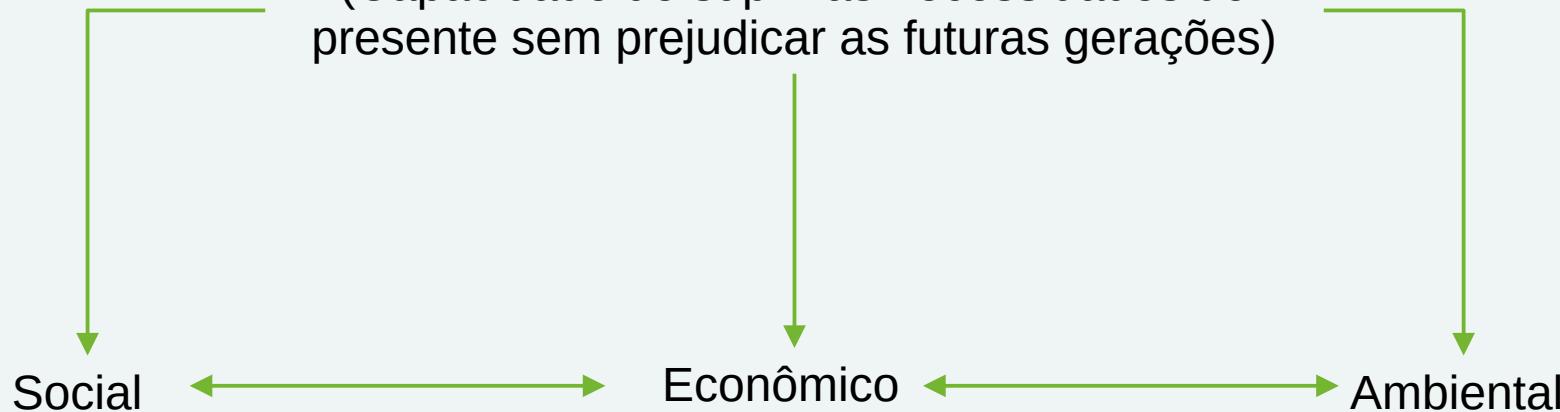
A matriz energética brasileira é mais renovável do que a mundial.

Fonte: [Empresa de Pesquisa Energética](#)

# Objetivos de desenvolvimento sustentável

O que é sustentabilidade?

(Capacidade de suprir as necessidades do presente sem prejudicar as futuras gerações)

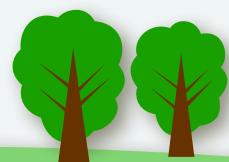


# Objetivos de desenvolvimento sustentável

## Agenda 2030

“Adotada em setembro de 2015 por 193 Estados Membros da ONU (UN General Assembly Resolution 70/1), a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável resultou de um processo global participativo de mais de dois anos, coordenado pela ONU, no qual governos, sociedade civil, iniciativa privada e instituições de pesquisa contribuíram através da Plataforma ‘My World’. Sua implementação teve início em janeiro de 2016, dando continuidade à Agenda de Desenvolvimento do Milênio (2000-2015), e ampliando seu escopo. Abrange o desenvolvimento econômico, a erradicação da pobreza, da miséria e da fome, a inclusão social, a sustentabilidade ambiental e a boa governança em todos os níveis, incluindo paz e segurança.”

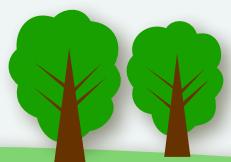
ODS Brasil



# Objetivos de desenvolvimento sustentável



Fonte: Nações Unidas



# Objetivos de desenvolvimento sustentável

## Status atual

Pesquisar cidade  
IRATI

Cidades Signatárias do PCS

Estado: TODOS

População: TODOS

Classificação ↑	Cidade	Estado	Pontuação	Desempenho por ODS
79	Piratininga	SP	61,33 ●	
91	Iratí	PR	61,18 ●	
614	Tapiratiba	SP	56,74 ●	

Fonte: IDSC-BR

Search country  
brazil

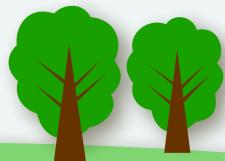
Rank	Country	Score	Performance
54	Brazil	73.81	

Fonte: Ranking por país (RDS)

