



# Seguridad Tecnologías del Hidrógeno

## Curso Postgrado **URUGUAY**

**2CAP-2024**

**2**

**HIDRÓGENO  
PROPIEDADES**

[aprea.infovia@gmail.com](mailto:aprea.infovia@gmail.com)

**Safety**  
Hydrogen Technologies



FACULTAD DE  
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

**José Luis APREA**

FEBRERO 2024



Comisión Nacional  
de Energía Atómica

# Seguridad Tecnologías del Hidrógeno

## Curso Postgrado **URUGUAY**

**CAP-2024**

**SEGURIDAD H2**

[aprea.infovia@gmail.com](mailto:aprea.infovia@gmail.com)

**Safety**  
Hydrogen Technologies



FACULTAD DE  
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

**José Luis APREA**

FEBRERO 2024



# Seguridad Tecnologías del Hidrógeno

La reproducción total o parcial de este curso exige que se citen las fuentes

## IMPORTANTE

Este curso fue preparado por el autor con fines educativos para contribuir a la formación de los interesados y no otorga ninguna garantía, expresa o implícita, ni asume ninguna responsabilidad legal por la exactitud, integridad o utilidad de cualquier información, aparato, producto o proceso divulgado, o declara que su uso no infringiría los derechos de propiedad privada. La referencia en este documento a cualquier producto, proceso o servicio comercial específico por nombre comercial, marca comercial, fabricante o de otro modo no constituye ni implica necesariamente su respaldo, recomendación o favorecimiento por parte del autor o de las instituciones citadas. Ninguna afirmación debe ser considerada como una recomendación comercial ni compromiso por parte del autor. El análisis del presente Informe, sus resultados e implicancias revisten el carácter de sugerencias técnicas especializadas ante un requerimiento específico. No representan compromiso para el autor o las instituciones a las cuales este pertenece, ni relevan a la firma, organismo o consorcio convocante de las responsabilidades legales en materia de seguridad de las instalaciones y de las personas.

**Safety**  
Hydrogen Technologies



FACULTAD DE  
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

**José Luis APREA**

FEBRERO 2024

# OBJETIVOS

- 1 Obtener a través de la capacitación el conocimiento básico de los procesos de producción del hidrógeno y sus aplicaciones
- 2 Identificar el hidrógeno y sus propiedades, especialmente las relacionadas con la seguridad, para poder reconocer los principales riesgos y asegurar la prevención de los mismos.
- 3 Brindar los conocimientos necesarios para considerar los aspectos de seguridad en diferentes tipos de proyectos de investigación y desarrollo.
- 4 Conocer las principales normas relacionadas con el hidrógeno e ilustrar mediante el estudio de casos y recomendaciones los aspectos y medidas de seguridad que deben contemplarse en la operación de sistemas del hidrógeno y en su eventual diseño.



# Seguridad Tecnologías del Hidrógeno

# SEGURIDAD

## CAP-01

1. INTRODUCCIÓN - MÉTODOS DE PRODUCCIÓN - DEMANDA
2. REFORMADO - ELECTRÓLISIS - OTROS MÉTODOS
3. APLICACIONES - TENDENCIAS

## CAP-02

1. INTRODUCCIÓN - PROPIEDADES. IDENTIFICACIÓN DE PRODUCTO
2. IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS - EXPLOSIÓN Y DETONACIÓN
3. PÉRDIDAS Y SISTEMAS DE DETECCIÓN

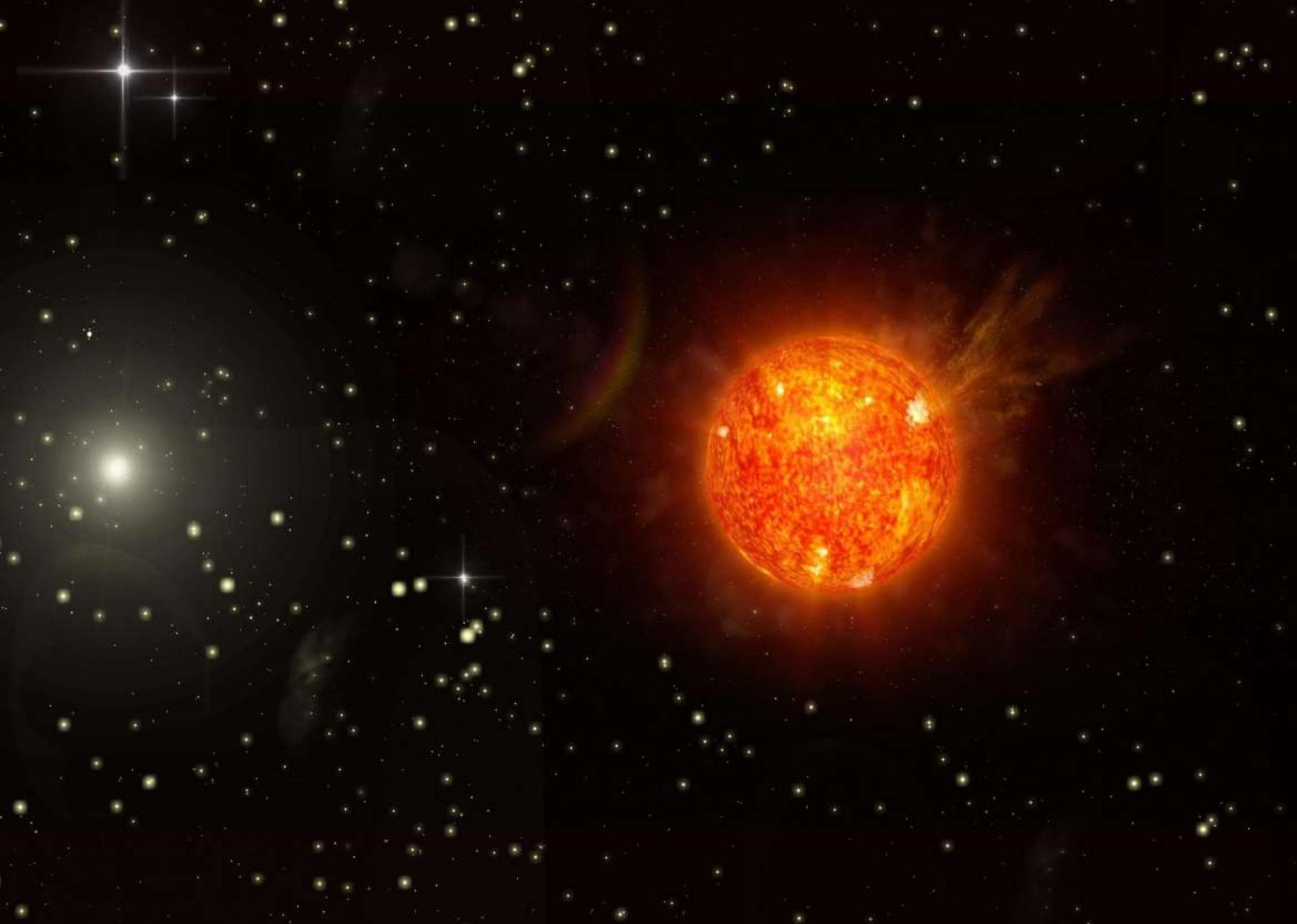
## CAP-03

1. ASPECTOS NORMATIVOS - NORMAS DE CALIDAD - ISO 14687
2. ASPECTOS NORMATIVOS - NORMAS DE SEGURIDAD - ISO TR 15916
3. OTROS DOCUMENTOS NORMATIVOS

## CAP-04

1. ANÁLISIS DE CASOS PRÁCTICOS. GUÍAS DE DISEÑO Y RECOMENDACIONES
2. INCIDENTES - ANÁLISIS DE RIESGOS Y PREVENCIÓN DE ACCIDENTES
3. CONCLUSIONES - Q & A





Período	Grupo																					
	1																	18				
1	1 <b>H</b> Hidrógeno																	2 <b>He</b> Helio				
2	3 <b>Li</b> Litio	4 <b>Be</b> Berilio															5 <b>B</b> Boro	6 <b>C</b> Carbono	7 <b>N</b> Nitrógeno	8 <b>O</b> Oxígeno	9 <b>F</b> Flúor	10 <b>Ne</b> Neón
3	11 <b>Na</b> Sodio	12 <b>Mg</b> Magnesio															13 <b>Al</b> Aluminio	14 <b>Si</b> Silicio	15 <b>P</b> Fósforo	16 <b>S</b> Azufre	17 <b>Cl</b> Cloro	18 <b>Ar</b> Argón
4	19 <b>K</b> Potasio	20 <b>Ca</b> Calcio	21 <b>Sc</b> Escandio	22 <b>Ti</b> Titanio	23 <b>V</b> Vanadio	24 <b>Cr</b> Cromo	25 <b>Mn</b> Manganeso	26 <b>Fe</b> Hierro	27 <b>Co</b> Cobalto	28 <b>Ni</b> Níquel	29 <b>Cu</b> Cobre	30 <b>Zn</b> Zinc	31 <b>Ga</b> Galio	32 <b>Ge</b> Germanio	33 <b>As</b> Arsénico	34 <b>Se</b> Selenio	35 <b>Br</b> Bromo	36 <b>Kr</b> Criptón				
5	37 <b>Rb</b> Rubidio	38 <b>Sr</b> Estroncio	39 <b>Y</b> Itrio	40 <b>Zr</b> Zirconio	41 <b>Nb</b> Niobio	42 <b>Mo</b> Molibdeno	43 <b>Tc</b> Tecnecio	44 <b>Ru</b> Rutenio	45 <b>Rh</b> Rodio	46 <b>Pd</b> Paladio	47 <b>Ag</b> Plata	48 <b>Cd</b> Cadmio	49 <b>In</b> Indio	50 <b>Sn</b> Estaño	51 <b>Sb</b> Antimonio	52 <b>Te</b> Teluro	53 <b>I</b> Yodo	54 <b>Xe</b> Xenón				
6	55 <b>Cs</b> Cesio	56 <b>Ba</b> Bario	57 <b>La</b> Lantano	72 <b>Hf</b> Hafnio	73 <b>Ta</b> Tántalo	74 <b>W</b> Volframio	75 <b>Re</b> Renio	76 <b>Os</b> Osmio	77 <b>Ir</b> Iridio	78 <b>Pt</b> Platino	79 <b>Au</b> Oro	80 <b>Hg</b> Mercurio	81 <b>Tl</b> Talio	82 <b>Pb</b> Plomo	83 <b>Bi</b> Bismuto	84 <b>Po</b> Polonio	85 <b>At</b> Astatino	86 <b>Rn</b> Radón				
7	87 <b>Fr</b> Francio	88 <b>Ra</b> Radio	89 <b>Ac</b> Actinio	104 <b>Rf</b> Rutherfordio	105 <b>Db</b> Dubnio	106 <b>Sg</b> Seaborgio	107 <b>Bh</b> Bohrio	108 <b>Hs</b> Hassio	109 <b>Mt</b> Meitnerio	110 <b>Uun</b> Ununnilio	111 <b>Uuu</b> Unununio	112 <b>Uub</b> Ununbio		114 <b>Uuq</b> Ununquadio		116 <b>Uuh</b> Ununhexio		118 <b>Uuo</b> Ununoctio				



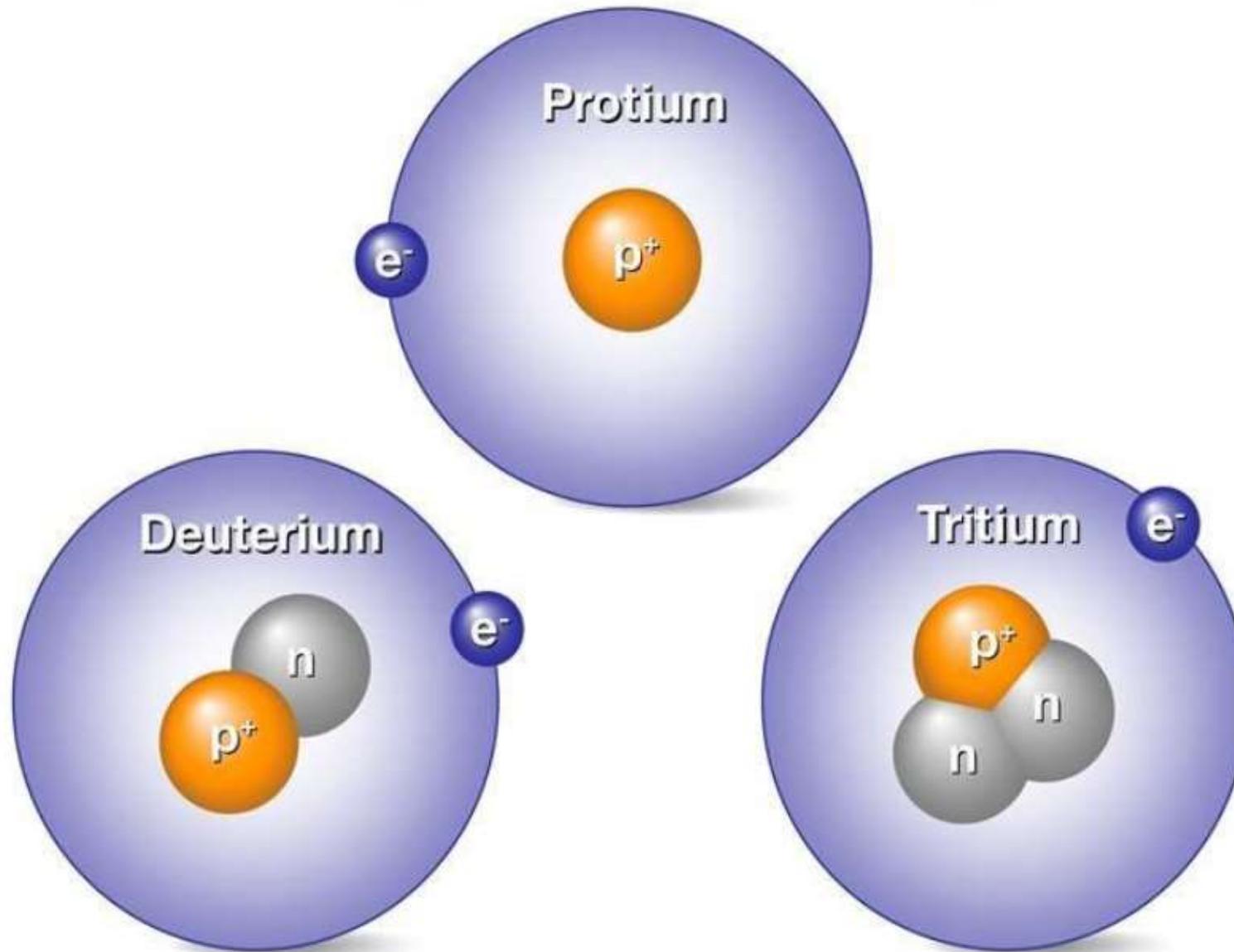
Lantánidos	6	58 <b>Ce</b> Cerio	59 <b>Pr</b> Praseodimio	60 <b>Nd</b> Neodimio	61 <b>Pm</b> Promecio	62 <b>Sm</b> Samario	63 <b>Eu</b> Europio	64 <b>Gd</b> Gadolinio	65 <b>Tb</b> Terbio	66 <b>Dy</b> Disprosio	67 <b>Ho</b> Holmio	68 <b>Er</b> Erbio	69 <b>Tm</b> Tulio	70 <b>Yb</b> Iturbio	71 <b>Lu</b> Lutecio
Actínidos	7	90 <b>Th</b> Torio	91 <b>Pa</b> Protactinio	92 <b>U</b> Uranio	93 <b>Np</b> Neptunio	94 <b>Pu</b> Plutonio	95 <b>Am</b> Americio	96 <b>Cm</b> Curio	97 <b>Bk</b> Berkelio	98 <b>Cf</b> Californio	99 <b>Es</b> Einsteinio	100 <b>Fm</b> Fermio	101 <b>Md</b> Mendelevio	102 <b>No</b> Nobelio	103 <b>Lr</b> Laurencio

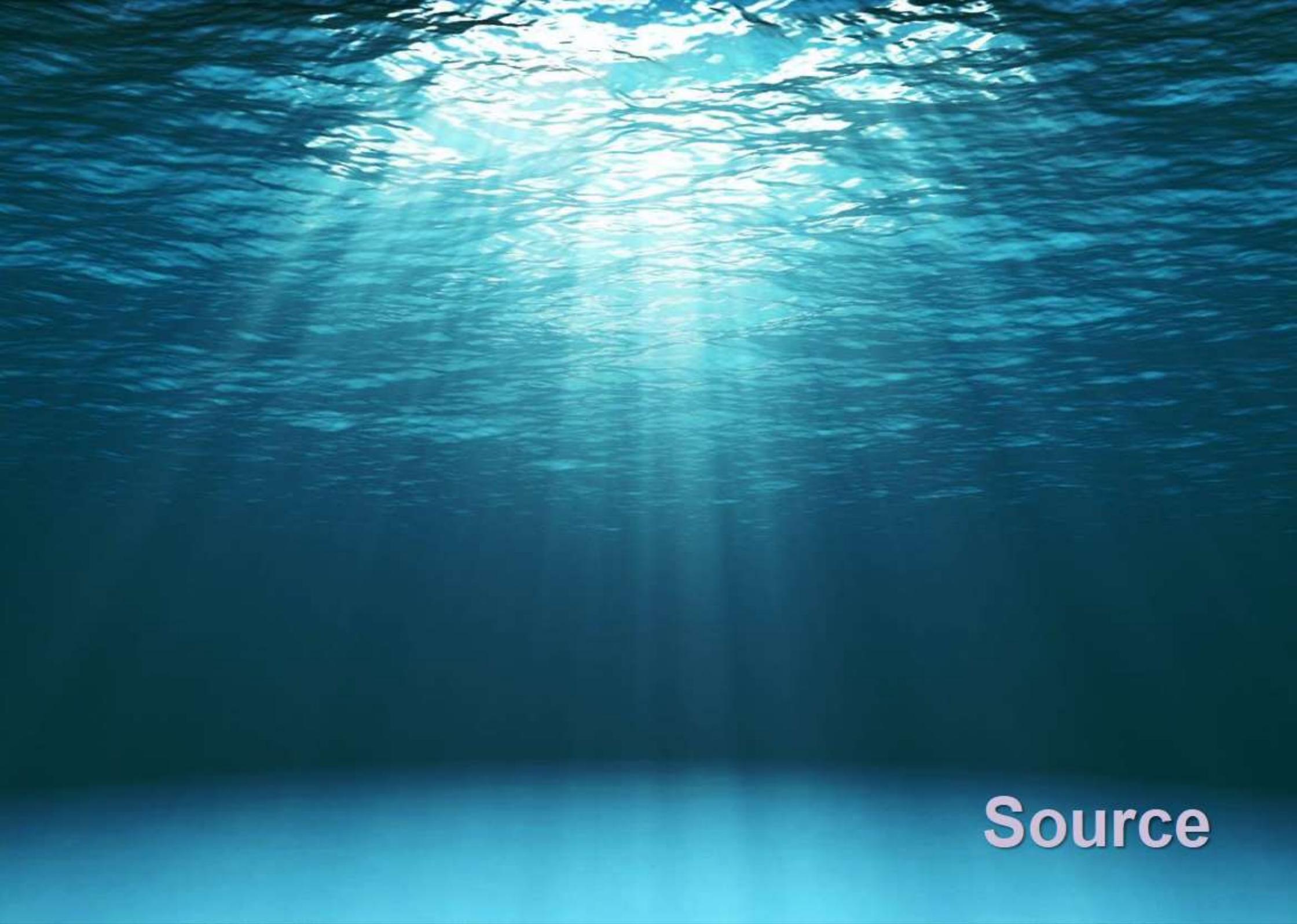
Notas:

- Metales
- Metaloides
- No metales
- Gases nobles

(1) Base en peso atómico carbono de 12 ( ) indica el más estable o el de isótopo más conocido.

