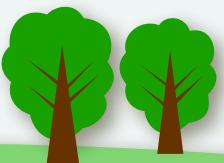


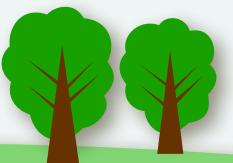
Energias renováveis, sustentabilidade e hidrogênio verde

Flaviano Williams Fernandes
Instituto Federal do Paraná, campus Iraty



Sumário

- Motivação
- ODS
- Pt-X
- H₂V
- Ensino, pesquisa e extensão
- Apêndice
 - Desafios do H₂V
 - Teoria
 - Resultados



Motivação

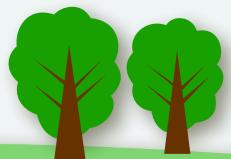
Acordo de Paris em 2015

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

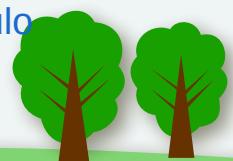
Estudo aponta que enchentes de 2024 foram maior desastre natural da história do RS e sugere caminhos para futuro com eventos extremos mais frequentes

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

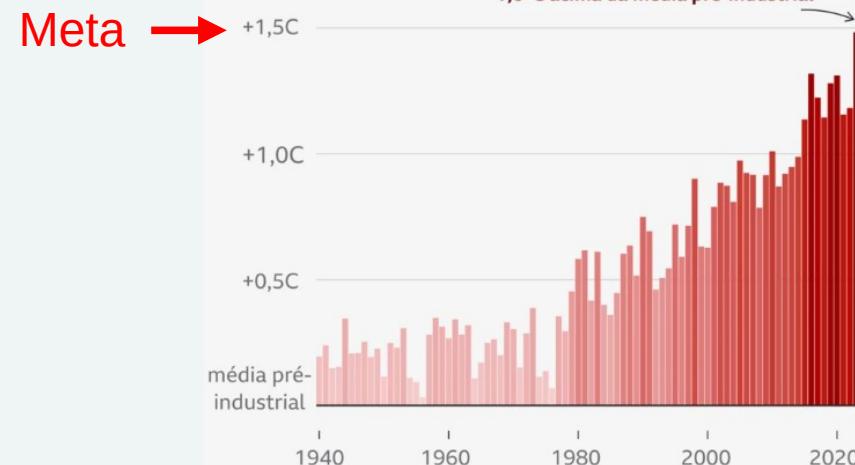


Motivação

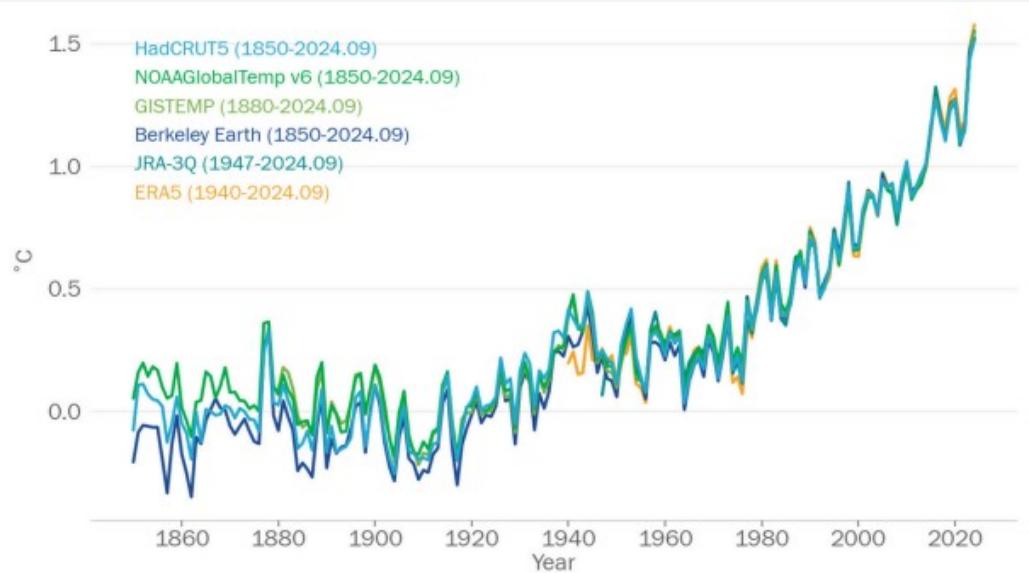
Consequências

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)



