

# Tallerine Energías Renovables

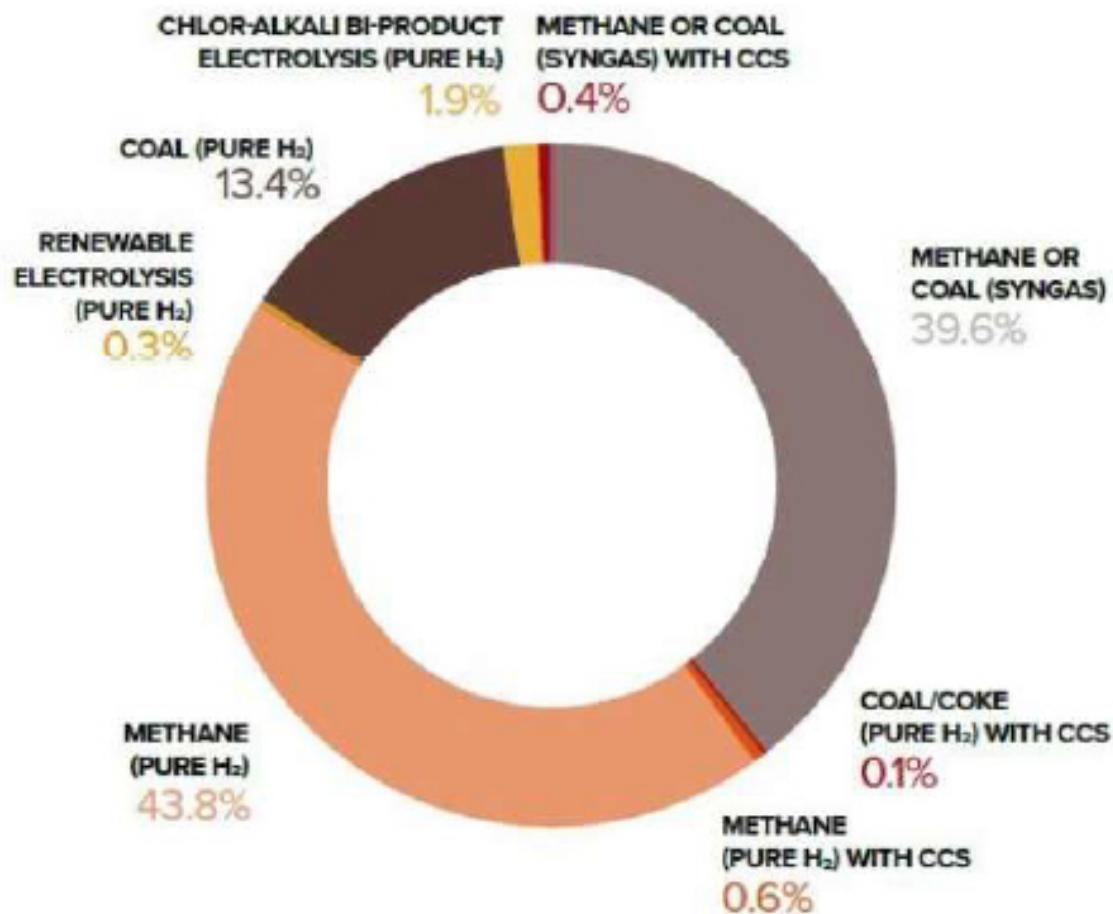
## Hidrogeno Verde



UNIVERSIDAD  
DE LA REPUBLICA  
URUGUAY



# Hydrogen Production

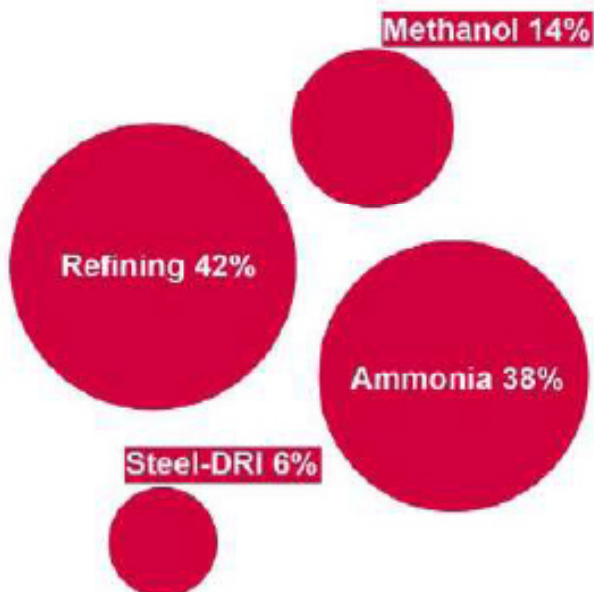


GLOBAL 2022

(Diapositiva extraida de curso “Seguridad del Hidrógeno” – José Luis Aprea - Feb 2024)