# ISÓTOPOS

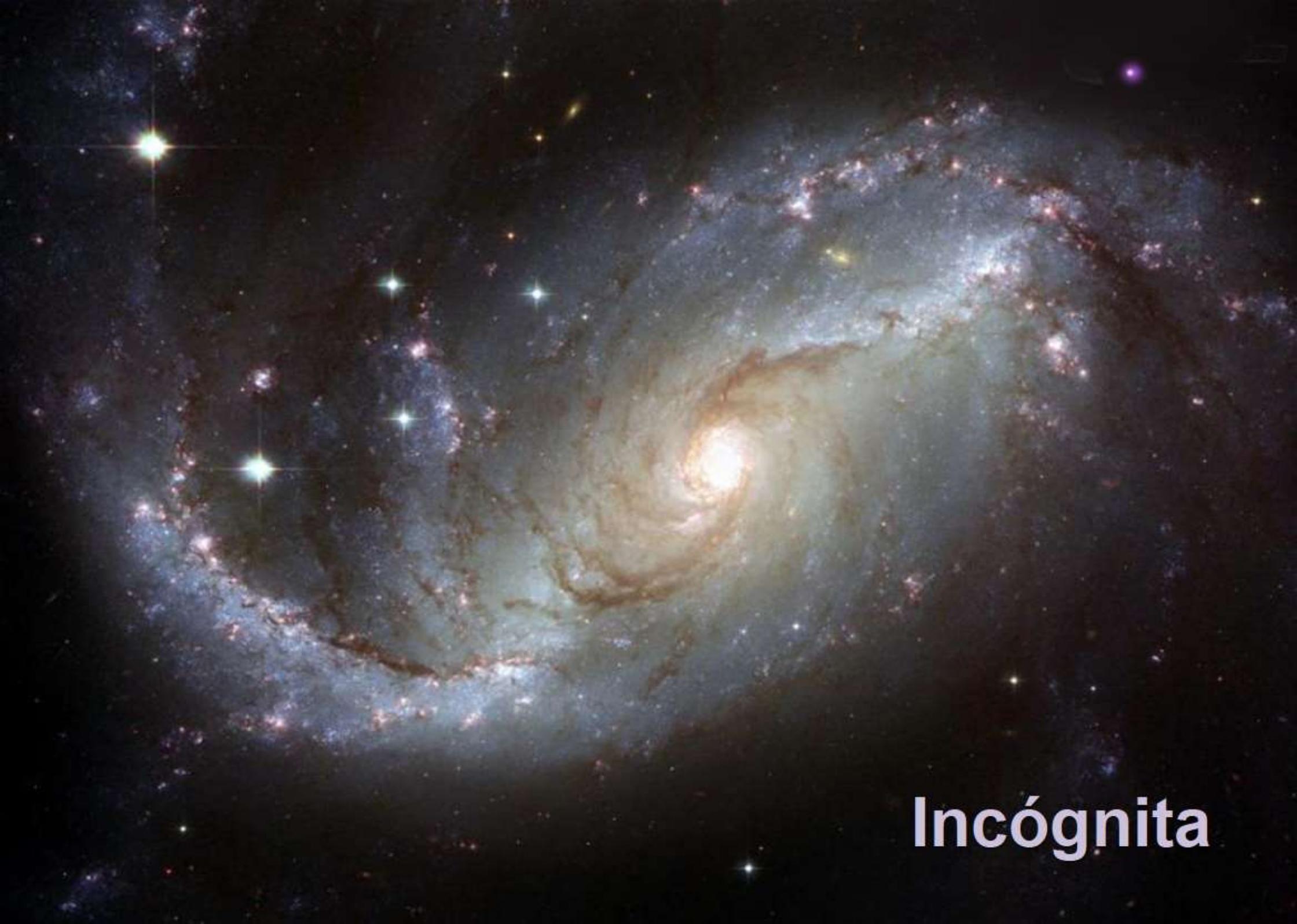




**Source**

# ISÓTOPOS

	<i>Hidrógeno</i>	<i>Deuterio</i>	<i>Tritio</i>
<i>Masa Atómica</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Símbolo</i>	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>T</i>
<i>Neutrones</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>
<i>Z Número de carga</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
	<i><math>{}_1H^1</math></i>	<i><math>{}_1H^2</math></i>	<i><math>{}_1H^3</math></i>
<i>Abundancia %</i>	<i>99,9845</i>	<i>0,0155</i>	<i><math>4 \times 10^{-15}</math></i>



**Incógnita**

**Propiedades del Hidrógeno****Valor y unidades**

1

**H**

HIDRÓGENO

**Primer elemento**

**Hidrógeno**

**Protio - Protium**



**UN 1049**

**CAS 1333-74-0**

**HIDRÓGENO**  
**GAS INFLAMABLE**

# IDENTIFICACIÓN

	N° UN
<b><i>Hidrógeno</i></b>	<b>1049</b>
<b><i>Hidrógeno absorbido en hidruros metálicos</i></b>	<b>9279</b>
<b><i>Hidrógeno comprimido</i></b>	<b>1049</b>
<b><i>Hidrógeno líquido criogénico</i></b>	<b>1966</b>
<b><i>Hidrógeno almacenado en sistema de hidruros</i></b>	<b>3468</b>

# Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (SGA/GHS) en el Ámbito Laboral

MINISTERIO DE TRABAJO Y SEGURIDAD SOCIAL (MTSS) bajo el título SGA  
REGLAMENTACION PARA LA PROTECCION DE LA SEGURIDAD Y LA SALUD DE LOS TRABAJADORES  
CONTRA LOS RIESGOS RELACIONADOS CON LOS AGENTES QUIMICOS DURANTE EL TRABAJO

Decreto 307-2009



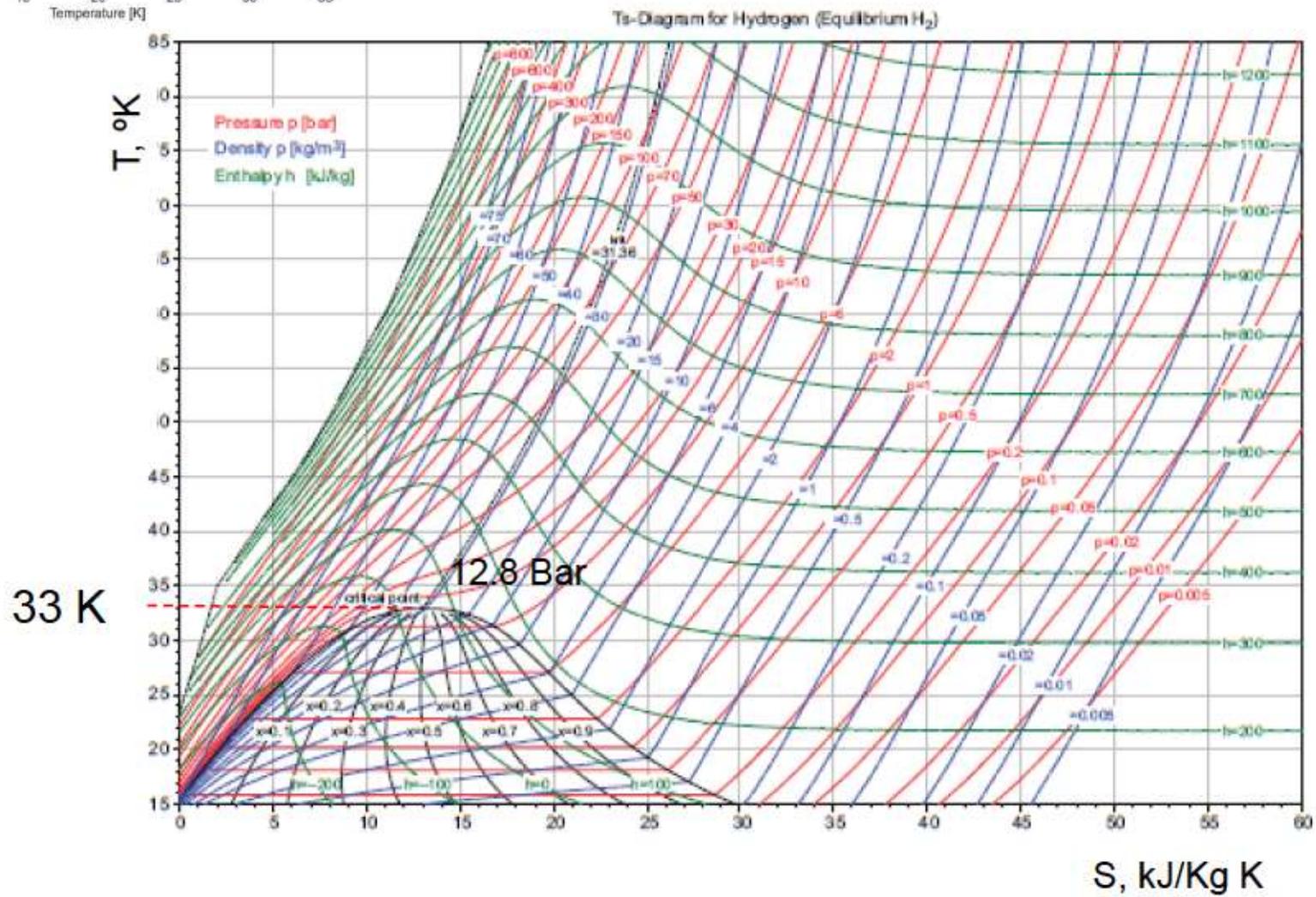
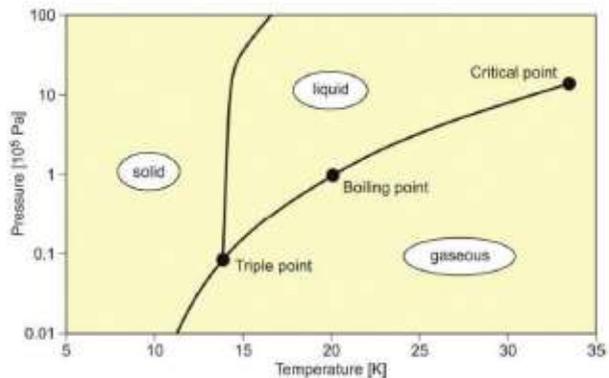
## Propiedades del Hidrógeno

## Valor y unidades

Número atómico	1
Peso atómico	1,0079
<b>Peso Molecular</b>	<b>2,0158 g/mol</b>
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)
Límites de inflamabilidad en aire	4 - 75 % en Volumen
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> <sub>1</sub> , Deuterio H <sup>2</sup> <sub>1</sub> , Tritio H <sup>3</sup> <sub>1</sub>
<b>Densidad del gas (GH)</b>	<b>0,08987 kg/ Nm<sup>3</sup> ( 0 °C y 1 Atmósfera)</b>
<b>Densidad del líquido (LH<sub>2</sub>)</b>	<b>70,973 kg/m<sup>3</sup> (-252 °C)</b>
Energía Mínima de Ignición	0,017 mJ

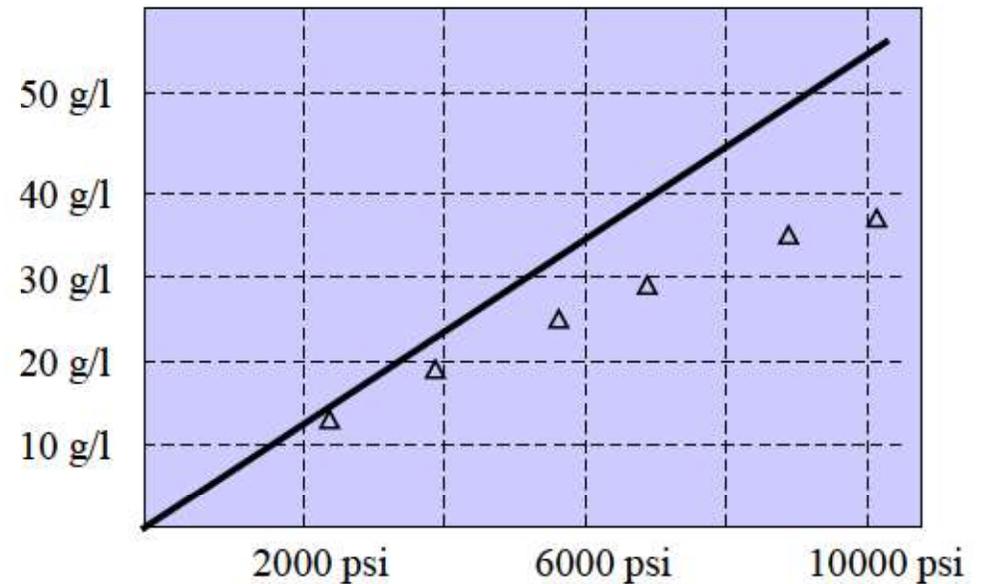


# T-S Fases



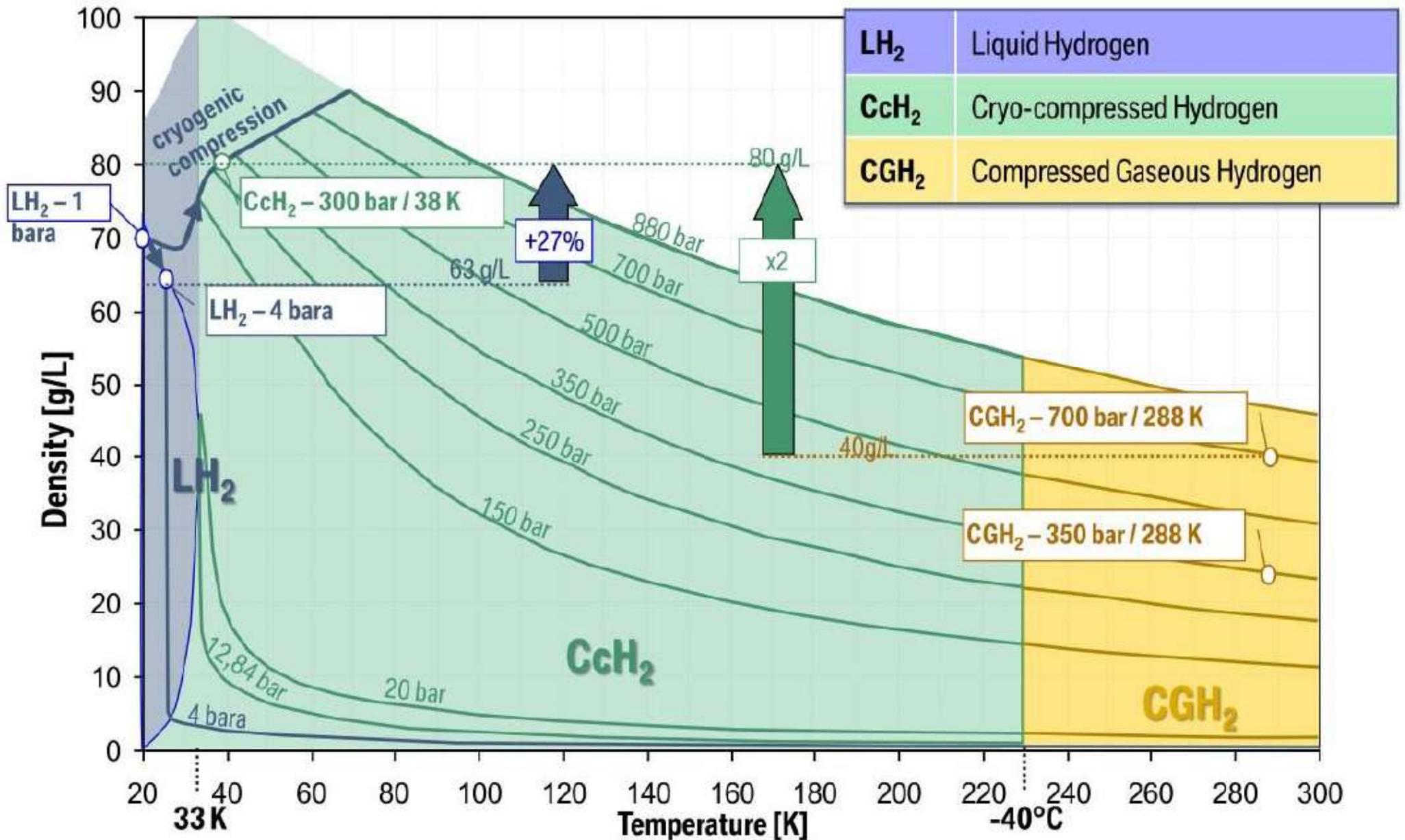
# DENSIDAD

La densidad del hidrógeno es en extremo baja, por lo cual cualquier fuga asciende, flota y se dispersa fácilmente