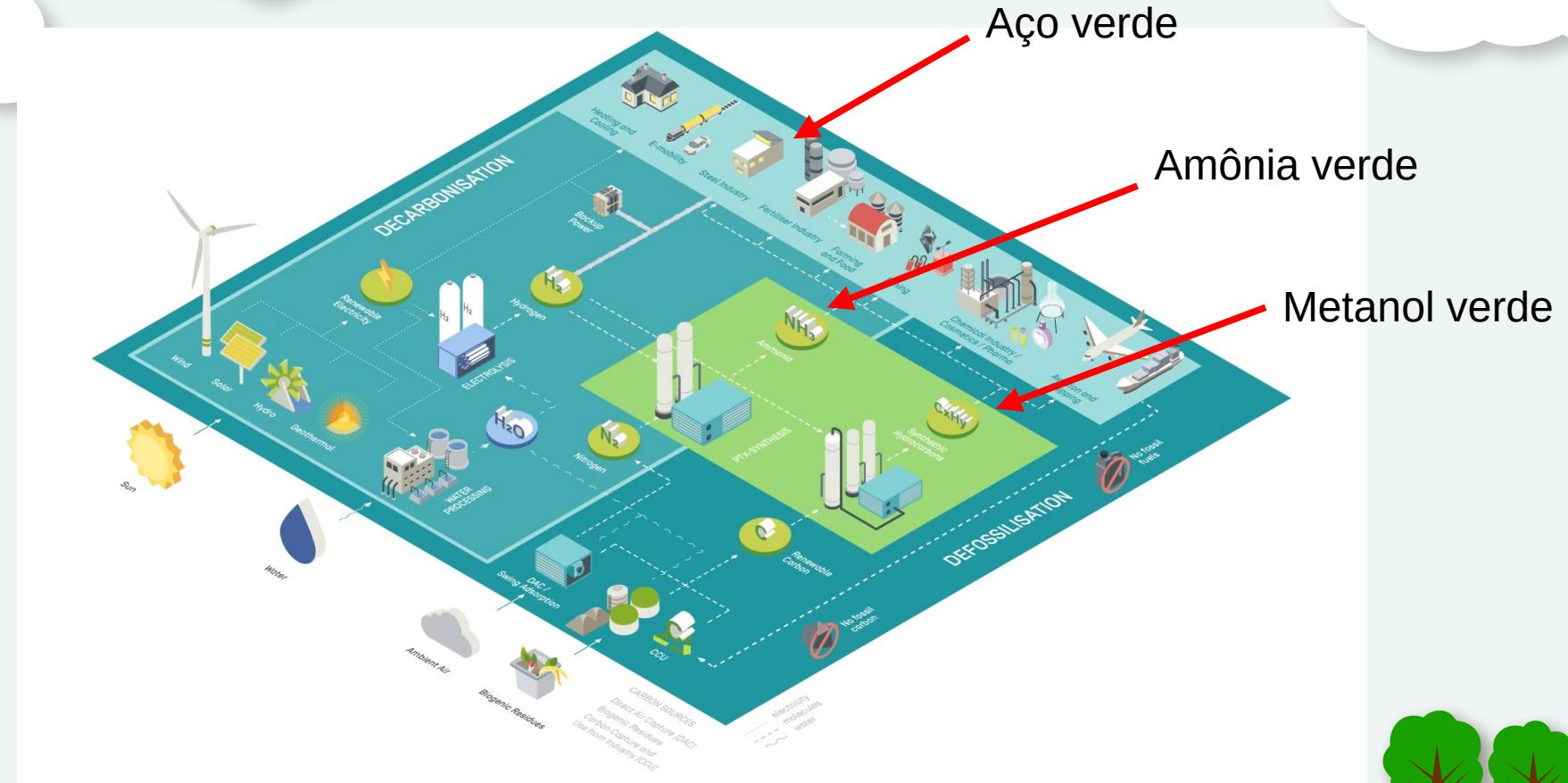
# Power-to-X

Termo amplamente utilizado na Alemanha e conversão de energias renováveis para outras fontes de energia ou produtos armazenaveis

- Power-to-gas: hidrogênio, amônia e hidrocarbonetos;
- Power-to-liquid: combustíveis sintéticos (aviação, ...);
- Power-to-heat: geração de calor (setor industrial);
- Power-to-mobility: armazenamento de energia elétrica;
- Power-to-chemicals: produtos químicos para a indústria em geral.



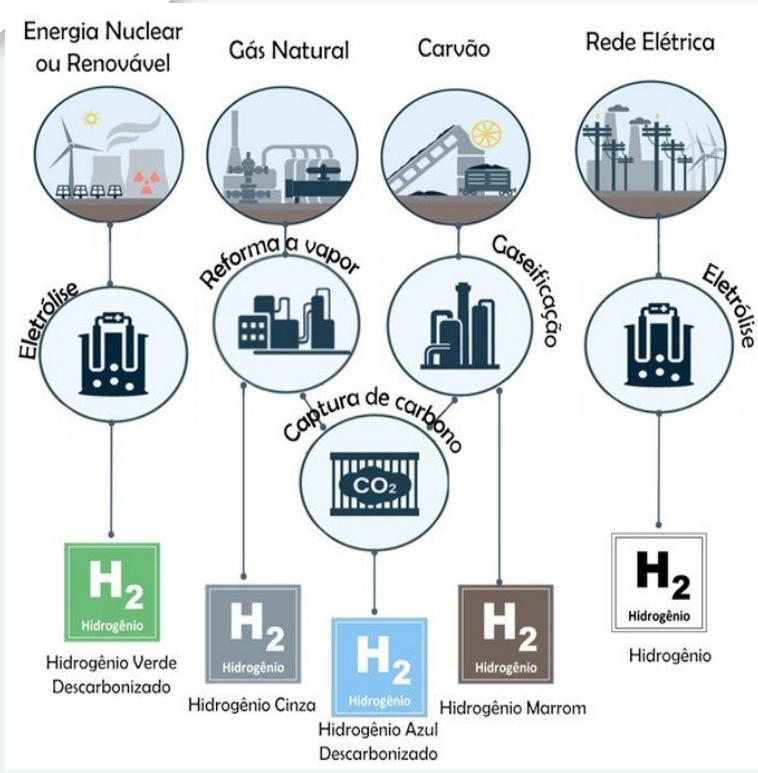
# Power-to-X



Fonte: International Pt-X Hub  
Flaviano Williams Fernandes

# Hidrogênio verde

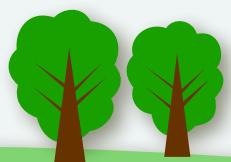
## Classificação dos processos de produção



Radiação eletromagnética:

- Processos foto-eletroquímicos
- Processos foto-biológicos

Processo lento e com baixa produtividade



# Hidrogênio verde

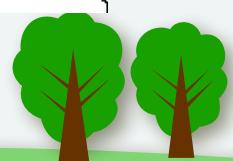
## Iniciativas



**Programa Nacional  
do Hidrogênio**

Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2)

Fonte: Diário do Nordeste



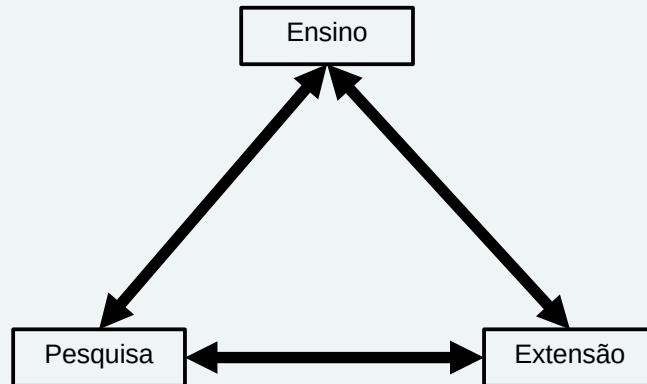
**Hidrogênio verde: há 113  
projetos com investimentos de  
R\$ 469 bi**

Estudo da consultoria CelaLA (Clean Energy Latin America) aponta custo de produção entre US\$ 2,94 e US\$ 7,38 por tonelada

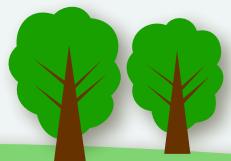
Escrito por [Egídio Serpa](#) egidio.serpa@svm.com.br

22 de Outubro de 2025 - 08:13 (Atualizado às 08:19)

# Ensino, pesquisa e extensão



- PIAP/PIBIC/PIBIC-Jr
- PRADI/PIBITI
- PIAE/PIBEX/PROEQ
- Seminário de ensino, pesquisa e extensão (**SIPEX**)



# Ensino, pesquisa e extensão

## Proposta de plano de ensino

- 1) Apresentar os conceitos fundamentais sobre sustentabilidade e sua importância;
- 2) Falar sobre a agenda 2030 e os objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU;
- 3) Analisar com os alunos os objetivos de desenvolvimento sustentável da cidade através da plataforma [IDSC-BR](#) ou a nível de país pela plataforma [RDS](#);
- 4) Escolher uma ou mais ODS de interesse e com os alunos propor soluções afim de aumentar a pontuação de sua cidade;
- 5) A partir da ODS escolhida, propor desafios para os alunos (com exemplos) na de projetos específicos;
- 6) Divulgar os trabalhos para o público em geral ([seminários](#), exposições, feiras de ciências, etc) e para agências do governo e ONGs afim de elevar a pontuação da sua cidade.