# H2 Demand & Supply

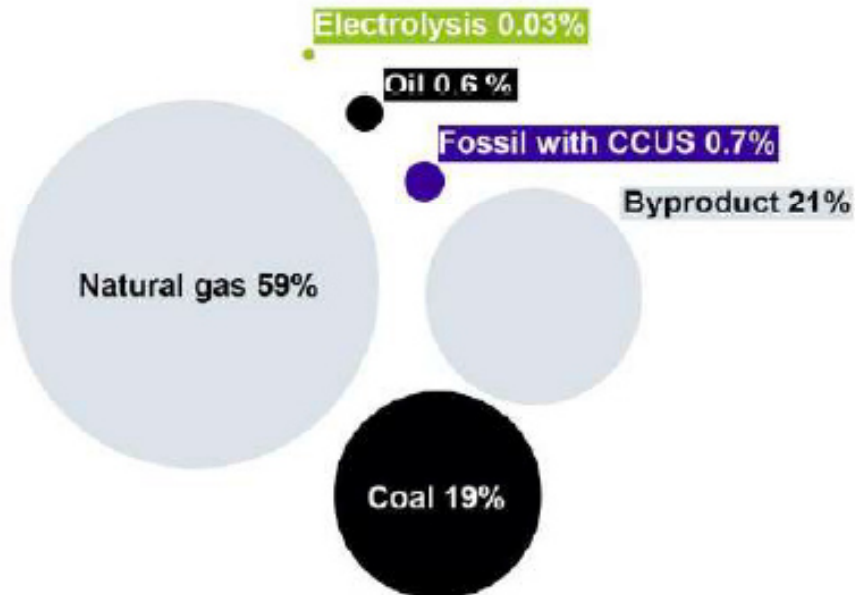
**A**  
Hydrogen demand



Source: Authors based on (IEA, 2021c, 2021b, 2021d)

**B**  
Hydrogen supply

● Grey H<sub>2</sub> ● Black H<sub>2</sub> ● Blue H<sub>2</sub> ● Green H<sub>2</sub>



GLOBAL IEA 2021

(Diapositiva extraida de curso “Seguridad del Hidrógeno” – José Luis Aprea - Feb 2024)

## PALETA DE COLORES

<b>Verde</b>		<b>Electrólisis + ER</b>
<b>Rosa</b>		<b>Electrólisis agua + Nuclear</b>
<b>Azul</b>		<b>Reforming hidrocarburos + CCS</b>
<b>Gris</b>		<b>Reforming Hidrocarburos</b>
<b>Amarillo</b>		<b>Electrólisis agua + Solar</b>
<b>Marrón</b>		<b>A partir del lignito</b>
<b>Turquesa</b>		<b>Pirólisis de metano</b>
<b>Blanco</b>		<b>Hidrógeno Natural</b>

(Diapositiva extraída de curso “Seguridad del Hidrógeno” – José Luis Aprea - Feb 2024)

## H2 TECHNOLOGIES



Se destacan tres tecnologías como las más prometedoras, actualmente o en el futuro:

**Electrólisis Alcalina (AE)**

**Proton Exchange Membrane Electrólisis (PEM)**

**Celdas de electrólisis de Óxido Sólido (SOEC)**

Siendo la tecnología madura con varias plantas de más de 100 MW en funcionamiento el siglo pasado, la electrólisis alcalina (AE) se está ampliando nuevamente. La tecnología SOEC es la menos desarrollada de las tres tecnologías de electrólisis y aún no se ha ampliado ni comercializado en gran escala. Las SOEC funcionan a alta temperatura, normalmente entre 700 y 800 °C, con una ventaja de eficiencia energética inherente en comparación con las tecnologías AE y PEM de baja temperatura. Sin embargo, cuando se integran con una reacción química que genera calor, como la síntesis de amoníaco, la eficiencia energética general se vuelve particularmente atractiva y no se necesitan metales preciosos para las SOEC.

