



Instituto de Energia e Ambiente - IEE
Universidade de São Paulo - USP
Prof. Célio Bermann

Instituto de Energia e Ambiente da USP

Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica da USP

IEE 0005 - Produção e Consumo de Combustíveis e o Meio Ambiente

11a. aula: Problemas ambientais nos grandes centros urbanos:
ozônio troposférico; monóxido de carbono; óxidos de enxofre;
material particulado; fumaça.

Célula de combustível (Hidrogênio) e carros elétricos
como alternativas

Poluentes primários - Principais efeitos nocivos à saúde

► Monóxido de Carbono (CO)

Substância inodora, insípida e incolor - atua no sangue reduzindo sua oxigenação. Combina com a hemoglobina no sangue, diminuindo a capacidade de oxigenação do cérebro, coração e outros tecidos do organismo. Pode provocar tonturas, dores de cabeça, sono e redução dos reflexos, fazendo assim com que as pessoas percam a noção do tempo. É um dos principais responsáveis por acidentes de trânsito em áreas de grande concentração, aumentando também o estado de morbidez em pessoas idosas.

► Hidrocarbonetos (HC)

São irritantes nos olhos, nariz, parte superior do sistema respiratório, onde aumenta a presença de muco. Podem vir a causar danos celulares, sendo que diversos hidrocarbonetos são considerados carcinogênicos e mutagênicos com alteração do DNA. Reduz também a visibilidade ambiente, com consequente aumento de acidentes no sistema viário.

► Óxidos de Nitrogênio (NOx)

Combinação de nitrogênio e oxigênio que se formam em razão da alta temperatura na câmara de combustão. Provocam irritação e contração das vias respiratórias, diminuindo a resistência orgânica às infecções e participam do desenvolvimento de enfisema pulmonar.

► Material particulado (MP)

Mantém-se suspensos na atmosfera. Atingem alvéolos pulmonares, produzem alergias, bronquite, asma, e câncer de pulmão.

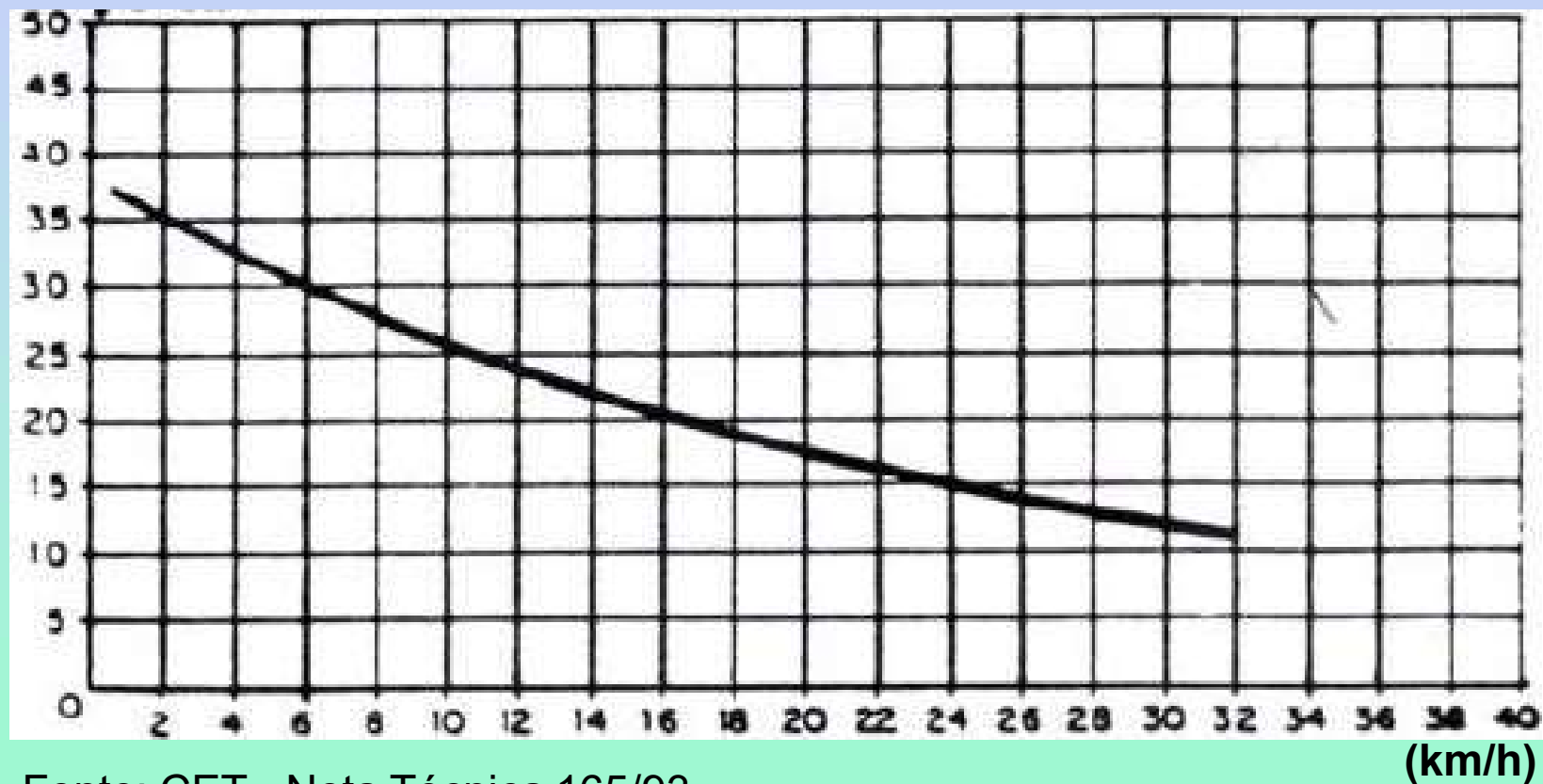
Velocidade de trânsito na malha viária da cidade de São Paulo



Fonte: CET-Companhia de Engenharia de Tráfego/SP (2007).

Curva CO para ônibus e caminhões a diesel

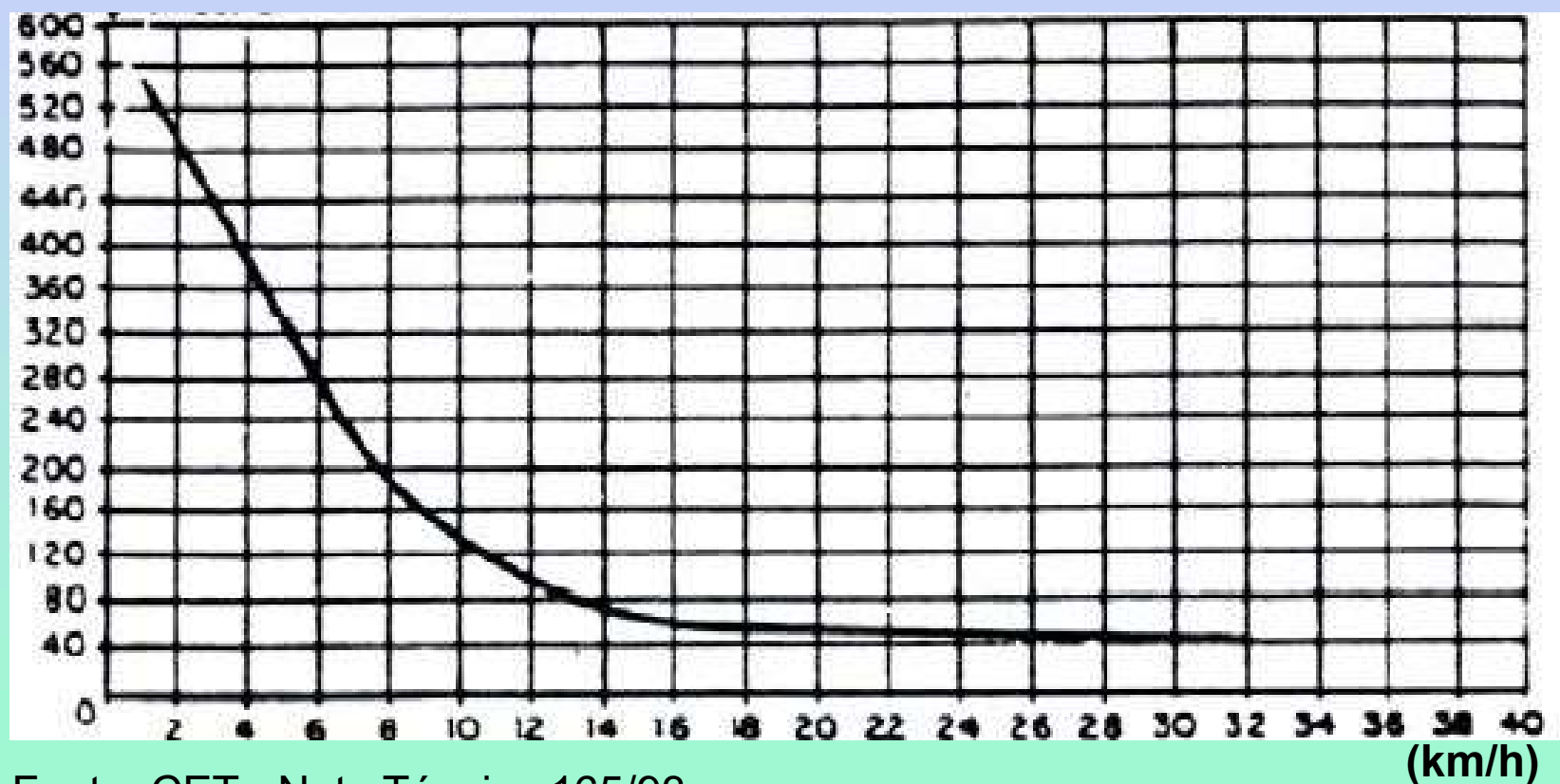
(gramas/km)



Fonte: CET - Nota Técnica 165/93.

Curva CO para autos a gasolina

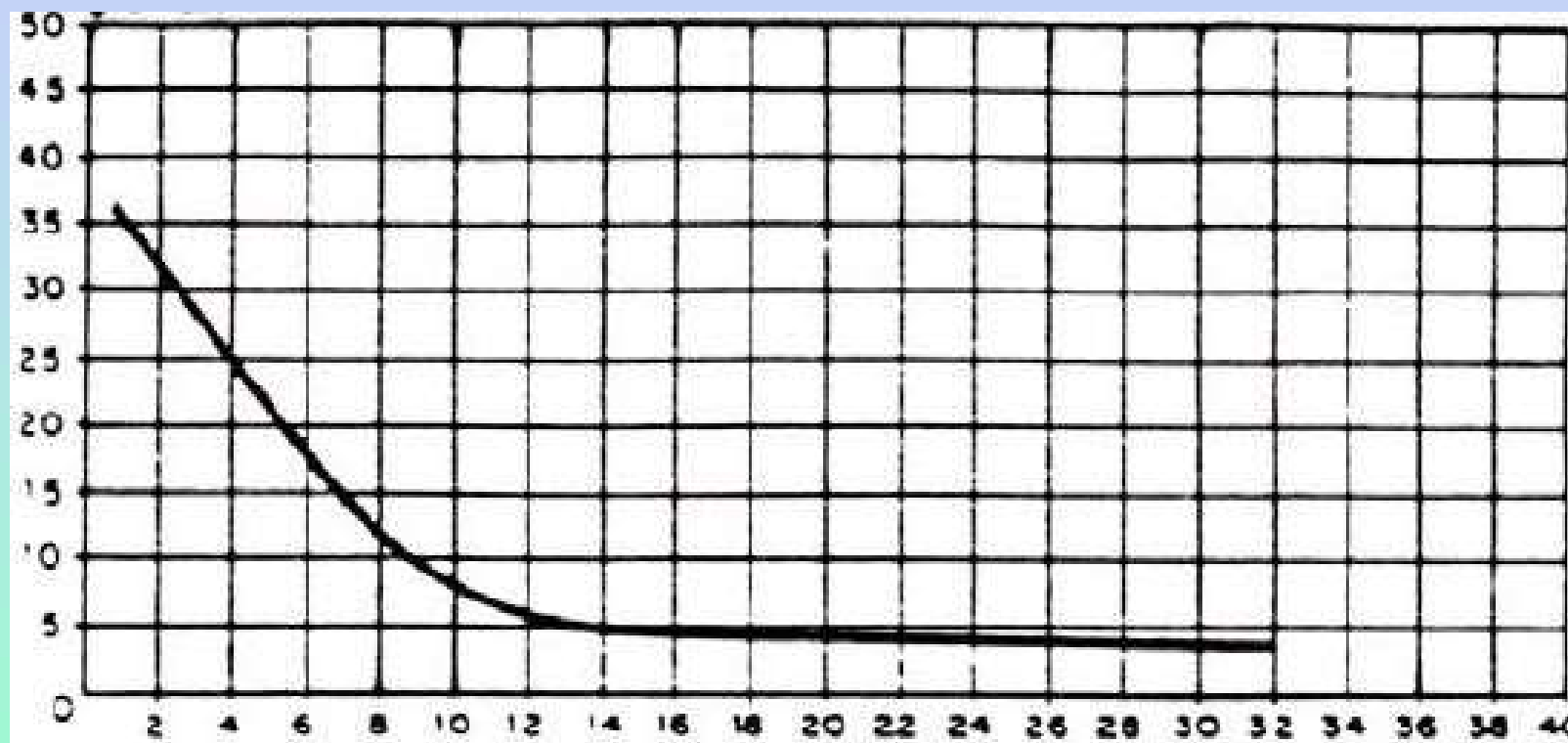
(gramas/km)



Fonte: CET - Nota Técnica 165/93.