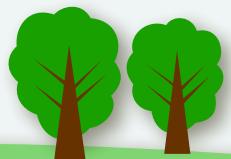


# Ensino, pesquisa e extensão

## Protótipo sobre produção de hidrogênio



Custo financeiro		
Item	Quantidade	Valor (reais)
Recipiente de vidro hermeticamente fechado	250 mL	~ 15,00
Lápis	3	4,80
Bateria	1	25,00
Água desmineralizada	250 mL	~ 5,00
Soda cáustica	44 g	~ 2,00
Total:		~ 51,80



# Apêndice A. Desafios do H<sub>2</sub>V

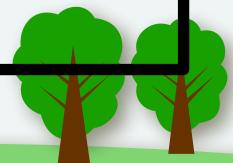
## Vantagens e desvantagens

### Vantagens

- Alta densidade de energia gravimetrica (kWh/g);
- Elemento abundante;
- Insolvel em agua;
- Usado em multisetores;
- Converte em varias fontes de energia.

### Desvantagens:

- Muito volatil;
- Extremamente inflamavel;
- Alta velocidade de queima;
- Baixa densidade de energia volumetrica (kWh/L);
- Baixa eficiencia durante a coleta.



# Apêndice A. Desafios do H<sub>2</sub>V

## Armazenamento

- Gás comprimido: Armazenamento em tanques de alta pressão;
- Liquefeito à baixa temperatura: Resfriamento a temperaturas extremamente baixas;
- Compostos: ligação química em compostos orgânicos;
- Amônia: Armazenamento na forma de amônia;
- MOFs: ligação química em estruturas organo metálicas;
- Geológico: Armazenamento em cavernas subterrâneas.



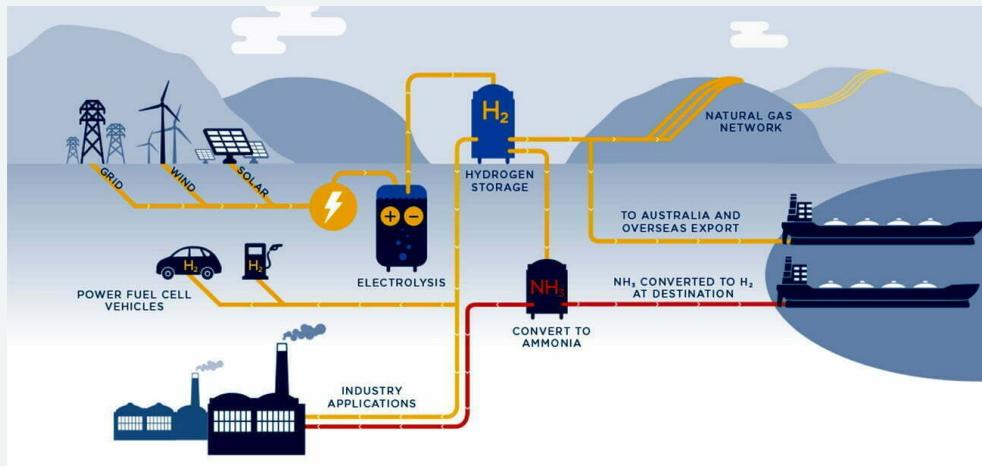
Tanque de armazenamento de H<sub>2</sub> em Kuqa, China.



# Apêndice A. Desafios do H<sub>2</sub>V

## Transporte

Precisa ser transportado em tanques capaz de suportar altas pressões e baixas temperaturas, o que eleva o custo final do produto.



Fonte: [Clydeco](#)



Fonte: [PEPPERL+FUCHS](#)

# Apêndice A. Desafios do H<sub>2</sub>V

## Desafios a serem alcançados

- Custo elevado de produção devido a processos de importação e dificuldades de acesso como eletrolisadores e outros;
- Logística ruim com uma infraestrutura de transporte, armazenamento e distribuição precária;
- Regulamentação e tributação.

The screenshot shows a news article from Novacana's website. The headline reads: "Hidrogênio verde trava na Bahia e empresa busca solução para equipamento milionário". Below the headline, it says: "Maquinário havia sido adquirido para o que seria primeira fábrica de hidrogênio verde do país". At the bottom, there is a note: "Agência Estado - Publicado: 25 Set 2025 - 16:14".

Fonte: Novacana

The screenshot shows a document from the Brazilian Senate. It features the Senate logo at the top, followed by the text: "SENADO FEDERAL" and "PROJETO DE LEI N° 2308, DE 2023". Below this, there is a detailed description of the bill's purpose and legal context.

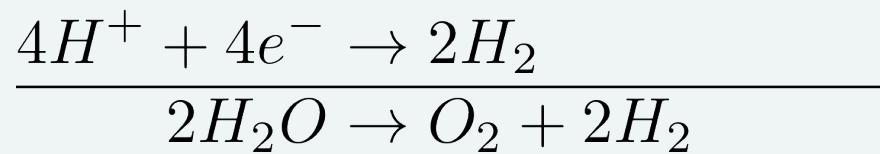
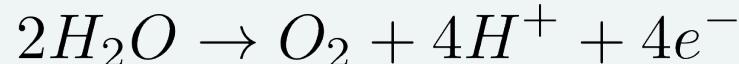
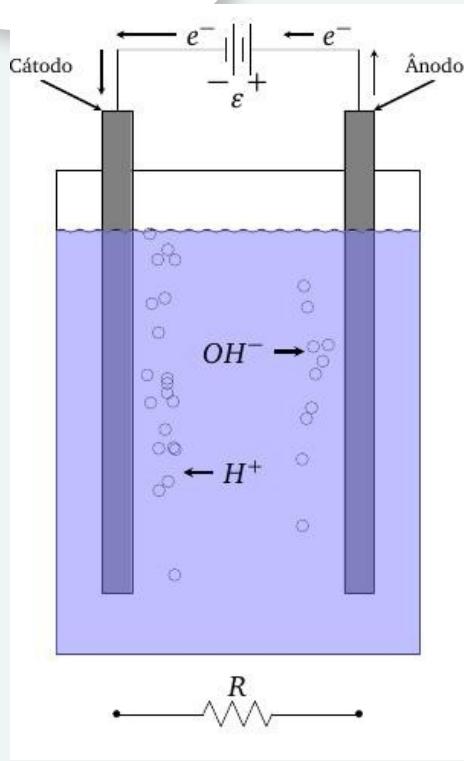
Fonte: Senado

The image shows a white boat with a yellow fuel tank on board, labeled "INOVACAO". The text below the image reads: "Hidrogênio verde em ação: América do Sul lança seu primeiro navio livre de emissões em direção à COP30 no Brasil".