(Diapositiva extraída de curso “Seguridad del Hidrógeno” – José Luis Aprea - Feb 2024)

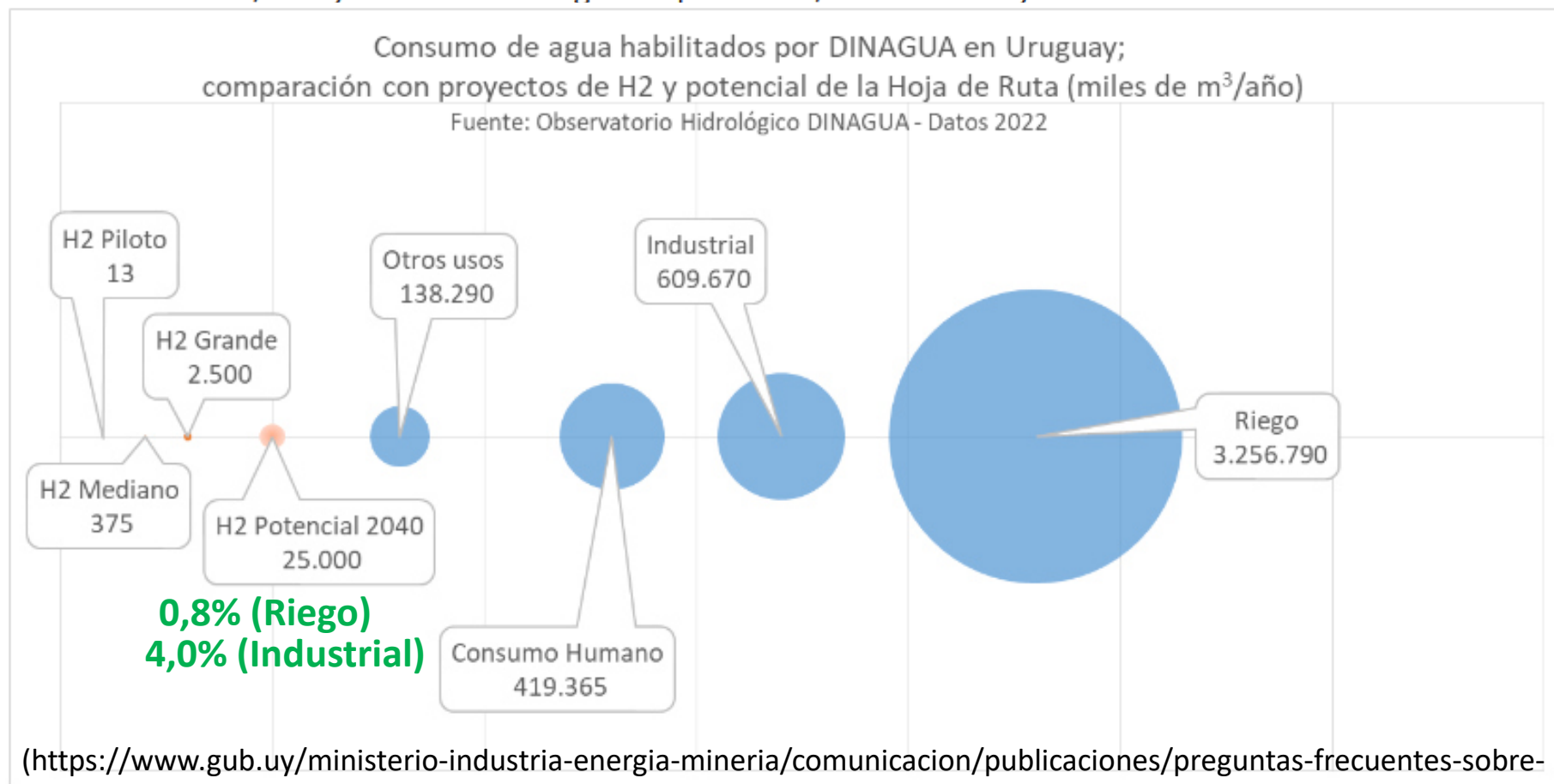
## Demanda de Agua

### ELECTRÓLISIS

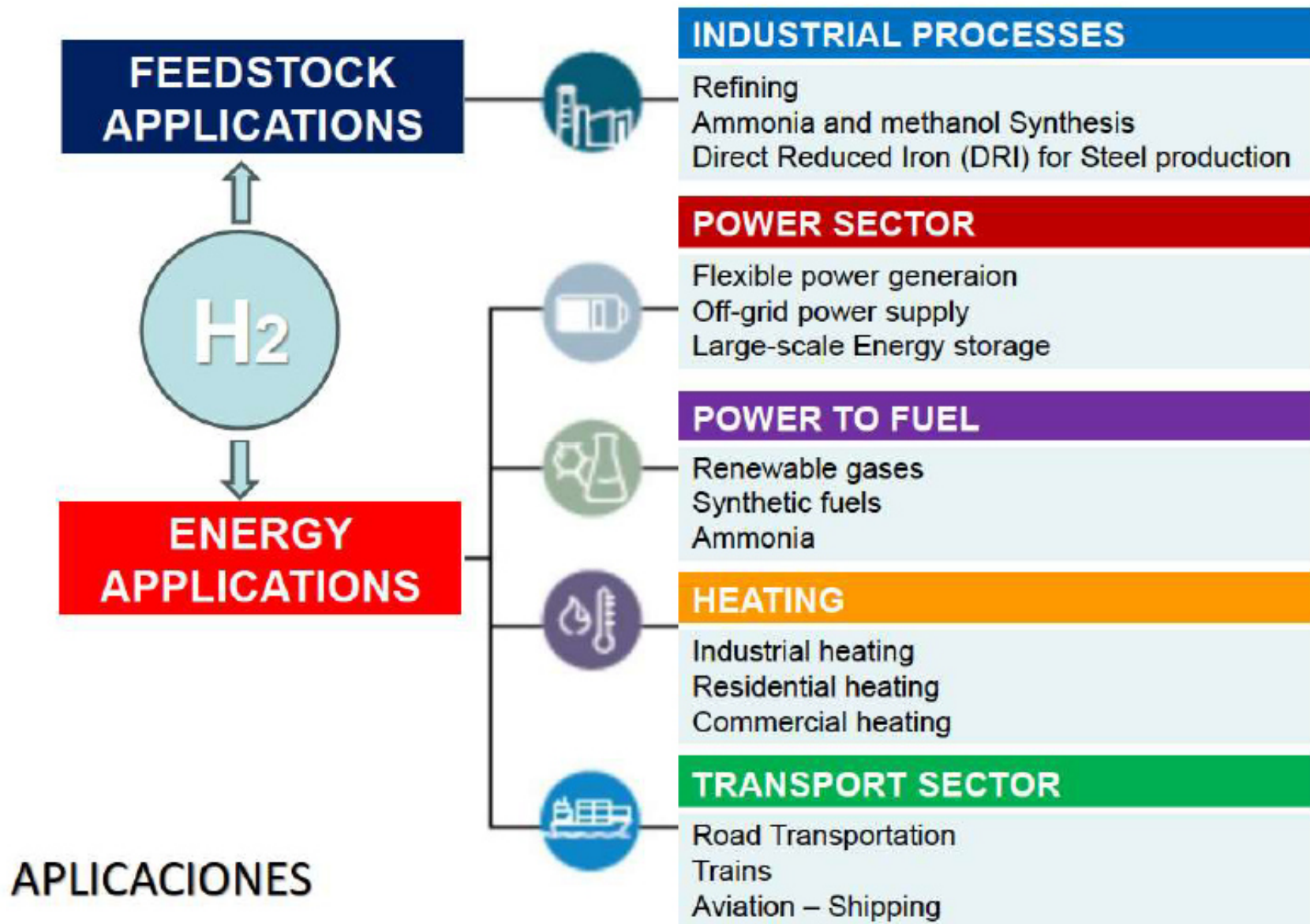
La demanda de agua es de 9 litros por kg de hidrógeno, pero se considera que el uso del agua puede variar entre 18 y 30 litros, dependiendo de la fuente y de la tecnología utilizada (Irena, 2023).

## ¿Cuánta agua se necesita para los proyectos de hidrógeno en Uruguay?

En el siguiente gráfico puede observarse que el consumo potencial de agua identificado para el desarrollo de toda la [Hoja de Ruta de hidrógeno verde y derivados](#) a 2040 representa un 0,8% del agua habilitada para uso de riego en el sector agropecuario y 4% del agua habilitada para consumo industrial en el año 2022. Estos valores representan el total de las autorizaciones otorgadas por DINAGUA, incluyendo tomas de aguas superficiales, subterráneas y embalses.