Substancia	Densidad - [Kg/M <sup>3</sup> ]
H2 Gas a 1 Atm y 273 °K	0,0899
Aire a 1 Atm y 273°K	1,292
Propano a 1 Atm y 273°K	2,420

# DENSIDAD



# Métodos de almacenaje

BREVE RESUMEN

Method	Gravimetric Energy Density (wt %)	Volumetric Energy Density (MJ/L)	T (K)	P (barg)	Remarks
<b>Compressed Liquid</b>	5.7	4.9	293	700	Current industry standard
<b>Cold/cryo compressed</b>	7.5	6.4	20	0	Boil-off constitutes major disadvantage
<b>MOF</b>	5.4	4.0	40 – 80	300	Boil-off constitutes major disadvantage
<b>Carbon nanostructures</b>	4.5	7.2	78	20 – 100	Attractive densities only at very low temperatures
<b>Metal hydrides</b>	2.0	5.0	298	100	Volumetric density based on powder density of 2.1 g/mL and 2.0 wt % storage capacity
<b>Metal borohydrides</b>	7.6	13.2	260 – 425	20	Requires thermal management system
<b>Kubas-type</b>	14.9 – 18.5	9.8 – 17.6	130	105	Low temperature, high pressure thermal management required
<b>LOHC</b>	10.5	23.6	293	120	Highly endo/exothermal requires processing plant and catalyst
<b>Chemical</b>	8.5	7	293	0	Not suitable for mobility
	15.5	11.5	298	10	Requires SOFC fuel cell

Source: Hydro Quebec

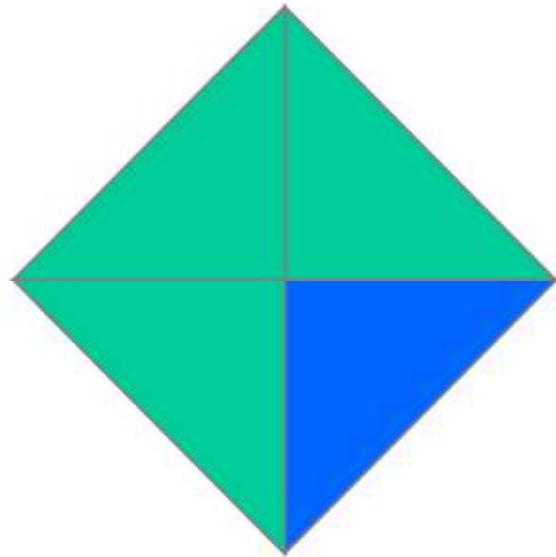
# EBULLICIÓN Y FUSIÓN

Contrario a lo que pueda imaginarse, el hidrógeno presenta el segundo más bajo valor, tanto del punto de ebullición como del punto de fusión, después del helio.

<b>Substancia</b>	<b>Hidrógeno</b>	<b>Helio</b>	<b>Propano</b>
Punto de ebullición [°K]	20 (-253)	4 (-269)	231 (- 42)
Punto de fusión [°K] (°C)	14 (-259)	1 (-272)	85 (-188)

El punto de ebullición del hidrógeno puede incrementarse hasta un máximo de  $-240$  °C a una presión de unos 13 barg, sin efectos benéficos a presiones mayores.

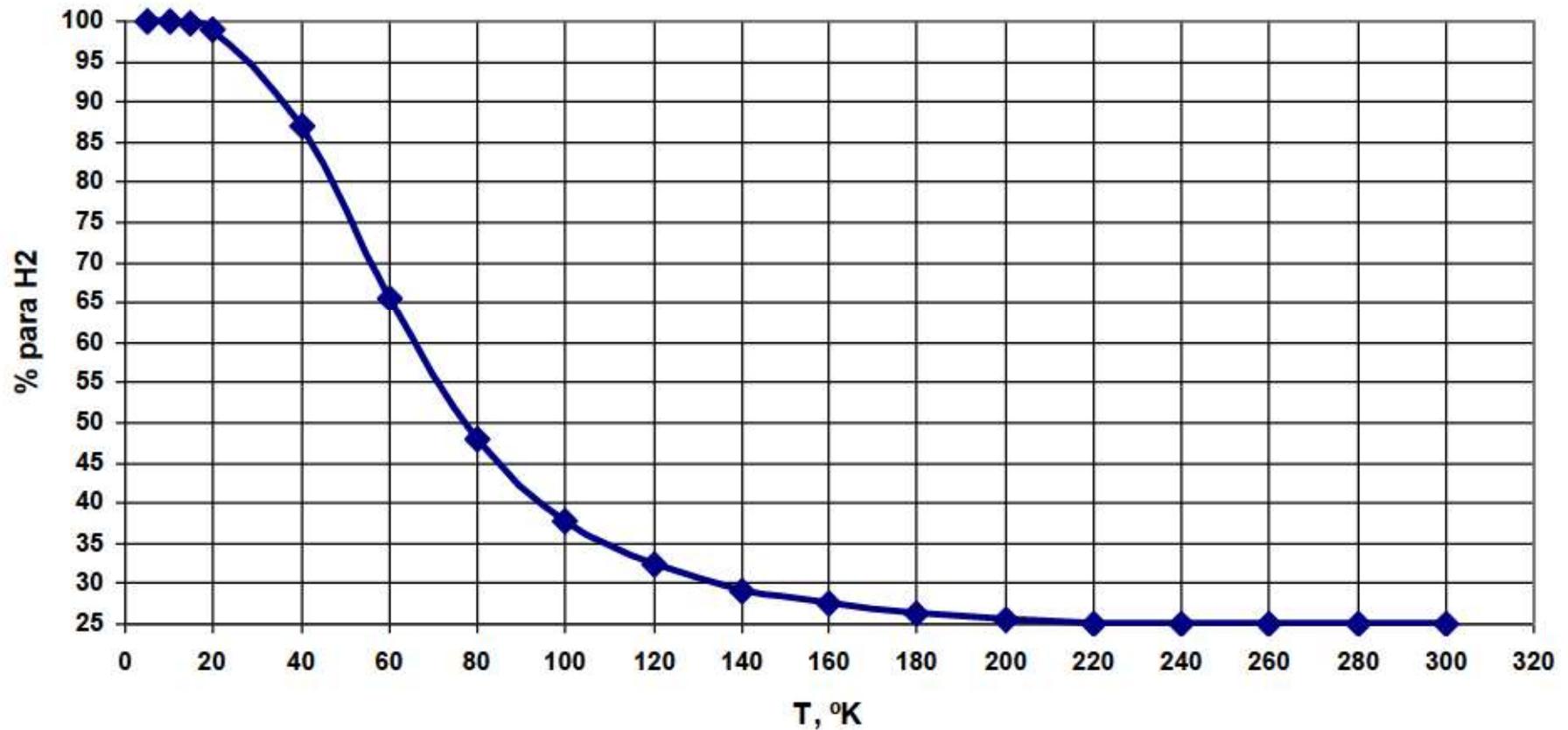
# ABUNDANCIA Y VARIEDAD



El hidrógeno gaseoso en condiciones ambientales es una mezcla que recibe el nombre de hidrógeno normal (Normal H<sub>2</sub>) y está compuesta de **75% de orto-hidrógeno** y **25% de para-hidrógeno**, siendo estas variedades de isómeros en las que el spin de los núcleos de los dos átomos que componen la molécula poseen la misma dirección (orto) o bien direcciones opuestas (para). Las propiedades químicas de estos isómeros son casi idénticas, mientras que sus propiedades físicas sólo difieren levemente.

# EQUILIBRIO - Orto/Para

Equilibrio o/p Hidrógeno



# VAPORIZACIÓN

La vaporización violenta del hidrógeno líquido ocasiona un aumento repentino de 850 veces en el volumen

<b>Substancia</b>	<b>Hidrógeno</b>
Densidad del Gas NTP 273 K [Kg/M <sup>3</sup> ]	0,089 90
Densidad del Líquido NBP 20 K [Kg/M <sup>3</sup> ]	70,97
Aumento de volumen NBP a NTP	850

El hidrógeno líquido es 14 veces menos denso que el agua y su coeficiente de expansión térmica es 23 veces mayor que el del agua a NPT.  
Por seguridad debe preverse espacio para la expansión (ullage)

## PROPIEDADES COMPARADAS

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

# EQUIVALENCIAS ENERGÉTICAS

<b>Tipo de Combustible</b>	<b>GGE (Kg)</b>	<b>Contenido energético (kWh/Kg)</b>
GNC	2,57	13,44
Hidrógeno	1,04	33,90
GNC + 15% H2	2,49	13,85
GNC + 30% H2	2,41	14,32
GNC + 50% H2	2,22	15,56

El valor del galón equivalente de nafta para el GNC está basado en la National Conference on Weights and measures.

# EQUIVALENCIAS ENERGÉTICAS

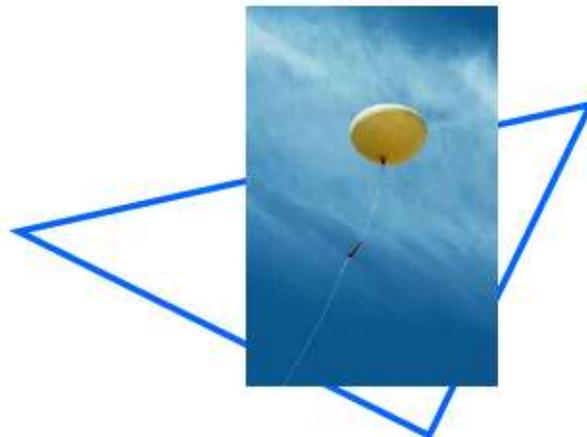
	Combustible	Energía Específica kWh/kg	Densidad Energética kWh/l
	Hidrógeno Liq (20 K)	33,33	2,359
	Hidrógeno Gas (150 Atm)	33,33	0,4490
<b>Gases CNPT</b>	<b>Hidrógeno</b>	<b>33,33</b>	<b>0,002993</b>
	Metano	11,39	0,009970
	Gas natural (82-93 % CH <sub>4</sub> )	10,6 - 13,1	0,0088 - 0,0104
	Etano	14,42	0,02024
	Propano	12,88	0,02589
	Butano	12,70	0,03439
	<b>Líquidos</b>	Nafta	≈ 12,0
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 H<sub>2</sub> Gas CNPT: 0,0898 g/l    1 kg ocupa 11,135 m<sup>3</sup>  
 Densidad H<sub>2</sub> Liq: 70,8 g/l    1 kg ocupa 14,12 litros  
 Densidad CH<sub>4</sub>, CNPT: 0,7167 g/l    1 kg ocupa 1,395 m<sup>3</sup>

**DENSIDAD ENERGÉTICA**

# PROPIEDADES Y PÉRDIDAS

<b>Tipo de Combustible</b>	<b>Hidrógeno</b>	<b>Metano</b>	<b>Propano</b>
Coef Dif. en aire [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ]	0,61	0,16	0,12
Viscosidad NPT [ $\mu\text{Pas}$ ]	8,9	11,7	80
Densidad a NPT [ $\text{Kg}/\text{M}^3$ ]	0,0838	0,6512	1,870
Cp/Cv a NPT	1,308	1,383	1,14



# MÁXIMA BRECHA DE SEGURIDAD

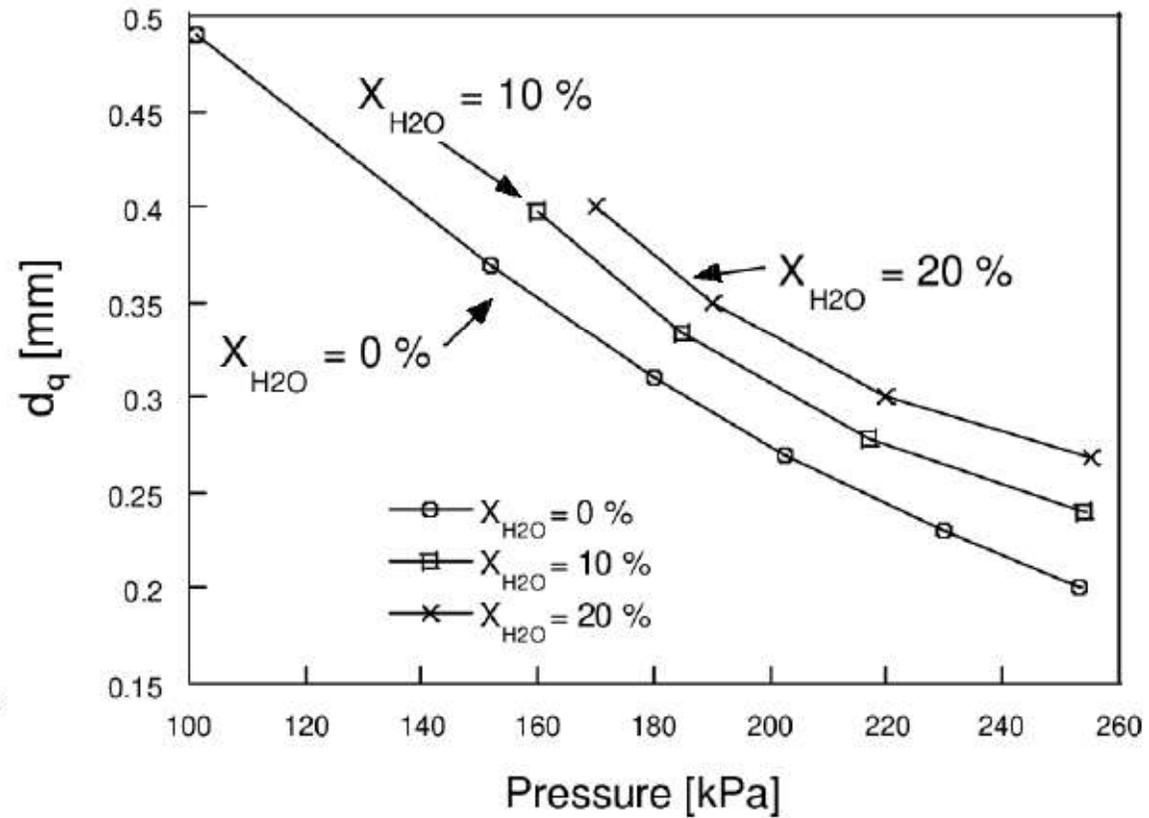
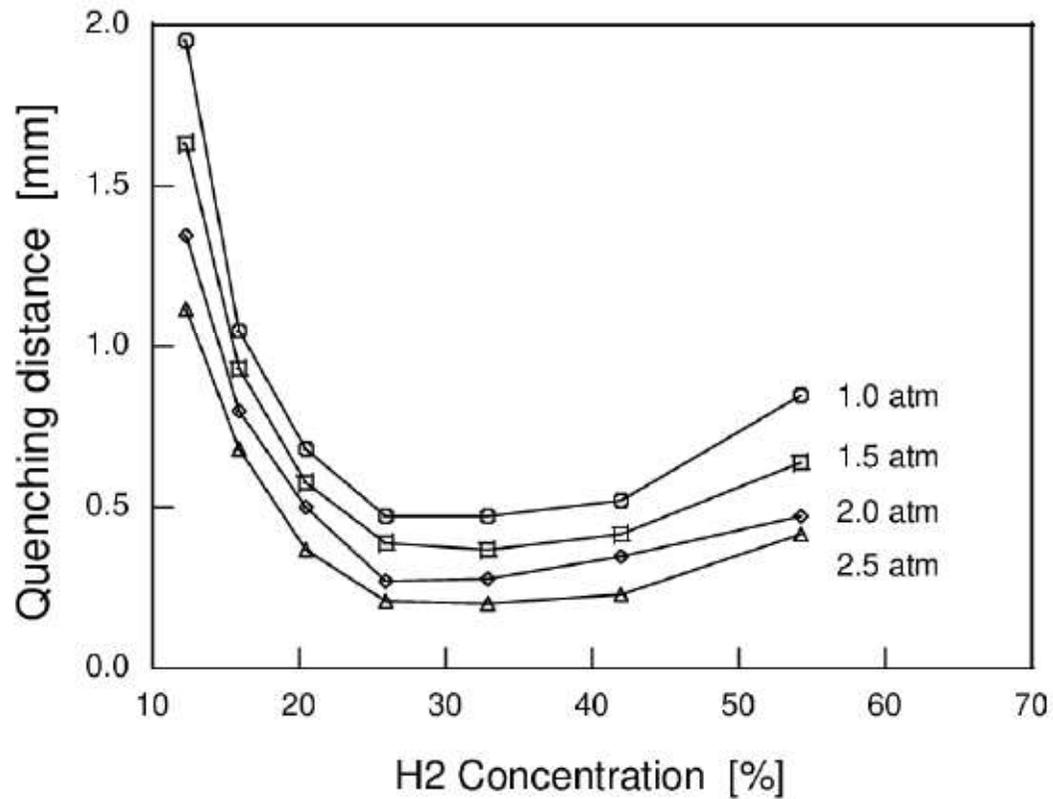
## QUENCHING GAP

El valor crítico depende de la composición del gas, de la temperatura, de la presión y de la geometría del pasaje. Dado que el valor de la brecha experimental máxima de seguridad para el hidrógeno es menor, se requerirán tolerancias más estrechas de modo que es más difícil construir un cierto equipo que contenga las llamas para el caso del hidrógeno que para los hidrocarburos en general (Backfire).

