

PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.

ÍNDICE

1. HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO
2. MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO
3. FUNDAMENTOS DE LA ELECTRÓLISIS
4. ELECTRÓLISIS ALCALINA
5. ELECTRÓLISIS PEM
6. ELECTRÓLISIS DE ALTA TEMPERATURA
7. SISTEMAS COMERCIALES ELECTROLISIS
8. COSTES DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO
9. NORMATIVA AMBIENTAL

ÍNDICE

- 1. HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO**
2. MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO
3. FUNDAMENTOS DE LA ELECTRÓLISIS
4. ELECTRÓLISIS ALCALINA
5. ELECTRÓLISIS PEM
6. ELECTRÓLISIS DE ALTA TEMPERATURA
7. SISTEMAS COMERCIALES ELECTROLISIS
8. COSTES DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO
9. NORMATIVA AMBIENTAL

1. HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO

Nuevo Modelo Energético

ENERGÍAS RENOVABLES



La disminución de las reservas de petróleo, la inestabilidad del precio de los combustibles fósiles, el aumento del consumo energético y las emisiones contaminantes, hacen evidente que es necesario buscar nuevas fuentes energéticas.

Estas fuentes alternativas podrían ser las **energías renovables**, que se presentan en España como una excelente opción para resolver estos problemas:

- Son inagotables e infinitas
- Permiten reducir la dependencia energética exterior
- No producen GEI, ni otras emisiones en su uso
- Se encuentran geográficamente distribuidas
- Favorecen el autoconsumo
- Incrementan el empleo en el sector renovable
- No generan residuos de difícil tratamiento

FUENTE: CNH2



1. HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO



Almacenamiento de Energía

CAPACIDAD ALMACENAMIENTO

Pero las Energías Renovables también presentan **problemas en su gestión y producción:**

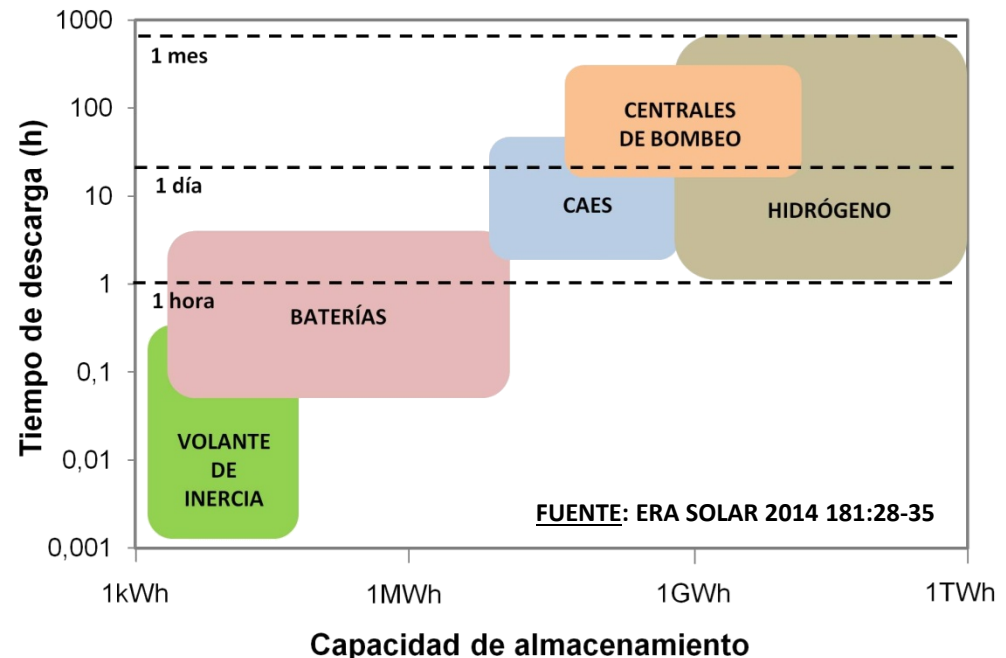
- Un panel FV no produce electricidad si no hay suficiente irradiación solar
- Un aerogenerador no produce electricidad si no hay suficiente viento



¿qué hacer si la demanda no coincide con la producción?

Necesitamos **herramientas que nos permitan almacenar esta energía en períodos de gran producción**, para que pueda utilizarse en épocas de escasez del recurso renovable.