(<https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/publicaciones/preguntas-frecuentes-sobre-hidrogeno-verde-sus-derivados/preguntas-5>)



(Diapositiva extraida de curso “Seguridad del Hidrógeno” – José Luis Aprea - Feb 2024)

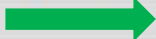


## PROPIEDADES COMPARADAS

	<b>G H2</b>	<b>Gas Natural</b>	<b>Nafta</b>
<b>Color</b>	NO	NO	SI
<b>Toxicidad</b>	NO	Poco	Alto
<b>Olor</b>	Sin Olor	SI (Mercaptanes)	SI (Aromáticos)
<b>Flotabilidad Aire: 1</b>	14 x Más liviano	2 x Más Liviano	3.7 x Más Pesado
<b>Energía (Peso)</b>	> 2.8 x	> 1.2 x	43 Mj/Kg
<b>Energía (Vol.)</b>	< 4 x	< 1,5 x	32 Mj/Lt

(Diapositiva extraida de curso “Seguridad del Hidrógeno” – José Luis Aprea - Feb 2024)

# EQUIVALENCIAS ENERGÉTICAS

	Combustible	Energía Específica kWh/kg	Densidad Energética kWh/l
	Hidrógeno Liq (20 K)	33,33	2,359
	Hidrógeno Gas (150 Atm)	33,33	0,4490
<b>Gases CNPT</b>	<b>Hidrógeno</b> 	<b>33,33</b>	<b>0,002993</b>
	Metano	11,39	0,009970
	Gas natural (82-93 % CH4)	10,6 - 13,1	0,0088 - 0,0104
	Etano	14,42	0,02024
	Propano	12,88	0,02589
	Butano	12,70	0,03439
<b>Líquidos</b>	Nafta	≈ 12,0	≈ 8,8
	Benceno	11,75	10,33
	Etanol	8,25	6,51
	Metano	5,47	4,44
	Amoníaco (L)	5,71	3,41
<b>Sólidos</b>	Carbón	8,72	≈ (15 - 20)
	Madera	4,76	≈ (2,8 -5,6)
Densidad H2 Gas CNPT: 0,0898 g/l    1 kg ocupa 11,135 m <sup>3</sup> Densidad H2 Liq: 70,8 g/l    1 kg ocupa 14,12 litros Densidad CH4, CNPT: 0,7167 g/l    1 kg ocupa 1,395 m <sup>3</sup>			

**DENSIDAD ENERGÉTICA**

(Diapositiva extraida de curso “Seguridad del Hidrógeno” – José Luis Aprea - Feb 2024)

# CHALLENGES

El almacenaje, la distribución y el uso del hidrógeno en cualquiera de sus formas presenta desafíos únicos

**FACILIDAD DE  
PÉRDIDAS**

**MUY BAJA ENERGÍA  
DE IGNICIÓN**

**AMPLIO RANGO  
INFLAMABILIDAD**

**ELEVADA  
FLOTABILIDAD**

**HABILIDAD PARA  
FRAGILIZAR  
METALES**

**GARANTIZAR  
OPERACIÓN SEGURA**

***[Ignición]: Proceso que inicia o desencadena una combustión.***

(Diapositiva extraída de curso “Seguridad del Hidrógeno” – José Luis Aprea - Feb 2024)

# DETONACIÓN

Tras la inflamación hay varias posibilidades

## **DEFLAGRACIÓN**

Combustión con velocidad del frente de reacción por debajo de la velocidad del sonido.

## **DETONACIÓN**

Velocidad del frente de reacción por encima de la velocidad del sonido (compresión supersónica). La onda expansiva comprime y calienta la mezcla de gas. Típico de las explosiones

**LA DETONACIÓN ES EL PEOR DE LOS CASOS PARA UN ACCIDENTE DE HIDRÓGENO**

(Diapositiva extraída de curso “Seguridad del Hidrógeno” – José Luis Aprea - Feb 2024)