Tipo de Combustible	QG mm
H2	0,6
GNC	2
HGNC	1,3 – 1,8

# MÁXIMA BRECHA DE SEGURIDAD

## QUENCHING GAP



# FRAGILIZACIÓN - FPH

## EMBRITTELEMENT

Los materiales utilizados en recipientes y otros componentes pueden sufrir una significativa pérdida de su resistencia estructural cuando se exponen al hidrógeno

El punto de comienzo es siempre la formación de hidrógeno atómico fácilmente difundible

El daño por hidrógeno puede manifestarse a través de distintos mecanismos como: ampollado interno (blistering), fragilización y pérdida de ductilidad (embrittlement) o ataque por hidrógeno.

La forma de contrarrestar el efecto de la fragilización por H<sub>2</sub> es a través del correcto diseño y selección de materiales.

# FRAGILIZACIÓN - FPH

A través del fenómeno conocido como **fragilización por hidrógeno** ciertos materiales metálicos utilizados en recipientes u otros componentes pueden sufrir una pérdida significativa de su ductilidad cuando se exponen al hidrógeno.

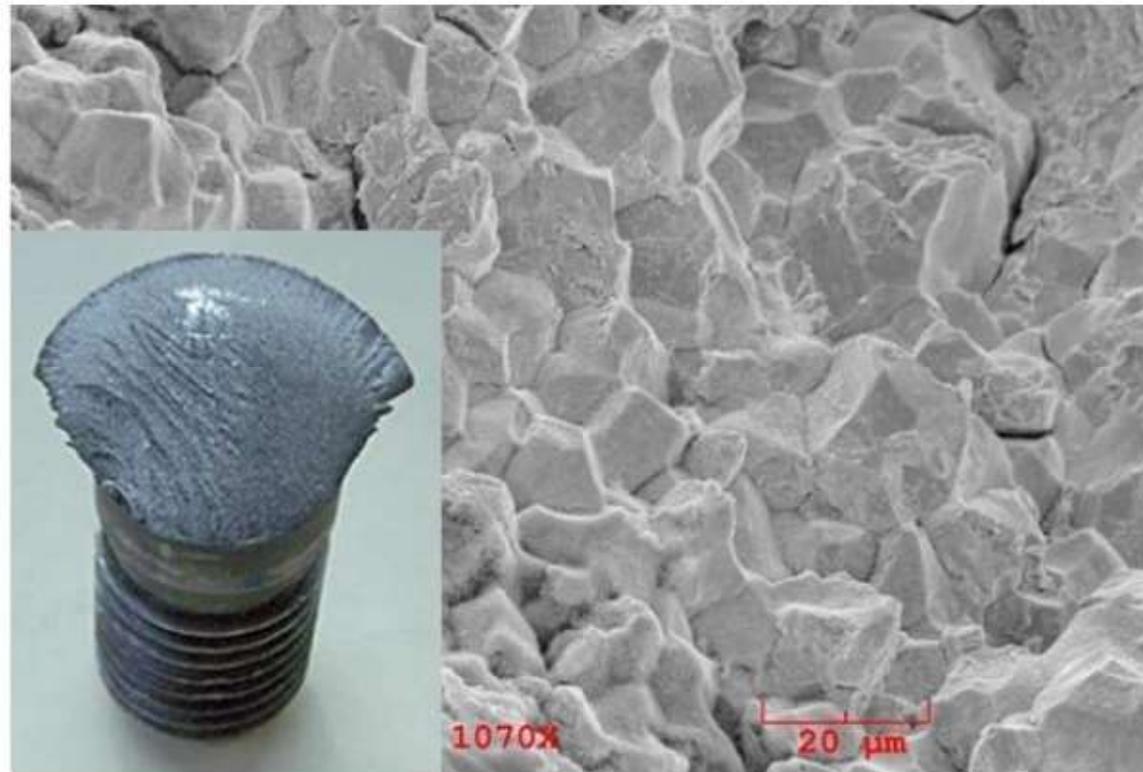
A nivel atómico, para que ocurra la fragilización, las moléculas de hidrógeno primero deben disociarse en átomos antes de que puedan difundirse en la estructura metálica.

A temperaturas cercanas a la temperatura ambiente, varios materiales metálicos son susceptibles a la fragilización por hidrógeno, particularmente aquellos con una estructura de red cristalina cúbica centrada en el cuerpo. Este es un problema particular con muchos aceros ferríticos si están sujetos a esfuerzos mecánicos. Frecuentemente se encuentra que los aceros de alta resistencia a la tracción son más susceptibles a la fragilización.

La degradación del material inducida por la fragilización puede provocar una falla catastrófica de las estructuras de contención.

**La fragilización por hidrógeno se contrarresta con un diseño y una selección de materiales adecuados**

# FRAGILIZACIÓN - FPH



Source: Herring Wire Forming Technology International/Fall 2010

# FRAGILIZACIÓN - FPH

## EMBRITTELEMENT

La elección de los materiales apropiados para trabajar en entornos de hidrógeno está influenciada por múltiples factores, algunos de los cuales son bastante complejos e interdependientes. Entre ellos, los siguientes:

**Condiciones del proceso**

**Temperatura**

**Presión parcial de hidrógeno**

**Enfoque de diseño**

**Contaminantes**

**Dureza**

**Estado de la superficie**

**Función del equipo**

**Criticidad**

**Grado de pureza**

**Presión**

**Microestructura**

**Geometría del equipo**

**O<sub>2</sub> y sus compuestos**

**Estado de tensiones**

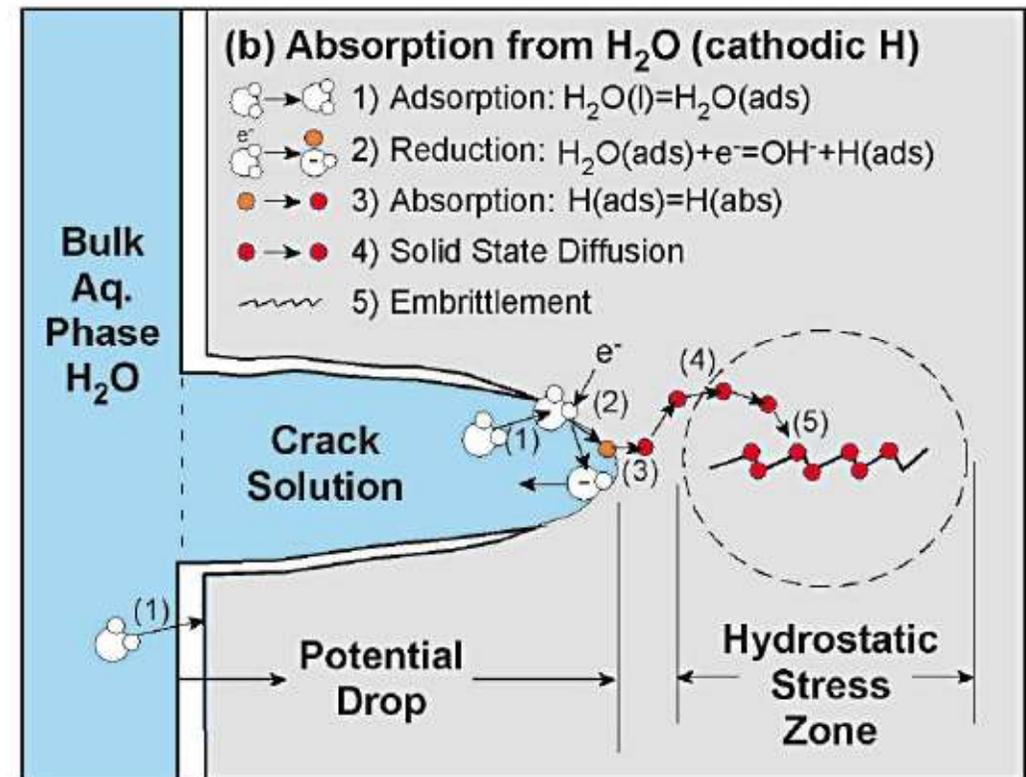
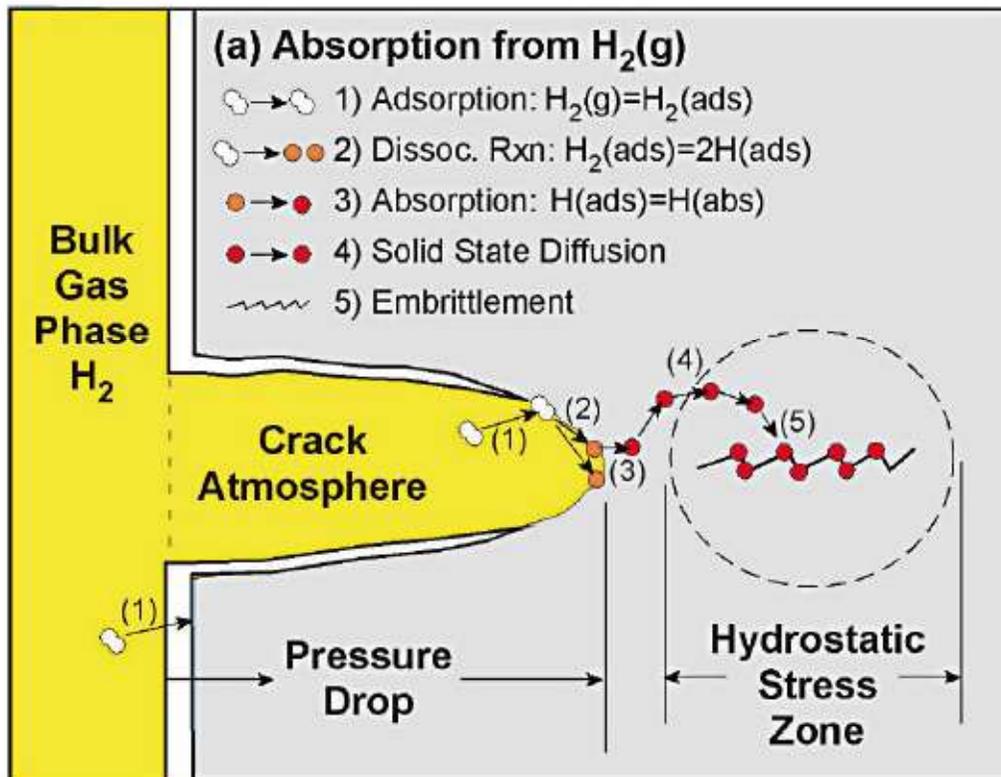
**Ciclos y Nro. de ciclos**

**Vida útil esperada**

**Tipo de servicio**

# FRAGILIZACIÓN - FPH

## EMBRITTELEMENT

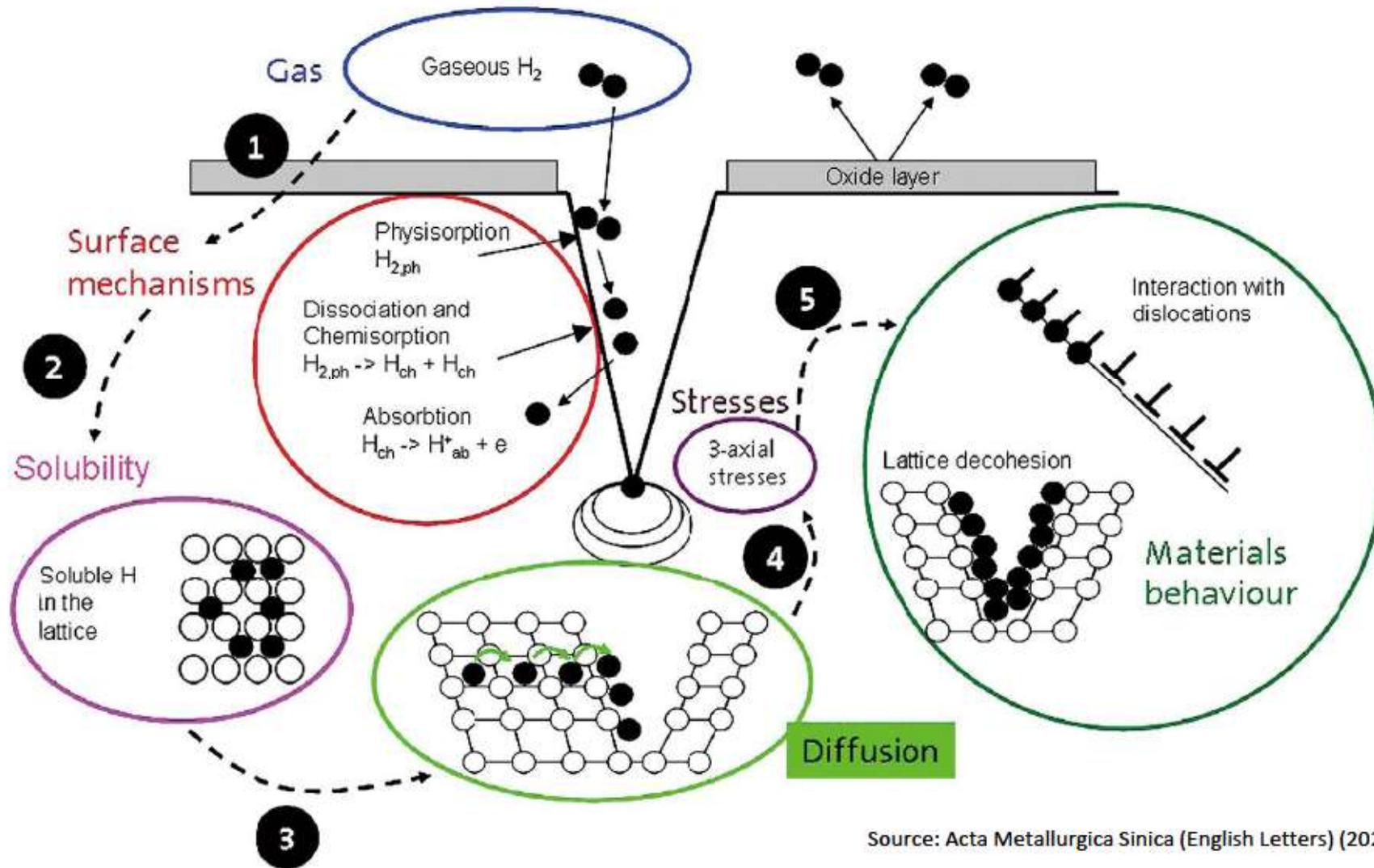


Source: Herring. Wire Forming Technology International/Fall 2010

## Mecanismos de FPH

# FRAGILIZACIÓN - FPH

## H2 EMBRITTLEMENT



Source: Acta Metallurgica Sinica (English Letters) (2020) 33

## Fases del mecanismo de FPH

# Susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno de materiales industriales

## **Extremely embrittled**

– 410 SS, AISI 1042, 17-7 PH SS, 4140, 440C, Inconel 718

## **Severely embrittled**

– Ti-6Al-4V, Ti-5Al-2.5Sn, AISI 1020, 430F, Ni 270, A515

## **Slightly embrittled**

– 304 ELC SS, 305 SS, Be-Cu Alloy 25, Ti

## **Negligibly embrittled**

– 310 SS, 316 SS, 1100 Al, 6061-T6 Al, 7075-T73 Al, OFHC Cu, A286

# ALGUNAS CONCLUSIONES



**El primer paso en el uso seguro del Hidrógeno es la identificación del producto, el conocimiento íntimo del elemento y de todas y cada una de sus propiedades.**

**Los valores de las propiedades pueden variar según las fuentes**

# 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**

## Empleo de cilindros

### IDENTIFICACIÓN

Los cilindros que contienen gases comprimidos deben ser perfectamente identificados.