HIDRÓGENO SE PRESENTA COMO EL COMPLEMENTO PERFECTO DE LAS EERR



1. HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO

Vector Energético

HIDRÓGENO

El hidrógeno no es un recurso sino un **vector energético**, es decir, un portador de energía. Esto supone que **se debe producir a partir de fuentes energéticas**, conteniendo una cierta cantidad de energía, una vez que este ha sido producido.

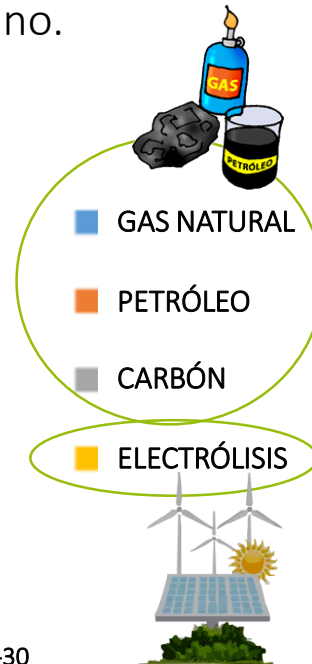
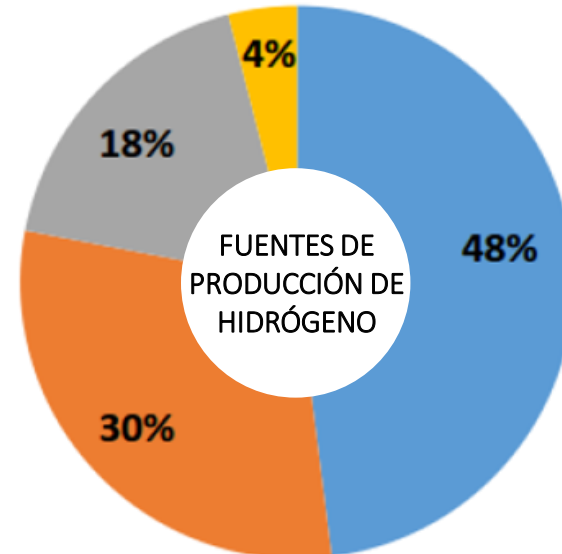
El **96% del hidrógeno producido utiliza como energía primaria combustibles fósiles**, siendo el reformado de gas natural la vía más comúnmente utilizada para producir hidrógeno.



SI QUEREMOS UTILIZAR EL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO SOSTENIBLE, NO PODEMOS PRODUCIRLO MEDIANTE COMBUSTIBLES FÓSILES