## Propiedades del Hidrógeno

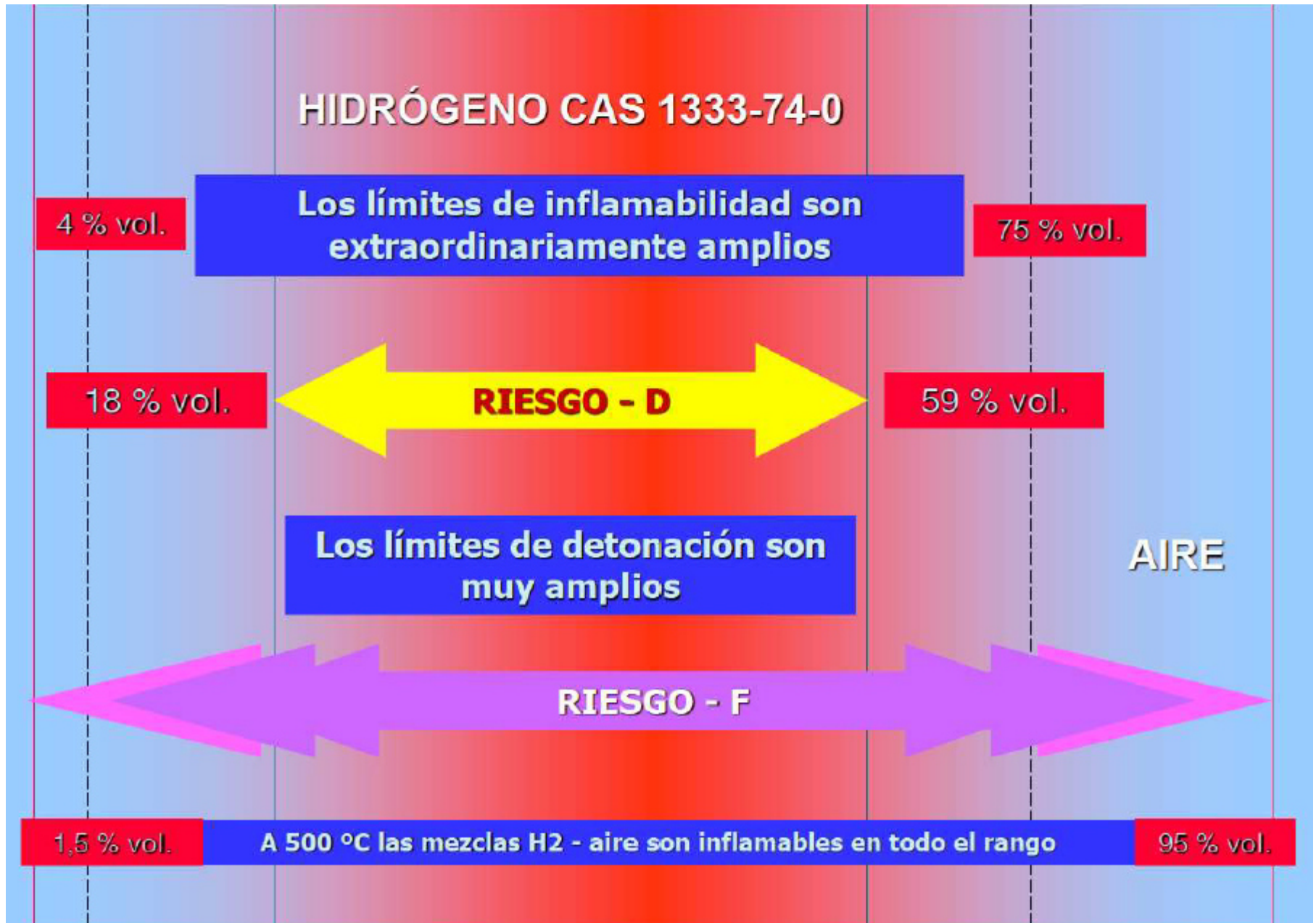
## Valor y unidades

Número atómico	1
Peso atómico	1,0079
Peso Molecular	2,0158 g/mol
Presión Crítica	12,8 Atmósferas
Temperatura Crítica	- 239,91 °C
Punto de ebullición normal	-252,766 °C = 20,390 °K ( a 0,1013 MPa)
Punto de fusión	-259,2 °C = 13,95 °K (a 0,1013 MPa)
Calor específico a presión constante	3,4 cal/ gr. a 0 °C
Calor de disociación	104,2 Kcal./mol a 25° C
<b>Coefficiente de difusión</b>	<b>0,61 cm<sup>2</sup>/s</b>
Temperatura de Autoignición	585 °C (Otras fuentes: 520 °C)
<b>Límites de inflamabilidad en aire</b>	<b>4 - 75 % en Volumen</b>
Límites de detonación en el aire	18,3 – 59% en Volumen
Potencial explosivo	24 gr TNT / gr H <sub>2</sub> ó 2 gr TNT / Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub>
Isótopos	Protio H <sup>1</sup> , Deuterio H <sup>2</sup> , Tritio H <sup>3</sup>
<b>Densidad del gas (GH)</b>	<b>0,08987 kg/ Nm<sup>3</sup> ( 0 °C y 1 Atmósfera)</b>
Densidad del líquido (LH <sub>2</sub> )	70,973 kg/m <sup>3</sup> (-252 °C)
<b>Energía Mínima de Ignición</b>	<b>0,017 mJ</b>