Curva HC para autos e caminhões a gasolina

(gramas/km)

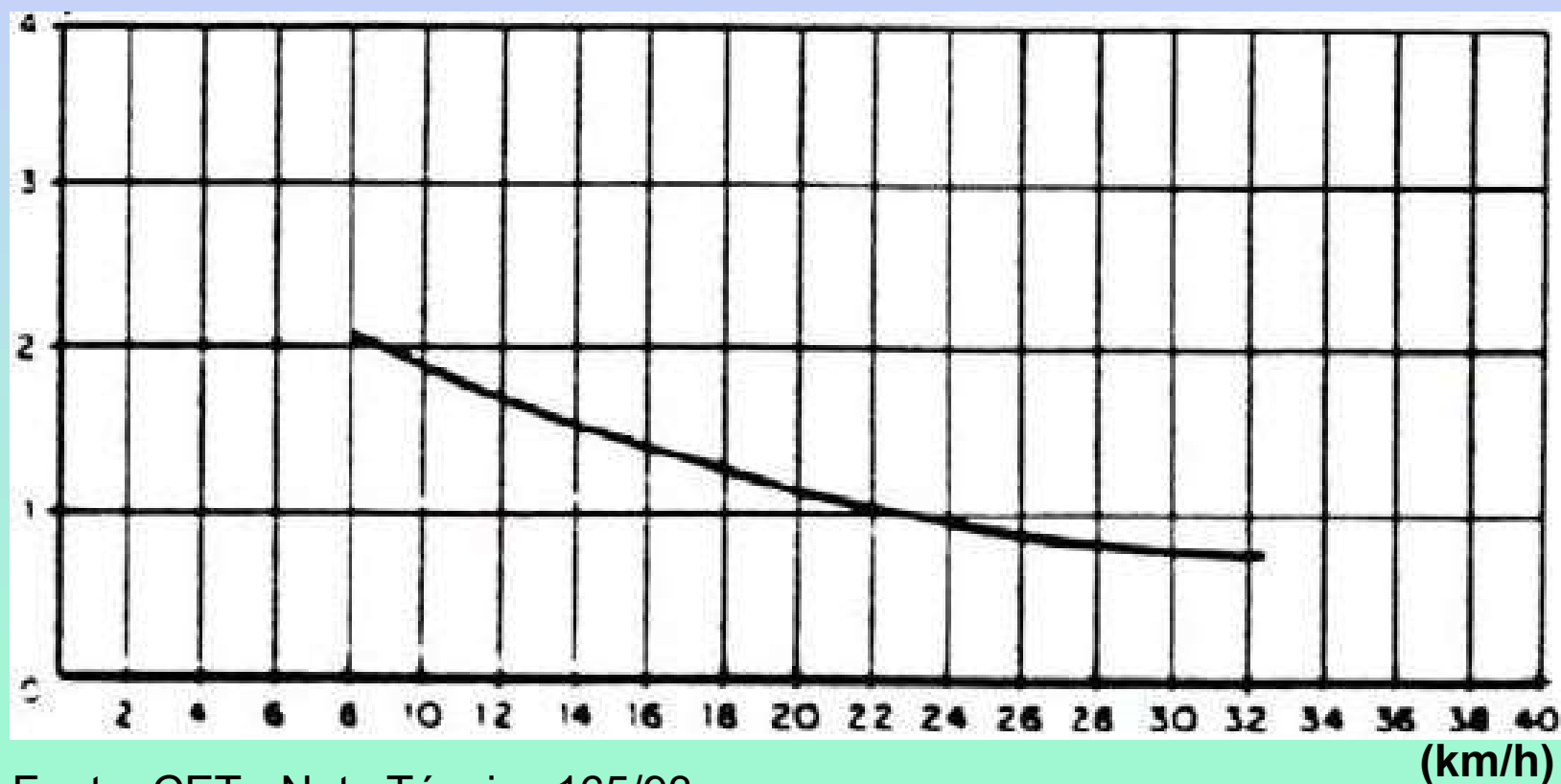


(km/h)

Fonte: CET - Nota Técnica 165/93.

Curva MP para autos e caminhões a gasolina

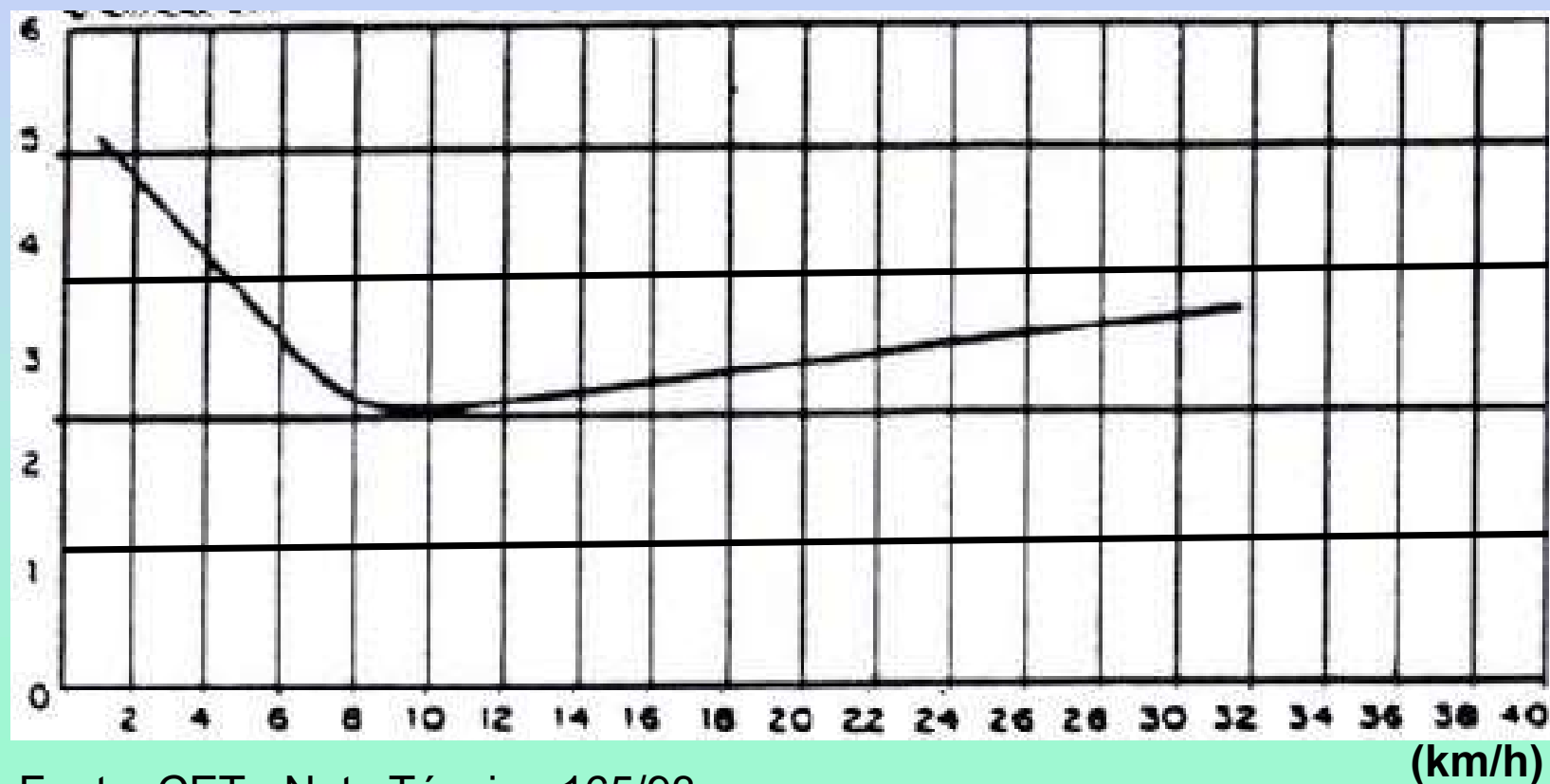
(gramas/km)



Fonte: CET - Nota Técnica 165/93.

Curva NOx para autos e caminhões a gasolina

(gramas/km)



Fonte: CET - Nota Técnica 165/93.

Tabela 1 - Padrões Nacionais de Qualidade do Ar e Critérios para Episódios Críticos de Poluição do Ar

Poluente	Tempo de amostragem	Padrão Primário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Padrão Secundário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Atenção ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Alerta ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Emergência ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PTS	24h*	240 80 ²	150 60 ²	375	625	875
SO ₂	24h*	365 80 ¹	100 40 ¹	800	1.600	2.100
O ₃	1h*	160	160	400 200**	800	1.000
FMC	24h*	150 60 ¹	100 40 ¹	250	420	500
MP ₁₀	24h*	150 50 ¹	150 50 ¹	250	420	500
NO ₂	1h	320 100 ¹	190 100 ¹	1130	2260	3000
CO	1h*	40.000 (35 ppm)	40.000 (35 ppm)			
	8h*	10.000 (9ppm)	10.000 (9ppm)	17.000 (15ppm)	34.000 (30ppm)	46.000 (40ppm)

1 - Média aritmética anual

2 - Média geométrica anual

*O padrão não deve ser excedido mais que uma vez ao ano

**Limite para o Estado de São Paulo, que possui legislação mais restritiva.

FMC - Fumaça

PTS - Partículas totais em suspensão

MP_{2,5} - Partículas inaláveis finas (diâmetro < 2,5 μm)

SO₂ - Dióxido de enxofre

MP₁₀ - Partículas inaláveis (diâmetro < 10 μm)

O₃ - ozônio

NO₂ - dióxido de nitrogênio

CO - monóxido de carbono

Fonte: Resolução CONAMA No 003/28/junho/1990.

Mecanismos de formação do óxido de nitrogênio:

- reação do nitrogênio atmosférico com oxigênio a altas temperaturas, formando **NO térmico**;
- reação de radicais hidrocarbônicos livres com a molécula de nitrogênio formando **NO *prompt*** (NO rápido);
- pela reação do nitrogênio existente no combustível, formando o **NO combustível**.

Dependendo das condições em que ocorre a combustão, existe o predomínio de um dos tipos de mecanismos mencionados:

- a altas temperaturas predomina **NO térmico**;
- se a quantidade de nitrogênio contido no combustível é alta e a temperatura é baixa, o **NO combustível** e o **NO *prompt*** são os predominantes.

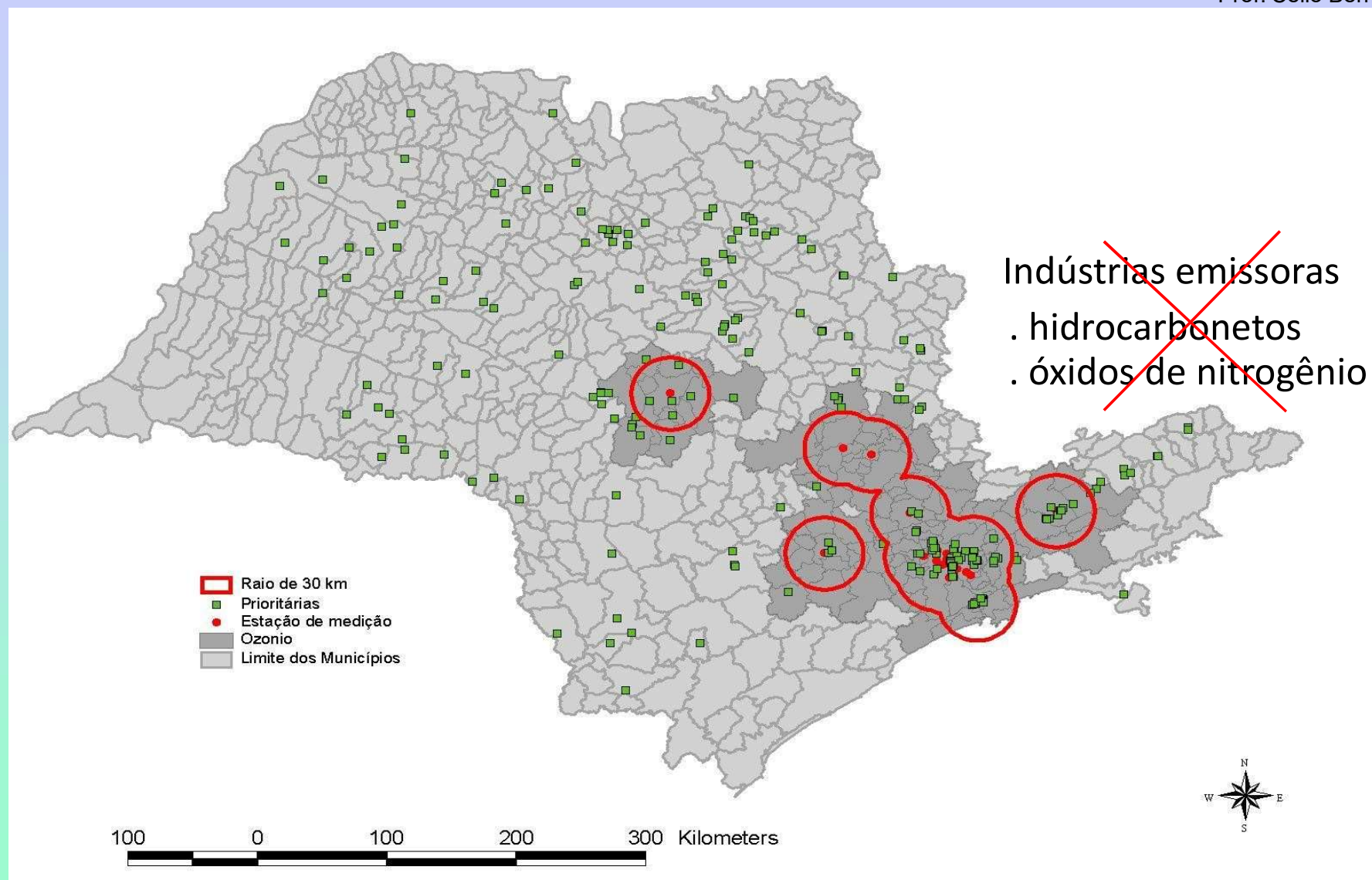
(Fonte: GALLEGO, MARTINS e GALLO, 2000.)

Os **hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio** reagem na atmosfera, principalmente sob ação da luz solar, formando um conjunto de gases agressivos denominados oxidantes fotoquímicos.

O mais importante dentre eles é o **Ozônio (O_3)** que, nas camadas inferiores da atmosfera, exerce ação nociva sobre os vegetais, animais, materiais e o homem, mesmo em concentrações relativamente baixas.

Nas plantas, o ozônio age como inibidor da fotossíntese, produzindo lesões características nas folhas. No homem, o ozônio provoca danos na estrutura pulmonar, reduzindo sua capacidade e diminuindo a resistência às infecções deste órgão, causando ainda o agravamento das doenças respiratórias, aumentando a incidência de tosse, asma, irritações no trato respiratório superior e nos olhos.

Os **oxidantes fotoquímicos** formam o chamado “smog”, ou névoa fotoquímica, que possui este nome porque causa na atmosfera uma diminuição da visibilidade. Seus efeitos mais danosos parecem estar mais relacionados com a exposição cumulativa do que com picos diários.