Fonte: Newsletter

# Apêndice B. Hidrogênio verde

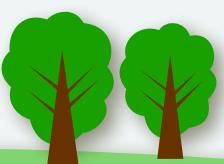
## Fundamentos da eletrólise alcalina



Pela lei de Faraday da eletrólise, a quantidade  $H_2$  é limitada pela corrente de acordo com a equação abaixo,

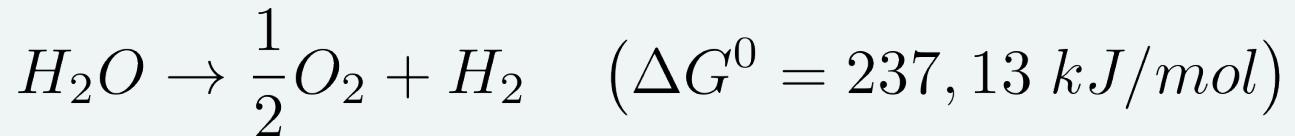
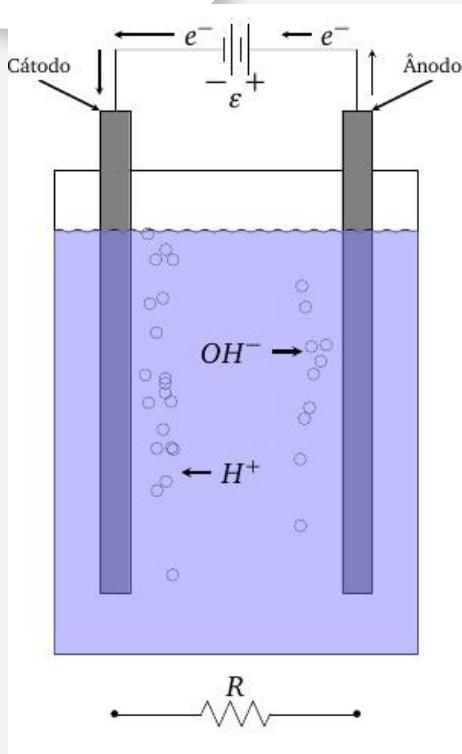
$$n = \frac{it}{2F}$$

$F$  é chamada constante de Faraday.



# Apêndice B. Hidrogênio verde

## Tensão mínima

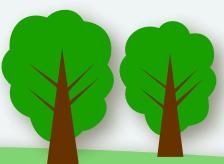


O trabalho realizado para transportar 2 mol de elétrons entre dois terminais com tensão V é dado por

$$\Delta G^0 = -2FV,$$

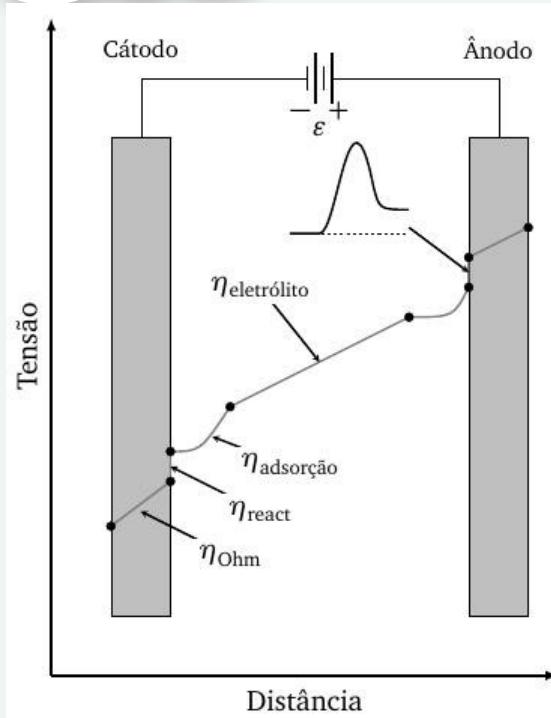
$$V = -\frac{\Delta G^0}{2F},$$

$$V = -\frac{237,13 \times 10^3}{2 \cdot 96485} \approx -1,23 \text{ V}$$



# Apêndice B. Hidrogênio verde

## Perdas de energia e sobrepotencial



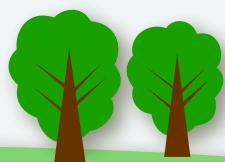
Considerando a entropia do sistema, o trabalho necessário para que a reação aconteça aumenta de acordo com a equação abaixo,

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S, \quad (\Delta H = 286 \text{ kJ/mol})$$

Assim a tensão mínima entre os eletrodos aumenta para 1,48 V. Além disso, considerando perdas de energia devido a efeito de caráter elétrico e mecânico teremos

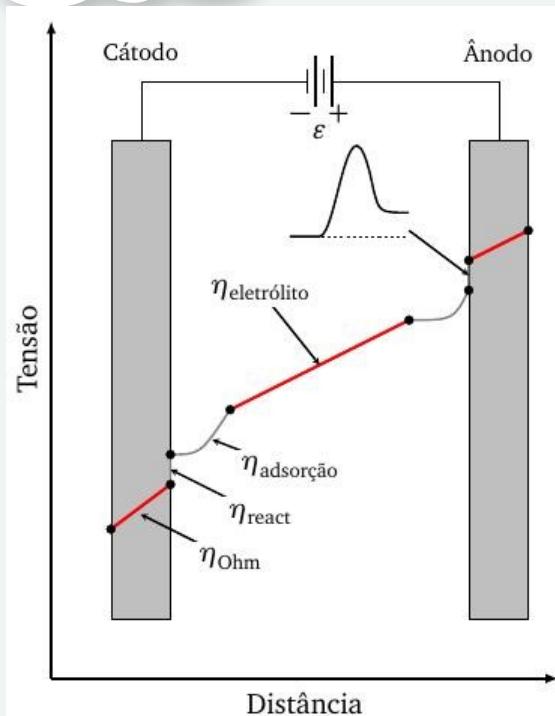
$$V_{\text{célula}} = V_{\text{padrão}} + \epsilon$$

$\epsilon$  é chamado de sobrepotencial.



# Apêndice B. Hidrogênio verde

## Sobrepotencial: ôhmico



Ôhmico

Ocorre perdas de energia por efeito Joule nos eletrodos e na solução eletrolítica.

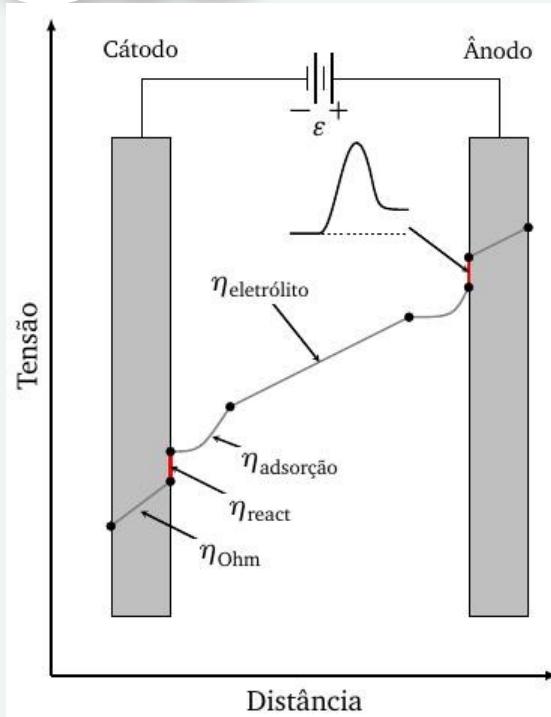
Solução:

- Utilização de eletrodos feitos de materiais de alta condutividade;
- Aumentar a condutividade do meio através portadores de carga elétrica (aumento da concentração).



