



Fundação de Apoio à
Universidade de São Paulo

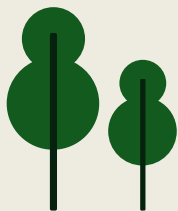


Secretaria de  **SÃO PAULO**
Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística GOVERNO DO ESTADO

WORKSHOP 2 PLANO ESTADUAL DE ENERGIA 2050

Race to Zero | Race to Resilience

OFERTA I – Geração de Energia Elétrica, Geração Distribuída e Redes Inteligentes, Hidrogênio





Fundação de Apoio à
Universidade de São Paulo



Secretaria de  **SÃO PAULO**
Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística GOVERNO DO ESTADO

WORKSHOP 2

PLANO ESTADUAL DE ENERGIA 2050

Race to Zero | Race to Resilience

Demanda de Energia na Produção de Hidrogênio

Prof. Dr. Ennio Peres da Silva

Profa. Dra. Carla Kazue N.

Cavaliere



AGENDA

1. CONTEXTO

2. METODOLOGIA, PREMISSAS E MODELOS UTILIZADOS

3. RESULTADOS

4. CONCLUSÕES

CONTEXTO

QUADRO ATUAL:

- **Consumo mundial de hidrogênio (2022): 94 MtH₂/ano (91 MtH₂/ano em 2019)**
- **Consumo brasileiro de hidrogênio (2019): 0,4 MtH₂/ano (0,44% do mundial)**
- **O ESP produz e consome atualmente cerca de 0,21 MtH₂/ano (48% do Brasil)**
- **Setores de consumo: petroquímico (76%); fabricação de amônia (19%); outros (5%)**
- **Fontes de energia utilizadas: gás natural (95%); eletricidade da rede (5%)**
- **Emissões de CO₂ associadas à produção/consumo: 1,4 ktCO₂-eq/ano**
- **Perspectivas de evolução desse quadro: PIB industrial do ESP**

CONTEXTO

PERSPECTIVAS NO HORIZONTE DE 2050:

- **Consumo mundial de hidrogênio (2050): 320 - 530 MtH₂/ano (DNV – IEA)**
- **Valores anunciados pelos países (2050): 250 MtH₂/ano**
- **Valor esperado para o Brasil (2050): 10 MtH₂/ano (aprox. 3% do mundial)**
- **A produção/consumo atual evoluirá de acordo com o PIB industrial do ESP**
- **Serão introduzidos novos empreendimentos de produção no ESP para:**
 - (1) ampliação dos usos atuais como insumo químico;**
 - (2) substituição de energéticos fósseis consumidos no estado;**
 - (3) introdução de novas aplicações do hidrogênio (transporte; geração de calor);**
 - (4) exportação de hidrogênio e seus derivados (amônia, metanol etc.).**