Fonte: CETESB. Relatório da Qualidade do Ar (2005).
 O ozônio na baixa altitude é um poluente que apresenta índices de saturação nas principais áreas urbanas.

Tabela 12 – Estimativa da frota de veículos da RMSP em 2010.

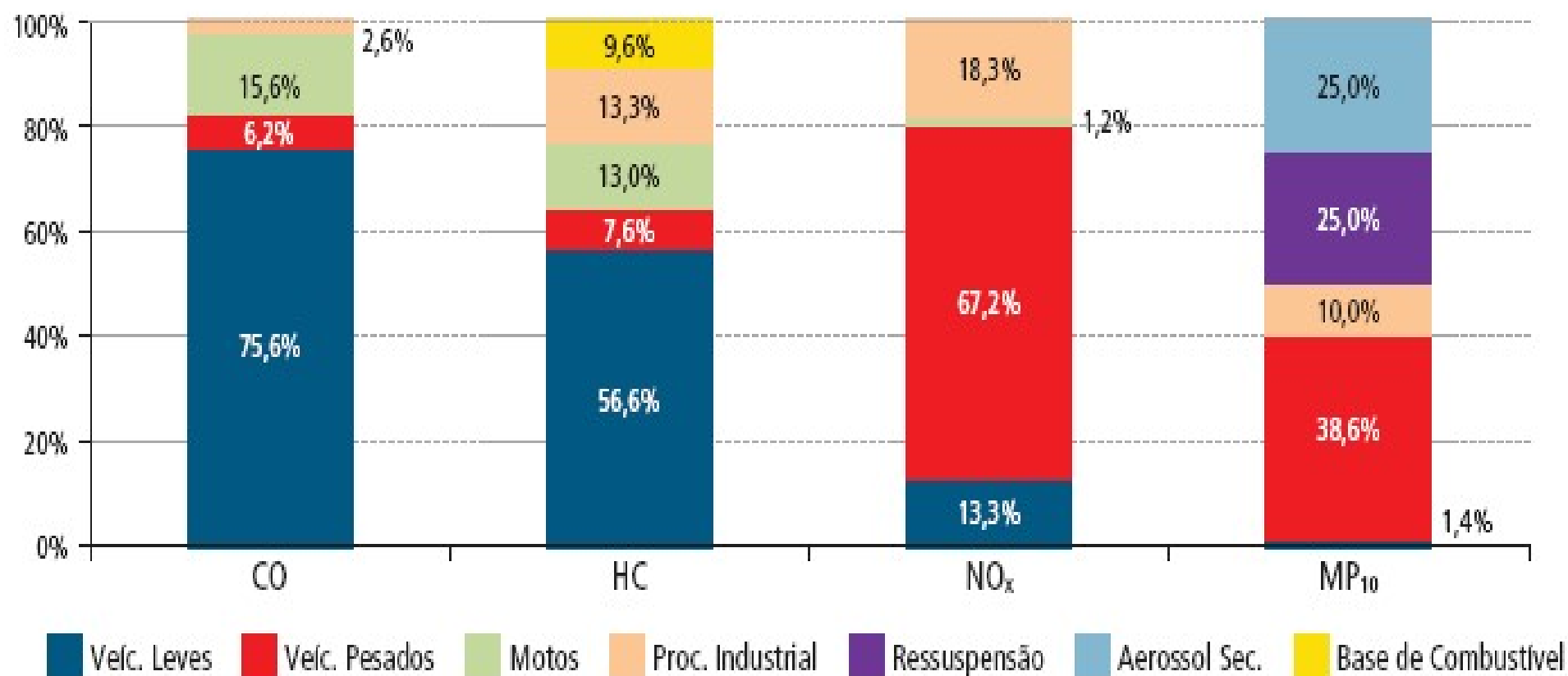
Categoria		Combustível	Frota Circulante	Idade Média (anos)	% Frota RMSP/Estado
Automóveis		Gasolina	2.633.899	12	57
		Etanol	222.986	22	44
		Flex	1.869.098	3	54
Comerciais leves		Gasolina	375.181	10	58
		Etanol	20.801	22	40
		Flex	189.477	3	44
		Diesel	129.224	7	46
Caminhões	Leves	Diesel	64.805	14	41
	Médios		31.307	15	42
	Pesados		71.555	8	43
Ônibus	Urbanos	Diesel	46.363	10	54
	Rodoviários		5.151	10	54
Motocicletas		Gasolina	745.596	6	34
		Flex	32.830	1	23
TOTAL			6.438.273	10	50

Fonte: CETESB. Qualidade do ar no estado de São Paulo, 2011.

Tabela 14 – Contribuição relativa das fontes de poluição do ar na RMSP.

Categoria		Combustível	Poluentes (%)			
			CO	HC	NO _x	MP ₁₀ ¹
Automóveis		Gasolina	46,65	14,47	5,72	nd
		Etanol	8,60	4,13	1,37	nd
		Flex	13,27	6,81	2,46	nd
Evaporativa		-	-	25,59	-	-
Comerciais Leves		Gasolina	5,42	1,76	0,72	nd
		Etanol	0,78	0,38	0,13	nd
		Flex	0,60	0,30	0,11	nd
		Diesel	0,29	0,34	2,84	1,42
Evaporativa		-	-	2,80	-	-
Caminhões	Leves	Diesel	0,16	0,23	1,77	1,35
	Médios		0,81	1,15	8,74	6,55
	Pesados		2,92	3,36	32,00	15,90
Ônibus	Urbanos	Diesel	1,87	2,30	19,94	12,01
	Rodoviários		0,43	0,53	4,72	2,77
Motocicletas		Gasolina	15,56	12,92	1,15	nd
		Flex	0,04	0,04	0,01	nd
OPERAÇÃO DE PROCESSO INDUSTRIAL (2008)			2,60	13,29	18,31	10,00
BASE DE COMBUSTÍVEL LÍQUIDO (2009)				9,61		
RESSUSPENSÃO DE PARTÍCULAS			-	-	-	25,00
AEROSSÓIS SECUNDÁRIOS			-	-	-	25,00
TOTAL			100,00	100,00	100,00	100,00

Gráfico 01 – Emissões relativas por tipo de fonte - RMSP.



Fonte: CETESB. Qualidade do ar no estado de São Paulo, 2011.

► Acidificação

- Através da emissão de COx, NOx e SOx (óxidos + H₂O) comprometendo a atmosfera, as águas e os solos

Tabela 1 - Padrões Nacionais de Qualidade do Ar e Critérios para Episódios Críticos de Poluição do Ar

Poluente	Tempo de amostragem	Padrão Primário (µg/m³)	Padrão Secundário (µg/m³)	Atenção (µg/m³)	Alerta (µg/m³)	Emergência (µg/m³)
PTS	24h*	240 80 ²	150 60 ²	375	625	875
SO ₂	24h*	365 80 ¹	100 40 ¹	800	1.600	2.100
O ₃	1h*	160	160	400 200**	800	1.000
FMC	24h*	150 60 ¹	100 40 ¹	250	420	500
MP ₁₀	24h*	150 50 ¹	150 50 ¹	250	420	500
NO ₂	1h	320 100 ¹	190 100 ¹	1130	2260	3000
CO	1h*	40.000 (35 ppm)	40.000 (35 ppm)			
	8h*	10.000 (9ppm)	10.000 (9ppm)	17.000 (15ppm)	34.000 (30ppm)	46.000 (40ppm)

1 - Média aritmética anual

2 - Média geométrica anual

*O padrão não deve ser excedido mais que uma vez ao ano

**Limite para o Estado de São Paulo, que possui legislação mais restritiva.

FMC - Fumaça

PTS - Partículas totais em suspensão

MP_{2,5} - Partículas inaláveis finas (diâmetro < 2,5 µm)

SO₂ - Dióxido de enxofre

MP₁₀ - Partículas inaláveis (diâmetro < 10 µm)

O₃ - ozônio

NO₂ - dióxido de nitrogênio

CO - monóxido de carbono

Fonte: Resolução CONAMA No 003/28/junho/1990.

A polêmica do S50 e a longa trajetória até o S10:

Em 2002, foi estabelecida a Resolução 315 do Conama, que definia um novo cronograma de limites de emissões a serem adotados até 2009.

Nos Estados Unidos, há anos, já foi atingido o nível de 50 partes por milhão (ppm).

Agora se busca a meta de 15 partes por milhão. Na Europa, a meta hoje é de 10 ppm. No Brasil, o diesel tem 500 partes de enxofre por milhão nas grandes cidades e 2.000 no interior do país (situação em 2008)

Cronograma de substituição de todo o diesel S50 para as frotas de ônibus urbanos:

Período	Cidades
Janeiro/2009	São Paulo e Rio de Janeiro
Maio/2009	Regiões metropolitanas de Fortaleza (CE), Recife (PE) e Belém (PA).
Agosto/2009	Curitiba (PR)
Janeiro/2010	Porto Alegre (RS), Belo Horizonte (MG) e Salvador (BA)
Janeiro/2010	Região Metropolitana de São Paulo.
Janeiro/2011	Regiões Metropolitanas do Estado de São Paulo (Baixada Santista, Campinas e São José dos Campos) e do Estado do Rio de Janeiro.
Janeiro/2013	Disponibilização de um novo óleo diesel comercial, com 10 ppm de enxofre, a partir de janeiro de 2013, para os veículos novos.



- Precipitações Ácidas

Formam-se ácidos a partir dos óxidos

- COx carbônico

- NOx nitroso, nítrico + umidade atmosférica
(H₂O)

- SOx sulfuroso, sulfúrico

Origem: 50 % natural

50 % atividades antropogênicas
(termelétricas e refinarias)

pH: concentração de íons de Hidrogênio (H⁺)

escala logarítmica: 14 —————> alcalino (básico)

7 —————> neutro

0 —————> ácido

Alguns valores comuns de pH	
Substância	pH
Acido de bateria	<1.0
Suco gástrico	2.0
Sumo de limão	2.4
Cola (refrigerante)	2.5
Vinagre	2.9
Sumo de laranja ou maçã	3.5
Cerveja	4.5
Café	5.0
Chá	5.5
Chuva ácida	<5.6
Saliva pacientes com cancro	4.5-5.7
Leite	6.5
Água pura	7.0
Saliva humana	6.5-7.4
Sangue	7.34 - 7.45
Água do mar	8.0
Sabonete de mão	9.0-10.0
Amónia caseira	11.5
Cloro	12.5
Hidróxido de sódio caseiro	13.5

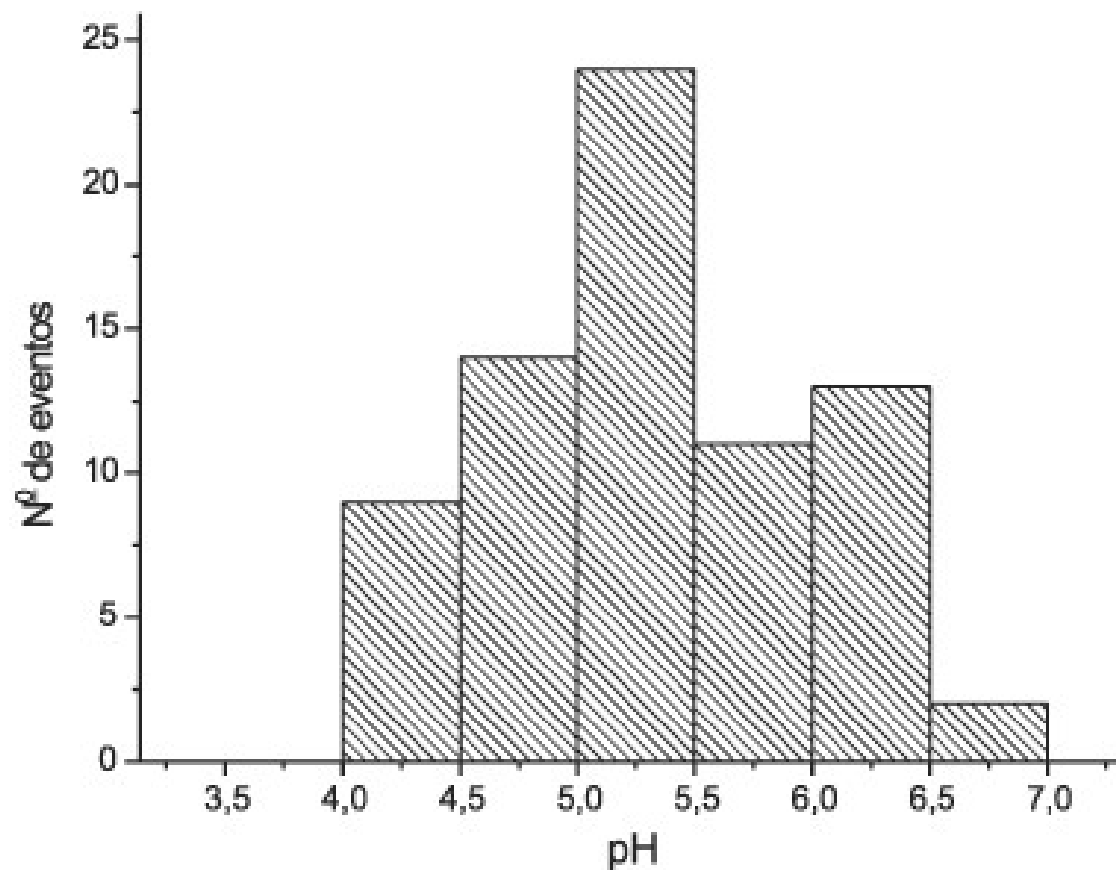


Figura 2. Histograma dos valores de pH de 73 amostras de águas de chuva, coletadas durante o período de Junho de 1999 a Junho de 2000, na região da Termelétrica de Figueira, Paraná

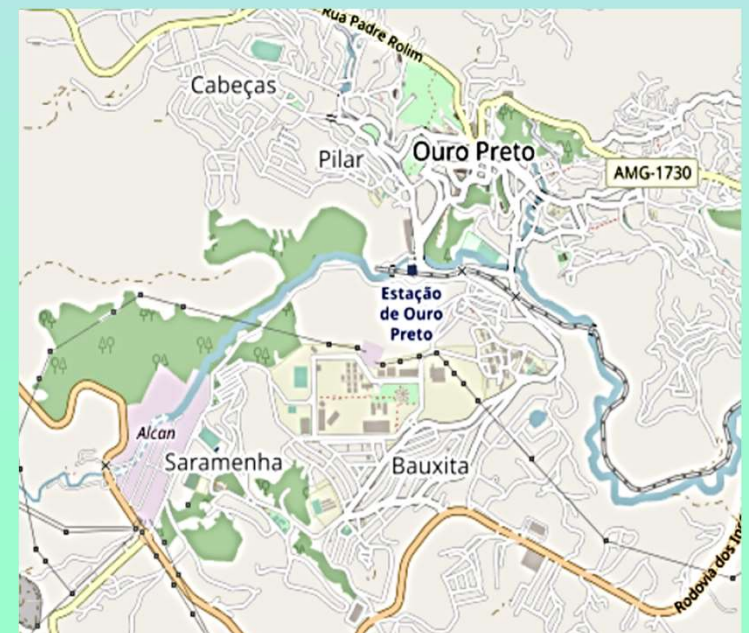
Fonte: Marlene Fluesl; Patrícia Hamal; Adalgiza Fornaroll. **Avaliação do nível da vulnerabilidade do solo devido à presença de termelétrica a carvão (Figueira, PR- Brasil).** Revista Química Nova, vol.26 no.4, São Paulo, July/Aug. 2003.