**[Ignición]:** *Proceso que inicia o desencadena una combustión.*

(Diapositiva extraída de curso “Seguridad del Hidrógeno” – José Luis Aprea - Feb 2024)



(Diapositiva extraída de curso “Seguridad del Hidrógeno” – José Luis Aprea - Feb 2024)

# DETONACIÓN

Tipo de Combustible	Hidrógeno	Metano	Propano	Nafta
LDL %V en aire	18	6,3	3,1	1,1
UDL %V en aire	59	13,5	7,0	3,3
Máx. Velocidad de quemado [m/s]	3,46	0,43	0,47	-
Mezcla Estequiom. [Vol %]	29,5	9,5	4,1	1,8
Veloc.de quemado Estequiom. [m/s]	2,37	0,42	0,46	0,42

***[LDL]: lower detonation limit***

***[UDL]: upper detonation limit***

(Diapositiva extraida de curso “Seguridad del Hidrógeno” – José Luis Aprea - Feb 2024)

# Propiedades Fisicoquímicas

Propiedad	GNC	Hidrógeno	Nafta
Mezcla Estequiométrica en aire, Vol %	9,48	29,53	1,76
PCI, Mj/Kg	44,24	119,93	43
Temperatura de Autoignición, °C	540	585	257
Velocidad de Difusión en aire, Cm/s	< 0,51	< 2,00	< 0,17
Temperatura Llama Adiabática, °K	2148	2318	2470
Brecha de seguridad NPT en aire, cm	0,203	0,064	0,200
EMI en Aire, Mj	0,29	0,017	0,24
Eficiencia Volumétrica, %	-	+	+
Almacenaje y Manejo	Difícil	+ Difícil	Fácil
Disponibilidad	Abundante	-	No Renov.

*[Ignición]: Proceso que inicia o desencadena una combustión.*

(Diapositiva extraída de curso “Seguridad del Hidrógeno” – José Luis Aprea - Feb 2024)



# MEDIOS PARA COMBATIR INCENDIOS

Consultar FDS Hidrógeno

**COMBUSTIÓN ESPONTÁNEA:** 580 °C (Depende de la fuente)

**LÍMITES DE INFLAMABILIDAD EN AIRE POR VOLUMEN:** 4% - 75%

**MEDIOS DE EXTINCIÓN:** CO<sub>2</sub>, polvo químico, rociar con agua ó agua pulverizada alrededor del área. No extinguir hasta que el suministro de Hidrógeno esté INTERRUMPIDO.

**INSTRUCCIONES ESPECIALES PARA COMBATIR INCENDIOS:**

Evacuar a todo el personal de la zona de peligro. Inmediatamente enfriar los cilindros ó tanques de almacenaje, rociándolos con agua desde lo más lejos posible.

**¡Cuidado de no extinguir las llamas!**

**¡Si las llamas se extinguen accidentalmente, puede re-ocurrir una explosión!**

Si es posible y si no hay peligro, cerrar el suministro del gas Hidrógeno mientras se continúa rociando los cilindros con agua.

(Diapositiva extraída de curso “Seguridad del Hidrógeno” – José Luis Aprea - Feb 2024)