**Aumento:
≈ 10 vezes**

AGENDA

1. CONTEXTO

2. METODOLOGIA, PREMISSAS E MODELOS UTILIZADOS

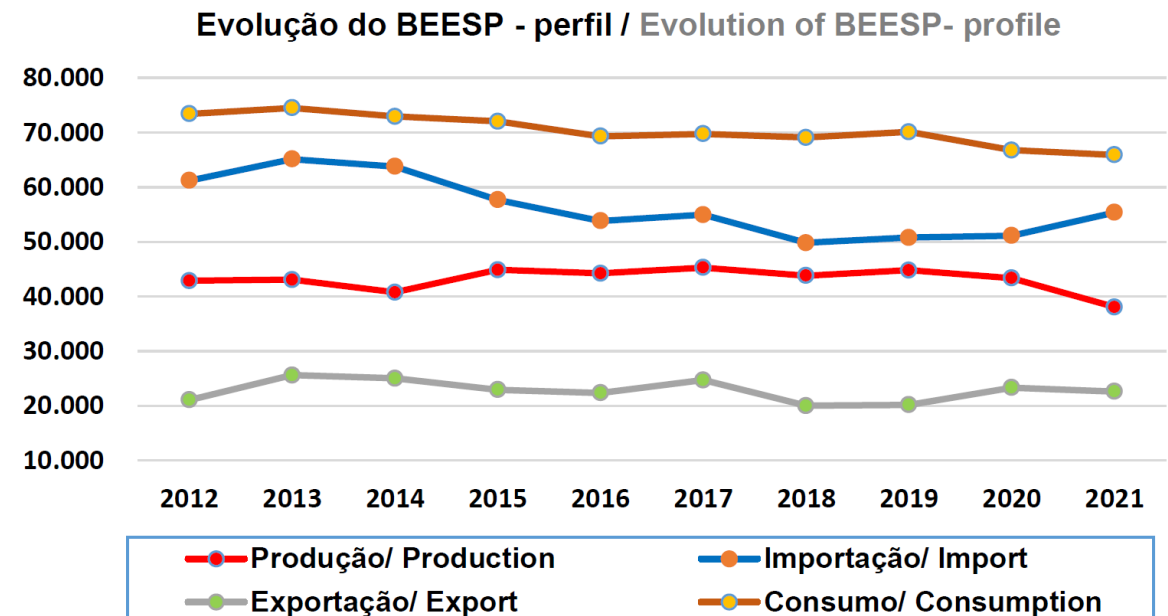
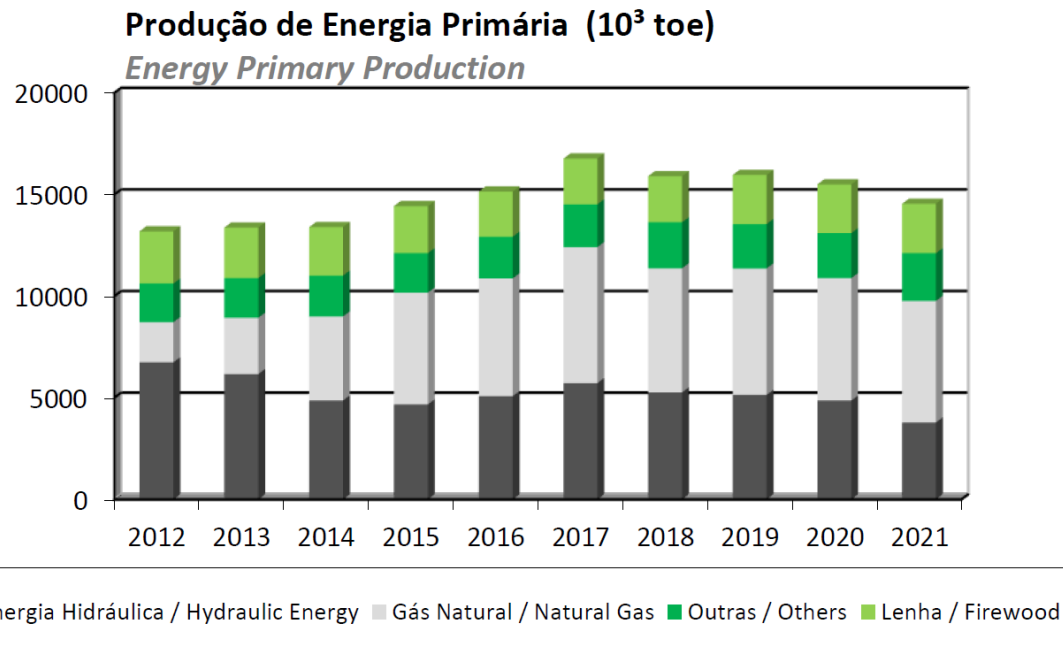
3. RESULTADOS

4. CONCLUSÕES

METODOLOGIA, PREMISSAS E MODELOS

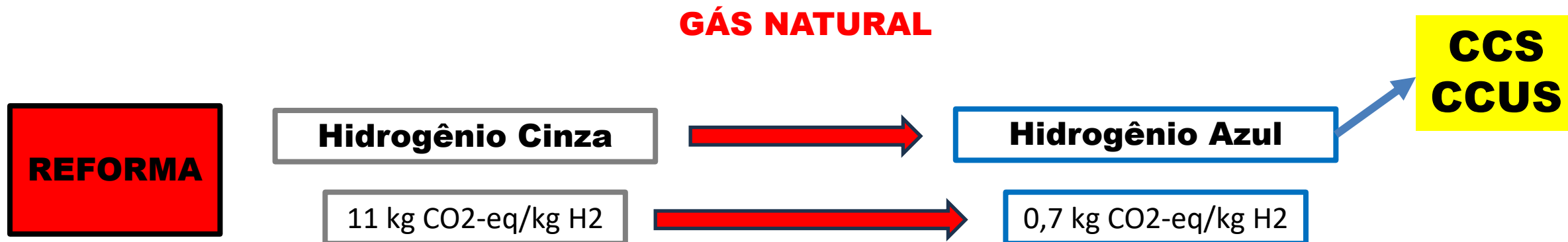
FONTES DE ENERGIA DISPONÍVEIS NO ESP PARA A PRODUÇÃO DE H2:

- gás natural;
- eletricidade: rede (majoritariamente hidráulica), solar fotovoltaica e eólica offshore;
- biomassas: etanol, biometano e resíduos (urbanos e rurais);



METODOLOGIA, PREMISSAS E MODELOS

PREMISSAS PARA AS FONTES DE ENERGIA PARA A PRODUÇÃO DE H2:



8.2.6.1. Reservas Provasdas 8.2.6.1. Proven Reserves

		2020	2021
Petróleo <i>Oil</i>	(milhões m ³) (million m ³)	1.269,83	1.479,98
Gás Natural <i>Natural Gas</i>	(milhões m ³) (million m ³)	205.580,58	244.253,75