Efeitos da acidificação em obras artísticas





Profeta Jeremias por Aleijadinho



1. Modelos de Dispersão

- Emissão (t/h; t/dia; t/ano)
- Altura da chaminé
- Condições atmosféricas: Direção dos ventos
Temperatura
Umidade relativa

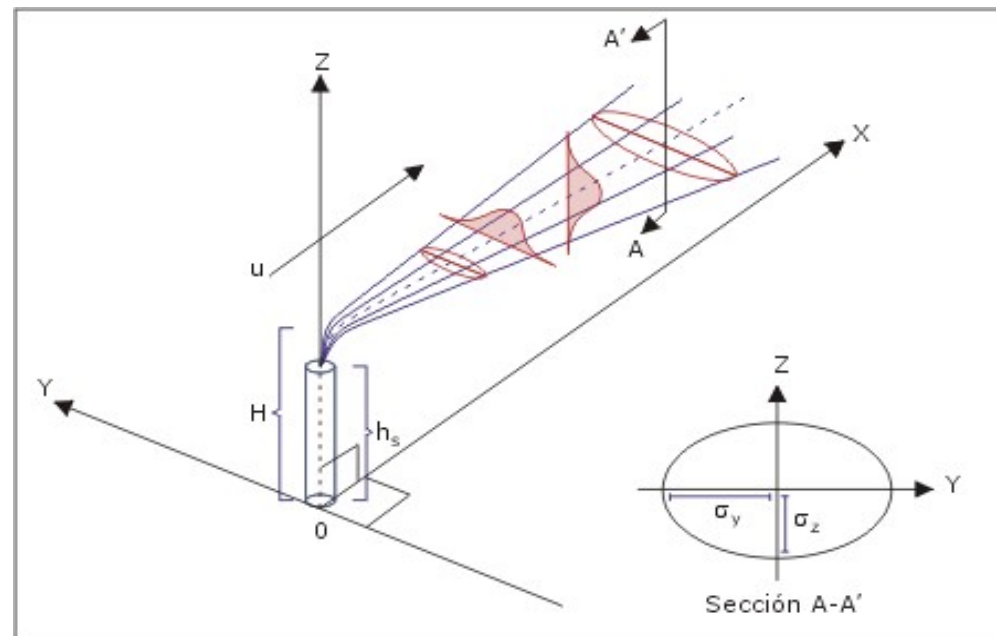
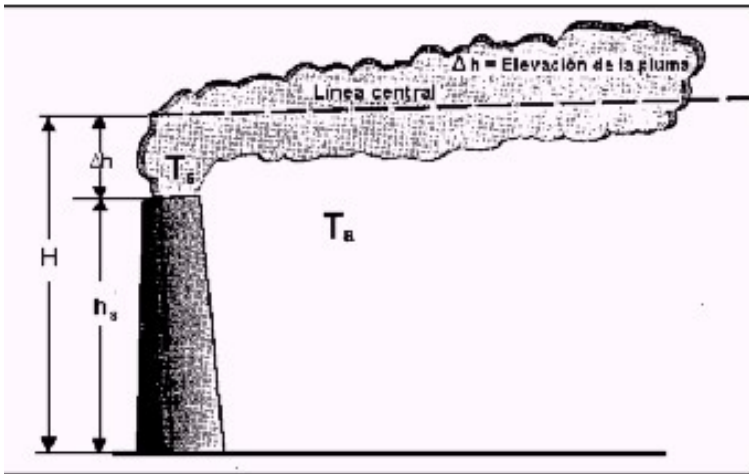
Ecuación de distribución gaussiana

Instituto de Energia e Ambiente - IEE
Universidade de São Paulo - USP
Prof. Célio Bermann

$$\chi = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \left\{ e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2} \right\}$$

Donde:

- χ = concentración del contaminante en el nivel del suelo (g/m³)
- Q = masa emitida por unidad de tiempo
- σ_y = desviación estándar de la concentración de contaminantes en dirección y (horizontal)
- σ_z = desviación estándar de la concentración de contaminantes en dirección z (vertical)
- u = velocidad del viento
- y = distancia en dirección horizontal
- z = distancia en dirección vertical
- H = altura efectiva de la chimenea



Representación esquemática de la pluma gaussiana (Fonte: Turner, 1970)



2. Acidez diretamente proporcional à quantidade de emissões (NIAR, Oslo, Noruega)

- padrão para avaliação: $> 12 \text{ t SO}_2 / \text{km}^2 / \text{ano}$

Quadrícula de 150 por 150 km, área de 22.500 km²

RMSP	120.000 t SO ₂ / ano
Campinas	80.000 t SO ₂ / ano
São José dos Campos	50.000 t SO ₂ / ano
Cubatão	50.000 t SO ₂ / ano
	300.000 t SO ₂ / ano

resultam em $13,3 \text{ t SO}_2 / \text{km}^2 / \text{ano}$

Tabela 1 - Padrões Nacionais de Qualidade do Ar e Critérios para Episódios Críticos de Poluição do Ar

Poluente	Tempo de amostragem	Padrão Primário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Padrão Secundário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Atenção ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Alerta ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Emergência ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PTS	24h*	240 80 ²	150 60 ²	375	625	875
SO ₂	24h*	365 80 ¹	100 40 ¹	800	1.600	2.100
O ₃	1h*	160	160	400 200**	800	1.000
FMC	24h*	150 60 ¹	100 40 ¹	250	420	500
MP ₁₀	24h*	150 50 ¹	150 50 ¹	250	420	500
NO ₂	1h	320 100 ¹	190 100 ¹	1130	2260	3000
CO	1h*	40.000 (35 ppm)	40.000 (35 ppm)			
	8h*	10.000 (9ppm)	10.000 (9ppm)	17.000 (15ppm)	34.000 (30ppm)	46.000 (40ppm)

1 - Média aritmética anual

2 - Média geométrica anual

*O padrão não deve ser excedido mais que uma vez ao ano

**Limite para o Estado de São Paulo, que possui legislação mais restritiva.

FMC - Fumaça

PTS - Partículas totais em suspensão

MP_{2,5} - Partículas inaláveis finas (diâmetro < 2,5 μm)

SO₂ - Dióxido de enxofre

MP₁₀ - Partículas inaláveis (diâmetro < 10 μm)

O₃ - ozônio

NO₂ - dióxido de nitrogênio

CO - monóxido de carbono

Padrões de Qualidade do Ar adotados pela EPA-Agência de Proteção Ambiental dos EUA

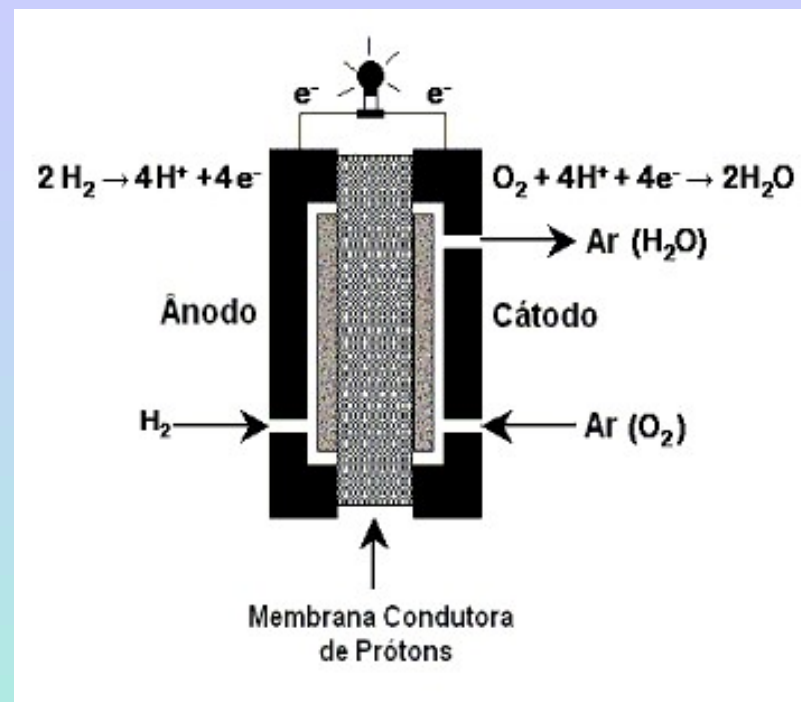
POLUENTE	TEMPO DE AMOSTRAGEM	PADRAO (UG/M3)	MÉTODO DE MEDIÇÃO
Partículas Totais em Suspensão	24 horas (1)	260	Amostrador de Grandes Volumes
	MAA (2)	75	
Dióxido de Enxofre	24 horas (1)	365	Pararosanilina
	MAA (3)	80	
Monóxido de Carbono	1 hora (1)	40.000 (35 ppm)	Infra-vermelho não Dispersivo
	8 horas (1)	10.000 (9 ppm)	
Ozona	1 hora (1)	235 (0,12 ppm)	Quimioluminescência
Hidrocarbonetos (menos metano)	3 horas (6h às 9h)	160 (0,24 ppmC)	Cromatografia Gasosa/ Ionização de Chama
Dióxido de Nitrogênio	MAA (3)	100	Quimioluminescência
Chumbo	90 dias	1.5	Absorção Atômica
Partículas Totais em Suspensão	1 hora	-	Amostrador de Grandes Volumes
	24 horas	150-230	
	MAA (3)	60-90	
Dióxido de Enxofre	1 hora	-	Pararosanilina
	24 horas	100-150	
	MAA (3)	40-60	
Fumaça	1 hora	-	Infra-vermelho não Dispersivo
	24 horas	100-150	
	MAA (3)	40-60	
Ozona	1 hora	100-200	Quimioluminescência
	24 horas	-	
	MAA (3)	-	
Dióxido de Nitrogênio	1 hora	190-320	Quimioluminescência
	24 horas	-	
	MAA (3)	-	

FONTE: Relatório sobre "Qualidade do ar da Região Metropolitana de São Paulo e em Cubatão - 1985", publicado pela CETESB em 1988.

OBSERVAÇÕES: (1) Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano
(2) Média Geométrica Anual
(3) Média Aritmética Anual

Energia do Hidrogênio (Célula Combustível)

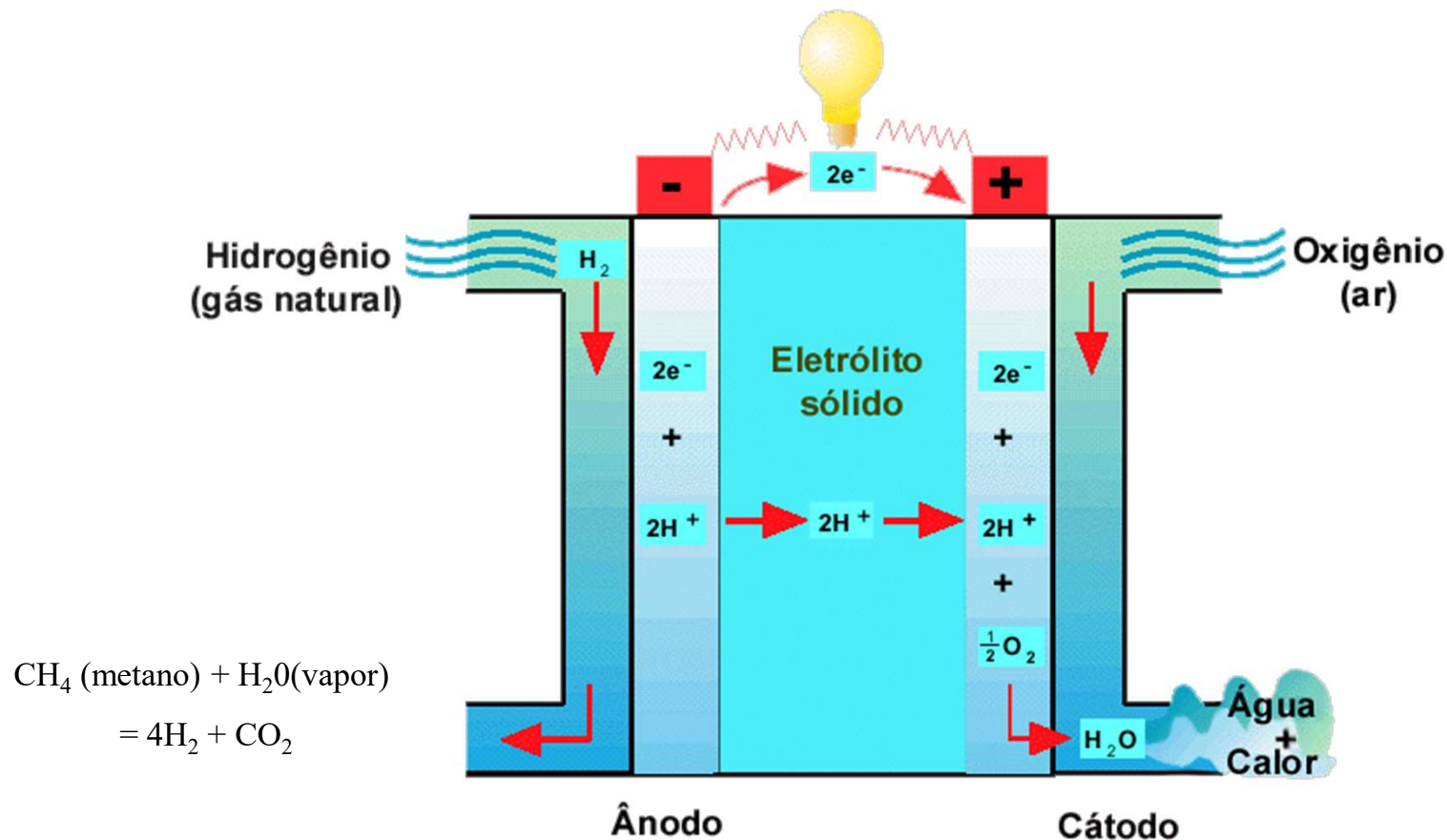
Composição da célula combustível



A célula combustível compõe-se de um anodo (pólo negativo), de um cátodo (pólo positivo), e uma membrana eletrolítica para bloquear o fluxo de elétrons.