**UN 1049**

**CAS 1333-74-0**

**HIDRÓGENO**  
**GAS INFLAMABLE**

**Cilindros**

**TUBOS**

**Las áreas de almacenaje de cilindros de hidrógeno deben estar separadas de las de otros gases, especialmente de los oxidantes**



**Areas de almacenaje**

Observar detalles



## Empleo de cilindros

### CONEXIONES DE VÁLVULAS UNIVERSALES para H2:

#### ROSCADO:

**0-3000 psig CGA 350**

**3001-5500 psig CGA 695**

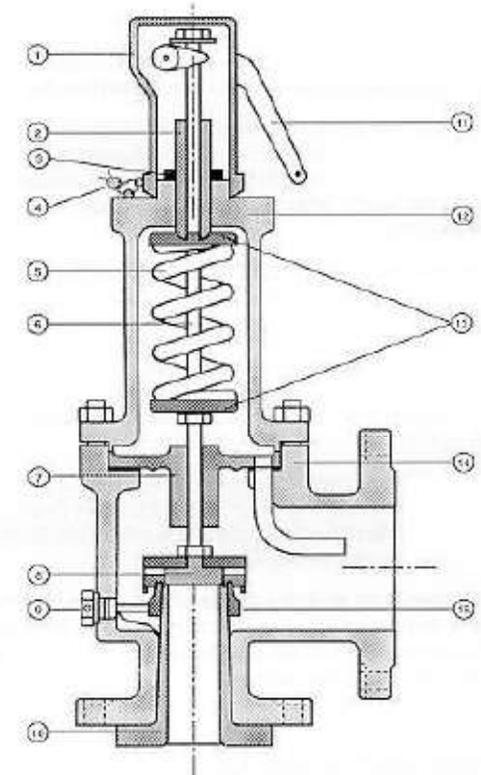
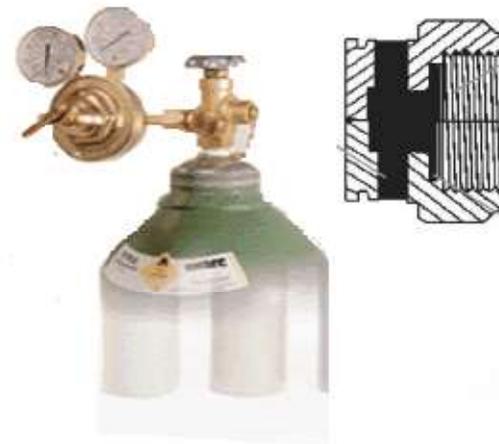
**5001-7500 psig CGA 703**

Conexiones equivalentes son:

**CGA 350 – BS 4 – DIN 1**

Si el número del medio es impar la conexión CGA es rosca izquierda y para ajustar se debe girar en sentido antihorario

**Usar SIEMPRE conexiones apropiadas  
NO USAR ADAPTADORES.**



- |                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| 1. Caperuza.                         | 9. Tornillo de fijación del anillo de ajuste. |
| 2. Tensor.                           | 10. Tobera de entrada.                        |
| 3. Contratuerca fijación regulación. | 11. Palanca de apertura manual.               |
| 4. Precinto.                         | 12. Cúpula o Arcada.                          |
| 5. Resorte.                          | 13. Placas resorte.                           |
| 6. Vástago.                          | 14. Cuerpo.                                   |
| 7. Tapa guía.                        | 15. Anillo de ajuste o regulación.            |
| 8. Disco de cierre u obturador.      |   |

**Typical Safety Valve**  
VÁLVULA DE SEGURIDAD

## Propiedades del Hidrógeno

## Valor y unidades

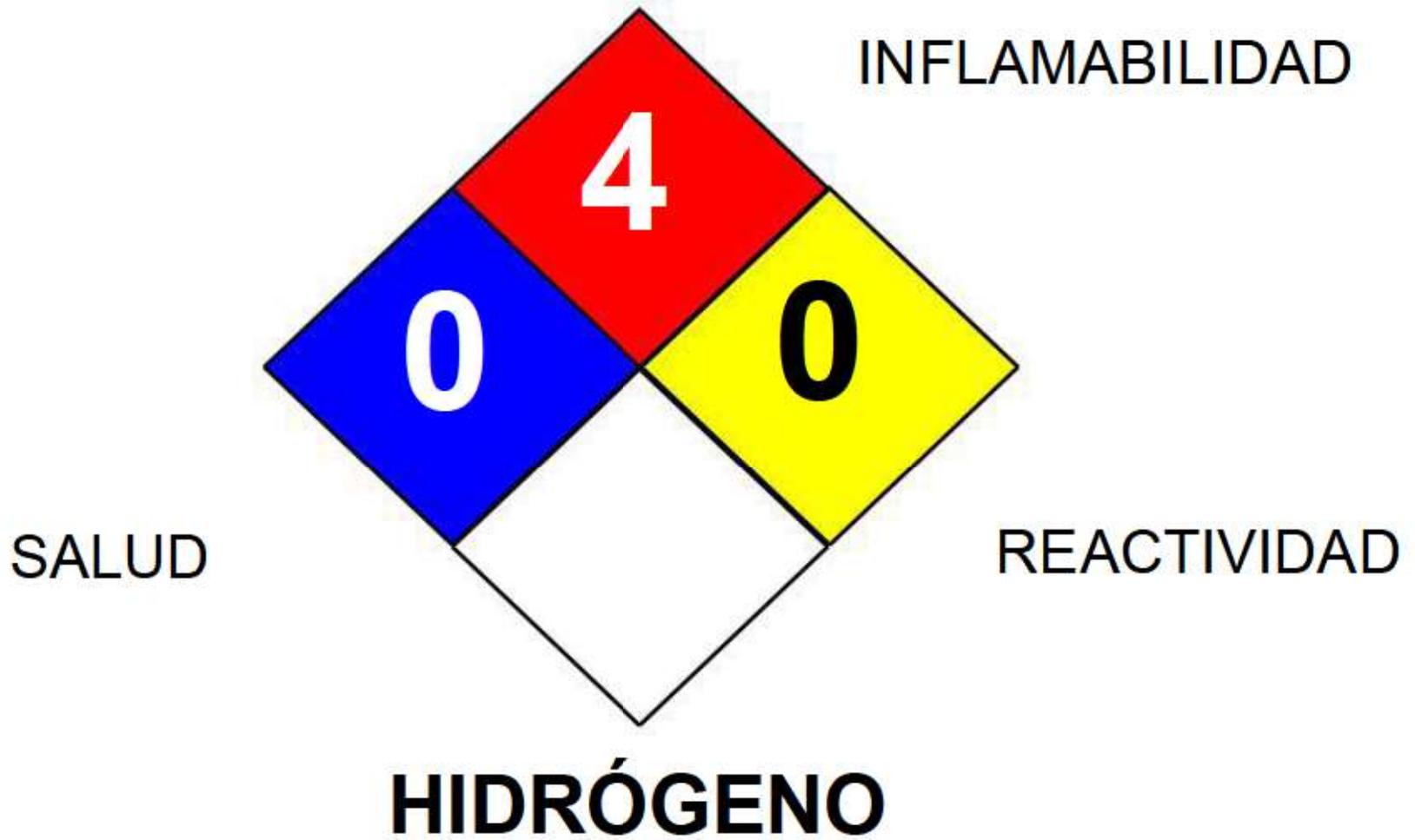


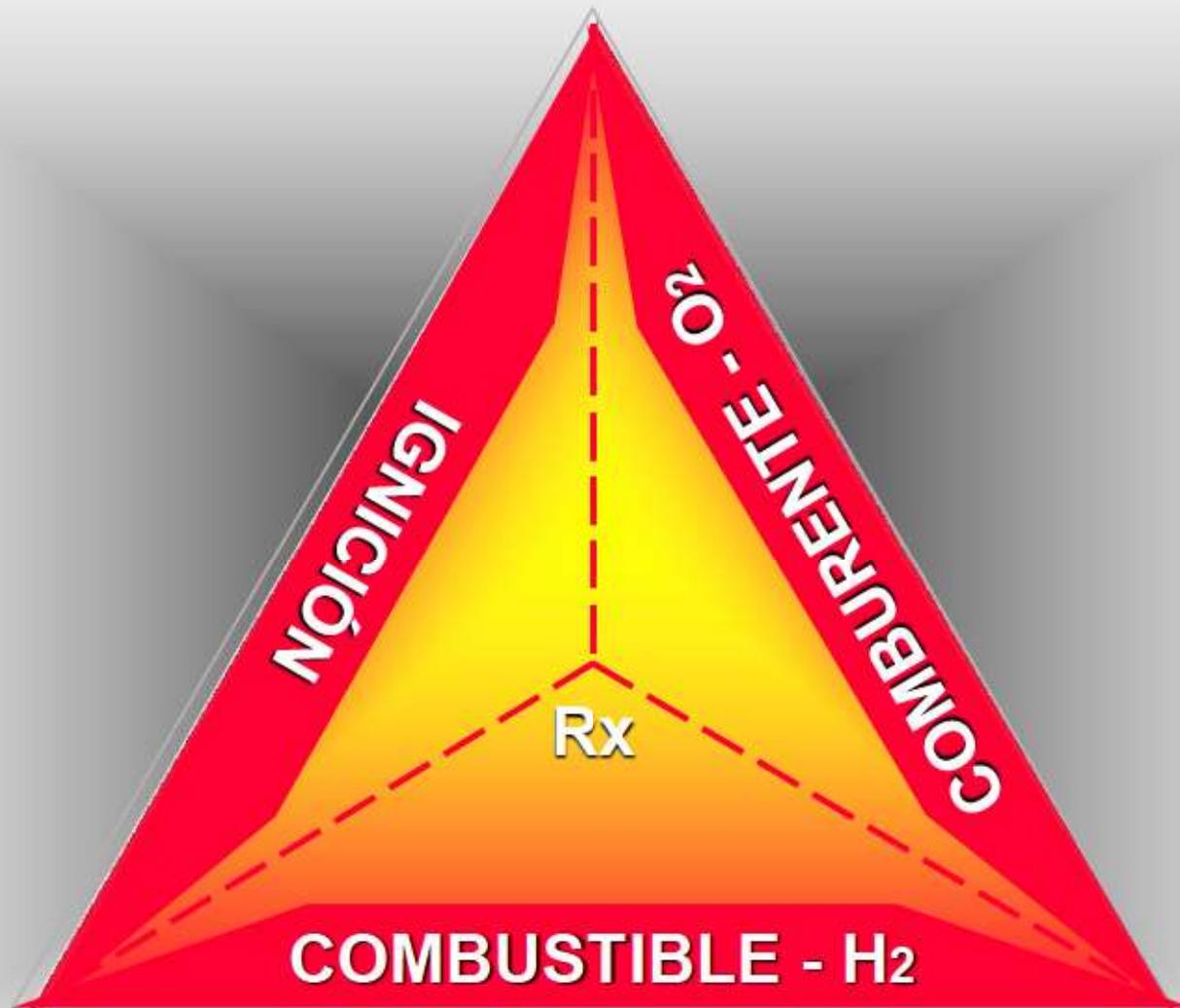
Número atómico	1
Peso atómico	1,0079
Peso Molecular	2,0158 g/mol
Presión Crítica	12,8 Atmósferas
Temperatura Crítica	- 239,91 °C
Punto de ebullición normal	-252,766 °C = 20,390 ° K ( a 0,1013 MPa)
Punto de fusión	-259,2 °C = 13,95 °K (a 0,1013 MPa)
Calor específico a presión constante	3,4 cal/ gr. a 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> <sub>1</sub> , Deuterio H <sup>2</sup> <sub>1</sub> , Tritio H <sup>3</sup> <sub>1</sub>
<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>



# Diamante NFPA

CLASIFICACIÓN DE RIESGOS		CÓDIGO NFPA / NORMA 704 National Fire Protection Association	
<b>PELIGRO PARA LA SALUD</b> 0 NORMAL. 1 POCO PELIGROSO. 2 PELIGROSO. 3 MUY PELIGROSO. 4 MORTAL.			<b>RIESGO DE INFLAMABILIDAD</b> 0 NO ARDE. 1 ARDE A MÁS DE 93° C 2 ARDE A MENOS DE 93° C 3 ARDE A MENOS DE 37° C 4 ARDE A MENOS DE 25° C
<b>PELIGRO ESPECÍFICO</b> ☹ INFLAMABLE. W NO USAR AGUA. ☠ TÓXICO. ☢ RADIATIVO. COR / ☹ CORROSIVO. OX / ☹ OXIDANTE. ACID ÁCIDO. ALK ALCALINO.			<b>RIESGO POR REACTIVIDAD</b> 0 ESTABLE. 1 INESTABLE AL CALENTAMIENTO. 2 CAMBIO QUÍMICO VIOLENTO. 3 PUEDE EXPLOTAR POR CHOQUE O CALENTAMIENTO. 4 PUEDE EXPLOTAR.
Las cuatro divisiones con colores indican un determinado riesgo. El azul hace referencia a los riesgos para la salud, el rojo indica el peligro de inflamabilidad, el amarillo los riesgos por reactividad (la inestabilidad del producto). El grado de riesgo se clasifica con un número de 0 (sin peligro) a 4 (peligro máximo). La sección blanca referencia al peligro específico, con un pictograma que indica si son oxidantes, corrosivos, reactivos con agua, radioactivos, tóxicos, etc.			





Tetraedro del Fuego

## Llamas del quemado de hidrocarburos



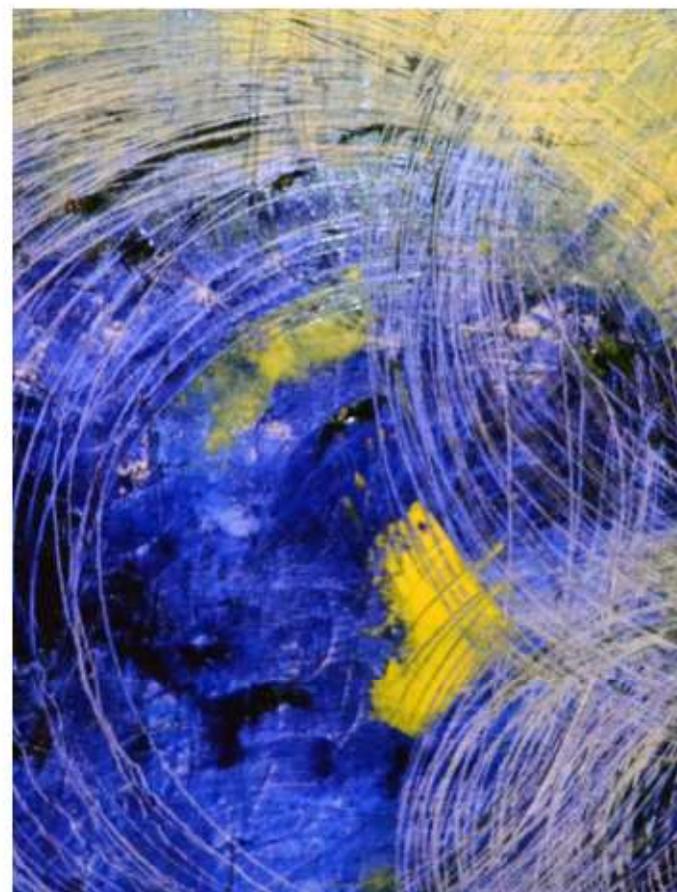


**El hidrógeno arde con una llama casi invisible, a menos que se contamine con impurezas**

# LLAMAS

- Las **llamas de hidrógeno** son invisibles a la luz del día, por ello los operadores deben estar advertidos al respecto. Dependiendo del tipo de instalaciones, pueden aplicarse variadas técnicas en la búsqueda de llamas durante una operación: oscurecimiento (blacking out), examinación visual nocturna (night vision), dispositivos UV-infrarojo o el método broom.