Fonte: Boletim Anual de Reservas - ANP, conforme a Resolução ANP n° 47/2014.
Source: Annual Bulletin of the Reserves - ANP, as Resolution ANP No. 47/2014.
As reservas do campo de Santos estão apropriadas totalmente no Estado de São Paulo.
The reserves of the field Santos are totally appropriate in São Paul

Tabela 3.03 - Gas Natural
Table 3.03 - Natural Gas

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Produção	1992	2788	4163	5538	5832	6740	6151	6265	6064	6021	Production
Importação Estadual	4044	3622	2104	552	668	146	280	429	92	36	State Import
Perdas Distr. Armazenagem	-66	-136	-75	-87	-66	-99	-79	-114	-47	-60	Losses in distrib. and storage
Oferta Bruta	5970	6274	6192	6003	5030	5439	6230	6279	5211	5997	Gross Supply

245.000 / 6.000 ≈ 41 anos

METODOLOGIA, PREMISSAS E MODELOS

PREMISSAS PARA AS FONTES DE ENERGIA PARA A PRODUÇÃO DE H₂:

ELETRICIDADE HIDRO

**ELETRÓ-
LISE**

Hidrogênio Amarelo

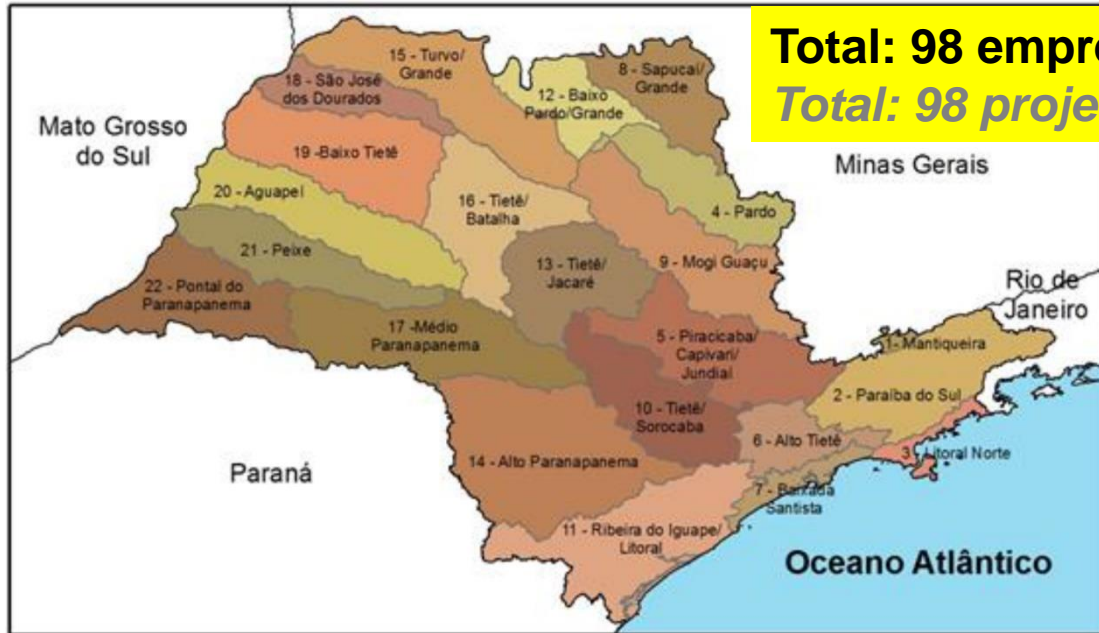


Hidrogênio Verde

5 kg CO₂-eq/kg H₂

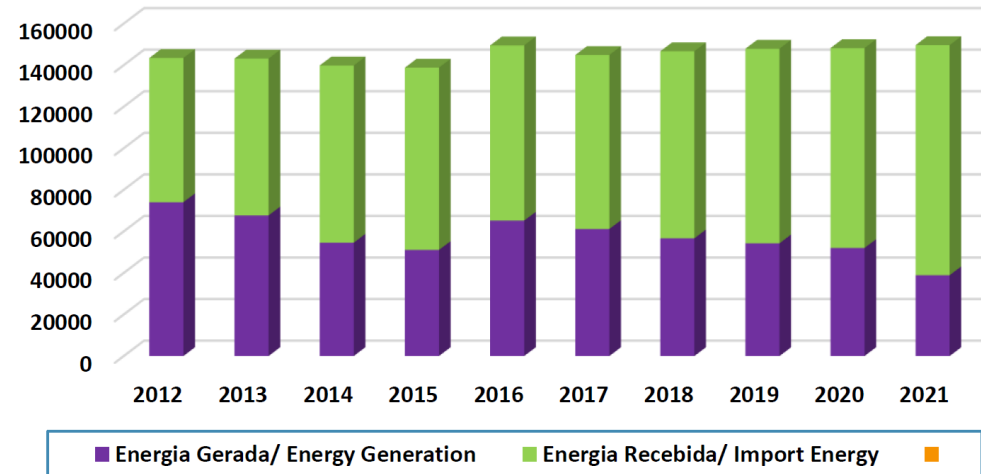


1 - 0,1 kg CO₂-eq/kg H₂



Total: 98 empreendimentos - 1800 MW
Total: 98 projects - 1800 MW

Energia Requerida (GWh)
Energy Requierdy



METODOLOGIA, PREMISSAS E MODELOS

PREMISSAS PARA AS FONTES DE ENERGIA PARA A PRODUÇÃO DE H₂:



8.2.5.1. Viabilidade Técnica-Econômica

8.2.5.1. Technical and Economic Feasibility

Potencial <i>Potential</i>	9.100 MWp
Área <i>area</i>	732 km ²
Energia <i>Energy</i>	12.085.166 MWh ano / <i>year</i>

ANEEL Data de referência dos dados: 01 de julho de 2023

Situação: em operação			
Estado	Pot Outorgada (kW)	Pot Fiscaliz (kW)	(%)
BA	2.051.915,35	2.049.515,35	21,26
CE	756.318,00	756.318,00	7,85
MG	3.083.322,68	3.083.322,16	31,98
PB	460.723,20	460.723,20	4,78
PE	414.853,63	414.855,25	4,30
PI	1.465.987,00	1.465.987,00	15,21
RN	366.827,34	366.827,34	3,81
SP	891.829,82	891.829,82	9,25
Brasil	9.639.904,17		98,44

São Paulo ≈ 10 % do H₂ verde do país

METODOLOGIA, PREMISSAS E MODELOS

PREMISSAS PARA AS FONTES DE ENERGIA PARA A PRODUÇÃO DE H₂:

ELETRICIDADE EÓLICA OFFSHORE

**ELETRÓ-
LISE**

Hidrogênio Amarelo

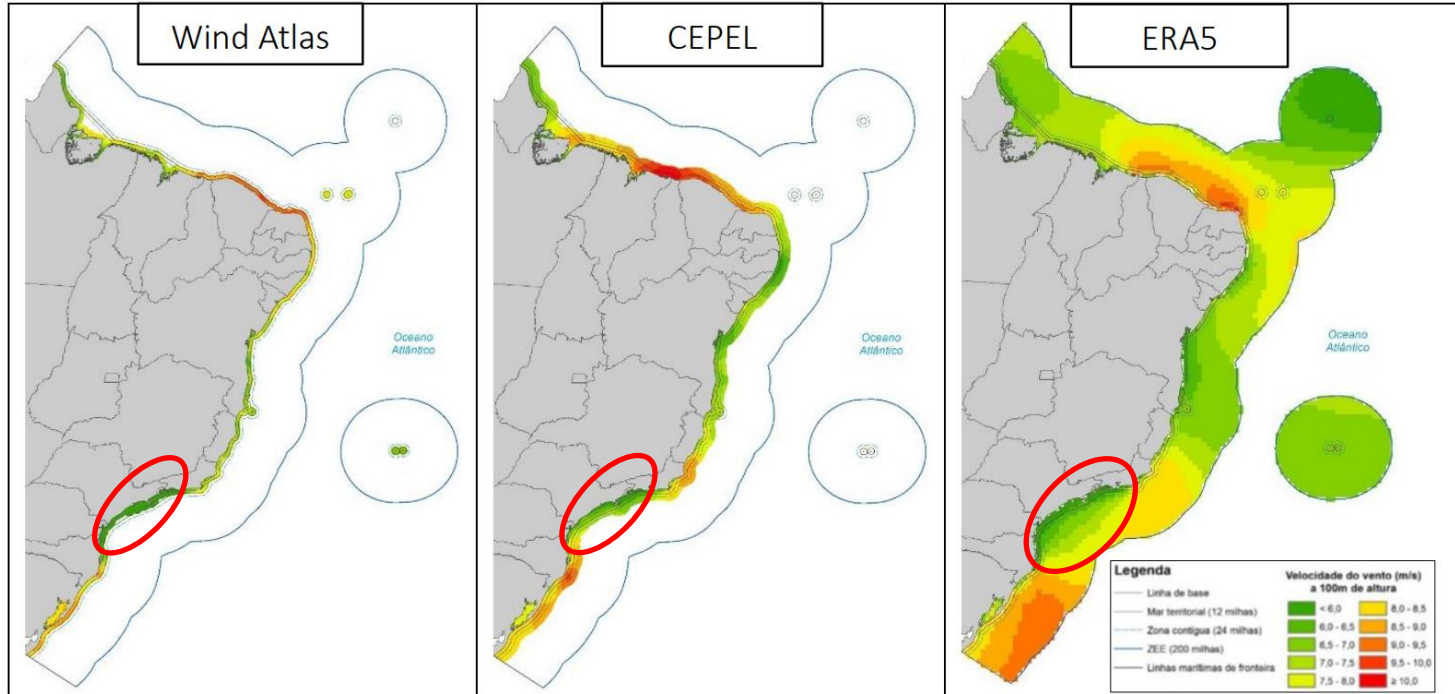


Hidrogênio Verde

5 kg CO₂-eq/kg H₂



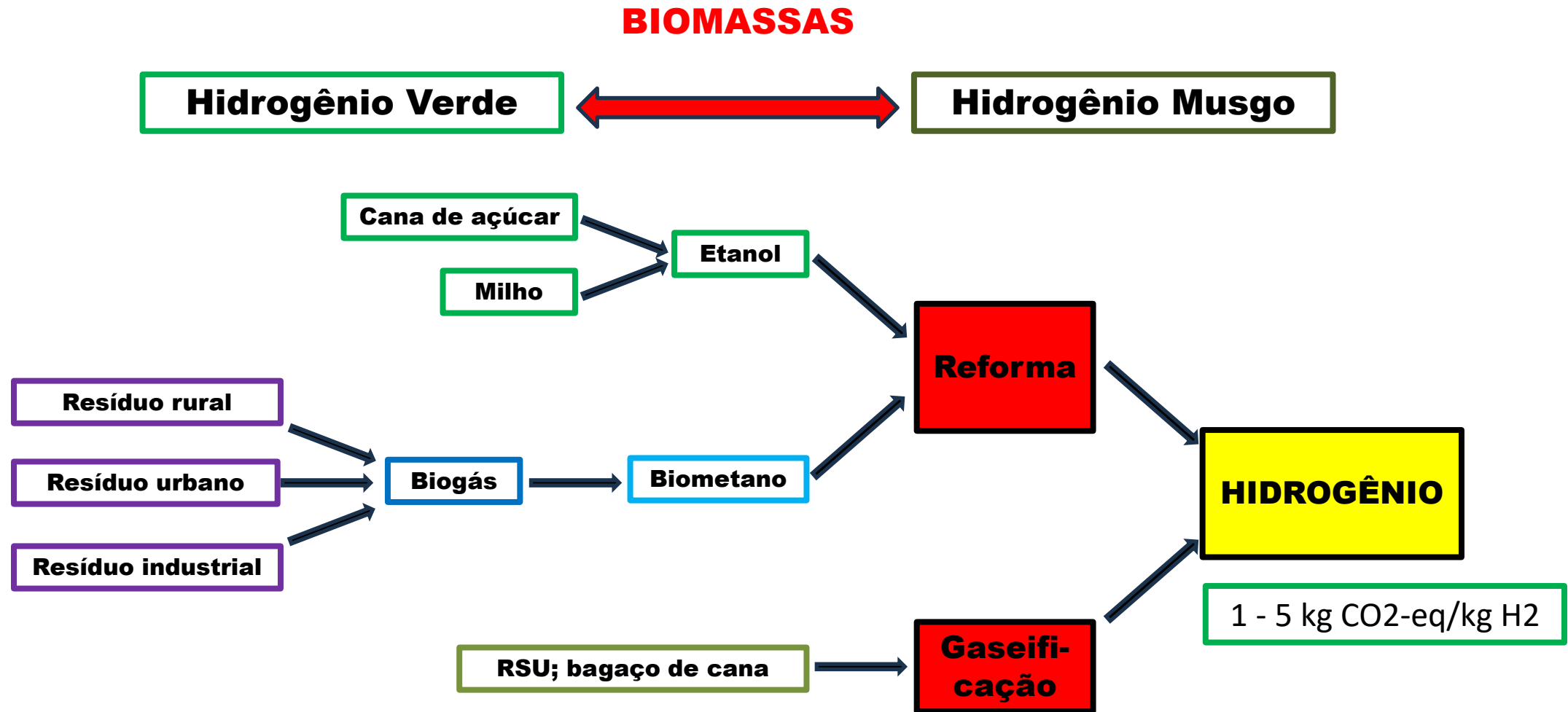
1 - 0,1 kg CO₂-eq/kg H₂



São Paulo ≈ 10 % do H₂ verde do país

METODOLOGIA, PREMISSAS E MODELOS

PREMISSAS PARA AS FONTES DE ENERGIA PARA A PRODUÇÃO DE H₂:



METODOLOGIA, PREMISSAS E MODELOS

PREMISSAS DOS FATORES DE CONVERSÃO PARA A PRODUÇÃO DE H₂:

- Reforma do gás natural (90% de metano): 3,5 kg GN/kg H₂ (4,6 m³/kg H₂)
- Reforma do biometano: 3,2 kg CH₄/kg H₂ (4,2 m³/kg H₂)
- Eletrólise da água: 50 kWh/kg H₂ (30 bar)
- Reforma do etanol: 4 kg Etanol/kg H₂ (5,0 litros/kg H₂)
- Gaseificação do bagaço da cana: 16,3 kg bagaço/kg H₂