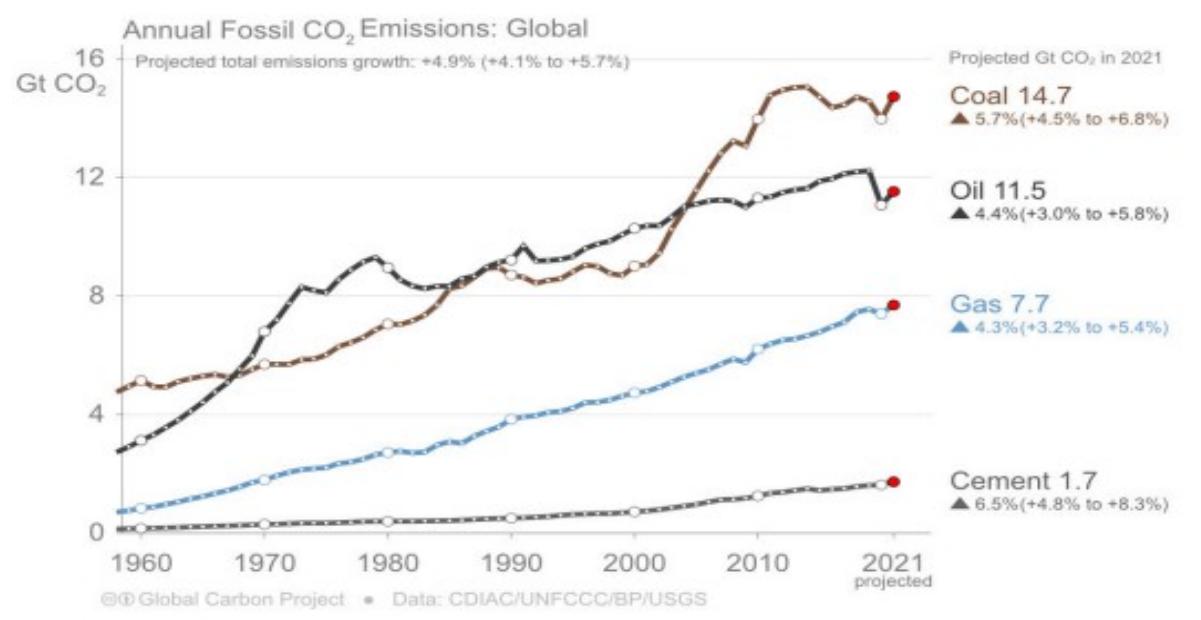
Fonte: BBC News



Fonte: World Meteorological Organization

Motivação

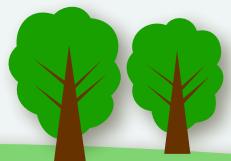
Principais fontes emissoras de CO₂



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

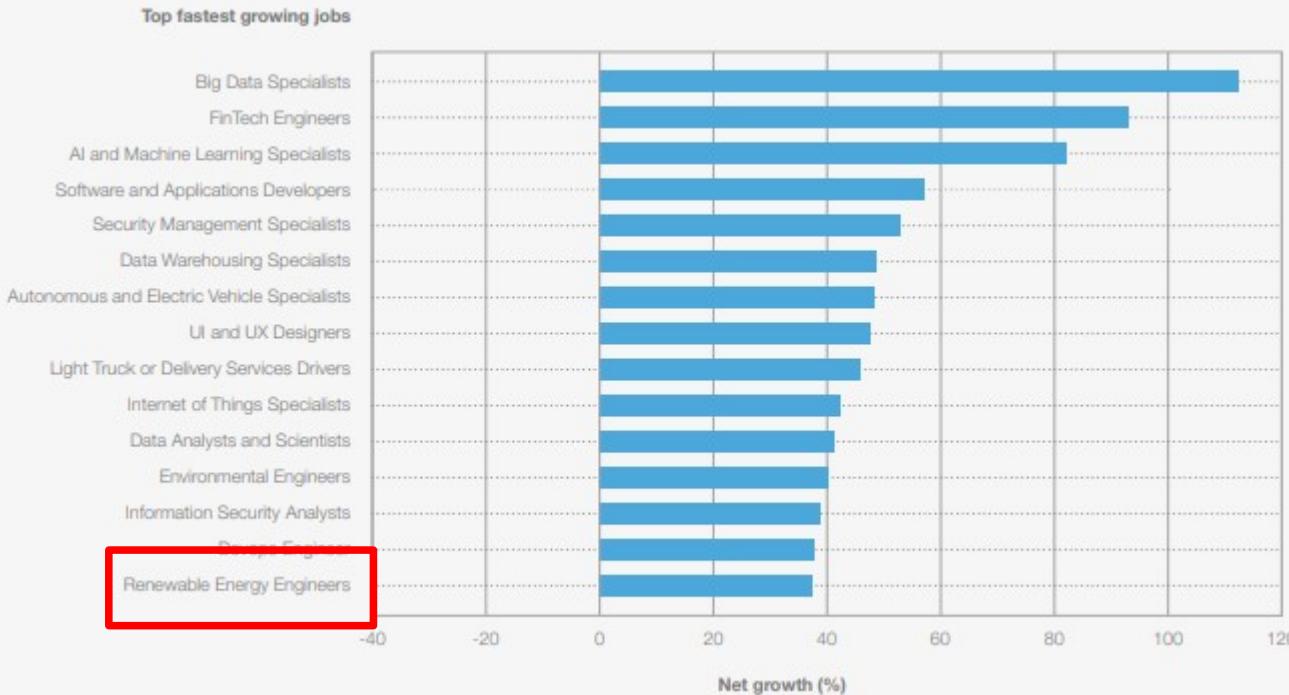
CNN Brasil

Fonte: [Global Carbon Project](#)

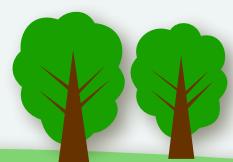


Motivação

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.

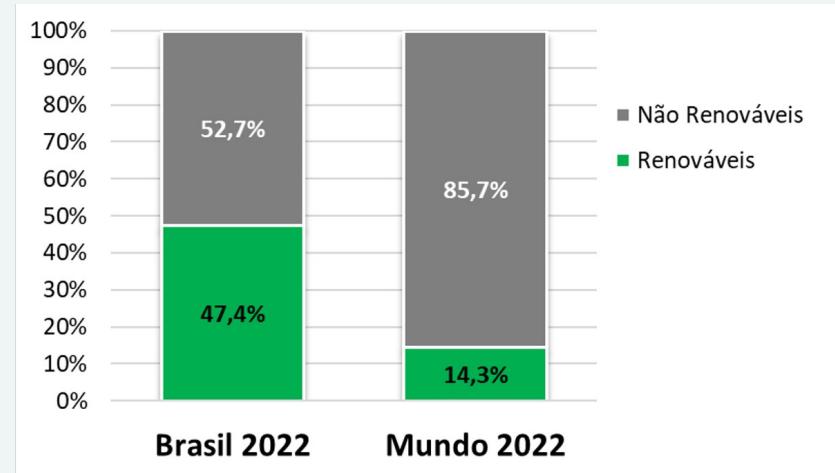
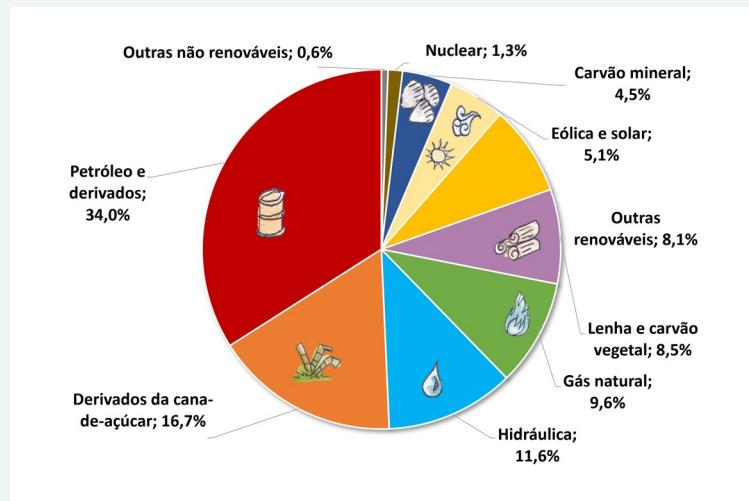


Fonte: [World Economic Forum](#)
Flaviano Williams Fernandes

Motivação

Potencial energético do Brasil

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



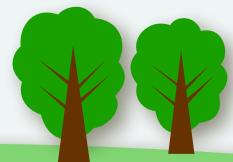
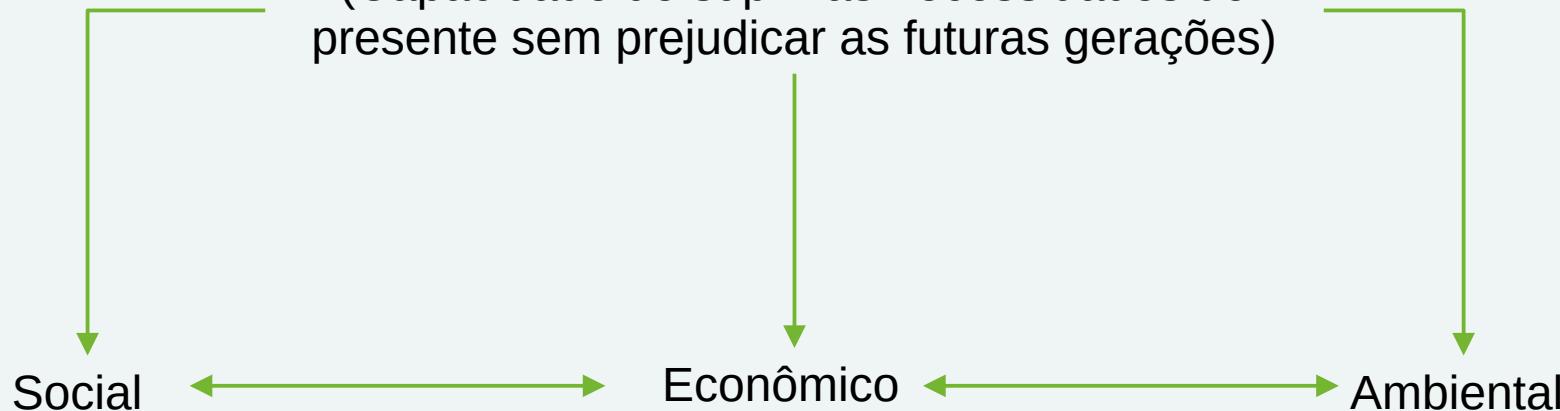
A matriz energética brasileira é mais renovável do que a mundial.