Producción limpia de hidrógeno a partir de fuentes renovables



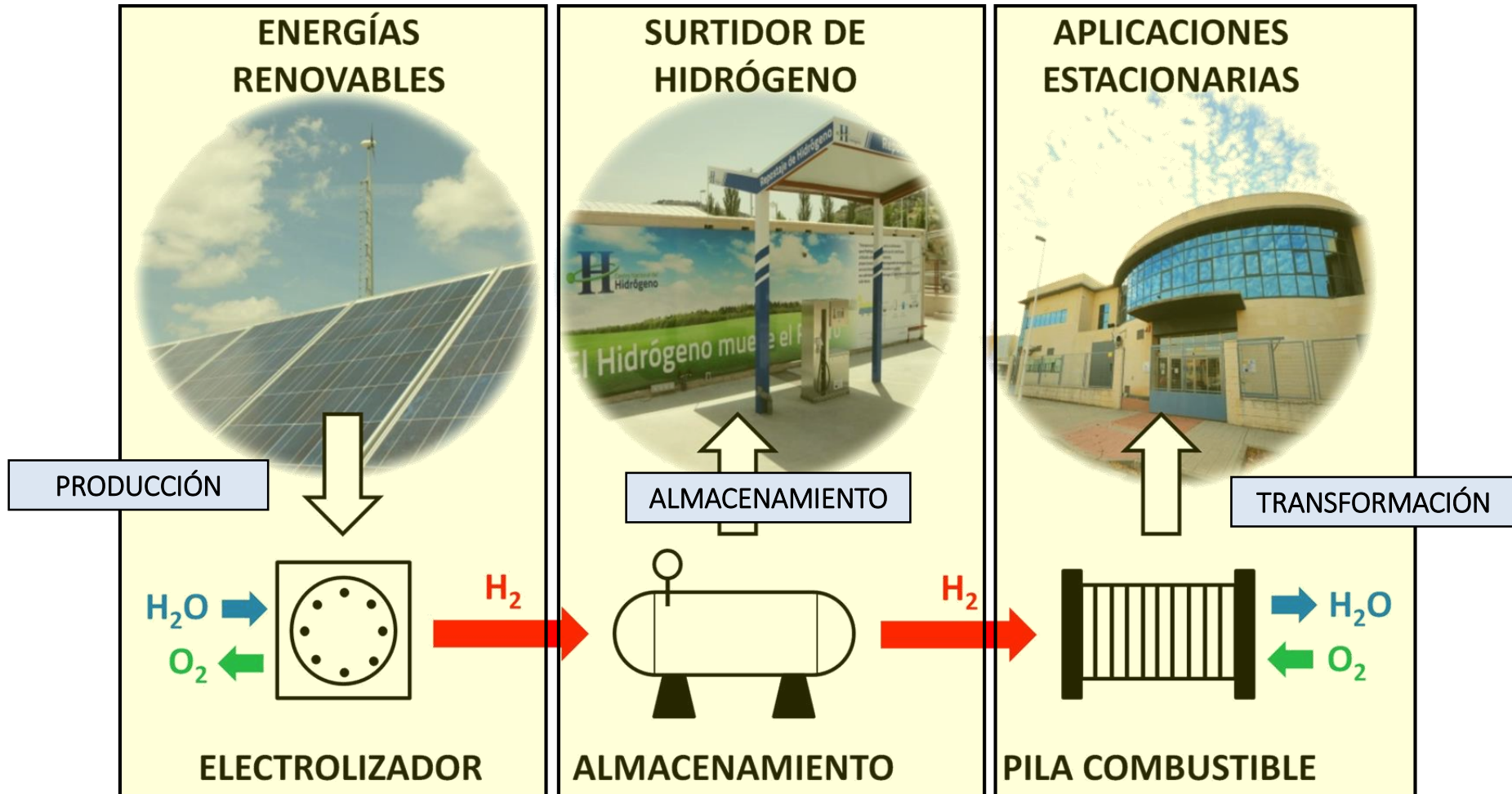
FUENTE: European Mechanical Science 2018 2(1):20-30

1. HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO



Ciclo del Hidrógeno Energético

FUENTE: Energética XXI 2018 177:83-84

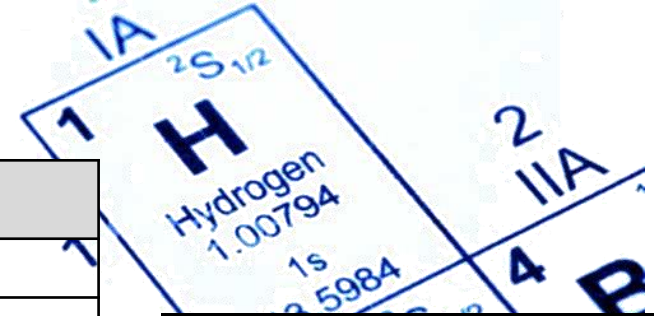


1. HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO



Propiedades del Hidrógeno

PARÁMETRO	VALOR
DENSIDAD DEL HIDRÓGENO GAS	0,0899 kg/Nm ³
DENSIDAD DEL HIDRÓGENO LÍQUIDO	0,0708 kg/L
DENSIDAD ENERGÉTICA DEL HIDRÓGENO GAS	10,8 MJ/Nm ³
DENSIDAD ENERGÉTICA DEL HIDRÓGENO LÍQUIDO	8,495 MJ/L
PUNTO DE EBULLICIÓN	20,28 K
PUNTO DE FUSIÓN	14,02 K
PODER CALORÍFICO INFERIOR PCI HIDRÓGENO	119,972 MJ/kg
PODER CALORÍFICO SUPERIOR PCS HIDRÓGENO	141,890 MJ/kg
LÍMITES DE EXPLOSIÓN	4 - 75 % de H ₂ en el aire
LÍMITES DE DETONACIÓN	18,3 – 59,0% de H ₂ en el aire
TEMPERATURAS DE COMBUSTIÓN ESPONTÁNEA	858 K
CAPACIDAD CALORÍFICA ESPECÍFICA	Cp = 14,33 J/(Kg K)
	Cv = 10,12 J/(Kg K)
COEFICIENTE DE DIFUSIÓN	0,61 cm ² /s