Na reação eletroquímica ocorre a oxidação, com o hidrogênio que flui pelo anodo se separando em elétrons e prótons, dirigindo os elétrons para um circuito externo para serem usados como eletricidade, enquanto os prótons fluem pela membrana. O oxigênio é bombeado do lado do cátodo, reagindo com os prótons do hidrogênio para formar água.

Princípio de Funcionamento



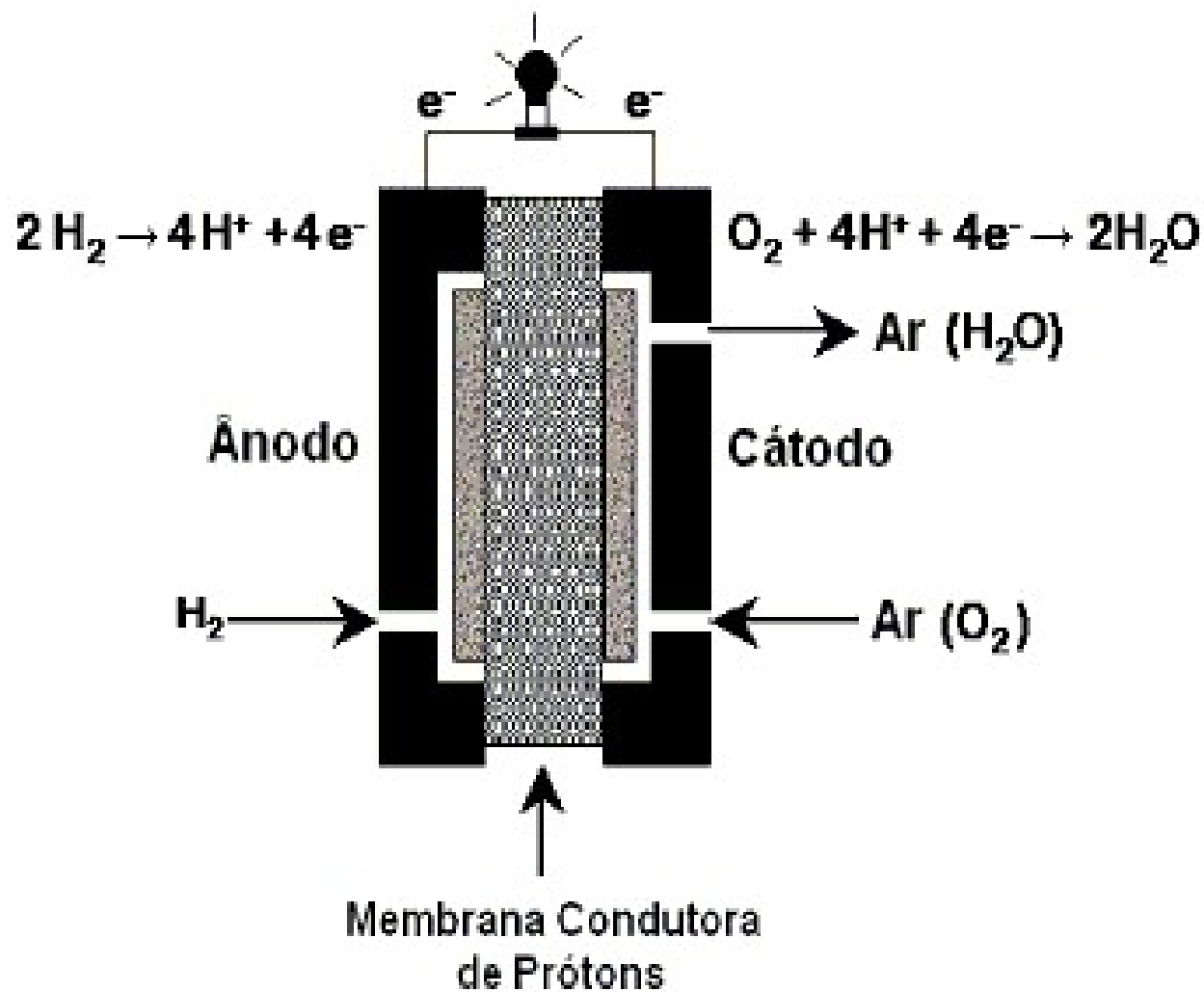
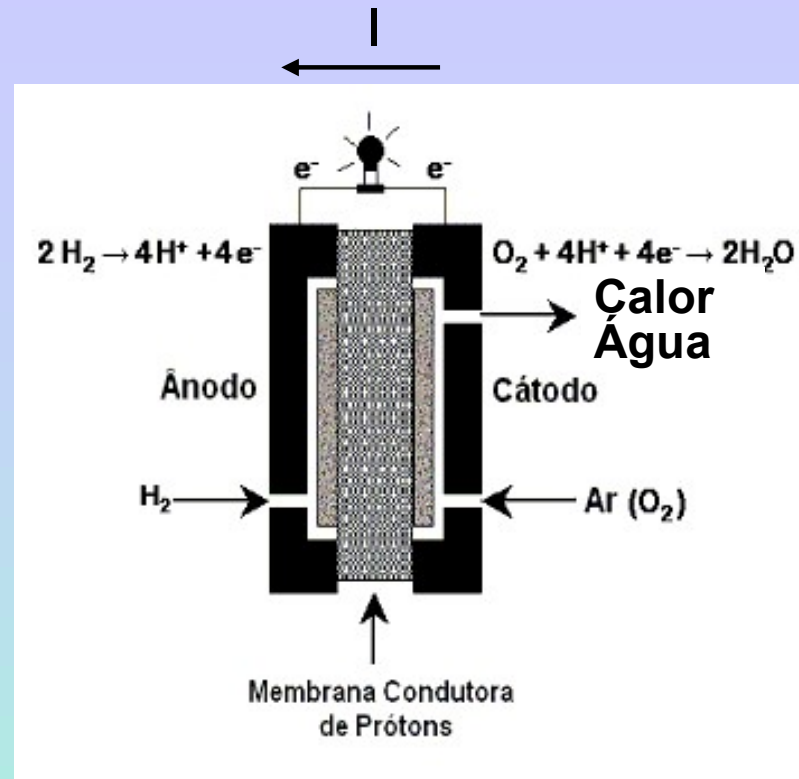
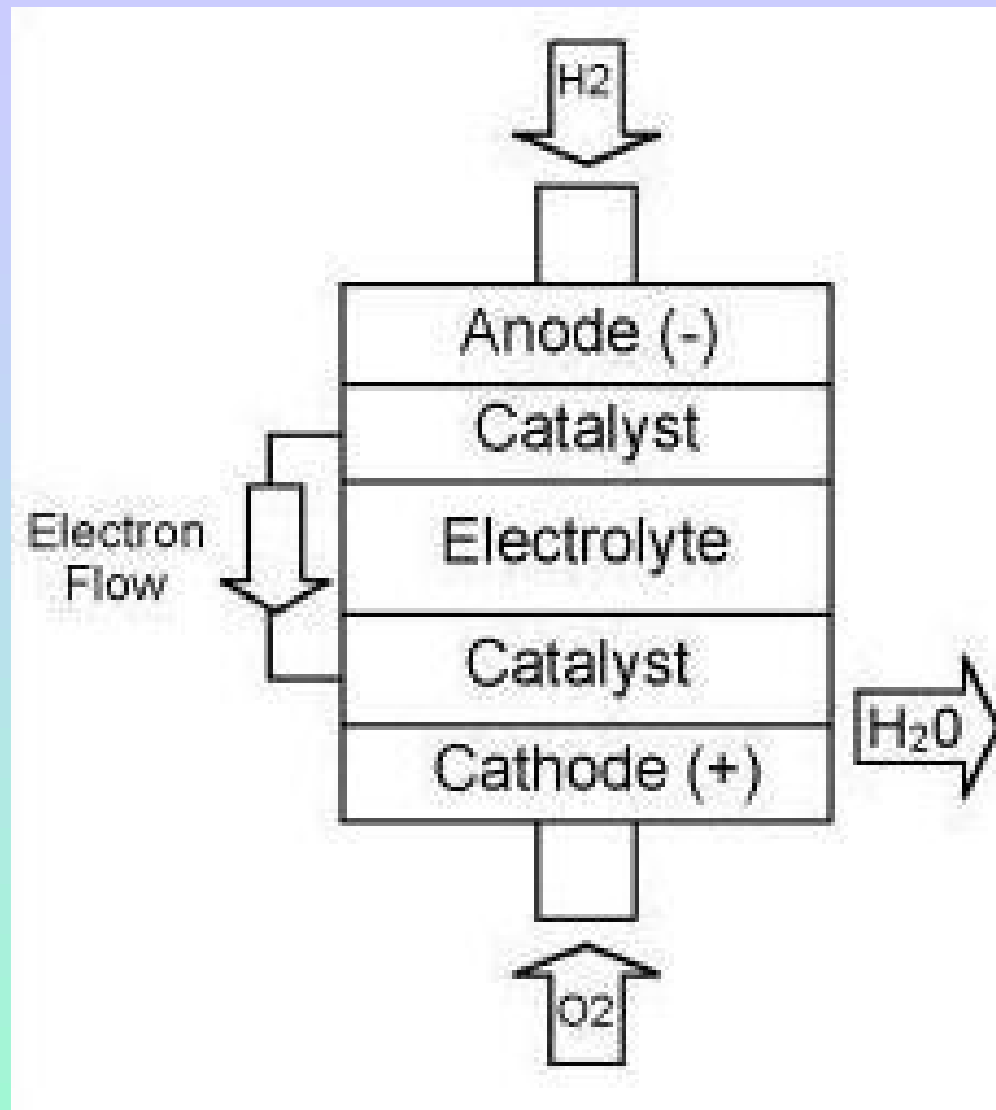


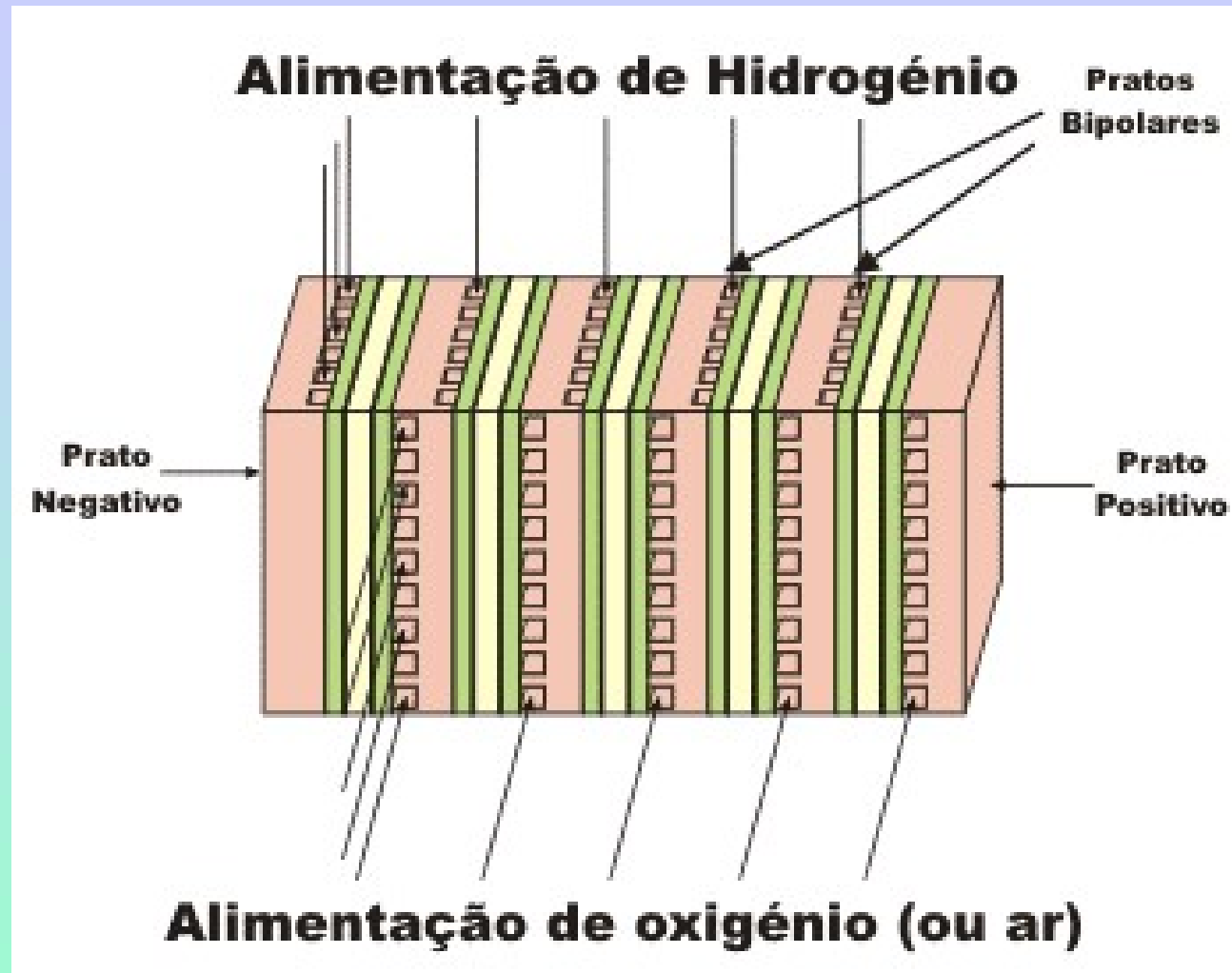
Diagrama de uma célula a combustível



Por convenção, o sentido da corrente elétrica é contrário ao do fluxo dos elétrons. Dessa forma, a corrente elétrica numa célula de combustível sai pelo cátodo e entra pelo anodo.



Para aumentar a eficiência da reação química utiliza-se catalisadores à base de metais nobres (p.ex. platina; níquel).