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)

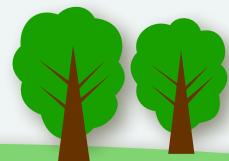


Objetivos de desenvolvimento sustentável

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.”

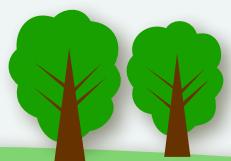
ODS Brasil



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

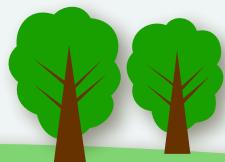
Rank	Country	Score	Performance
54	Brazil	73.81	

Fonte: Ranking por país (RDS)

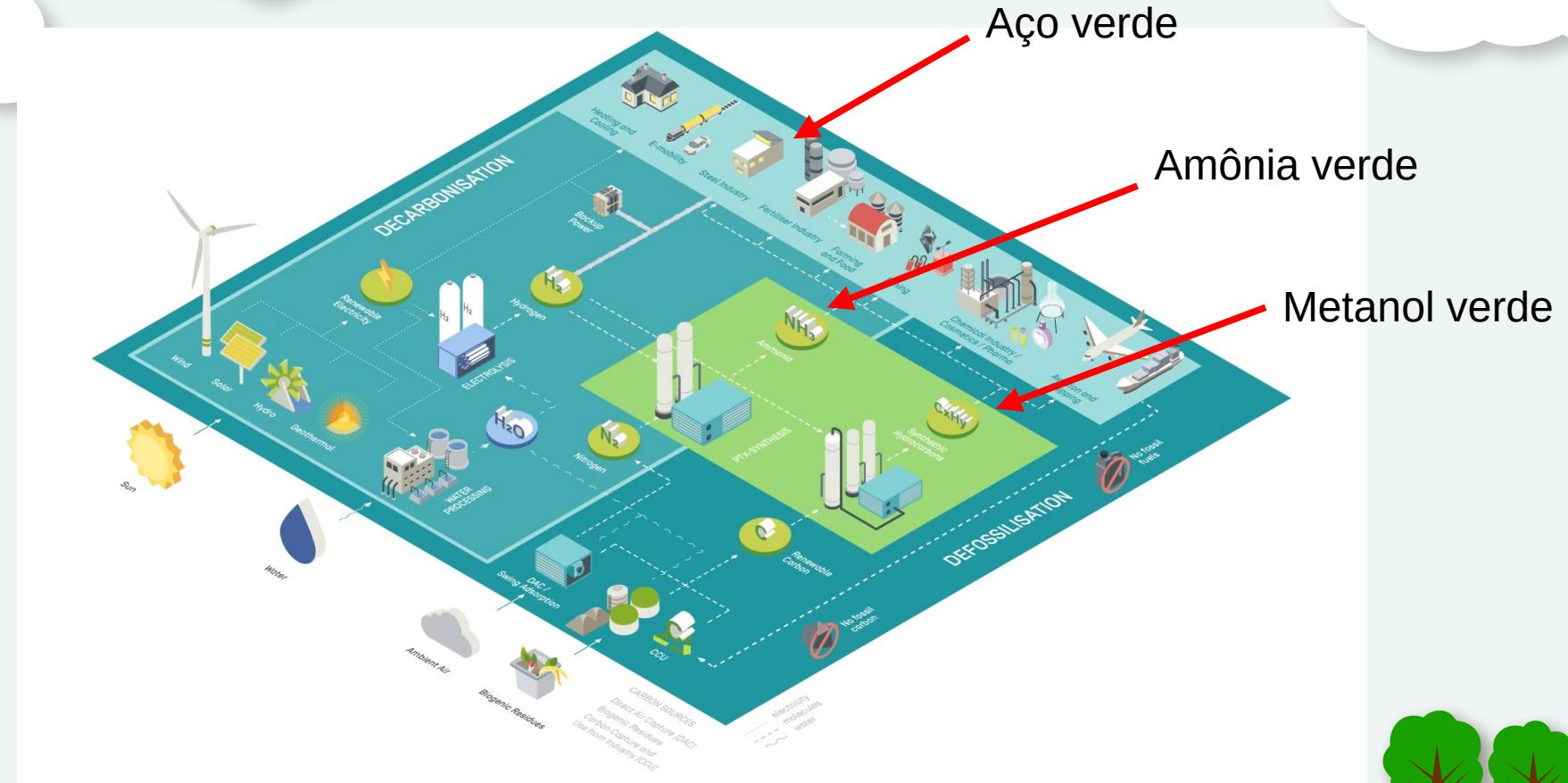
Power-to-X

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.



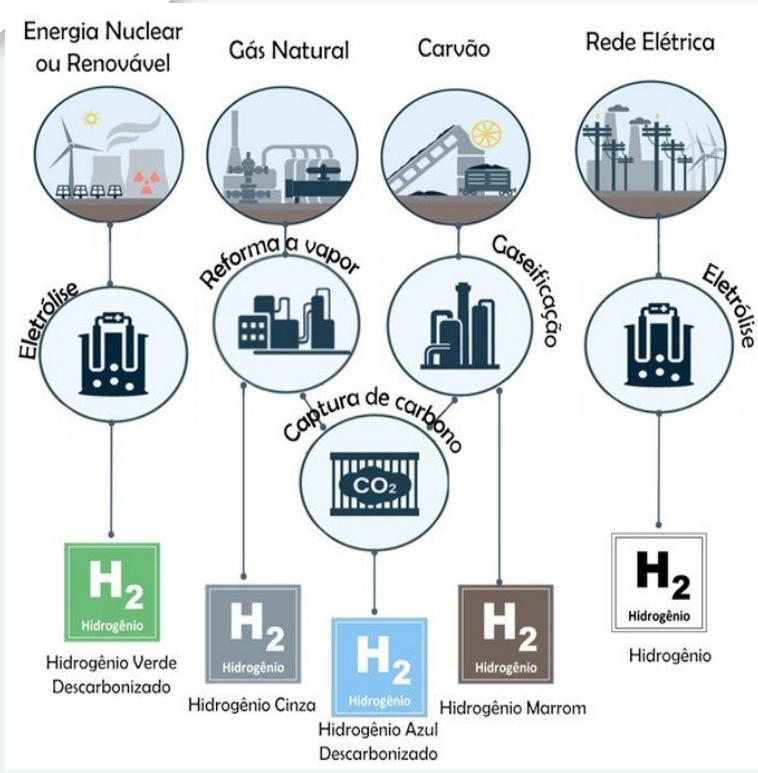
Power-to-X



Fonte: International Pt-X Hub
Flaviano Williams Fernandes

Hidrogênio verde

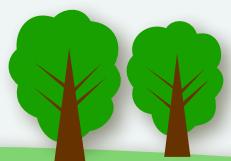
Classificação dos processos de produção



Radiação eletromagnética:

- Processos foto-eletroquímicos
- Processos foto-biológicos

Processo lento e com baixa produtividade



Hidrogênio verde

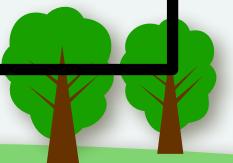
Vantagens e desvantagens

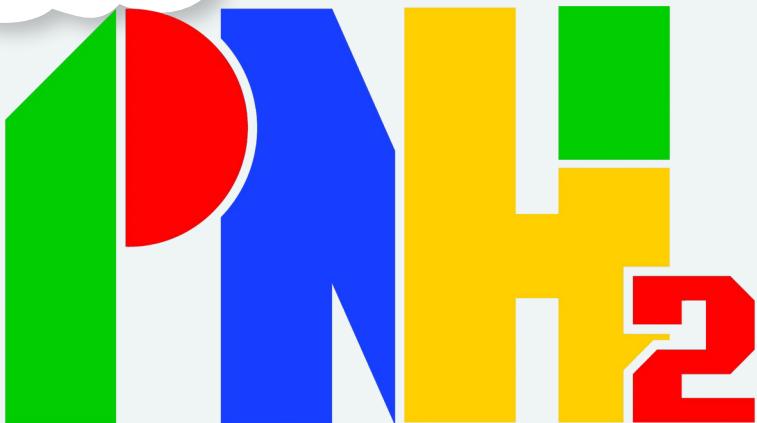
Vantagens

- 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.