# Apêndice B. Hidrogênio verde

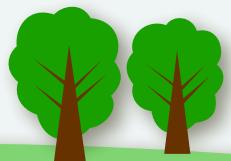
## Sobrepotencial: reação na superfície



Ocorre perdas de energia devido a energia de ativação necessária para o processo reativo ocorrer na superfície do eletrodo.

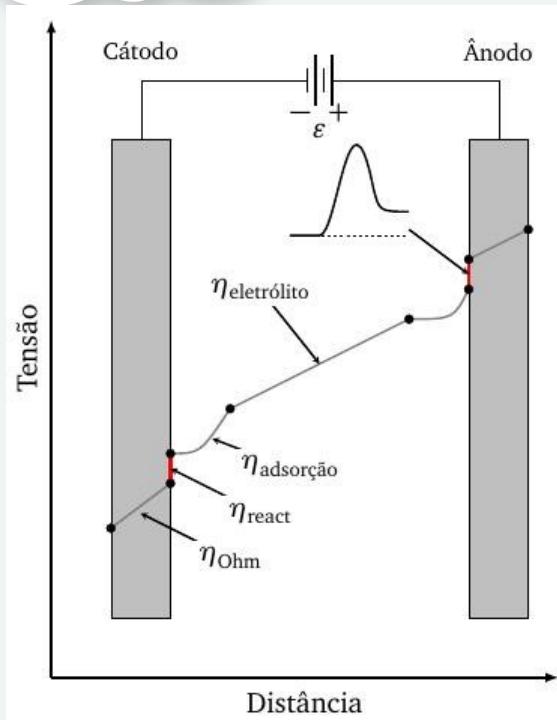
Solução:

- Aumentar a temperatura para facilitar a reação na superfície;
- Remoção de camadas passivas.



# Apêndice B. Hidrogênio verde

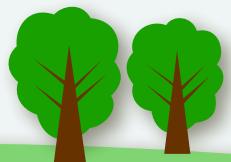
## Sobrepotencial: adsorção



Ocorre perdas de energia devido a formação de bolhas na superfície do eletrodo e a baixa difusão de íons  $H^+$  e  $OH^-$ .

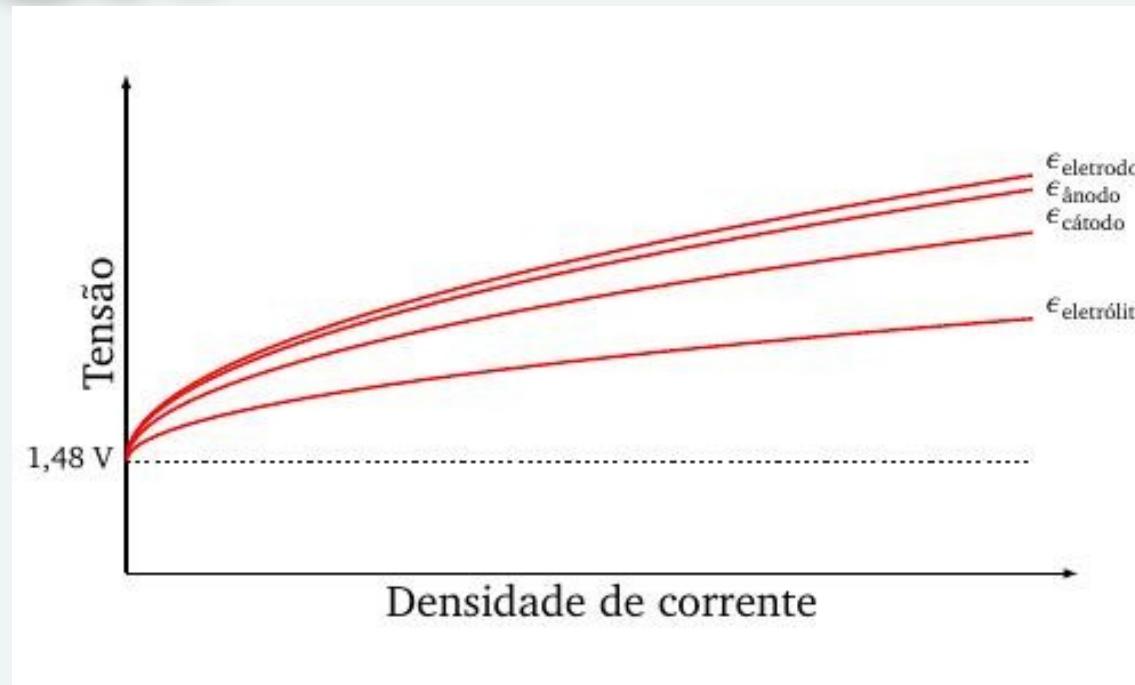
Solução:

- Facilitar o deslocamento de bolhas na superfície e na solução;
- Aumentar a temperatura para facilitar a difusão dos íons;



# Apêndice B. Hidrogênio verde

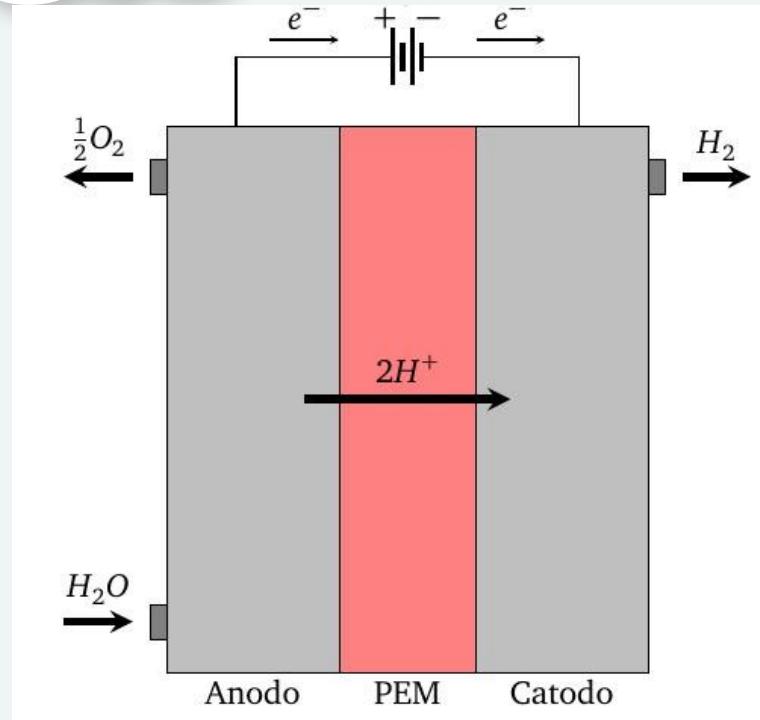
Gráfico da tensão versus densidade de corrente



$$V = 1,48 + \epsilon_{\text{eletrólito}} + \epsilon_{\text{cátodo}} + \epsilon_{\text{ânodo}} + \epsilon_{\text{eletrodos}}.$$

# Apêndice B. Hidrogênio verde

## Polymer Electrolyte Membrane (PEM)

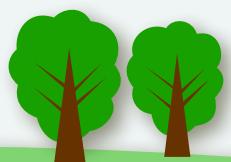


### Vantagens:

- Elevado grau de pureza;
- Eficiência em torno de 70 à 80%.