# CONCLUSIONES



**El conocimiento de las propiedades del hidrógeno asociadas a la seguridad es el punto de partida para la producción y el uso seguro del producto**

**El Hidrógeno es un gas inflamable - UN 1049**

**Propiedades del Hidrógeno****Valor y unidades**

1

**H**

HIDRÓGENO

**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

**Coefficiente de difusión**0,61 cm<sup>2</sup>/s**Temperatura de Autoignición**

585 °C (Otras fuentes: 520 °C)

**Límites de inflamabilidad en aire**

4 – 75,6 % en Volumen

**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><sub>1</sub>, Deuterio H<sup>2</sup><sub>1</sub>, Tritio H<sup>3</sup><sub>1</sub>**Densidad del gas (GH)**0,08987 kg/ Nm<sup>3</sup> ( 0 °C y 1 Atmósfera)**Densidad del líquido (LH<sub>2</sub>)**70,973 kg/m<sup>3</sup> (-252 °C)**Densidad relativa del GH (aire=1)**

0,0695

**HIDRÓGENO CAS 1333-74-0**

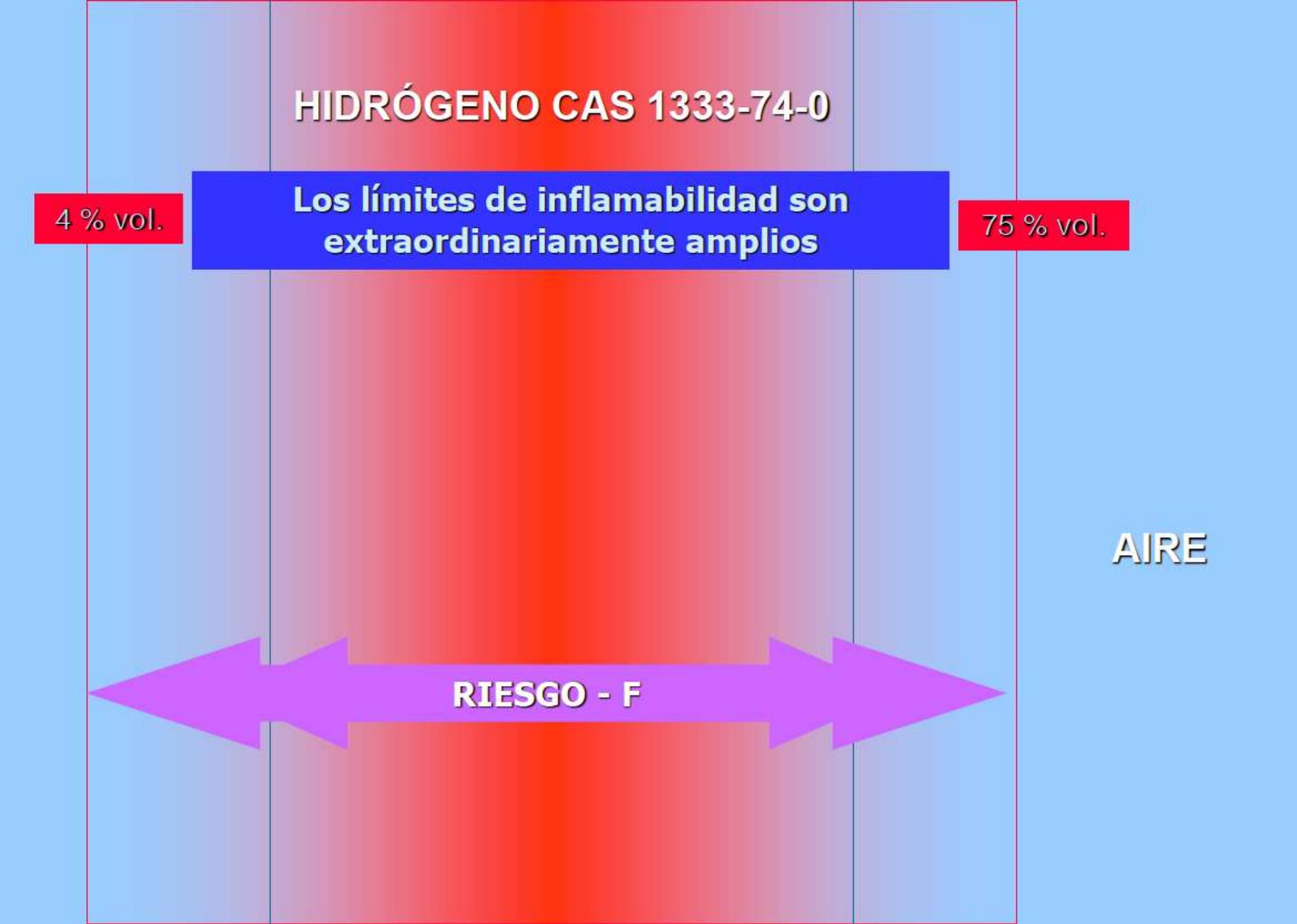
**4 % vol.**

**Los límites de inflamabilidad son  
extraordinariamente amplios**

**75 % vol.**

**AIRE**

**RIESGO - F**



# HIDRÓGENO CAS 1333-74-0

4 % vol.

**Los límites de inflamabilidad son extraordinariamente amplios**

75 % vol.

AIRE

1,5 % vol.

**A 500 °C las mezclas H<sub>2</sub> - aire son inflamables en todo el rango**

95 % vol.



# HIDRÓGENO CAS 1333-74-0

4 % vol.

Los límites de inflamabilidad son extraordinariamente amplios

75 % vol.

18 % vol.

**RIESGO - D**

59 % vol.

Los límites de detonación son muy amplios

AIRE

**RIESGO - F**

1,5 % vol.

A 500 °C las mezclas H<sub>2</sub> - aire son inflamables en todo el rango

95 % vol.

# HIDRÓGENO CAS 1333-74-0

4 % vol.

Los límites de inflamabilidad son extraordinariamente amplios

75 % vol.

18 % vol.

**RIESGO - D**

59 % vol.

11 %

RIESGO - D (Tieszen - Alcock Et Al)

70%

Los límites de detonación son muy amplios

AIRE

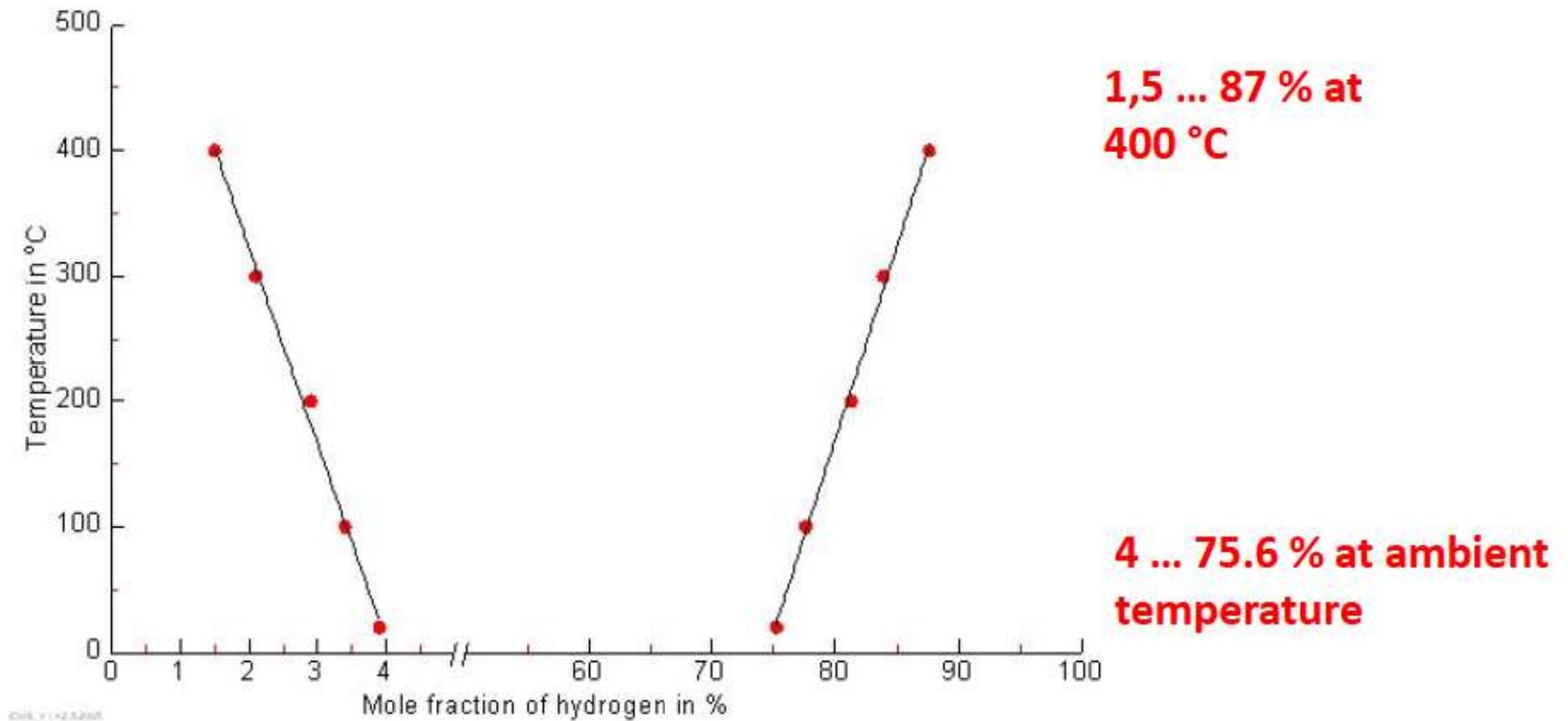
**RIESGO - F**

1,5 % vol.

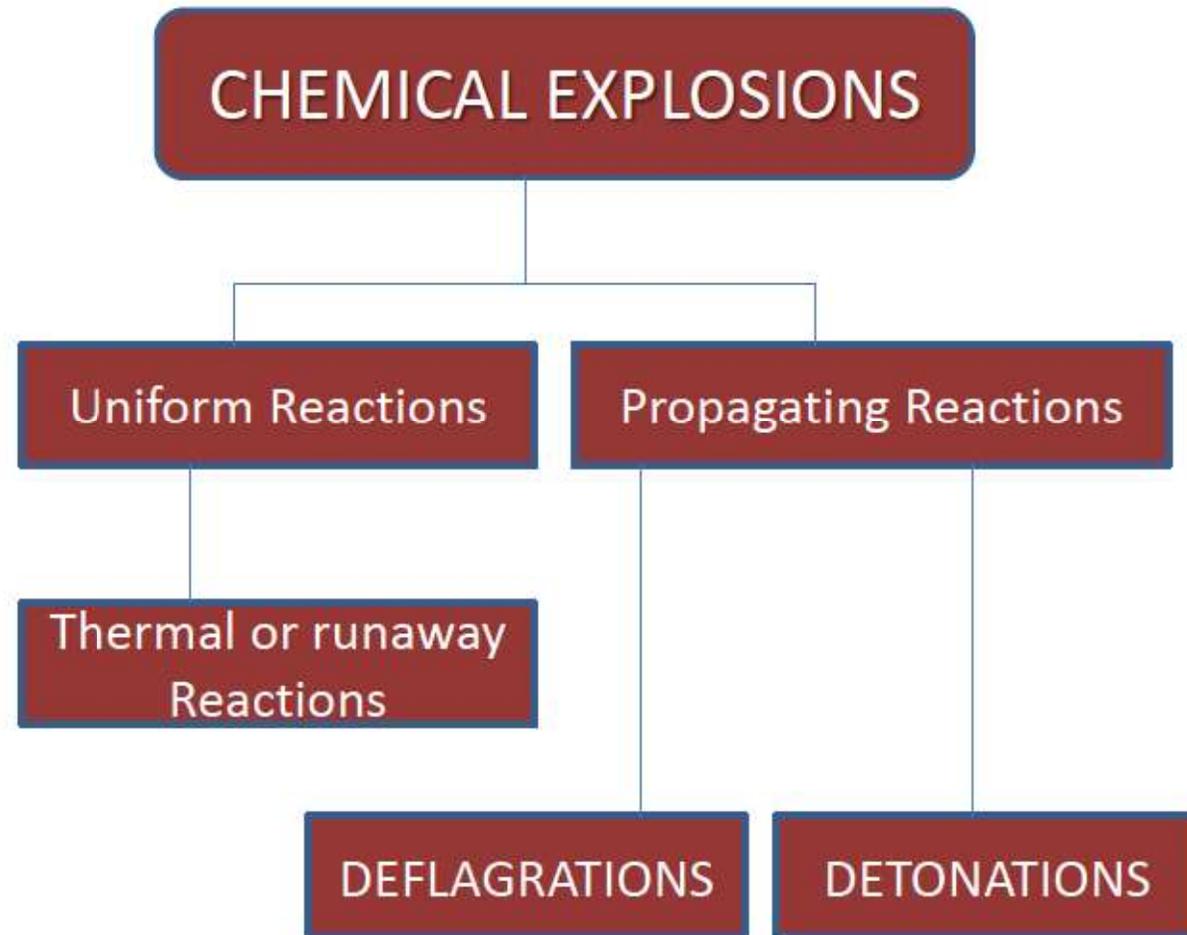
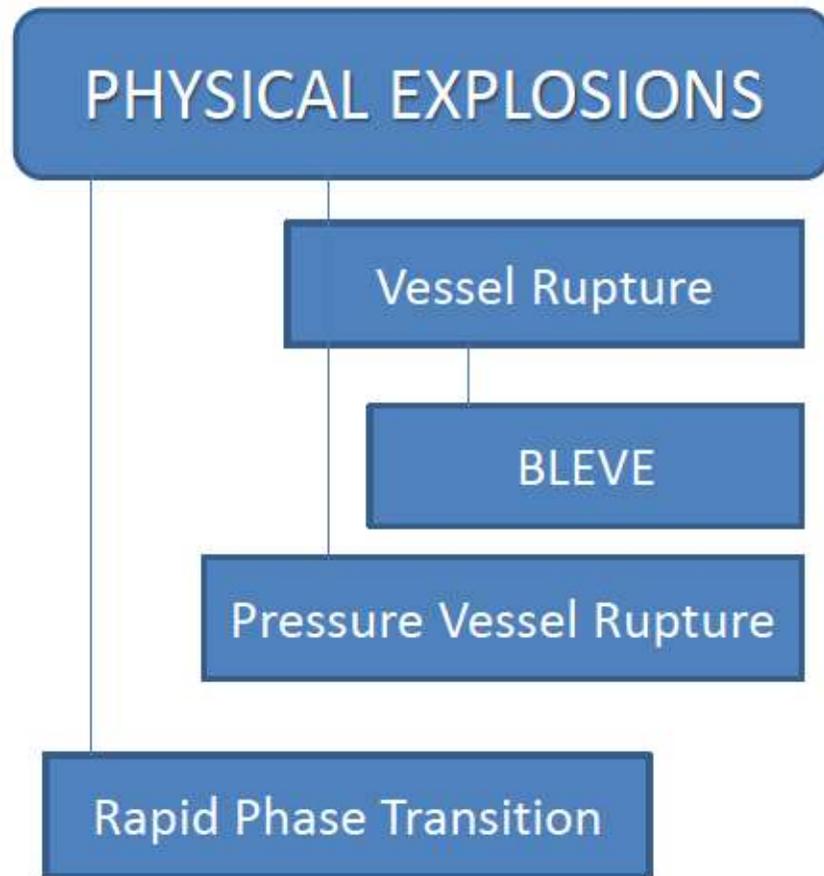
A 500 °C las mezclas H<sub>2</sub> - aire son inflamables en todo el rango

95 % vol.

# INFLAMABILIDAD - f (T)



# Classification of explosions



# 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**

# FORMAS DE INCENDIOS

## BOLAS DE FUEGO, CHORROS, PISCINAS E INCENDIOS REPENTINOS

- **FIRE BALL** Una bola de fuego resulta de la quema de una nube de aire y combustible.
- **JET FIRE** Los incendios tipo jet resultan de la combustión de un combustible liberado de un sistema presurizado o de un recipiente de almacenamiento.
- **POOL FIRE** Los incendios en piscinas son el resultado de la quema superficial de materiales inflamables o líquidos combustibles
- **FLASH FIRE** Un incendio repentino es la combustión no explosiva de una nube de vapor resultante de la liberación de material inflamable o de combustible al aire libre.

# FUENTES DE IGNICIÓN

- ✓ **Chispas eléctricas (cargas estáticas, cortocircuitos, disparo de fusibles, contactores)**
- ✓ **Compresión adiabática (aumento de presión)**
- ✓ **Chispas mecánicas (rechinar, impacto)**
- ✓ **Radiación ionizante (radiactividad)**
- ✓ **Radiación electromagnética**
- ✓ **Radiación ultrasónica**
- ✓ **Luz (láser/flash)**
- ✓ **Reacciones químicas**
- ✓ **Partículas metálicas**
- ✓ **Superficies calientes**
- ✓ **Explosivos**
- ✓ **Llamas**

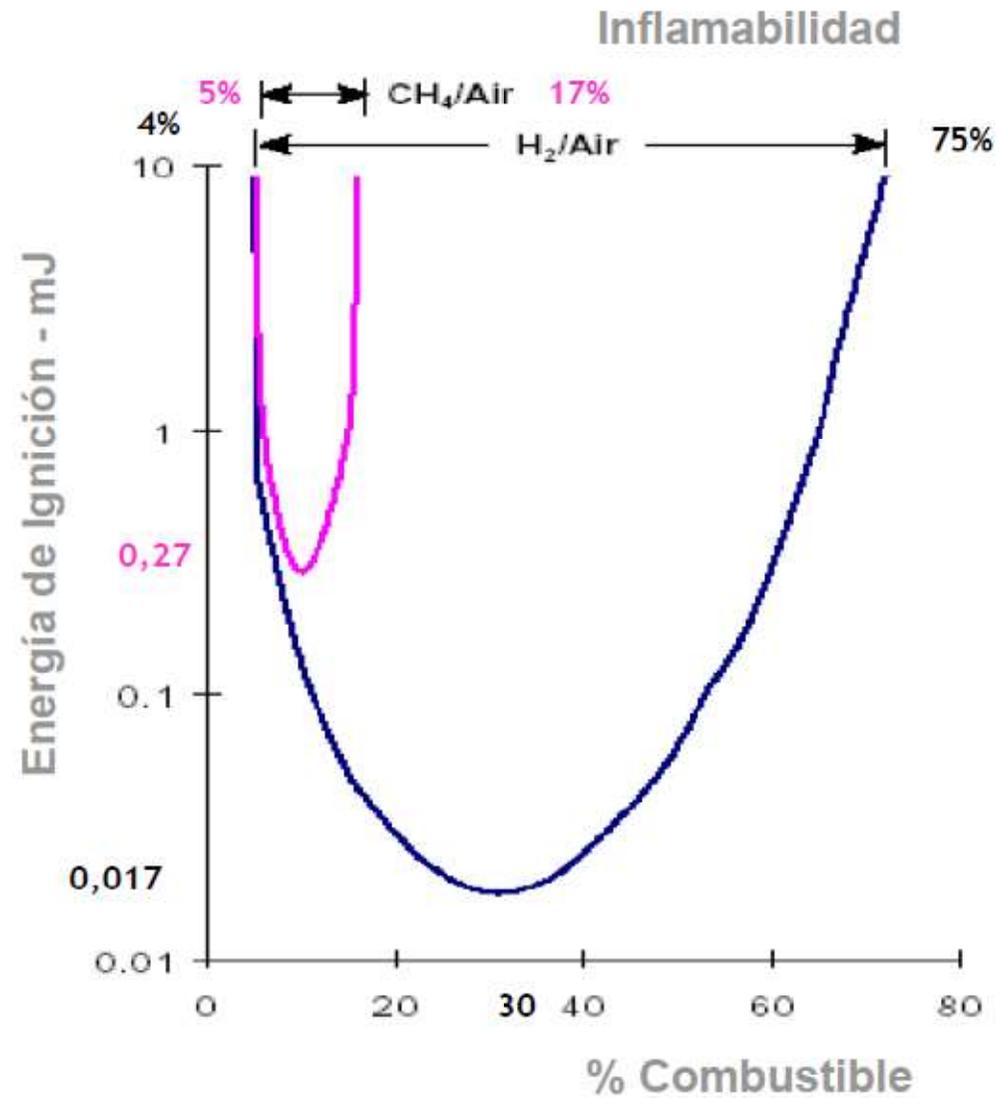
# DETONACIÓN

<b>Tipo de Combustible</b>	<b>Hidrógeno</b>	<b>Metano</b>	<b>Propano</b>	<b>Nafta</b>
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

# Propiedades Fisicoquímicas

<b>Propiedad</b>	<b>GNC</b>	<b>Hidrógeno</b>	<b>Nafta</b>
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.