AGENDA

1. CONTEXTO

2. METODOLOGIA, PREMISSAS E MODELOS UTILIZADOS

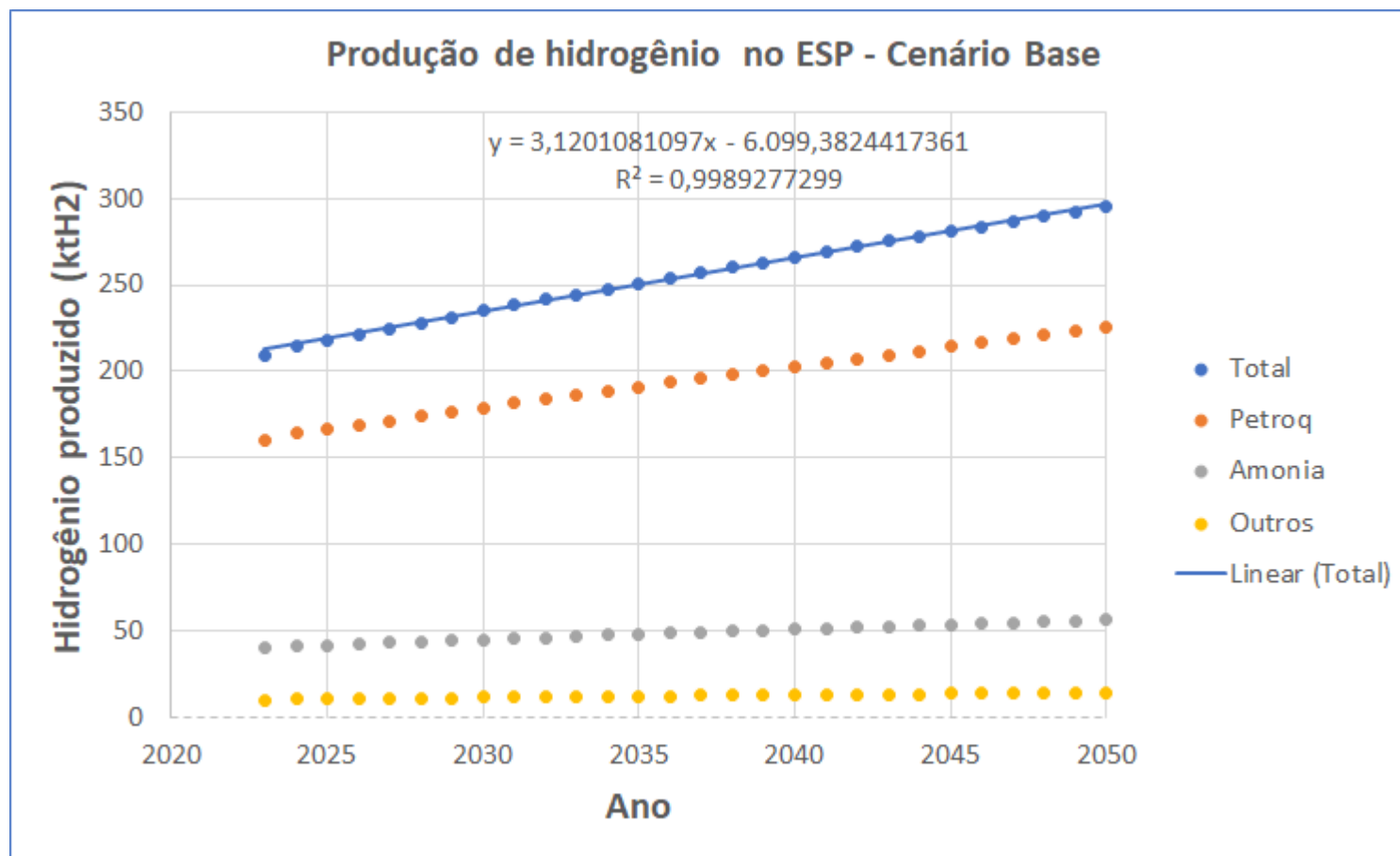
3. RESULTADOS

4. CONCLUSÕES

RESULTADOS

DEMANDA DE ENERGIA PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO NO ESP:

Evolução do quadro atual segundo o PIB industrial do ESP



Ano	Consumo total H2 (mil ton)	Consumo H2 Petro (mil ton)	Consumo H2 Amon (mil ton)	Consumo H2 Outr (mil ton)
2023	210	160	40	10
2024	215	164	41	10
2025	218	166	42	10
2026	222	169	42	11
2027	225	171	43	11
2028	228	174	43	11
2029	232	176	44	11
2030	235	179	45	11
2031	238	181	45	11
2032	241	184	46	11
2033	245	186	47	12
2034	248	189	47	12
2035	251	191	48	12
2036	254	193	48	12
2037	257	196	49	12
2038	260	198	50	12
2039	263	200	50	13
2040	266	203	51	13
2041	269	205	51	13
2042	272	207	52	13
2043	275	210	52	13
2044	278	212	53	13
2045	281	214	54	13
2046	284	216	54	14
2047	287	219	55	14
2048	290	221	55	14
2049	293	223	56	14
2050	296	225	56	14

RESULTADOS

DEMANDA DE ENERGIA PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO NO ESP:

Evolução do quadro atual segundo o PIB industrial do ESP

1. Setor petroquímico

- **Situação atual: reforma do gás natural, sem CCS**
- **Situação futura (até 2050): reforma do gás natural, com CCS**
- **Evolução da demanda: segundo o PIB industrial do Estado**
- **Evolução do consumo de GN: de 736 milhões de m³ em 2022 a 1.035 milhões em 2050**
- **Captura de Carbono: início em 2030, com aumento progressivo até chegar a 1,6 ktCO₂-eq/ano em 2050**

RESULTADOS

DEMANDA DE ENERGIA PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO NO ESP:

Evolução do quadro atual segundo o PIB industrial do ESP

2. Setor amônia

- **Situação atual: reforma, sem CCS**
- **Situação futura (até 2050): substituir progressivamente o GN por eletricidade (eletrólise)**
- **Evolução da demanda: segundo o PIB industrial do Estado**
- **Evolução do consumo de GN: cai de 184 milhões de m³ em 2022 a zero em 2050**
- **Consumo de eletricidade: cresce a partir de 2030, com aumento progressivo até chegar a 2,8 TWh em 2050 (potência média de 320 MW)**

RESULTADOS

DEMANDA DE ENERGIA PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO NO ESP:

Novas aplicações para o hidrogênio de baixo carbono no ESP

1. Setor de transporte

- Disponibilidade dos energéticos: rede, FV, eólica offshore, biomassas, GN com CCS
- Futuramente: uso de eletricidade (eletrólise) e/ou reforma
- Evolução da demanda, segundo a frota de veículos do Estado:

FROTA DE VEÍCULOS [x1000]

Categoria de veículo	Automóveis				Comerciais leves				Caminhões urbanos				Caminhões estradeiros				Ônibus urbanos				Ônibus rodoviários				Motocicletas			
	2022	2030	2040	2050	2022	2030	2040	2050	2022	2030	2040	2050	2022	2030	2040	2050	2022	2030	2040	2050	2022	2030	2040	2050	2022	2030	2040	2050
Total [absoluto]	10.066	11.497	14.818	17.773	2.082	2.161	2.345	2.480	379	339	288	236	549	629	669	663	122	121	110	100	56	54	48	41	2.681	2.903	3.185	3.435
MCI Gasolina	1.893	819	244	53	359	154	43	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.670	1.329	705	253
MCI Etanol	124	44	6	1	12	4	1	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MCI Flex	7.816	8.353	7.289	5.461	902	779	561	363	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.011	1.331	1.552	1.375
VHE Gasolina+Flex	25	508	1.586	2.008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VHEP Gasolina+Flex	10	318	1.113	2.033	-	46	191	325	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MCI Diesel	79	88	40	11	404	485	400	247	190	163	122	77	274	302	287	235	61	55	37	21	28,1	25,6	19,3	12,0	-	-	-	-
MCI Gás	-	-	-	-	-	46	131	178	-	5	16	24	-	12	47	94	-	2	7	10	-	1,2	3,7	5,2	-	-	-	-
VEB	4	454	1.759	3.420	1	118	420	764	-	7	27	56	-	12	42	74	-	8	28	48	-	1,2	5,2	10,3	-	243	927	1.807
VECC Hidrogênio	-	-	40	733	-	-	6	21	-	-	1	3	-	-	5	26	-	-	0	2	-	-	0,4	1,8	-	-	-	-

RESULTADOS

DEMANDA DE ENERGIA PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO NO ESP:

Novas aplicações para o hidrogênio de baixo carbono no ESP

1. Setor de transporte

➤ Consumo veicular:

Automóveis: 150 kgH₂/ano

Comerciais leves: 1.000 kgH₂/ano

Caminhões: 2.000 kgH₂/ano

Ônibus: 3.600 kgH₂/ano

FROTA DE VEÍCULOS [x1000]

Categoria de veículo	Automóveis				Comerciais leves				Caminhões urbanos				Caminhões estradeiros				Ônibus urbanos				Ônibus rodoviários			
	2022	2030	2040	2050	2022	2030	2040	2050	2022	2030	2040	2050	2022	2030	2040	2050	2022	2030	2040	2050	2022	2030	2040	2050
VECC Hidrogênio	0	0	40	733	0	0	6	21	0	0	1	3	0	0	5	26	0	0	0	2	0	0	0	2
Consumo H2 (kt/ano)	0	0	6	110	0	0	6	21	0	0	2	6	0	0	11	51	0	0	2	6	0	0	1	6