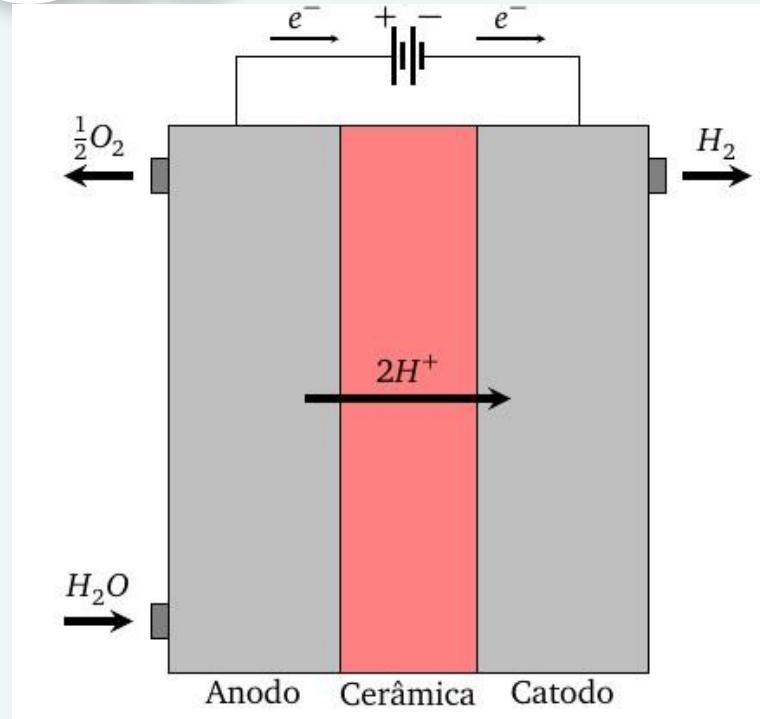
### Desvantagens:

- Custo elevado;
- Possui baixo tempo de vida útil.



# Apêndice B. Hidrogênio verde

## Solid Oxide Electrolysis (SOE)

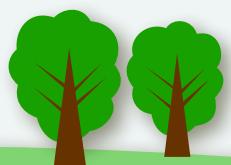


### Vantagens:

- Baixo custo financeiro;
- Baixa demanda de energia;
- Eficiência próximo a 100%.

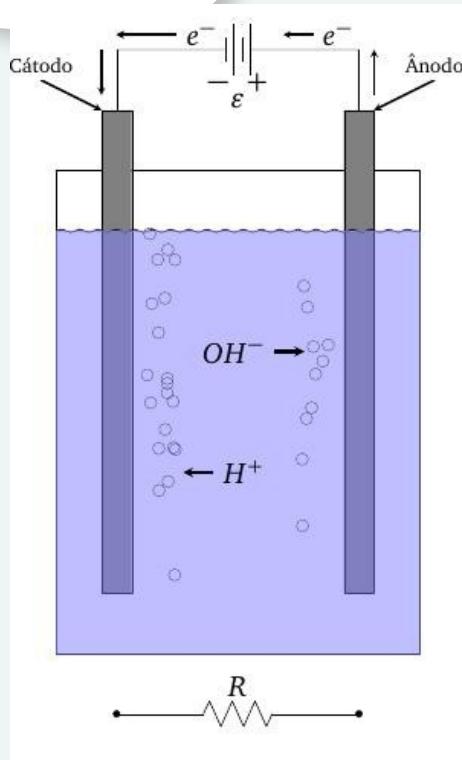
### Desvantagens:

- Possui baixo tempo de vida;
- Muito instável;
- Ainda em fase de pesquisa.



# Apêndice B. Hidrogênio verde

## Alcaline Electrolyzer (AEL)

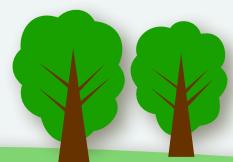


### Vantagens:

- Baixo custo financeiro;
- Maior tempo de vida útil;
- Estável;
- Tecnologia bem conhecida.

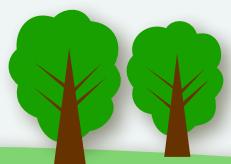
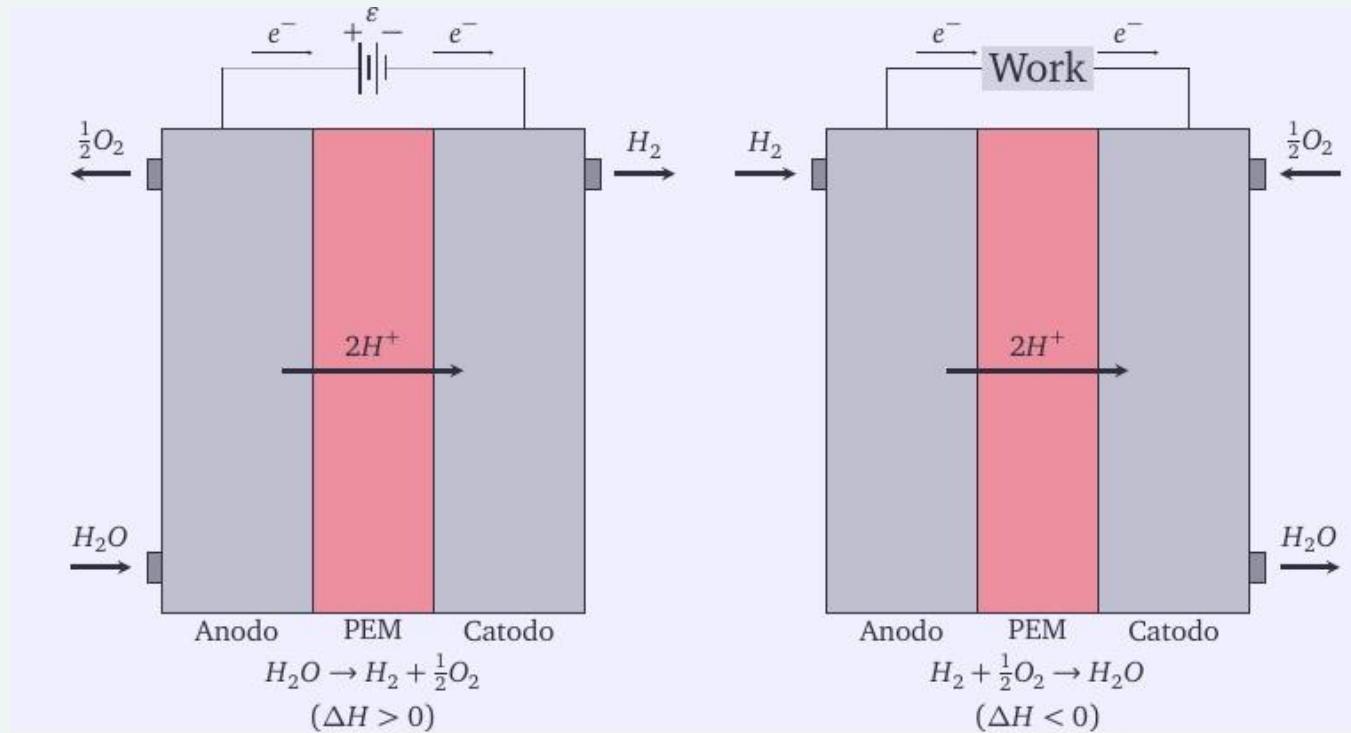
### Desvantagens:

- Baixo grau de pureza;
- Eficiência em torno de 60 à 70%;
- Sucetível à corrosão nos eletrodos.



# Apêndice B. Hidrogênio verde

H2V → Power-to-mobility



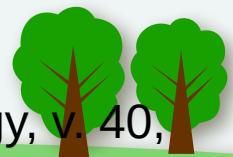
# Apêndice B. Hidrogênio verde

## Eficiência $\eta$ do reator

Razão entre a energia produzida na forma de H<sub>2</sub> pela energia elétrica fornecida pela fonte de alimentação (tensão e corrente)

$$\eta = \frac{P \cdot n_{H_2}}{Vi}$$

$$P = 141,9 \text{ kJ/g}$$

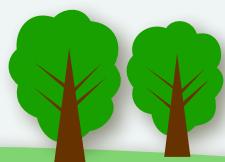


# Apêndice C. Resultados

## Planejamento experimental

- Para o planejamento experimental, foi utilizado o planejamento experimental  $3^k$ , onde cada um dos fatores "k" é avaliado em 3 níveis distintos;
- Utilizado para otimizar trabalhos e experimentos, permitindo avaliar como diferentes combinações de fatores (concentração e tensão) afetam o trabalho.

$$\hat{y}(X_1, X_2) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_3 X_1^2 + \beta_4 X_2^2$$



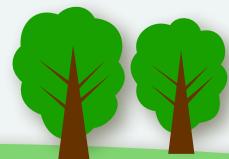
# Apêndice C. Resultados

## Planejamento experimental

Para obter os valores  $X_1$  e  $X_2$  mostrado anteriormente, foi utilizada a seguinte regra de codificação abaixo,

$$X_1 = \frac{V - 2,7}{0,3},$$

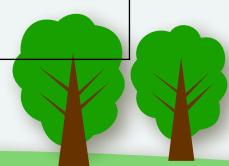
$$X_2 = \frac{C - 3,5}{1,5}$$



# Apêndice C. Resultados

## Matriz de planejamento

<b>Experimento</b>	<b>Corrida</b>	<b>X<sub>1</sub></b>	<b>X<sub>2</sub></b>	<b>y (mL/min)</b>
1	2	-1	-1	0,400
2	15	0	-1	3,430
3	17	+1	-1	5,533
4	5	-1	0	0,500
5	8	0	0	3,860
6	11	+1	0	7,717
7	16	-1	+1	0,600
...	...	...	...	...