Programa Nacional do Hidrogênio

Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2)

Hidrogênio verde

Iniciativas

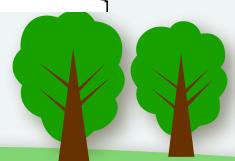
**Hidrogênio verde: há 113
projetos com investimentos de
R\$ 469 bi**

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

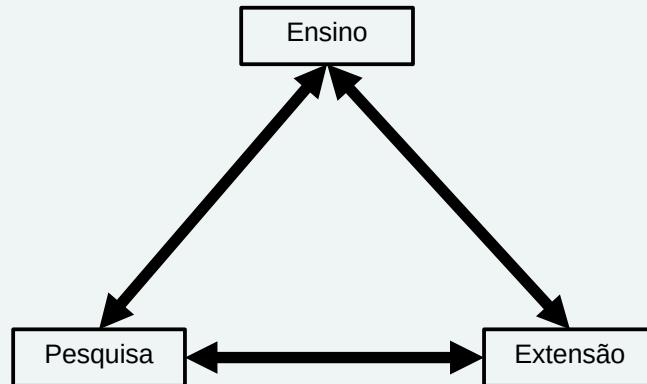
Escrito por [Egídio Serpa](#) egidio.serpa@svm.com.br

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

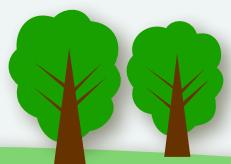
Fonte: Diário do Nordeste



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

Protótipos que atendem a ODS 7



Fonte: [Electroarteperú](#)

Fonte: [G1](#)

Fonte: [Manual do Mundo](#)

Ensino, pesquisa e extensão

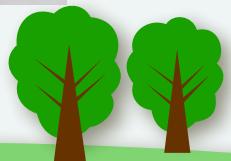
Protótipos que atendem a ODS 6



Fonte: Próprio autor



Fonte: Química em prática

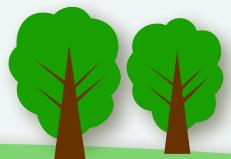


Ensino, pesquisa e extensão

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 H₂V

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.



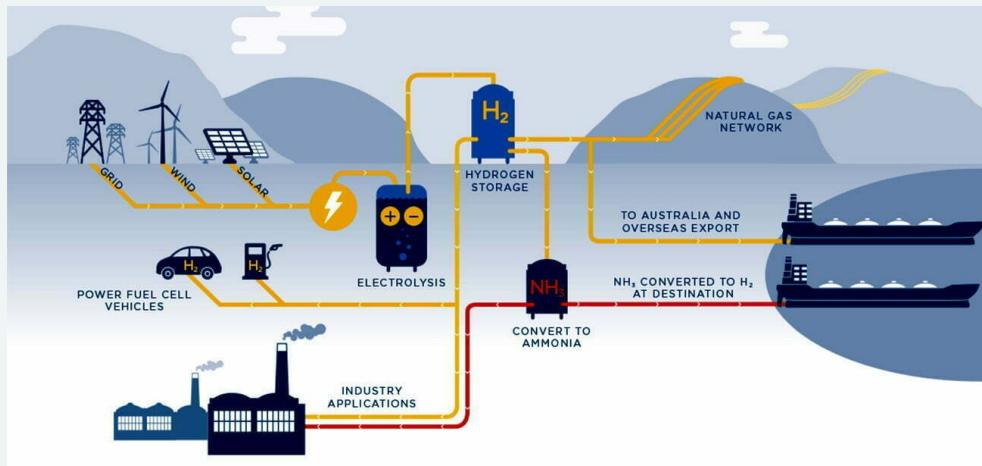
Tanque de armazenamento de H₂ em Kuqa, China.



Apêndice A. Desafios do H₂V

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 H₂V

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.

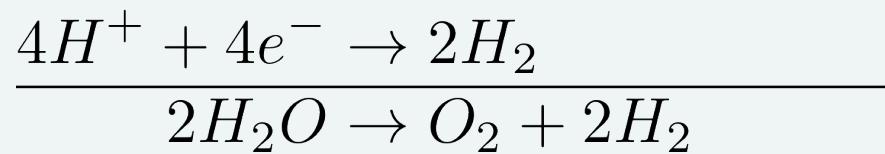
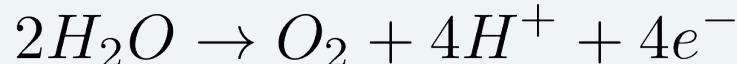
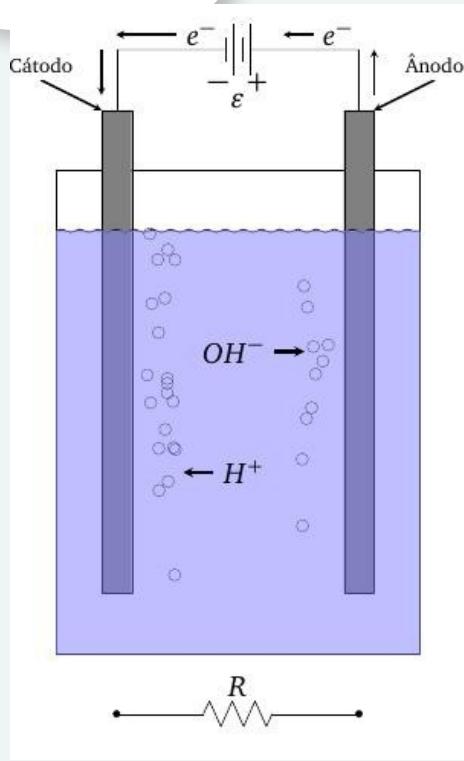
Fonte: Senado