A tensão obtida por cada elemento da célula combustível é de 0,7 – 1 V. Através do empilhamento de elementos em conjuntos denominados pilhas de células, a tensão pode ser elevada a qualquer valor.

O Desenvolvimento da Tecnologia



Fonte: Smithsonian Institute (2005)
Smith et al. (2002)

A primeira célula de combustível foi construída em 1839 por Sir William Grove, um juiz Galês e cientista.

O interesse nas células de combustível como um gerador prático, começou nos anos 60, quando o programa espacial dos Estados Unidos escolheu a célula de combustível no lugar da energia nuclear (mais arriscada), e da energia solar (mais cara).

As células de combustível abasteceram de energia as naves Apolo e Geminis e ainda fornecem eletricidade e água ao tranbordador espacial.

- > **1839** - Sir William Grove descobre o princípio de funcionamento e monta a primeira célula.
- > **1955** - Willard Thomas Grubb desenvolve uma membrana trocadora de íons (General Electric).
- > **1958** - Leonard Niedrach desenvolveu um processo de depósito de Pt em Titânio e posteriormente colar na membrana polimérica.

Equivalência energética do hidrogênio

Um quilo de hidrogênio libera a mesma quantidade de energia de 4 litros de gasolina ou 3,7 metros cúbicos de gás natural.

Fontes para obtenção do Hidrogênio

➤ hidrogênio puro:

Não é facilmente encontrado na natureza, mas mais freqüentemente encontrado em compostos nos quais os átomos de hidrogênio ligam-se quimicamente a um ou mais dos outros elementos. Separar essas ligações exige energia, diminuindo, assim, a eficiência relativa das células combustíveis.

A forma mais tradicional para produção de hidrogênio puro é pela hidrólise da água.

Processar, armazenar e distribuir hidrogênio puro é demasiadamente difícil em curto prazo para tornar-se viável em escala planetária. O hidrogênio puro é simplesmente difícil de obter-se e, mesmo quando se o tem, são necessários uma grande pressão e um grande volume para armazená-lo, para colher a eficiência da relação energia/peso.

Fontes para obtenção do Hidrogênio

➤ metanol (ou outro hidrocarboneto líquido):

Sua vantagem principal é a similaridade com a gasolina, e, portanto, uma familiaridade mundial com sua produção, transporte e distribuição. Dependendo da fonte, os combustíveis de hidrocarbonetos líquidos podem, também, tornar-se uma fonte de energia renovável. As desvantagens incluem armazenamento, corrosão e desperdício de combustível, devido ao “*cross-over*” na membrana da célula combustível.

A gasolina comum e o etanol são mais duas alternativas disponíveis em termos de hidrocarbonetos líquidos, mas as necessidades de “reformas” do combustível antes da introdução no sistema da célula combustível permanece uma constante em todas as fontes líquidas. O processo de reformar extrai hidrogênio das estruturas moleculares mais complexas; contudo, o fato de que o monóxido de carbono e o dióxido de carbono podem tornar-se subprodutos adicionais do ciclo de produção de energia torna esses sistemas menos atraentes.

Fontes para obtenção do Hidrogênio

➤ metano (gás natural):

O hidrogênio pode ser obtido do gás natural pelo processo de reforma catalítica a vapor. O processo envolve a conversão catalítica do metano em presença de vapor d'água, que libera hidrogênio e óxidos de carbono (CO e CO₂).

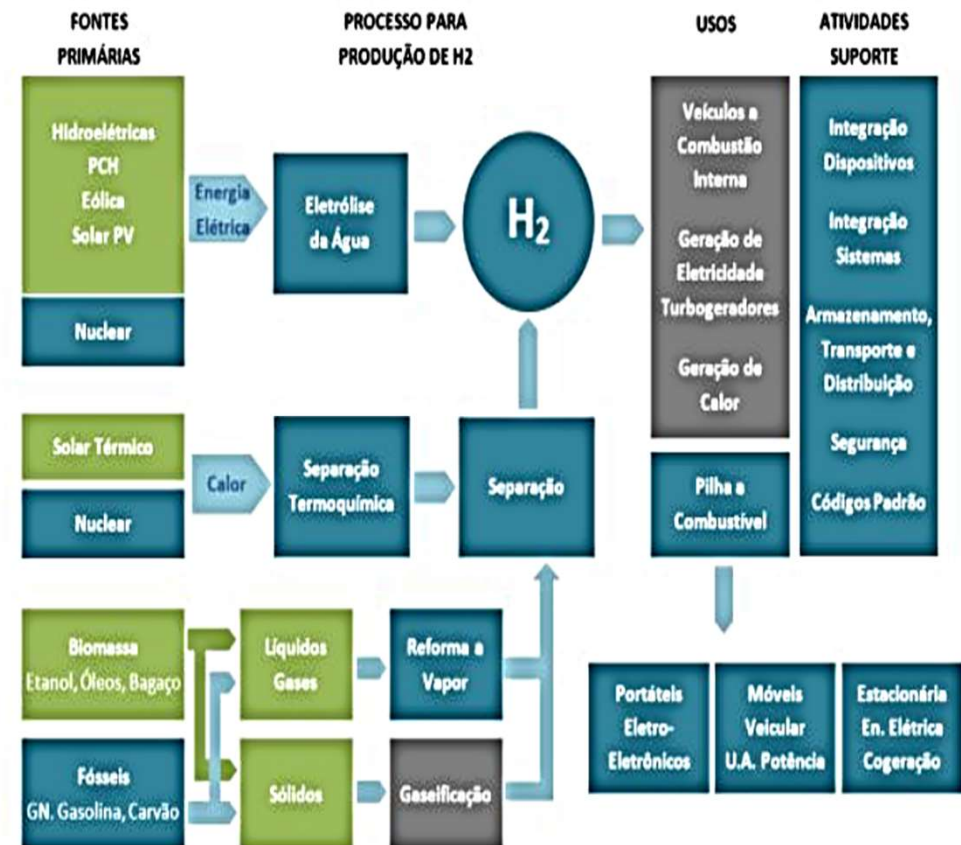
Como potencial fonte de hidrogênio para células combustíveis, o gás natural tem a seu favor uma infra-estrutura de distribuição estabelecida. Além dessa infra-estrutura estabelecida, a necessidade de comprimir o gás natural e de usar um equipamento especial para fornecê-lo reduz sua atração como fonte de hidrogênio.

Classificação das Rotas Tecnológicas

Fontes para obtenção do Hidrogênio

Classificação do hidrogênio em escala de cores

Cor	Classificação	Descrição
■	Hidrogênio Preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem CCUS
■	Hidrogênio Marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS
□	Hidrogênio Cinza	Produzido por reforma a vapor do gás natural, sem CCUS
■	Hidrogênio Azul	Produzido por reforma a vapor do gás natural (eventualmente, também de outros combustíveis fósseis), com CCUS
■	Hidrogênio Verde	Produzido via eletrólise da água com energia de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar).
□	Hidrogênio Branco	Produzido por extração de hidrogênio natural ou geológico
■	Hidrogênio Turquesa	Produzido por pirólise do metano, sem gerar CO ₂
■	Hidrogênio Musgo	Produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS
■	Hidrogênio Rosa	Produzido com fonte de energia nuclear

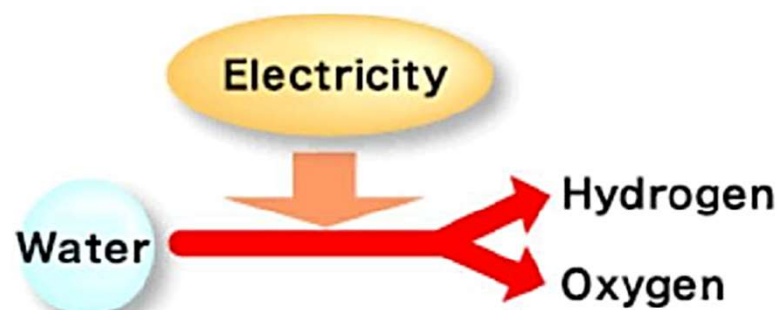


Representação esquemática de rotas tecnológicas para obtenção de hidrogênio

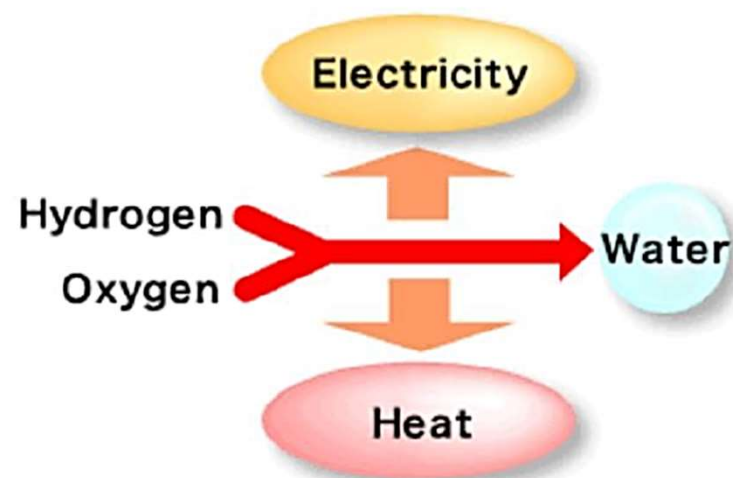
Fonte: EPE, 2021

Aplicações veiculares

PRODUÇÃO DE H₂



GERAÇÃO DE ENERGIA POR H₂ (FUEL CELL)





Automóvel ix35 Fuel Cell da Hyundai.

Tanque de Hidrogénio

Na parte traseira situa-se uma bateria de alta voltagem. Com depósito H_2

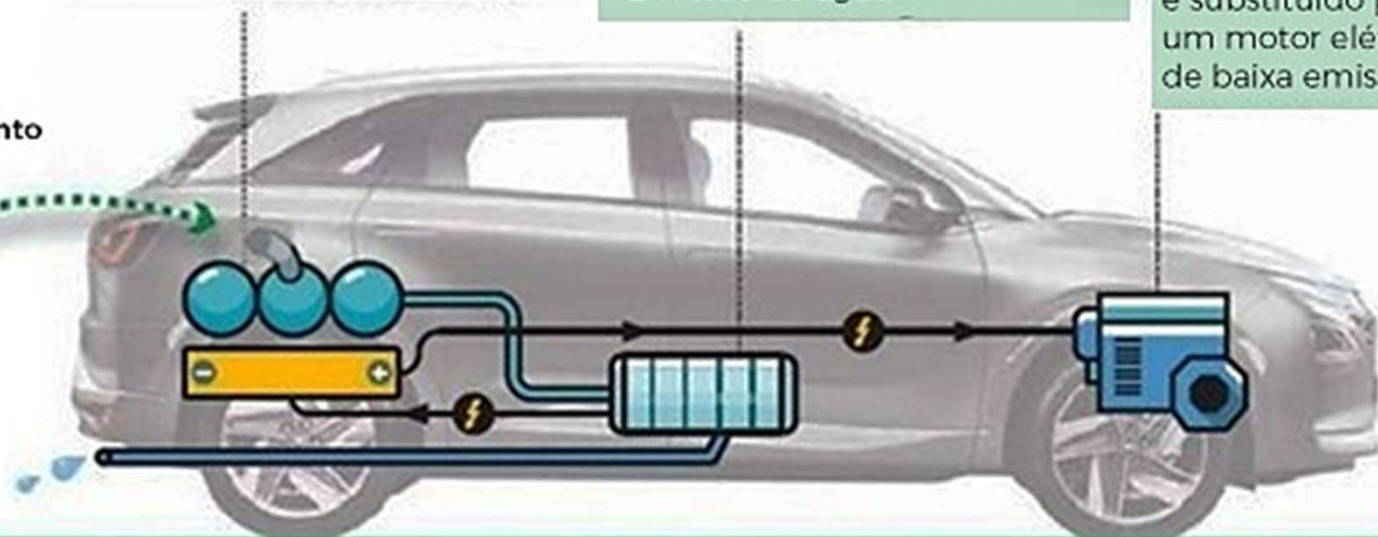
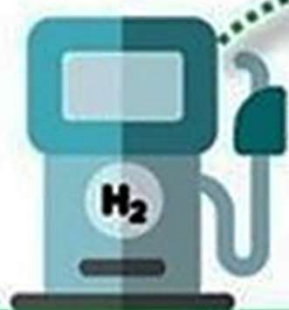
Bateria de Combustível

Debaixo do bancos dianteiros situa-se a pilha de combustível
 $Ar + H_2 = \text{Eletricidade}$
Emissão de água

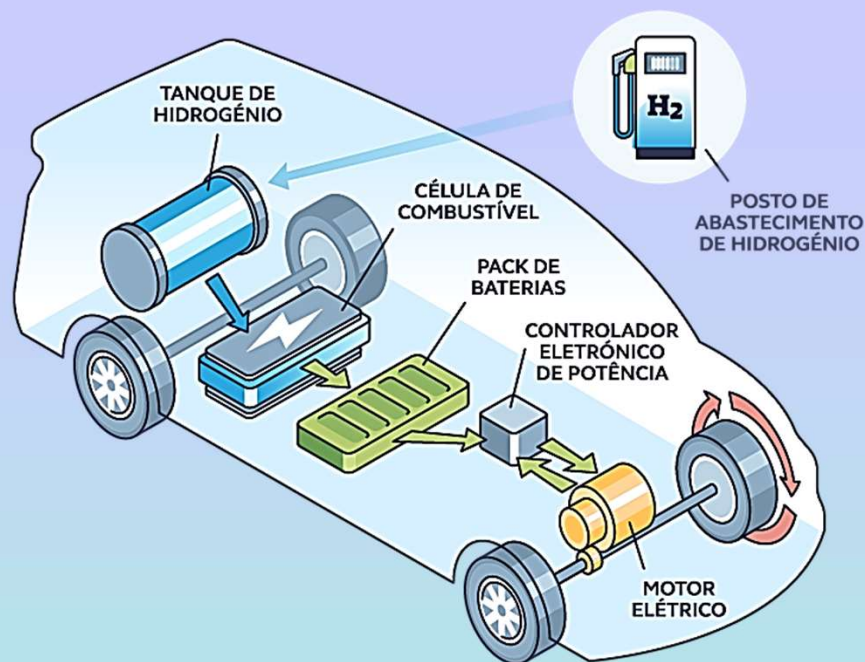
Motor Elétrico

Na parte frontal o motor de explosão é substituído por um motor elétrico de baixa emissão