# Hoja de Ruta de Hidrógeno Verde en Uruguay

## Videos



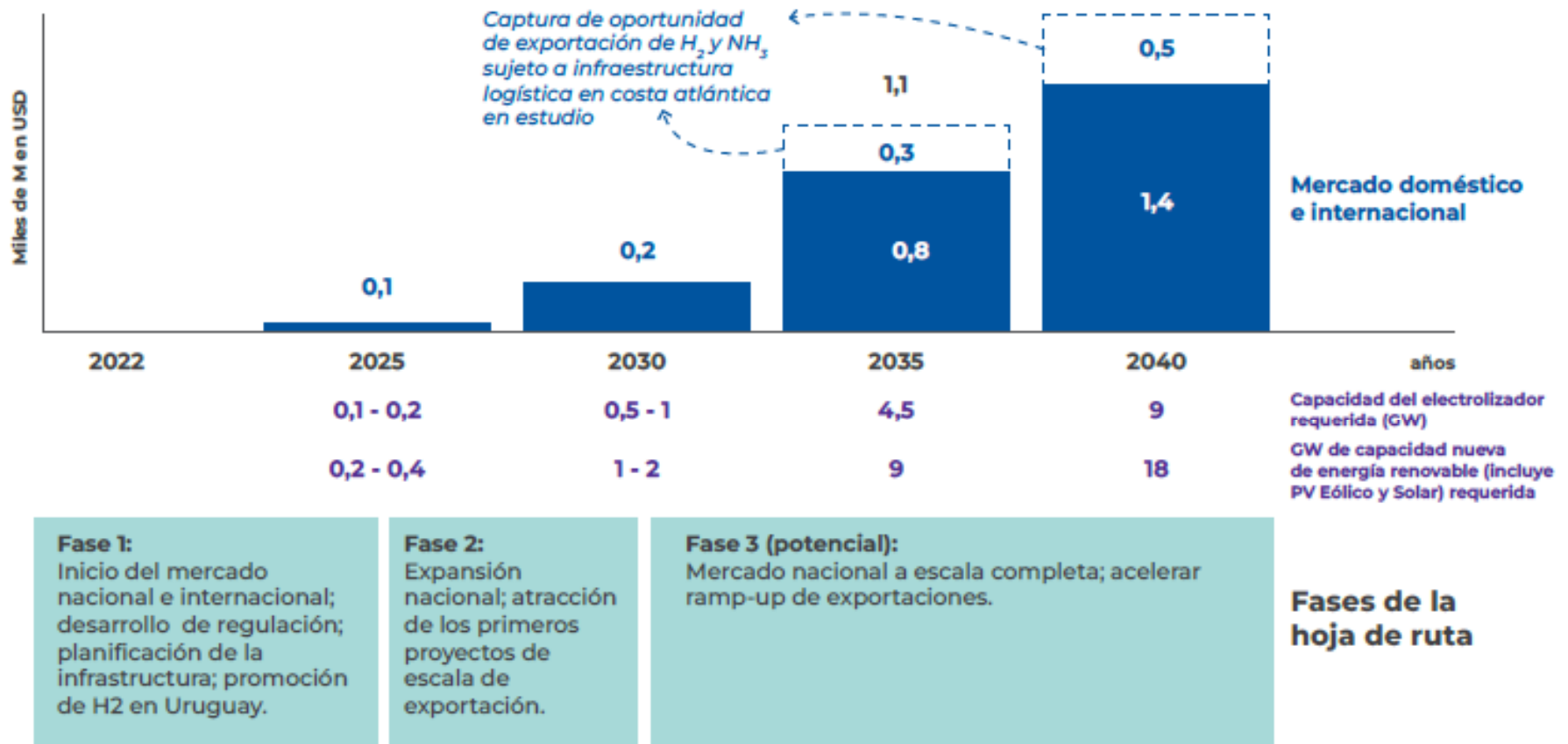
## Descargas

↓ [Hoja de ruta de hidrógeno verde \(.pdf 4859 KB\)](#)

↓ [Green Hydrogen Roadmap in Uruguay \(.pdf 4643 KB\)](#)

Fuente: <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/noticias/hoja-ruta-hidrogeno-verde-uruguay>

El mercado doméstico y las exportaciones de hidrógeno verde y productos derivados representan una oportunidad de facturación anual estimada en 160 millones de dólares por año a 2030 y de 1900 millones de dólares para Uruguay a 2040 (ver figura 13).

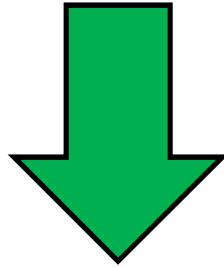


**Figura 13: Metas y proyecciones del mercado uruguayo de hidrógeno y derivados: 2025-2040.**

Fuente: McKinsey & Company, 2021, de acuerdo con contrato #:C-RG-T3777-P001 concluido con el BID

Fuente: <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/noticias/hoja-ruta-hidrogeno-verde-uruguay>

El 28/2/2024 se realizó la firma de un **memorando de entendimiento** entre Uruguay y la empresa HIF Global por inversión en hidrógeno en Paysandú.



*-Estudios, análisis, etc*

¿?

***Contrato de inversión***

Se trata de un proyecto sin precedentes que, de concretarse, implicaría la mayor inversión privada de la historia del país, con un monto estimado de US\$6.000 millones y la creación de 3.000 puestos de trabajo durante la fase de construcción.