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

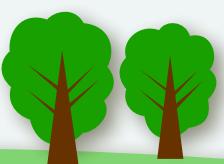
Fundamentos da eletrólise alcalina



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

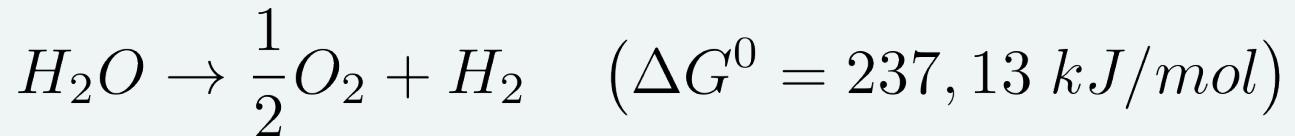
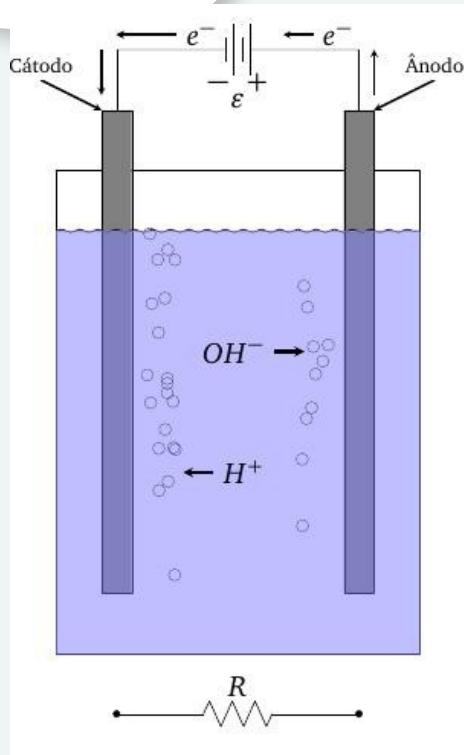
$$n = \frac{it}{2F}$$

F é chamada constante de Faraday.



Apêndice B. Hidrogênio verde

Tensão mínima

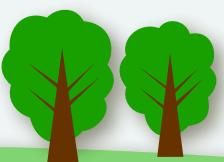


O trabalho realizado para transportar 2 mol de elétrons entre dois terminais com tensão V é dado por

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

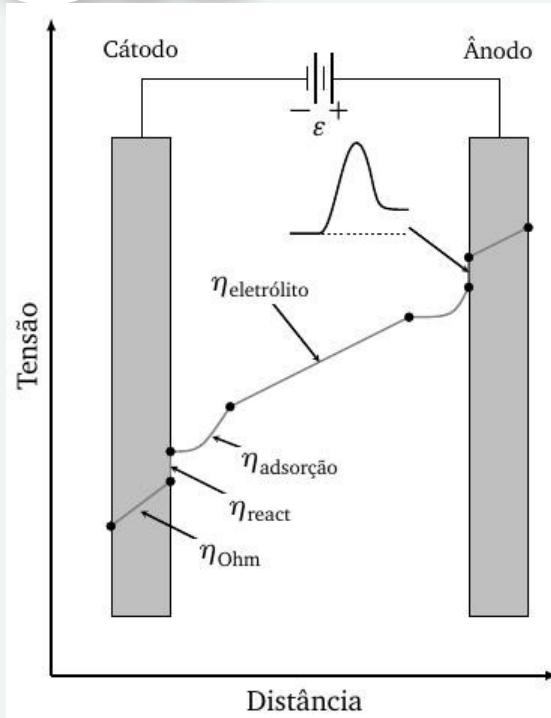
$$V = -\frac{\Delta G^0}{2F},$$

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



Apêndice B. Hidrogênio verde

Perdas de energia e sobrepotencial



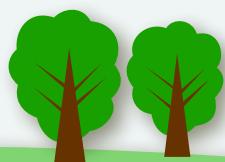
Considerando a entropia do sistema, o trabalho necessário para que a reação aconteça aumenta de acordo com a equação abaixo,

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

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

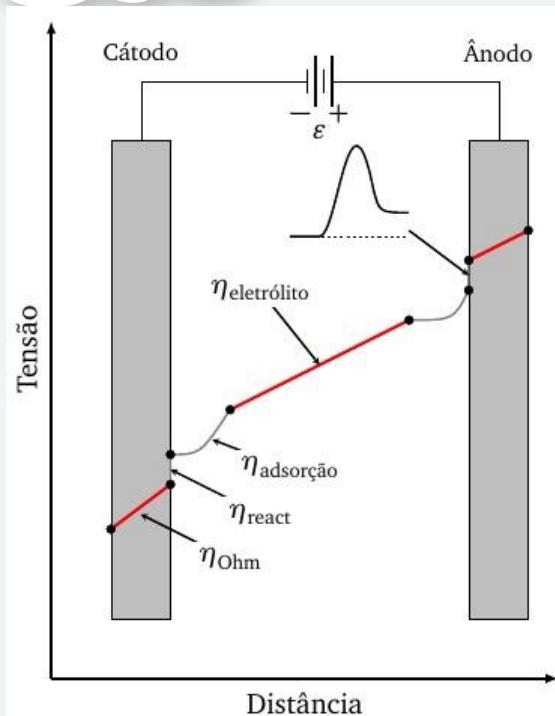
$$V_{\text{célula}} = V_{\text{padrão}} + \epsilon$$

ϵ é chamado de sobrepotencial.



Apêndice B. Hidrogênio verde

Sobrepotencial: ôhmico

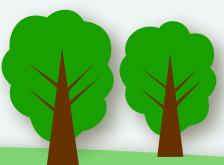


Ôhmico

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

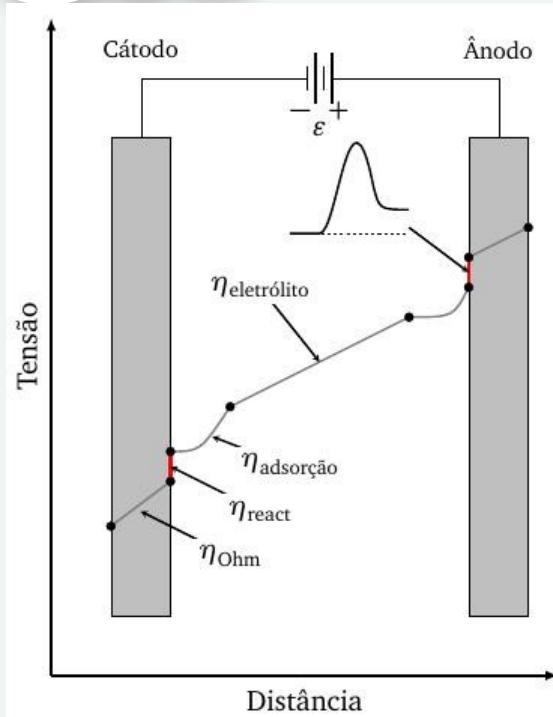
Solução:

- 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

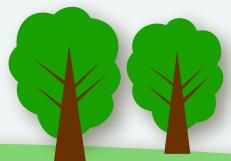
Sobrepotencial: reação na superfície



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

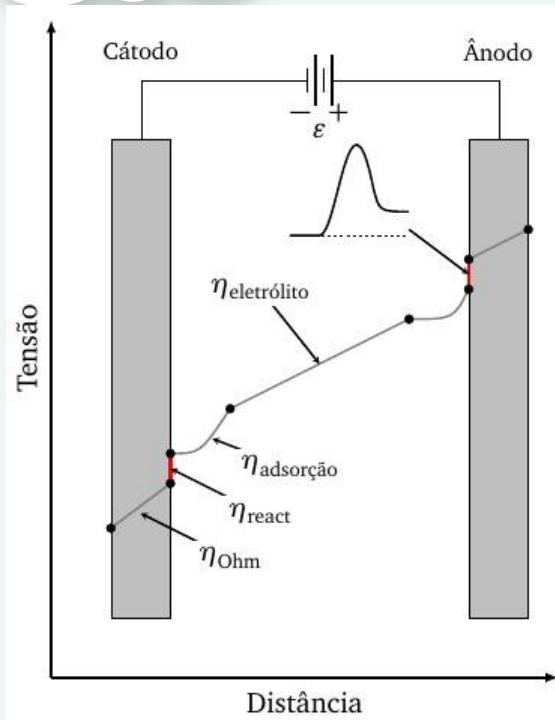
Solução:

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



Apêndice B. Hidrogênio verde

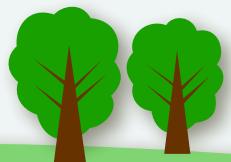
Sobrepotencial: adsorção



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

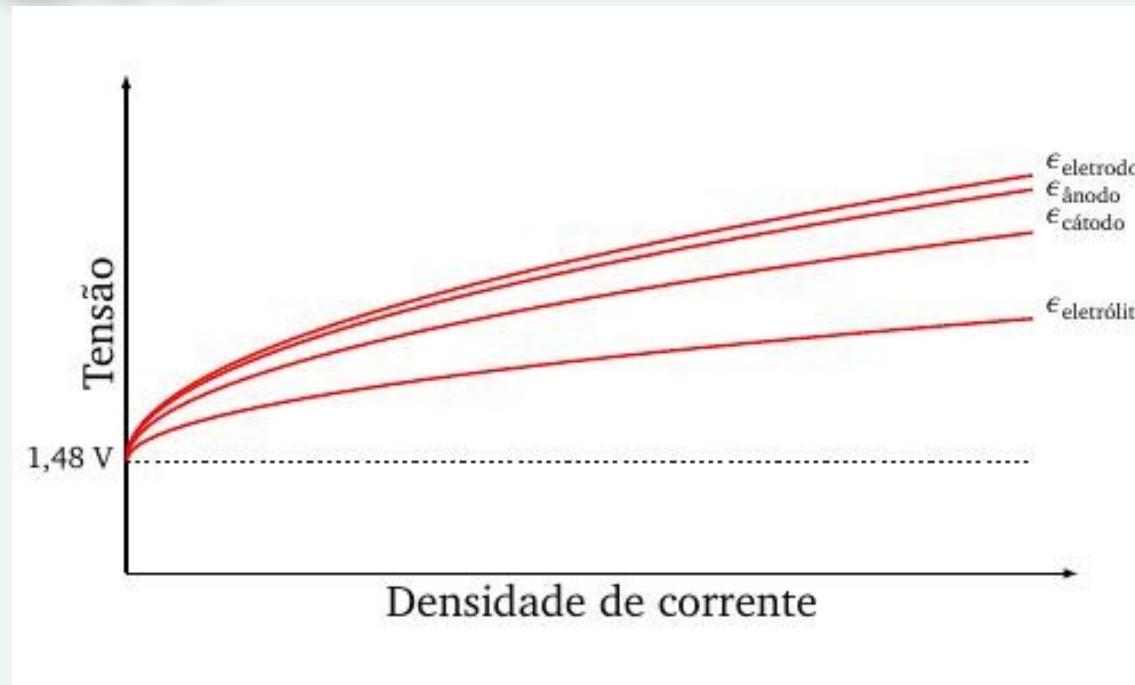
Solução:

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



Apêndice B. Hidrogênio verde

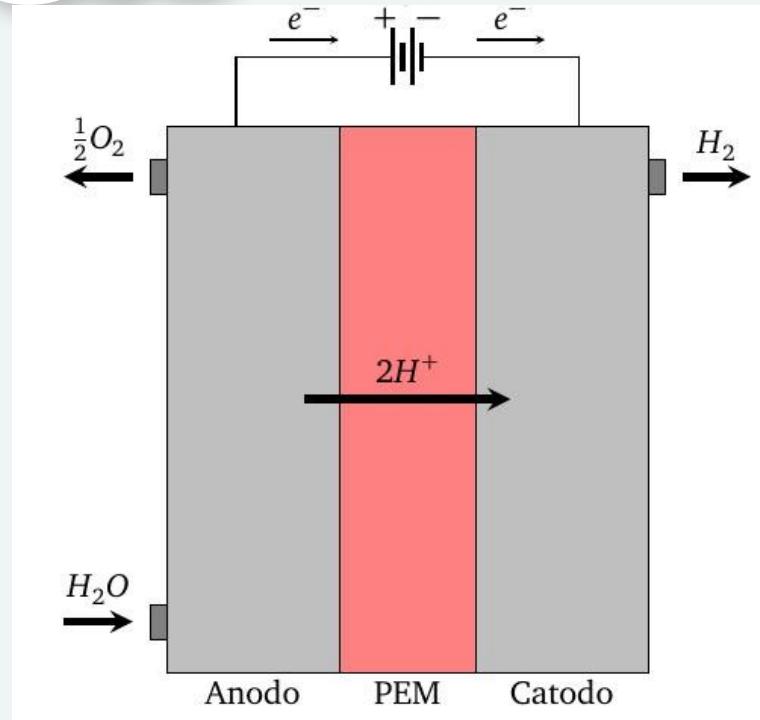
Gráfico da tensão versus densidade de corrente



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

Apêndice B. Hidrogênio verde

Polymer Electrolyte Membrane (PEM)

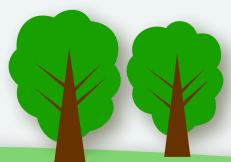


Vantagens:

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

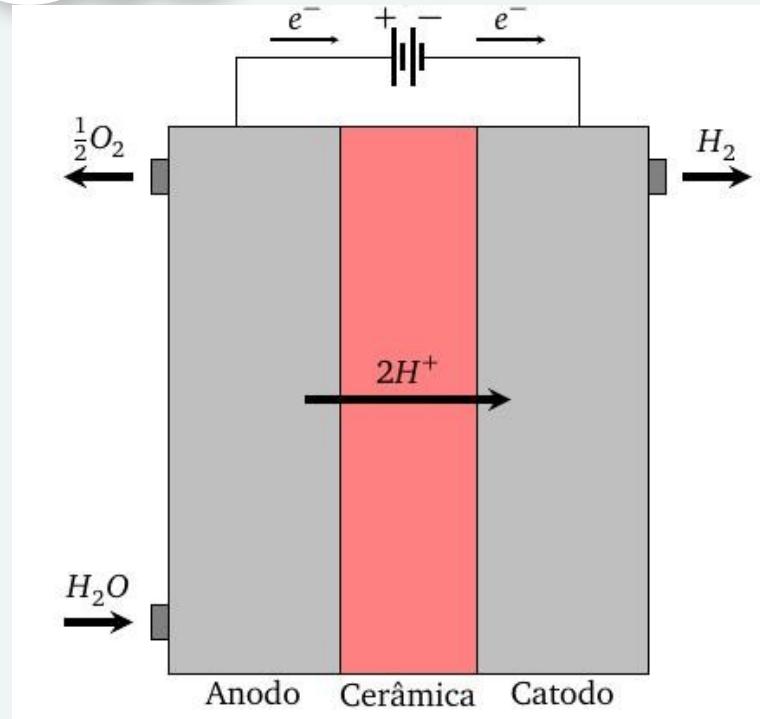
Desvantagens:

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



Apêndice B. Hidrogênio verde

Solid Oxide Electrolysis (SOE)

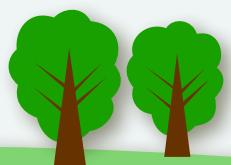


Vantagens:

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

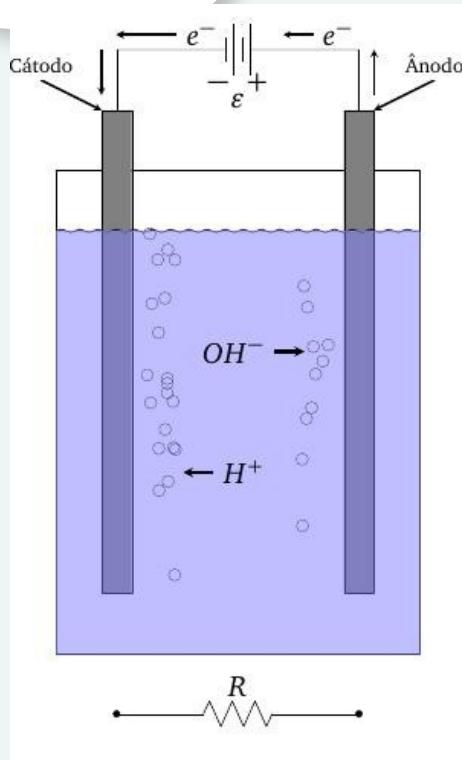
Desvantagens:

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



Apêndice B. Hidrogênio verde

Alcaline Electrolyzer (AEL)

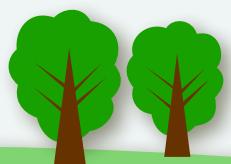


Vantagens:

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

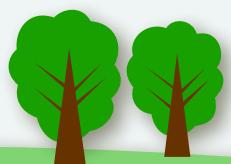
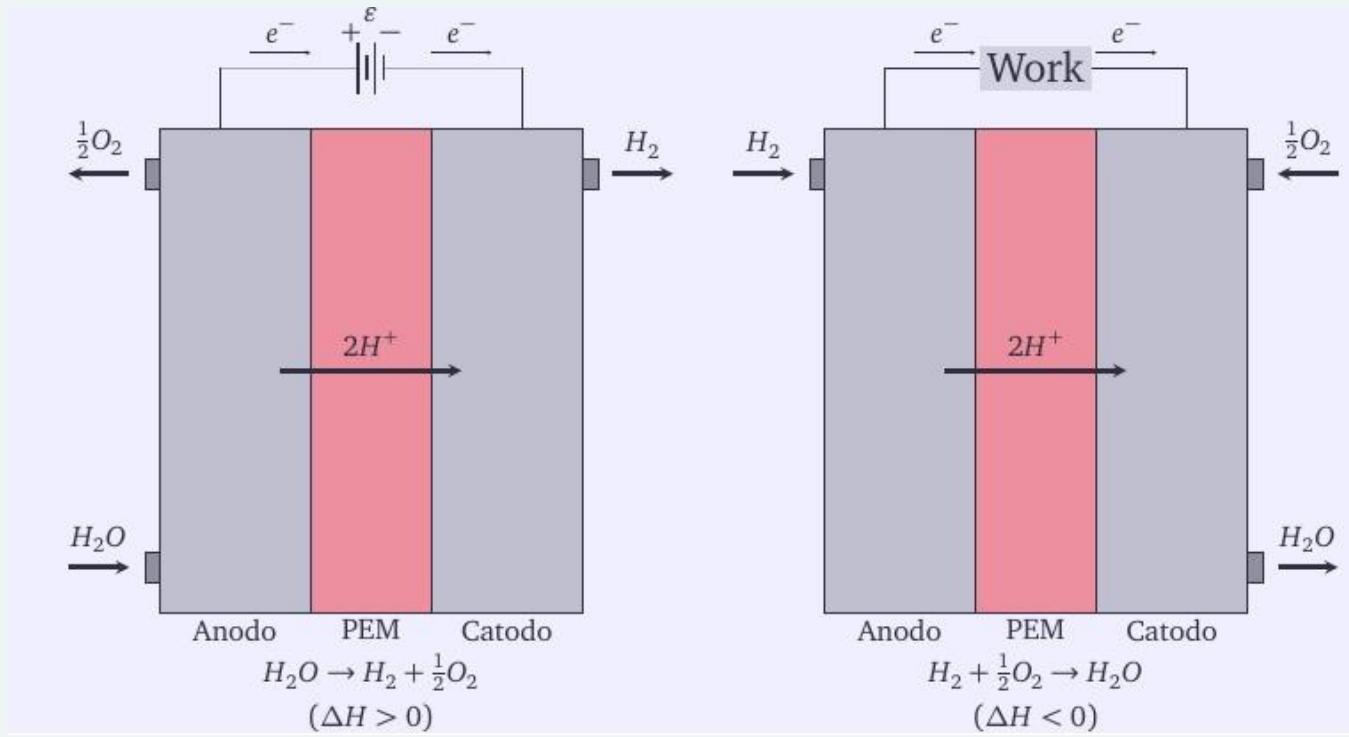
Desvantagens:

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



Apêndice B. Hidrogênio verde

H2V → Power-to-mobility



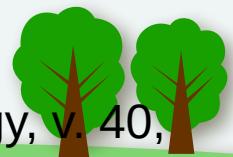
Apêndice B. Hidrogênio verde

Eficiência η do reator

Razão entre a energia produzida na forma de H₂ pela energia elétrica fornecida pela fonte de alimentação (tensão e corrente)

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

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

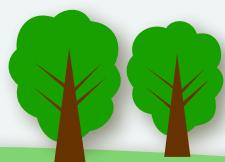


Apêndice C. Resultados

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.

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



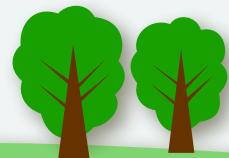
Apêndice C. Resultados

Planejamento experimental

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

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

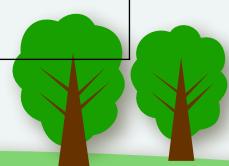
$$X_2 = \frac{C - 3,5}{1,5}$$



Apêndice C. Resultados

Matriz de planejamento

Experimento	Corrida	X₁	X₂	y (mL/min)
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 H₂