Tempo de Carregamento
3 -5 Minutos



ABC

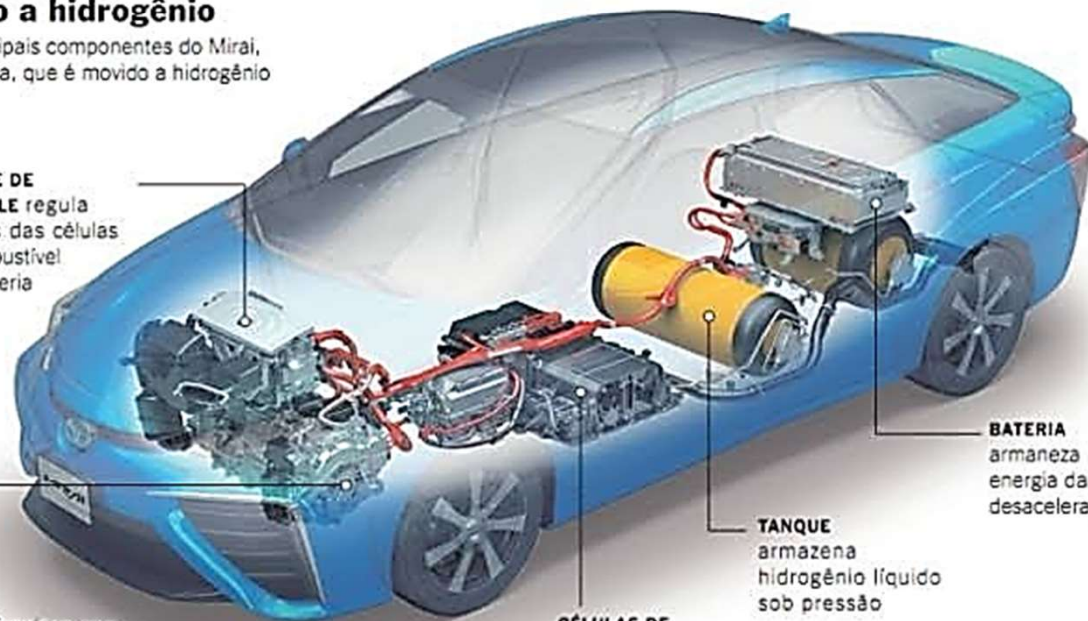


Carro a hidrogênio

Os principais componentes do Mirai, da Toyota, que é movido a hidrogênio

UNIDADE DE CONTROLE regula funções das células de combustível e da bateria

MOTOR funciona com a eletricidade das células de combustível e da bateria



CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL geram eletricidade a partir do hidrogênio

TANQUE armazena hidrogênio líquido sob pressão

BATERIA armazena energia da desaceleração

Vantagens dos carros a hidrogénio:

- **Zero ruído:** A propulsão dos carros a hidrogénio é puramente elétrica. Quando conduz este tipo de veículo, na prática está a conduzir um carro elétrico, o que significa zero ruído de motor durante a condução e zero poluição sonora para o ambiente.
- **Zero emissões poluentes:** Carros a hidrogénio utilizam apenas energia renovável e não produzem emissões nocivas para o ambiente.
- **Tempo de carregamento:** Outra das vantagens dos carros a hidrogénio é o tempo de carregamento. Por norma, estão atestados e prontos para voltar a circular em menos de cinco minutos. Cómodo e bastante mais prático para os consumidores do que os carros elétricos.
- **Maior autonomia:** carros a hidrogénio têm maior capacidade percorrer quilómetros do que um carro elétrico. Um tanque cheio consegue percorrer, em média 480 quilómetros. Contudo, tudo vai depender do modelo e de como este é fabricado e idealizado.
- **Resistência:** Graças ao seu revestimento e material de produção, os carros a hidrogénio tendem a ter um chassi muito mais resistente que um veículo convencional.

Desvantagens dos carros a hidrogénio

- **Rede de postos de abastecimento:** Atualmente poucas estações de serviço estão preparadas para o abastecimento de hidrogénio. Em Portugal, existem apenas 2: uma em Lisboa, outra em V.N de Gaia.
- **Vida útil:** Por lei, têm uma vida útil limitada a 15 anos, o que se poderá traduzir na própria vida útil do veículo. Quer isto dizer que, existe sempre esta condicionante na altura de escolher comprar este tipo de carro.
- **Preço de compra:** O facto de custarem mais a fabricar, sobretudo devido à célula de combustível, são mais caros para aquisição. A **Johnson Matthey (JM)** afirma que, actualmente, as células de hidrogénio de 100 kW **custam um mínimo de 20.000€, mas baixarão para 8.000 a 10.000€ dentro de dois a três anos**, para em 2030 poderem atingir 3.000€ a unidade.



Ônibus híbrido, movido a eletricidade e hidrogênio, usado durante as Olimpíadas do Rio-2016

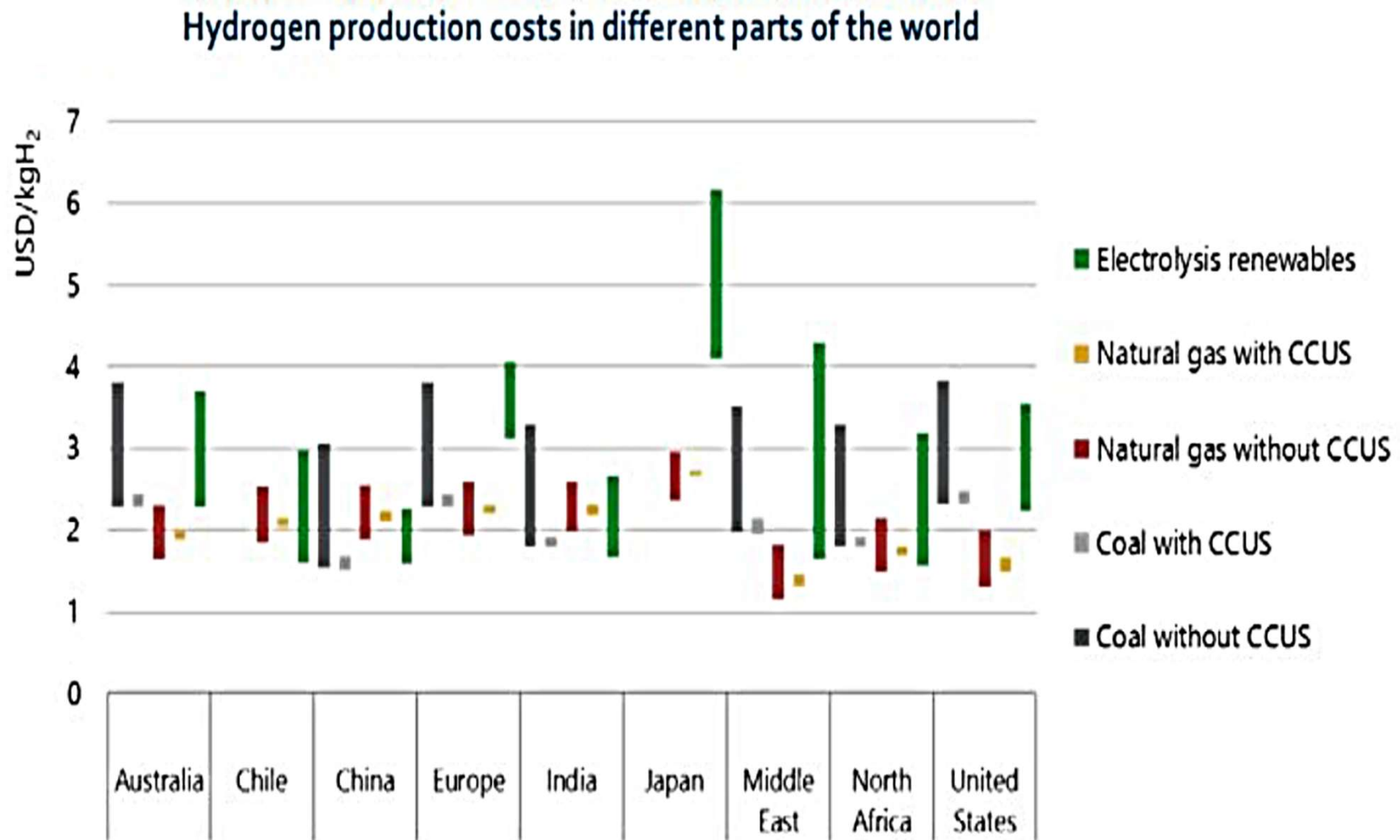
Diego Padgurschi-19.ago.2016/Folhapress



Ônibus a hidrogenio na frota da EMTU no ABC (SP)

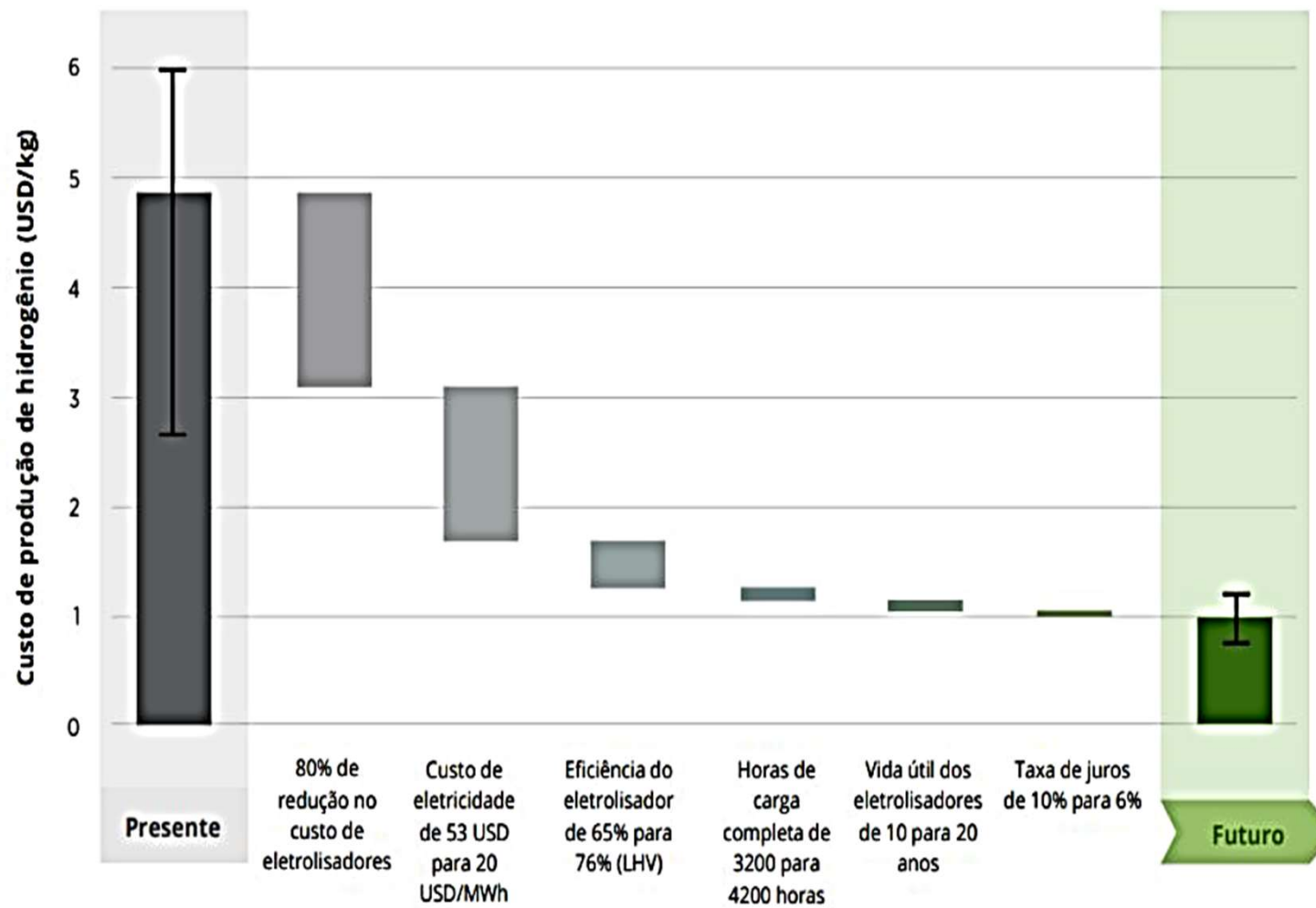
Custos de Produção

Comparativo Global - Presente



Fonte: IEA, 2019

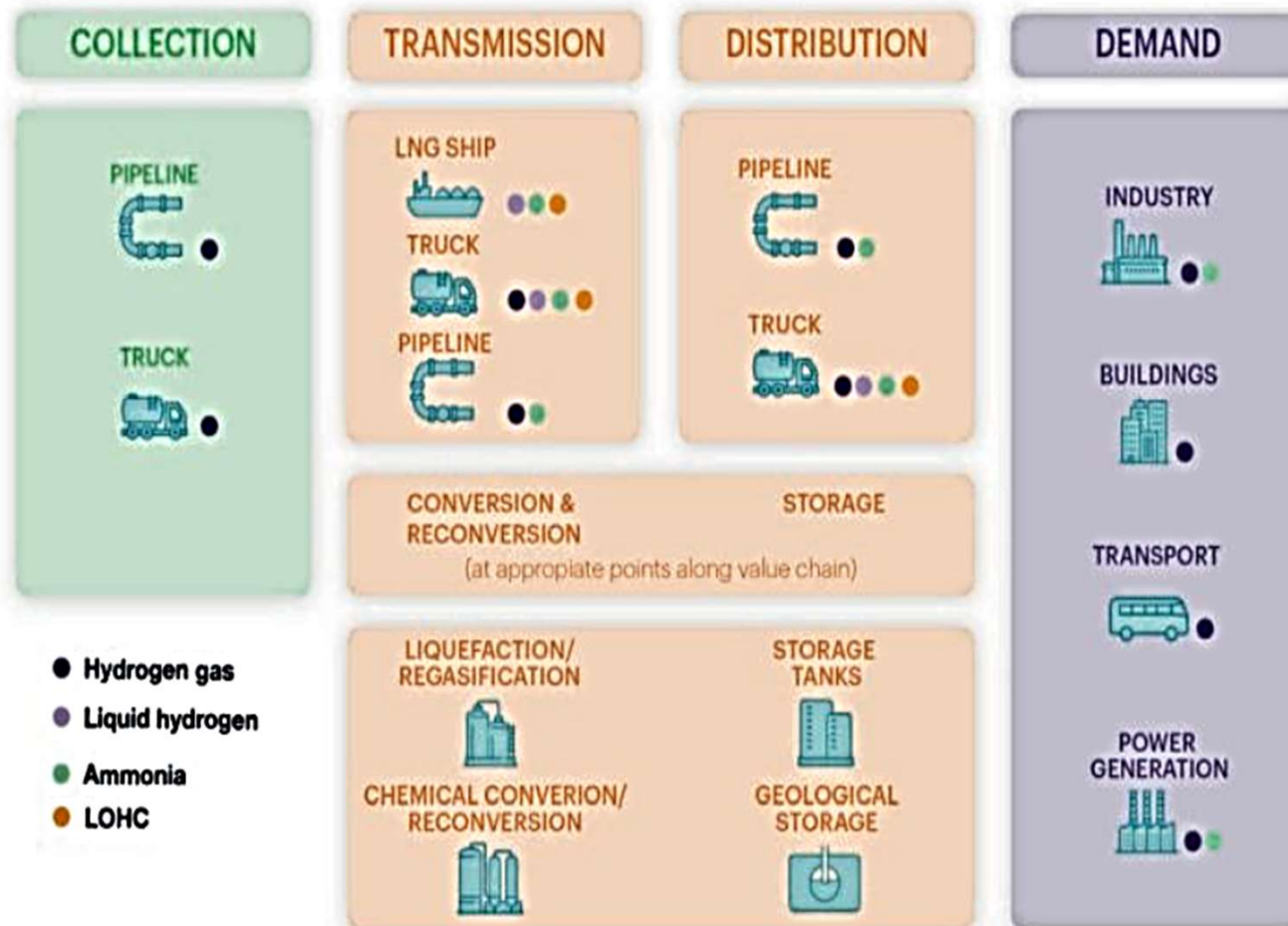
Custos de Produção Comparativo Global - Futuro