Ano	Automóveis (mil ton H ₂)	Com. leves (mil ton H ₂)	Caminhões (mil ton H ₂)	Ônibus (mil ton H ₂)	Total (mil ton H ₂)
2030	0	0	0	0	0
2040	6	6	13	3	28
2050	110	21	57	12	101

RESULTADOS

DEMANDA DE ENERGIA PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO NO ESP:

Novas aplicações para o hidrogênio de baixo carbono no ESP

2. Novas aplicações industriais do hidrogênio (amônia, metano, e-fuels)

- **Disponibilidade dos energéticos: rede, FV, eólica offshore, biomassas, GN com CCS**
- **Evolução da produção: aumento progressivo a partir de 2030, até chegar a 10% da produção esperada para o Brasil em 2050, ou seja, 1 Mth₂/ano (quase 5 vezes a produção atual)**
- **Hidrogênio de baixo carbono: eletrólise e/ou reforma de GN com CCS (biometano)**
- **Só eletricidade: 50 TWh (5.700 MWmed, pouco mais que as UHEs de Ilha Solteira e Porto Primavera juntas)**
- **Só gás natural (biometano): 5 bilhões de m³ gás natural (4,5 bilhões m³ biometano)**

AGENDA

1. CONTEXTO

2. METODOLOGIA, PREMISSAS E MODELOS UTILIZADOS

3. RESULTADOS

4. CONCLUSÕES

CONCLUSÕES

DEMANDA DE ENERGIA PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO NO ESP:

CONCLUSÕES:

- **A demanda atual de gás natural para a produção de H₂ no ESP é de 920 milhões m³/ano, o que corresponde a aproximadamente 15% do consumo do Estado;**
- **A demanda de potência elétrica para que toda a produção atual de H₂ passasse a ser feita por eletrólise da água seria de aproximadamente 1.200 MWmed, o que representa 78% da potência instalada da UHE de Porto Primavera.**
- **Considerando a evolução da produção atual de H₂ no Estado segundo o PIB do setor industrial, mantendo as formas de produção, haverá a necessidade, em 2050, de 1.035 milhões m³/ano de gás natural e 0,7 TWh/ano de energia elétrica (80 MWmed).**
- **No setor de transporte, a introdução de veículos a hidrogênio aumentará o consumo de hidrogênio em aproximadamente 100 mil toneladas em 2050, ou seja, mais 50% da produção atual.**

CONCLUSÕES

DEMANDA DE ENERGIA PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO NO ESP:

CONCLUSÕES:

- **No setor industrial, para se atingir no Estado a produção de 10% da produção nacional em 2050, serão necessários mais 5.700 MWmed de energia elétrica ou mais 5 bilhões de m³ de gás natural com CCS, ou ainda 4,5 bilhões m³ de biometano, sendo o mais provável uma combinação de cada uma dessas alternativas.**

- **Lembrando, para o ESP:**
 - 1. Potencial hidráulico: 1.800 MW**
 - 2. Potencial solar FV: 9.100 MW**
 - 3. Reservas gás natural: 40 anos com o consumo atual**
 - 4. Maiores possibilidades: biomassas, biogás, biometano, etanol, resíduos etc.**

CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS:

1. Balanço Energético do Estado de São Paulo – ano base 2021, disponível em <https://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalsev2/intranet/BiblioVirtual/diversos/BalancoEnergetico.pdf>
2. Hydrogen Demand and Cost Dynamics Working Paper, World Energy Council (2021). Available at: <https://www.worldenergy.org/publications/entry/working-paper-hydrogen-demand-and-cost-dynamics>
3. DNV (2022) Hydrogen Forecast to 2050. Available at: <https://www.dnv.com/focus-areas/hydrogen/forecast-to-2050.html>
4. IEA (2021) Net Zero by 2050. Available at: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
5. IEA (2019) The Future of Hydrogen. Available at: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
6. IEA (2023) Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity. Available at: <https://www.iea.org/reports/towards-hydrogen-definitions-based-on-their-emissions-intensity>
7. Wood Mackenzie (2022) Low-carbon hydrogen: defining the path to commercial scalability. Available at: <https://www.woodmac.com/news/opinion/low-carbon-hydrogen-defining-the-path-to-commercial-scalability/>
8. IPHE (2022) Methodology for Determining the Greenhouse Gas Emissions Associated With the Production of Hydrogen, V.2. Available at: https://www.iphe.net/files/ugd/45185a_03457347901844c3856e196689f3227c.pdf

Secretaria de
Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística



SÃO PAULO
GOVERNO DO ESTADO



FUST

Fundação de Apoio à
Universidade de São Paulo