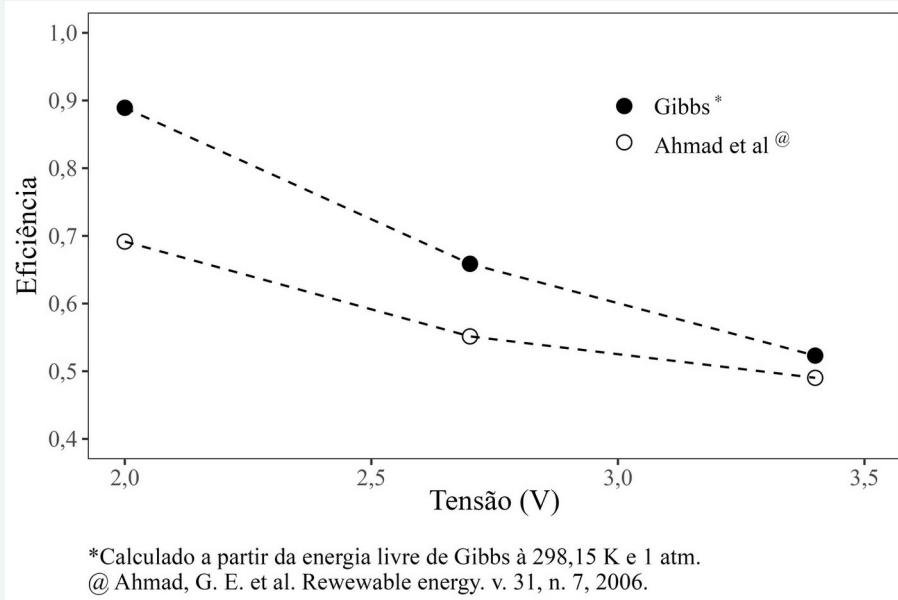


Eletrolizador

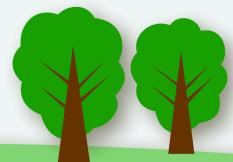
Coleta de O₂

Apêndice C. Resultados

Eficiência do eletrolizador

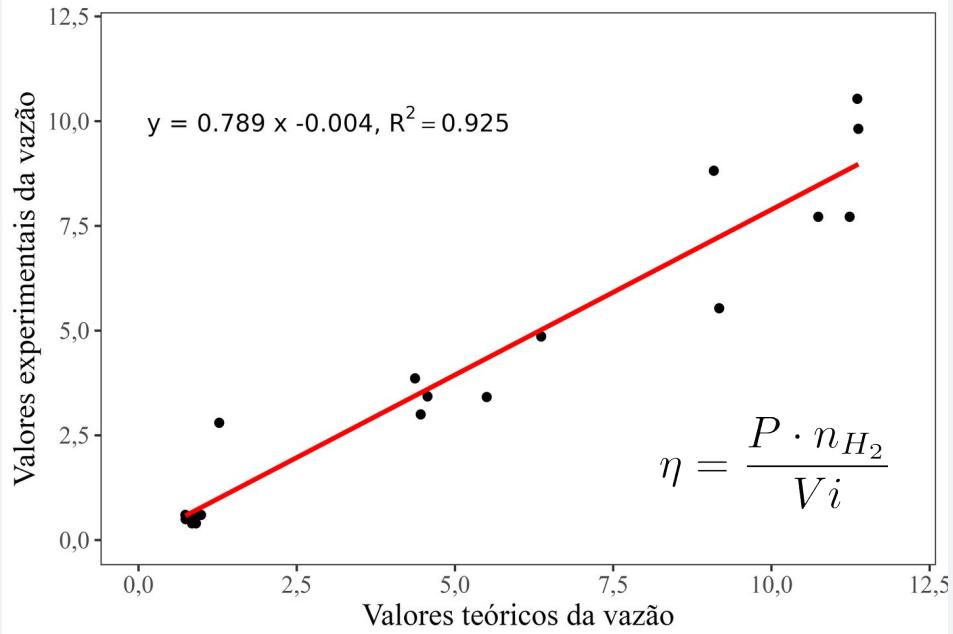


- Os valores foram obtidos tomando como referência a energia livre de Gibbs à 1 atm e 298,15 K da reação de formação do H₂ de 236,486 kJ/mol;
- O valor máximo da eficiência do reator foi obtido através da tensão de 2V, decaindo exponencialmente para valores maiores.

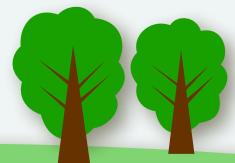


Apêndice C. Resultados

Comparação entre os valores teóricos e experimentais

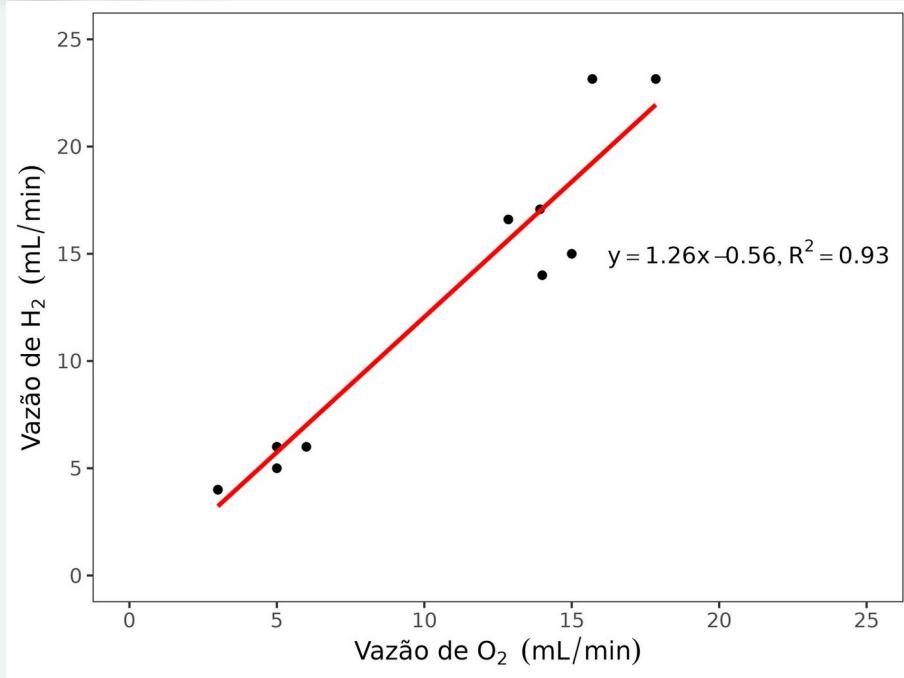


- O gráfico ao lado mostra através de uma análise de correlação linear que os dados experimentais reproduzem de maneira significativa os cálculos previsto pela teoria;
- Utilizando o teste t-Student com nível de significância de 5% foi verificado que não existe diferença significativa entre os valores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



Apêndice C. Resultados

Comparação entre as vazões de H₂ e O₂



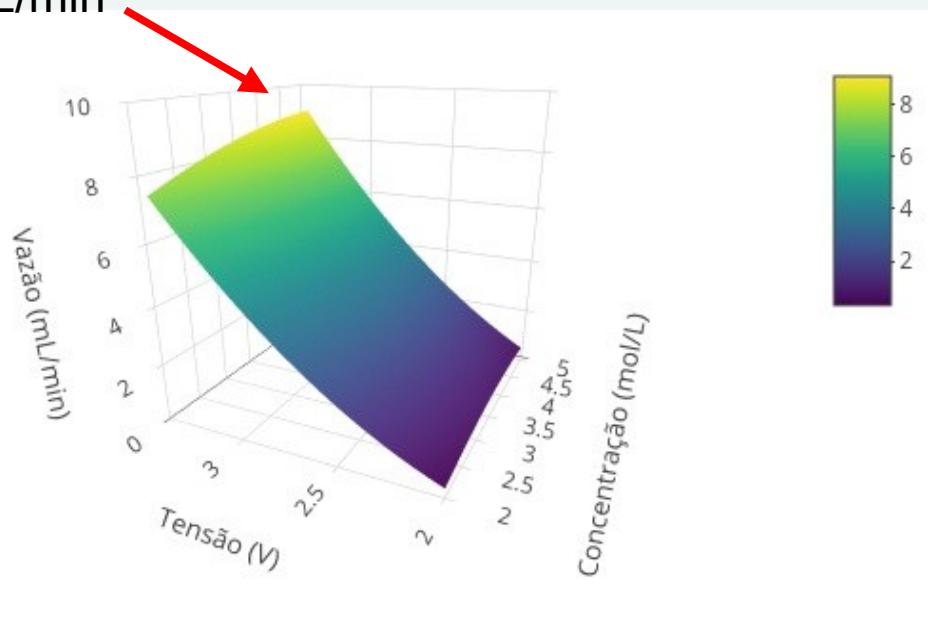
O gráfico à esquerda mostra a análise de regressão obtida para a vazão de H₂ em relação a O₂, o que demonstra uma forte correlação entre os volumes acima de 1/1, de acordo com os cálculos estequiométricos.

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 H₂