Fonte: GIZ, 2021

Desafios Logísticos

Transmission, distribution and storage elements of hydrogen value chains

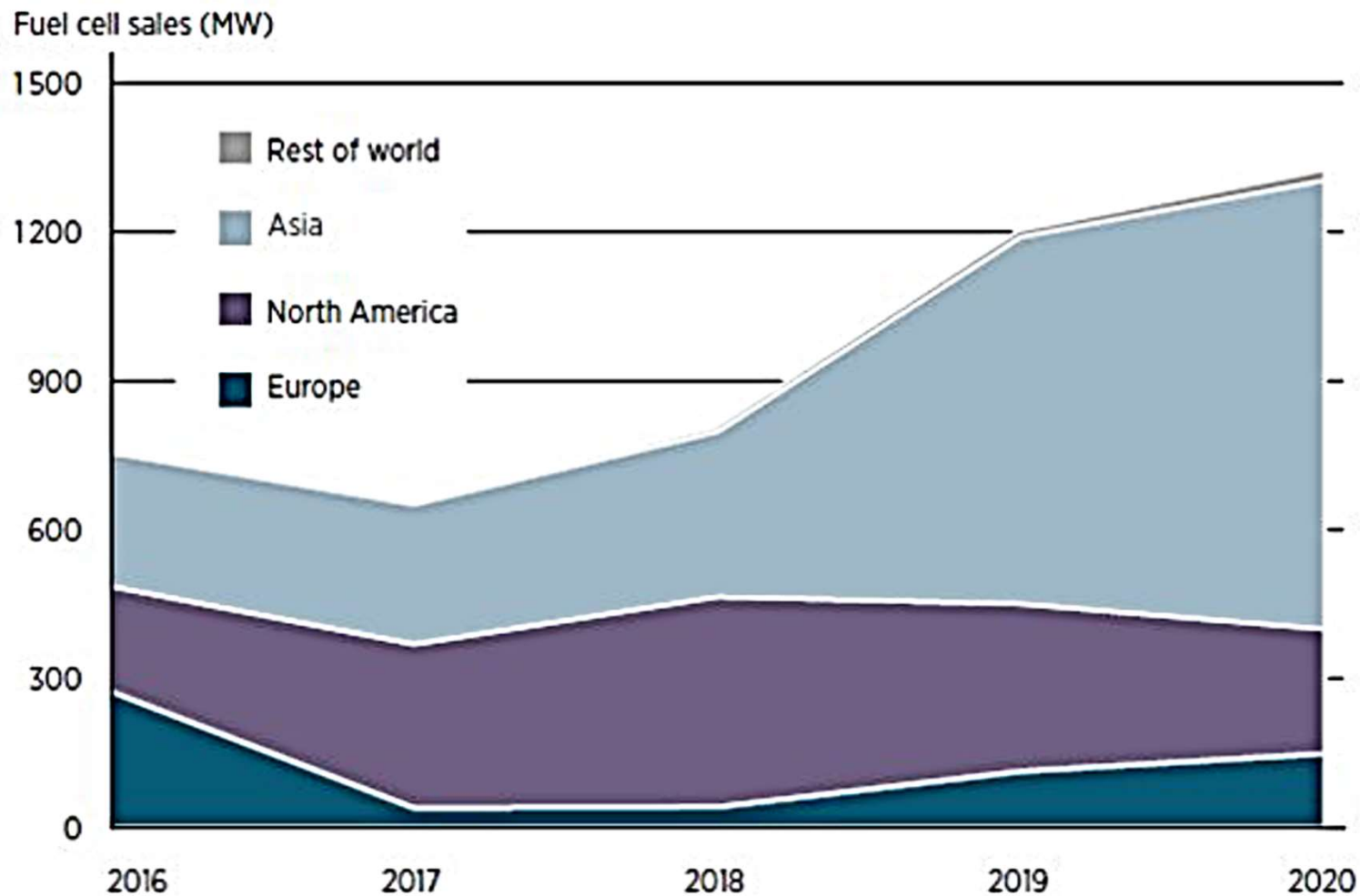


Note: LOHC = liquid organic hydrogen carrier.

Fonte: IEA, 2019

Células de Combustível

Vendas por região, 2016-2020



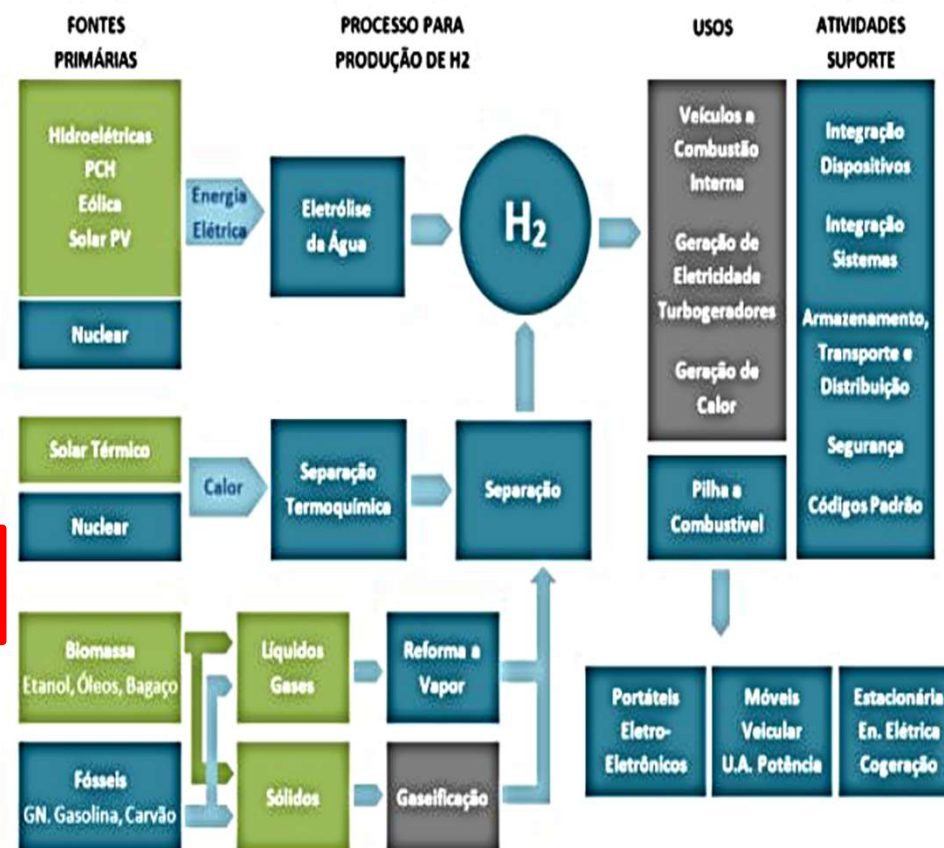
Fonte: IRENA, 2022

Classificação das Rotas Tecnológicas

Fontes para obtenção do Hidrogênio

Classificação do hidrogênio em escala de cores

Cor	Classificação	Descrição
■	Hidrogênio Preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem CCUS
■	Hidrogênio Marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS
□	Hidrogênio Cinza	Produzido por reforma a vapor do gás natural, sem CCUS
■	Hidrogênio Azul	Produzido por reforma a vapor do gás natural (eventualmente, também de outros combustíveis fósseis), com CCUS
■	Hidrogênio Verde	Produzido via eletrólise da água com energia de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar).
□	Hidrogênio Branco	Produzido por extração de hidrogênio natural ou geológico
■	Hidrogênio Turquesa	Produzido por pirólise do metano, sem gerar CO ₂
■	Hidrogênio Musgo	Produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS
■	Hidrogênio Rosa	Produzido com fonte de energia nuclear

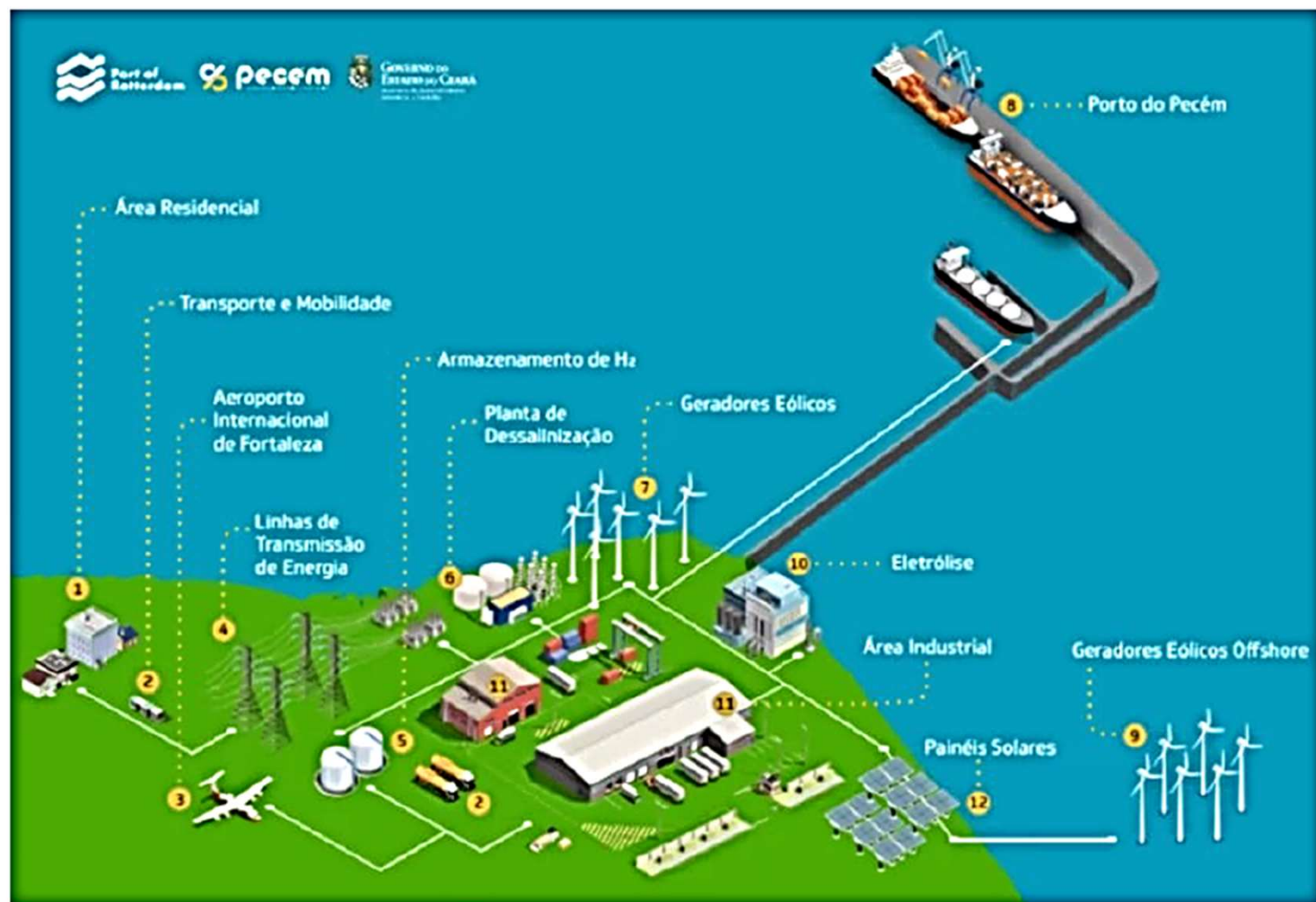


Representação esquemática de rotas tecnológicas para obtenção de hidrogênio

Fonte: EPE, 2021

Projetos de Hidrogênio Renovável

Porto do Pecém, Brasil



Projeto *Base One*

Energix Energy + Black & Veatch

- Local: Ceará
- Início operação: 2025
- Investimento: US\$ 5,4Bi
- Consumo: 3,4 GW (eólica e solar)
- Produção H₂: 600 kt/ano (**exportação**)
- Redução de CO₂: 10 Mt/ano



A respeito da Transição Energética

Embora a transição energética seja um assunto global pois está diretamente relacionada com as mudanças climáticas, nos países do Sul Global o termo deve ser tratado como uma expressão neo-colonialista que procura transferir o problema dos países do Norte Global, extremamente dependentes dos combustíveis fósseis, para os países do Sul Global, cuja responsabilidade pelas emissões de GEEs não está no consumo de fontes energéticas, mas pela queima de suas florestas e alteração do uso do solo.

Como consequência, cabe então aos países periféricos a produção de Hidrogênio e sua exportação para atender à demanda dos países centrais. Dessa forma, permanece o quadro da inserção destes países no mercado internacional como meros produtores de produtos primários com baixo valor agregado.

Célio Bermann (2024)