# Apêndice C. Resultados

## Equipamento

Fonte de alimentação

Coleta de H<sub>2</sub>

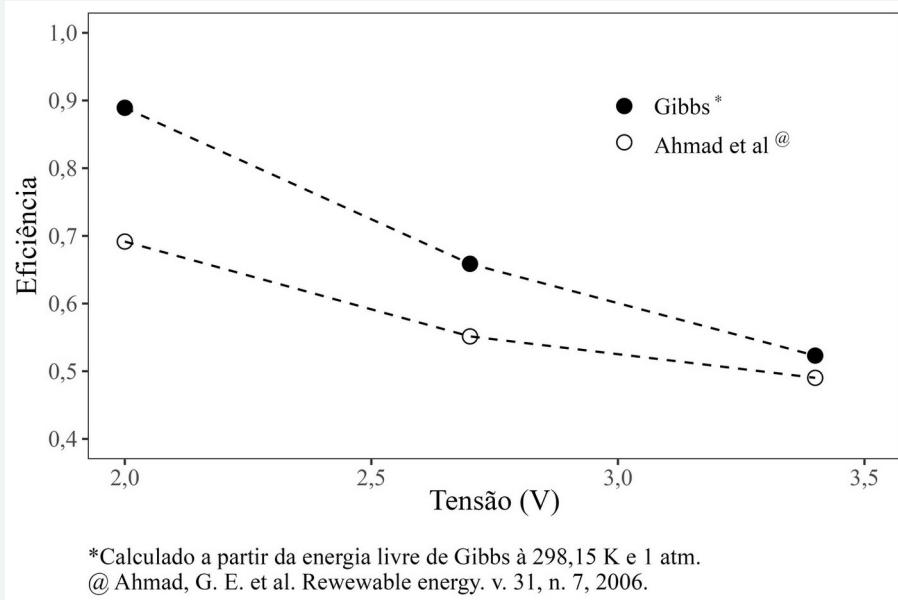


Eletrolizador

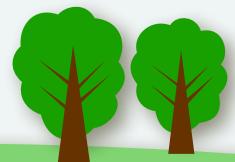
Coleta de O<sub>2</sub>

# Apêndice C. Resultados

## Eficiência do eletrolizador

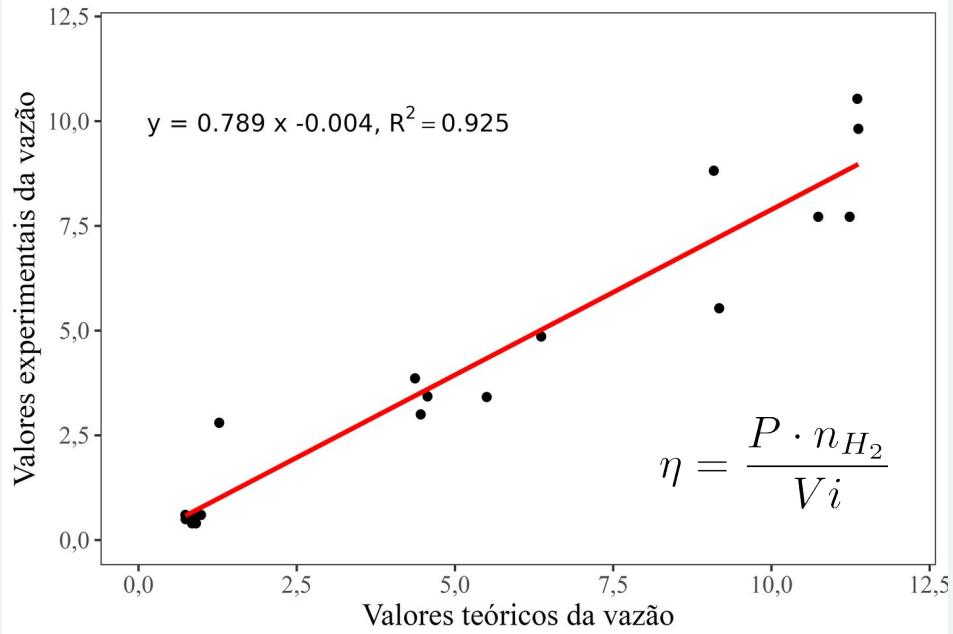


- Os valores foram obtidos tomando como referência a energia livre de Gibbs à 1 atm e 298,15 K da reação de formação do H<sub>2</sub> de 236,486 kJ/mol;
- O valor máximo da eficiência do reator foi obtido através da tensão de 2V, decaindo exponencialmente para valores maiores.

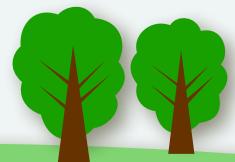


# Apêndice C. Resultados

## Comparação entre os valores teóricos e experimentais

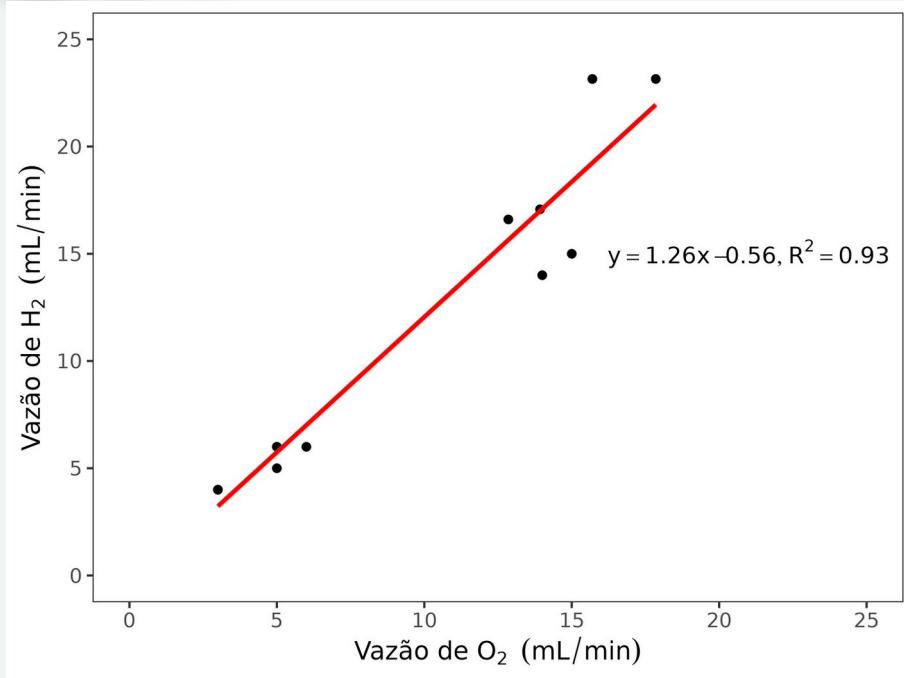


- O gráfico ao lado mostra através de uma análise de correlação linear que os dados experimentais reproduzem de maneira significativa os cálculos previsto pela teoria;
- Utilizando o teste t-Student com nível de significância de 5% foi verificado que não existe diferença significativa entre os valores teóricos e experimentais.

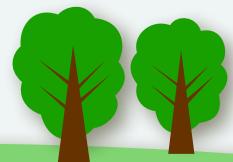


# Apêndice C. Resultados

## Comparação entre as vazões de H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>



O gráfico à esquerda mostra a análise de regressão obtida para a vazão de H<sub>2</sub> em relação a O<sub>2</sub>, o que demonstra uma forte correlação entre os volumes acima de 1/1, de acordo com os cálculos estequiométricos.

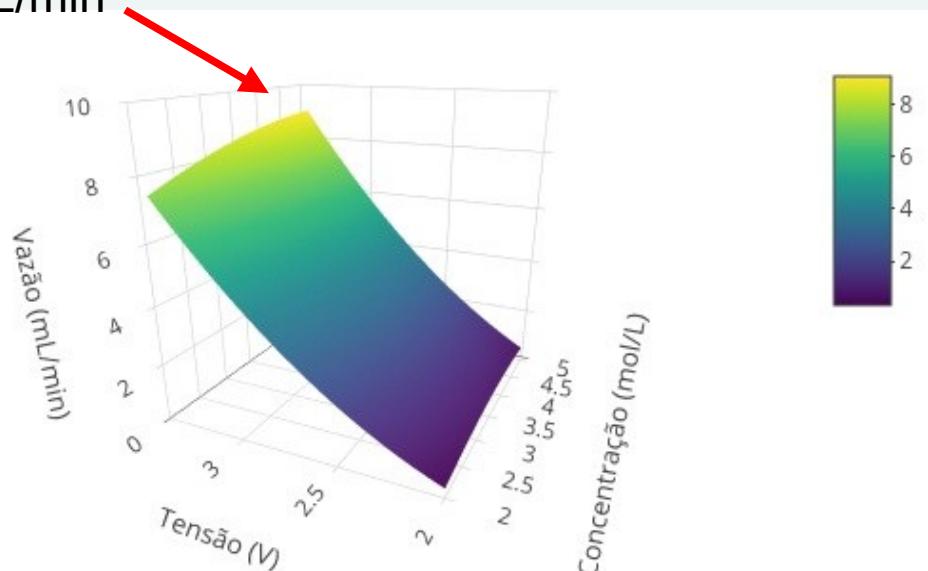


# Apêndice C. Resultados

## Vazão em função da tensão e concentração

$$Z(V, C) = 3,73 - 5,21V + 0,297C + 0,333VC + 1,79V^2 - 0,127C^2$$

9,06 mL/min



O gráfico ao lado mostra o valor de máximo local próximo de 3,4 V e 5 mol/L. Nestas condições é previsto pelo modelo a produção de 9,06 mL/min de H<sub>2</sub>