# RIESGO COMPARADO



# Diffusion Coefficients of Common Gases

	Gas pair		$D_0$ , cm <sup>2</sup> /sec	0 °C – 760 mm Hg
Carbon monoxide . . . . .	CO	in O <sub>2</sub> *	0.185	<p>Compare thermal diffusivity and kinematic viscosity of air at 0°C, 760 mm Hg,</p> $\alpha = 0.187$ $\nu = 0.133$ } cm <sup>2</sup> /sec
Oxygen . . . . .	O <sub>2</sub>	in N <sub>2</sub> *	0.181	
Oxygen . . . . .	O <sub>2</sub>	in air*	0.178	
Carbon dioxide . . . . .	CO <sub>2</sub>	" "	0.138	
Hydrogen . . . . .	H <sub>2</sub>	" "	0.611	
Water . . . . .	H <sub>2</sub> O	" " *	0.220	
Methane . . . . .	CH <sub>4</sub>	" "	0.196	
Ethane . . . . .	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	" "	0.108	
Propane . . . . .	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	" "	0.0878	
Butane . . . . .	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	" "	0.0750	
Pentane . . . . .	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	" "	0.0671	
n-Octane . . . . .	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	" "	0.0505	
Benzene . . . . .	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	" "	0.077	
Toluene . . . . .	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	" "	0.051	
Naphthalene . . . . .	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	" "	0.0513	
Anthracene . . . . .	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	" "	0.0421	
Methyl alcohol . . . . .	CH <sub>3</sub> OH	" "	0.1325	
Ethyl alcohol . . . . .	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	" "	0.102	

Effect of pressure and temperature:

$$D = D_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^m \cdot \frac{p_0}{p}$$

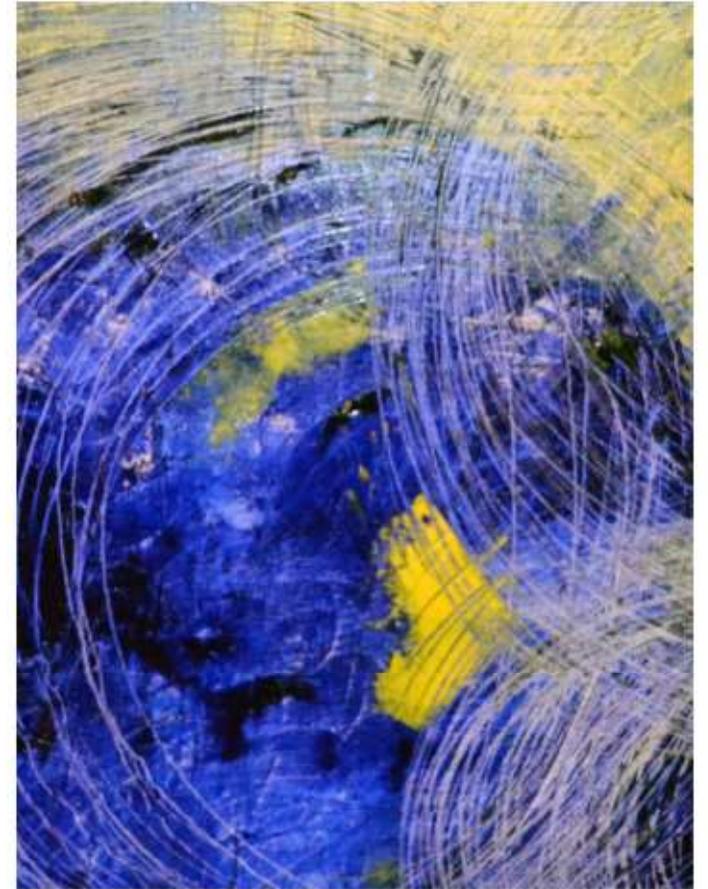
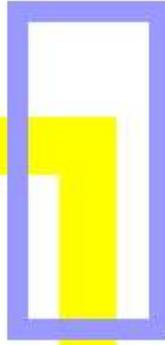
where  $m = 1.75$  for gas pairs marked with an asterisk;  $m = 2.0$  for other gas pairs;  $D$ ,  $T$  and  $p$  are diffusion coefficient, absolute temperature, and pressure; suffix 0 refers to S.T.P.

\* From *Int. Crit. Tab.* (1929) Vol. V, p. 62 and by permission from *Absorption and Extraction* by Sherwood and Pigford. Copyright 1952. McGraw-Hill Book Co. Inc.



**Prohibido Fumar en laboratorios, plantas industriales o demostrativas, estaciones de carga o en cualquier instalación donde se almacene o use hidrógeno o sus mezclas**

# ALGUNAS CONCLUSIONES



**El hidrógeno es un gas fácilmente inflamable, más liviano que el aire, difunde rápidamente y arde con llama invisible. Si se le permite acumular puede formar mezclas explosivas**

**Se deben considerar los riesgos y sus probabilidades**

# Sensores de hidrógeno

Para detección en ambientes de trabajo industriales o experimentales para la producción, el almacenaje y el uso de hidrógeno se pueden emplear distintos tipos de sensores:

- 01 Sensores Catalíticos
- 02 Sensores de Conductividad Térmica
- 03 Sensores Electroquímicos
- 04 Sensores basados en Resistencia
- 05 Sensores basados en Función de trabajo
- 06 Sensores Mecánicos
- 07 Sensores Ópticos
- 08 Sensores Acústicos



# Requerimientos

## Sensores de hidrógeno

1. **Rango de indicación 0,01 - 10 % hidrógeno (seguridad) ó 1 - 100 % Fuel cells**
2. **Rendimiento seguro, es decir, diseño de sensor a prueba de explosiones y carcasa protectora**
3. **Respuesta confiable, precisión suficiente, sensibilidad (incertidumbre 5 - 10 % de la señal)**
4. **Señal estable con bajo nivel de ruido**
5. **Robustez que incluye baja sensibilidad a parámetros ambientales como:**
  - (5a) temperatura (-30 a 80 °C (seguridad), -70 a 150 °C (pilas de combustible) - (5b) presión (80 a 110 kPa) - (5c) humedad relativa (10 a 98 %, condensación) - (5d) independencia del caudal de gas - (5f) robustez mecánica
6. **Respuesta rápida y tiempo de recuperación (< 1 s)**
7. **Baja sensibilidad cruzada (por ejemplo, hidrocarburos, CO, H<sub>2</sub>S)**
8. **Larga vida útil (> 5 años)**
9. **Bajo consumo de energía (< 100 mW)**
10. **Bajo costo (<100 USD por sistema)**
11. **Tamaño pequeño**
12. **Operación y mantenimiento simples con intervalo de servicio prolongado**
13. **Validado y certificable según estándares internacionales**
14. **Integración e interfaz de sistema simple**

# Performance

## Hydrogen Sensors

Comparison of performance specifications of commercially available sensors

Sensor type	Principle/Device	Performance*			Power mV consumption	Gas environment	Lifetime years
		Measuring range Vol%	Accuracy % of indication	Response time (t90)/s			
Catalytic	Pellistor	Up to 4	< ± 5	< 30	1000	-20 +70 °C 5 - 95% RH 70 - 130 kPa	5
Thermal conductivity	Calorimetric	1-100	± 0.2	< 10	< 500	0 + 50 °C 0 - 95% RH 80-120 kPa	5
Electrochemical	Amperometric	Up to 4	≤ ± 4	< 90	2,7	-20 +55 °C 5 - 95% RH 80-110 kPa	2
Resistance based	Semiconducting metal oxide	Up to 2	± 10 - 30	< 20	< 800	-20 +70 °C 10 - 95% RH 80-120 kPa	> 2
	Metallic resistor	0,1-100	≤ ± 5	< 15	> 25	0 + 45 °C 0 - 95% RH Up to 700 kPa	< 10
Work function based	Capacitor	Up to 5	< ± 7	< 60	4000	-20 +40 °C 0 - 95% RH 80-120 kPa	10
	MOS field effect transistor	Up to 4,4	< ± 7	< 2	700	-40 + 110 °C 5 - 95% RH 70-130 kPa	10
Optical	Optrode	0,1-100	± 0.1	< 60	1000	- 15 + 50 °C 0 - 95% RH 75-175 kPa	> 2

Lifetime depends significant on gas concentration and environment. Sensor types that have been omitted are not commercially available to the author-knowledge.

\* Based on typical data collected from datasheets provided by sensor supplier.

T. Hübert et al. / Sensors and Actuators B 157 (2011) 329– 352

# Características

## Sensores de hidrógeno

- **01 Sensores Catalíticos.**

1

**PELLISTOR** Los sensores constan de dos bobinas de platino, cada una de ellas incrustada en un "pellet" de cerámica (ejemplo, alúmina porosa). Las bobinas de platino cumplen dos funciones; actúan como un calentador además de ser un termómetro de resistencia. La superficie de una de las perlas se activa con catalizador de platino o paladio. La otra perla inactiva no tiene catalizador en su superficie y actúa como elemento compensador.

Las perlas se montan en un circuito de puente de Wheatstone para facilitar la comparación de las resistencias de las bobinas. Durante el funcionamiento, la corriente eléctrica pasa a través de las bobinas de platino, lo que hace que se calienten a más de 300 °C. A estas altas temperaturas, las moléculas de hidrógeno quimisorbidas en la superficie del catalizador de Pt se oxidan con el oxígeno adsorbido para formar agua. La reacción exotérmica eleva la temperatura de la perla activada y da un cambio en la resistencia eléctrica de la bobina. Esto crea un desequilibrio en el puente de Wheatstone dando la señal del sensor. La principal desventaja es que no son selectivos y reaccionan con cualquier fuel.

**Se utilizan generalmente en el rango de 1 a 4 % de H<sub>2</sub> (±1% del VM). Los tiempos de respuesta son menores a los 8 segundos para el rango.**

# Características

## Sensores de hidrógeno

- **01 Sensores Catalíticos.**

### TERMOELÉCTRICOS

1

Los sensores catalíticos termoelectricos también generan una señal eléctrica basada en la reacción de oxidación exotérmica catalizada del hidrógeno, pero utilizan el efecto termoelectrico para generar la señal. El efecto termoelectrico, o más concretamente el efecto Seebeck, surge cuando existe una diferencia de temperatura entre dos puntos de un material conductor o semiconductor que se traduce en una diferencia de tensión entre dichos puntos.

En un sensor termoelectrico de hidrógeno, el aumento de temperatura en la parte activa del sensor se debe a la oxidación del hidrógeno y el voltaje termoelectrico inducido se correlaciona con la concentración de hidrógeno. La señal del sensor, depende de la cantidad de hidrógeno oxidado.

Ciertos sensores de hidrógeno termoelectrico micro mecanizados para su aplicación en estaciones de servicio de hidrógeno (HRS) muestran una respuesta lineal en un **rango de concentración de hidrógeno en el aire de 10 ppm a 4 %** con un tiempo de respuesta promedio medido menor a 2,5 s.

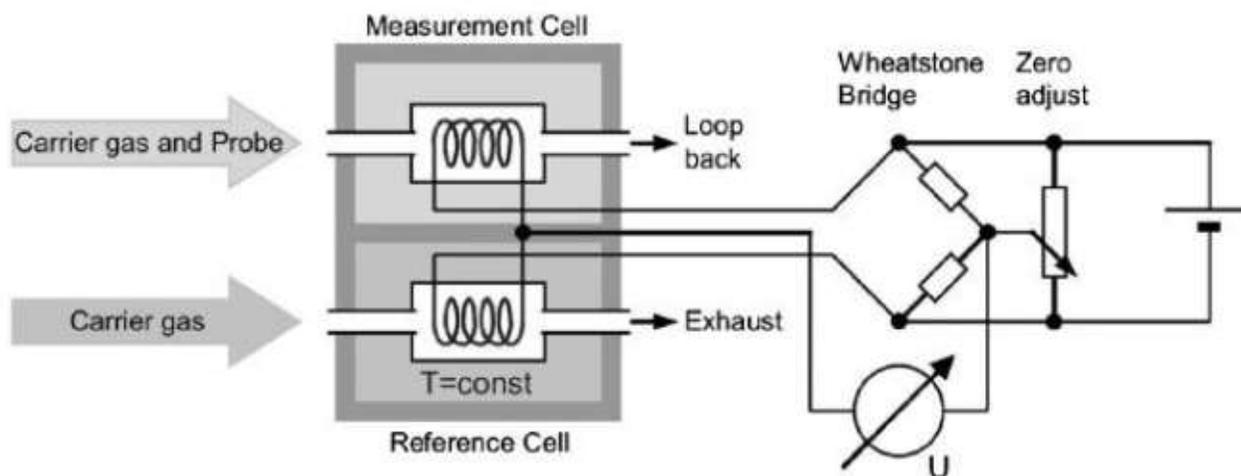
# Características

## Sensores de hidrógeno

- 02 Sensores de Conductividad.

# 2

**CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.** El principio de funcionamiento se basa en la pérdida de calor medida de un cuerpo caliente al gas circundante. Hay dos variantes de esta tecnología. El primero, o sensor similar a un pellistor, consta de dos perlas de resistencia inertes, cada una con una termorresistencia incrustada, de hecho similar a la perla compensadora en un pellistor catalítico. La resistencia de detección se expone al gas que se mide, mientras que la resistencia de referencia se sella en una cámara que contiene un gas de referencia (aire). Por lo general, las dos perlas están conectadas en un circuito de puente de Wheatstone. **Permiten medir en el rango de 1 a 100 % de H<sub>2</sub> aún en ausencia de oxígeno.**



# Características

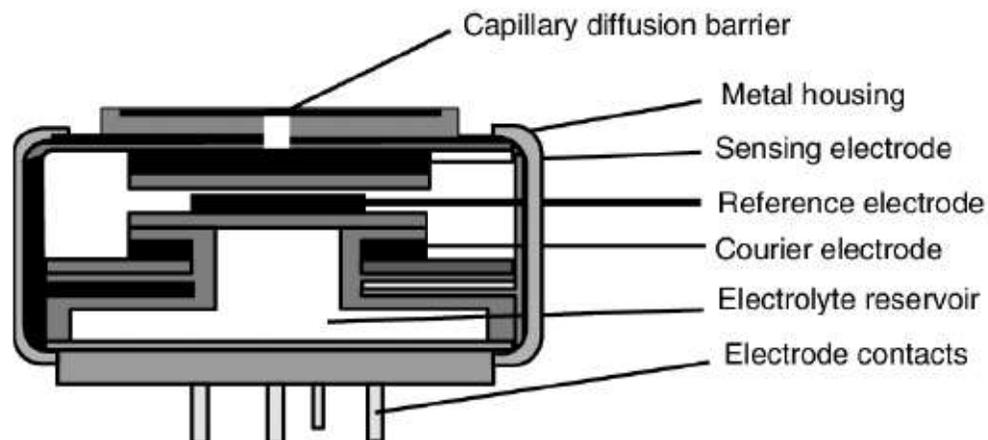
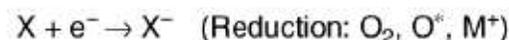
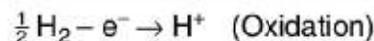
## Sensores de hidrógeno

- 03 Sensores electroquímicos.

# 3

**ELECTROQUÍMICOS.** Se componen de un ánodo y de un cátodo que intercalan un electrólito químicamente sensible. Cuando el hidrógeno pasa por el electrólito, ocurre una reacción química reversible, que genera una corriente proporcional a la concentración del gas.

Para asegurar reversibilidad química se requiere del oxígeno, lo que implica que **el sensor no es ambientalmente independiente**. Se utilizan para H<sub>2</sub> en el **rango de 100 a 1000 ppm**. Tiempo de reacción de 30 a 50 s a escala completa.



# Características

## Sensores de hidrógeno

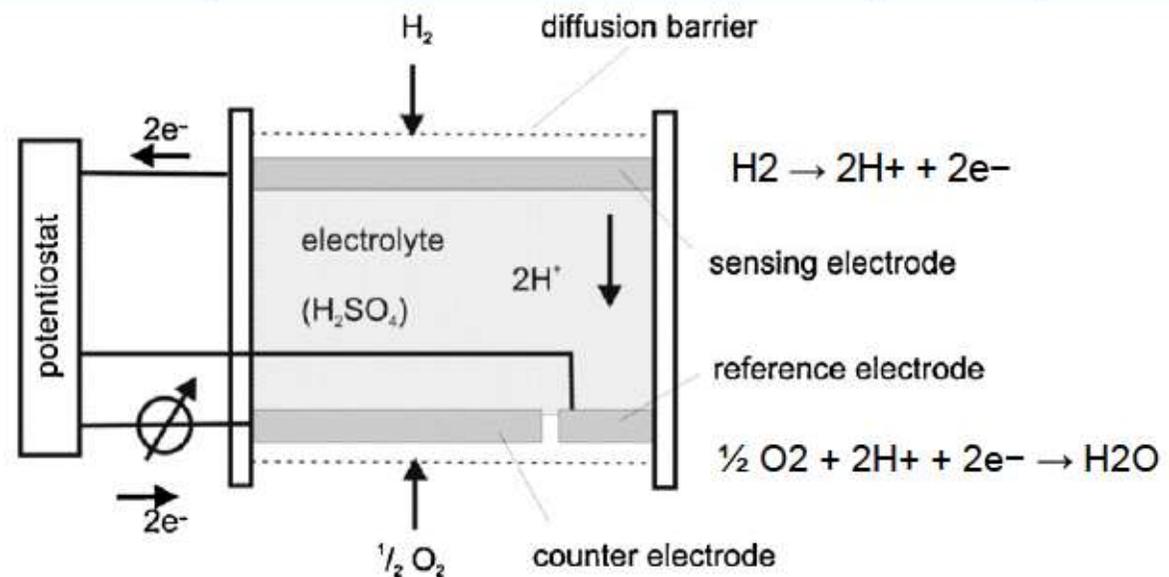
### 03 Sensores electroquímicos.

# 3

**AMPEROMÉTRICOS.** Funcionan con un voltaje aplicado constante y la señal del sensor es una corriente de difusión limitada. La configuración básica requiere un electrodo de trabajo o sensor y un contraelectrodo. Sin embargo, la mayoría de los sensores también incluyen un electrodo de referencia y un potencióstato para mantener un voltaje constante. El electrodo de platino, también actúa como catalizador de la reacción de oxidación del hidrógeno. En segundo lugar, una celda electroquímica contiene un electrolito sólido o líquido para permitir el transporte de iones entre los electrodos. Se usa H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pero se tiende a uno sólido (Nafion)

### POTENCIOMÉTRICOS

Se diferencian de los sensores amperométricos en que idealmente funcionan con corriente cero y la cantidad medida es la diferencia de potencial o fuerza electromotriz entre el electrodo de detección y el electrodo de referencia.



# Características

## Sensores de hidrógeno

- 04 Sensores de Semiconductores

4

**ÓXIDOS METÁLICOS SEMICONDUCTORES** Los sensores de estado sólido que utilizan óxidos semiconductores funcionan generalmente a temperaturas superiores a la ambiente. La resistencia eléctrica del material del sensor también dependerá de la temperatura, y de la composición química de la atmósfera circundante.

La mayoría de los óxidos cambiarán su resistencia cuando cambia la concentración de oxígeno en el ambiente, haciendo a estos sensores **inadecuados para monitoreo de alimentación de celdas de combustible.**

La respuesta es rápida en el **rango de 0 a 1000 ppm de H<sub>2</sub>** y son útiles para la detección de escapes.



# Características

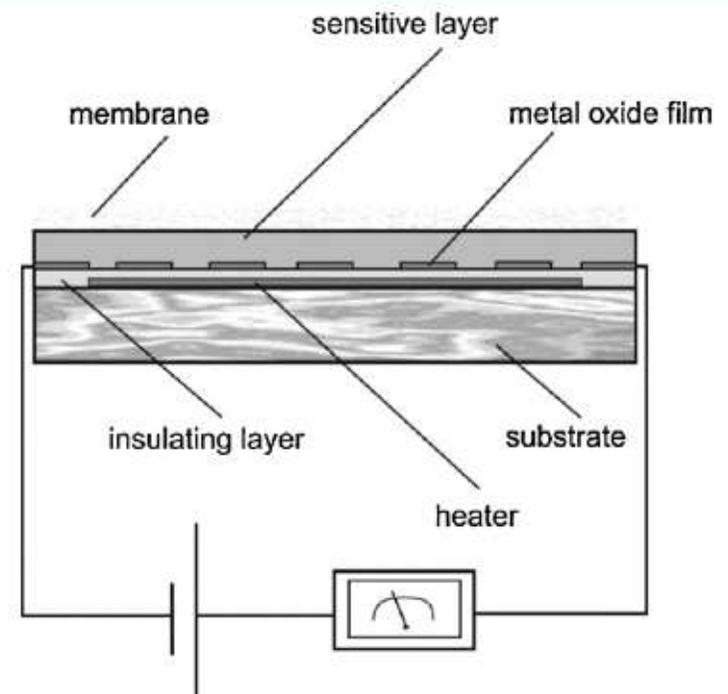
## Sensores de hidrógeno

### • 04 Sensores de Semiconductores

# 4

El cambio en la resistencia de los óxidos metálicos resulta de una ganancia de electrones superficiales después de la reacción del hidrógeno con el oxígeno adsorbido. Como resultado, la resistencia de este tipo de óxido disminuye en presencia de  $H_2$  y la magnitud del cambio de resistencia puede relacionarse con la concentración de hidrógeno. Son sensibles a otros compuestos reductores y que contienen  $H_2$ , como monóxido de carbono, metano, alcoholes, humedad, etc.

Se han logrado mejoras en la selectividad del sensor y la sensibilidad al  $H_2$  dopando los óxidos metálicos con metales catalíticos como Pt, Pd, Au, Ag y Cu. Hay muchos sensores de óxido de metal disponibles en el mercado y la mayoría usan óxido de estaño. Los tiempos de respuesta oscilan entre 4 y 20 s. **Típicamente se pueden detectar (pérdidas) concentraciones de  $H_2$  en el rango de 10 ppm a 2%.**



# Características

## Sensores de hidrógeno

- **04 Sensores Resistivos de aleación de Paladio.**

**4 RESISTENCIA METÁLICA** Para una respuesta rápida en ambientes químicamente variables, se utilizan el Paladio metal y sus aleaciones. La superficie del paladio actúa catalíticamente para romper el enlace de H-H del hidrógeno diatómico y permite que el hidrógeno monoatómico difunda en el material. El nivel del hidrógeno disuelto cambia proporcionalmente la resistencia eléctrica del metal, y es este doble aspecto del paladio lo que lo hace altamente deseable como sensor del hidrógeno.

**En el mercado esta tecnología con partículas de paladio de nanocluster afirma tener un límite de detección inferior a 10 ppm, un rango operativo de hasta el 1 % de hidrógeno, una alta selectividad y un tiempo de respuesta de 4 s.** Se deben eliminar contaminantes sulfurados, a través de filtros no específicos del hidrógeno.

# Características

## Sensores de hidrógeno

- **05 Sensores basados en función de trabajo.**

**5**

### **BASADOS EN FUNCIÓN DE TRABAJO**

Los sensores de gas basados en funciones de trabajo de semiconductores generalmente tienen una estructura de triple capa de metal, óxido y semiconductor (MOS). La función de trabajo generalmente se mide en electronvoltios y es la energía mínima requerida para eliminar un electrón de una superficie sólida hasta el infinito. Para la detección de hidrógeno, se deposita un metal catalítico sensible al hidrógeno sobre una capa de óxido que, a su vez, se deposita sobre un sustrato semiconductor

Los diodos Schottky basados en transistores de alta movilidad de electrones (HEMT) AlGaIn/GaN recientemente novedosos han demostrado una **capacidad de detección muy baja (hasta 10 ppm), un rango de medición amplio (ppm a 30 %), un tiempo de respuesta rápido (1 s)** y estabilidad a largo plazo pero no hay casi sensores comerciales de tipo Schottky disponibles en el mercado.

# Características

## Sensores de hidrógeno

- **05 Transistores de efecto de campo de H<sub>2</sub> (HFET)**

5

Al usar el paladio como material de puerta para un transistor de efecto de campo estándar, los cambios pequeños en la resistencia del Paladio producen cambios grandes en las características corriente-voltaje del FET. Esta tecnología de sensores trabaja bien en el **rango de 50 a 1000 ppm de H<sub>2</sub>. Funciona independientemente del ambiente.**

### **TRANSISTOR METAL - AISLANTE - SEMICONDUCTOR**

Los sensores de hidrógeno MISFET o MOSFET son otro sensor de tipo semiconductor que utiliza un transistor de efecto de campo (FET) para transformar el cambio en la función de trabajo de una compuerta metálica catalítica en presencia de hidrógeno en una señal eléctrica relacionada con la concentración de hidrógeno.

# Características

## Sensores de hidrógeno

- 06 Sensores Mecánicos

### 6

#### MECÁNICOS

El hidrógeno, cuando es absorbido por un metal, ocupa sitios intersticiales en la red metálica, lo que hace que esta red se expanda y, por lo tanto, cambie las propiedades físicas del metal. Los voladizos revestidos de paladio microfabricados utilizan la expansión del paladio después de la absorción de hidrógeno como principio de detección. Estos sensores consisten en una película de paladio recubierta en un lado de un voladizo.

Sin embargo, la expansión del volumen por absorción de hidrógeno está prohibida por el sustrato sobre el que se recubre la película y las tensiones inducidas se traducen en la flexión mecánica o curvatura del voladizo. Por ello se requiere más investigación y a pesar de que los sensores son muy robustos y consumen muy poca energía, **sus tiempos de detección aun son algo lentos (30-90 s) a concentraciones del orden de 400 ppm.**

# Características

## Sensores de hidrógeno

- 07 Sensores Ópticos

7

### ÓPTICOS

Se emplean varias técnicas en la detección óptica de hidrógeno pues las propiedades ópticas de ciertos materiales cambian cuando interactúan con él.

**Medidas de reflectividad en microespejos.** Los microespejos consisten en una capa delgada del material de detección (paladio) que recubre el extremo cortado de una fibra óptica. El cambio en la reflectividad de la capa de Pd al exponerse al H<sub>2</sub> se detecta y se correlaciona con la concentración.

**Mediciones interferométricas.** Un cambio en las dimensiones o el índice de refracción del material de detección produce un cambio de fase en el haz de luz de fibra, que puede detectarse mediante interferometría. Dichos sensores de fibra óptica se conocen como optrodes u optodes.

**Resonancia de plasmones superficiales (SPR).** Los plasmones superficiales son ondas electromagnéticas superficiales que se propagan paralelas a una interfaz metal/dieléctrica y que, por lo tanto, son sensibles a los cambios en la estructura de la superficie metálica.

# Características

## Sensores de hidrógeno

- **08 Sensores Acústicos**

# 8

## ACÚSTICOS

Los sensores acústicos de gas detectan cambios en las propiedades de las ondas acústicas debido a un adsorbato en la superficie o un absorbente en la mayor parte de un material piezoeléctrico.

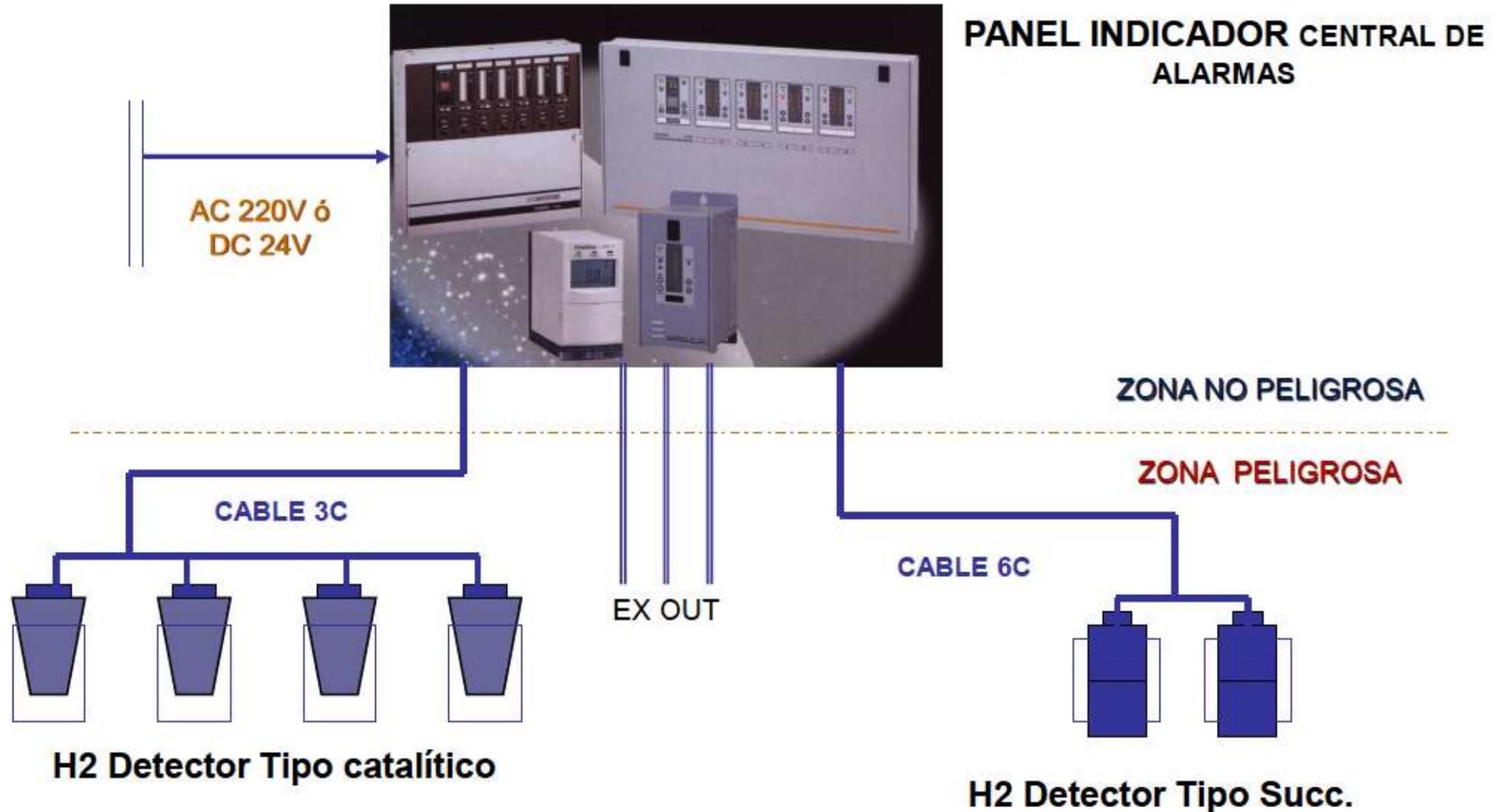
### **Sensor de ondas acústicas de superficie**

En la detección de hidrógeno, las ondas acústicas superficiales (SAW) se generan por medio de un sustrato piezoeléctrico con dos juegos de transductores interdigitales (IDT) depositados sobre él. Uno de estos transductores convierte una señal de entrada eléctrica aplicada en una onda acústica, mientras que el segundo convierte esta onda nuevamente en una señal de salida eléctrica. Se emplean las ondas de Rayleigh usando IDT

**La velocidad del sonido en paladio** también se ha medido como un medio para detectar H<sub>2</sub>. La velocidad de la onda acústica en una guía de onda sólida depende de la densidad del material y de la tensión a la que está sujeto. Cuando el Pd absorbe H<sub>2</sub> sus propiedades mecánicas cambian y puede detectarse un delta en la velocidad de las ondas sonoras que lo atraviesan.

# Sistema de monitoreo

EJEMPLO



# ALGUNAS CONCLUSIONES



**El hidrógeno no tiene olor ni color y para detectar su presencia se requiere de sistemas de detección**

**Los sistemas se deben calibrar apropiadamente**

**IRAM – ISO / TR 15916 (ISO TR 15916)****Consideraciones básicas para la seguridad en los sistemas de hidrógeno**

*Instituto IRAM, Perú 550, Buenos Aires. ARGENTINA. – 2004 / (2015)*

**ISO TR 15916:2015****Basic Considerations for the Safety of Hydrogen Systems****ISO 14687:2019****Gaseous Hydrogen - Fuel Product Specification****MSDS Hidrógeno comprimido**

Hoja de datos de seguridad del material

*AAH - 2015*

**MSDS Hydrogen Compressed Gas**

Hoja de datos de seguridad del material

*Air Products*

## **FDS Hidrogeno – Linde 2020**

HDSP P-4604 – Rev. 5.0

*Linde Montevideo - Uruguay*

## **Global Hydrogen Review**

International Energy Agency

2023

## **Green Hydrogen Roadmap in Uruguay**

MIEM 2022 - INTERINSTITUTIONAL GROUP

BID Support



Comisión Nacional de Energía Atómica

# Seguridad Tecnologías del Hidrógeno

Curso Postgrado  
**URUGUAY**

# FIN

**2CAP-2024**

# 2

**HIDRÓGENO**  
**PROPIEDADES**

[aprea.infovia@gmail.com](mailto:aprea.infovia@gmail.com)

**Safety**  
Hydrogen Technologies



FACULTAD DE INGENIERÍA



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA URUGUAY

José Luis APREA

FEBRERO 2024

# NOTAS