FUENTE: AeH2

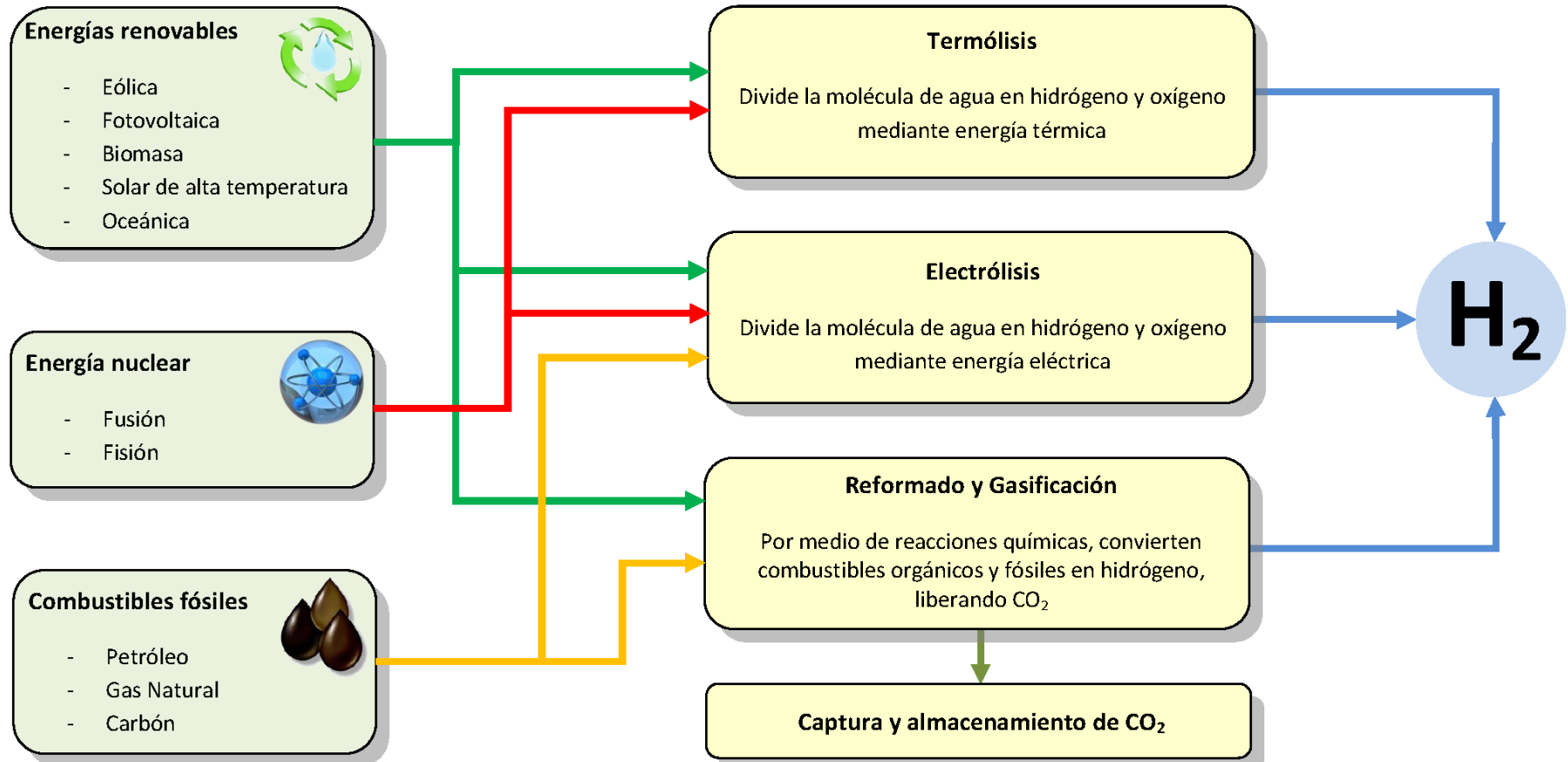
ÍNDICE

- 1. HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO**
- 2. MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO**
3. FUNDAMENTOS DE LA ELECTRÓLISIS
4. ELECTRÓLISIS ALCALINA
5. ELECTRÓLISIS PEM
6. ELECTRÓLISIS DE ALTA TEMPERATURA
7. SISTEMAS COMERCIALES ELECTROLISIS
8. COSTES DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO
9. NORMATIVA AMBIENTAL

2. MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE H₂

Tecnologías de Producción

PRINCIPALES PROCESOS



FUENTE: CNH2

2. MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE H₂

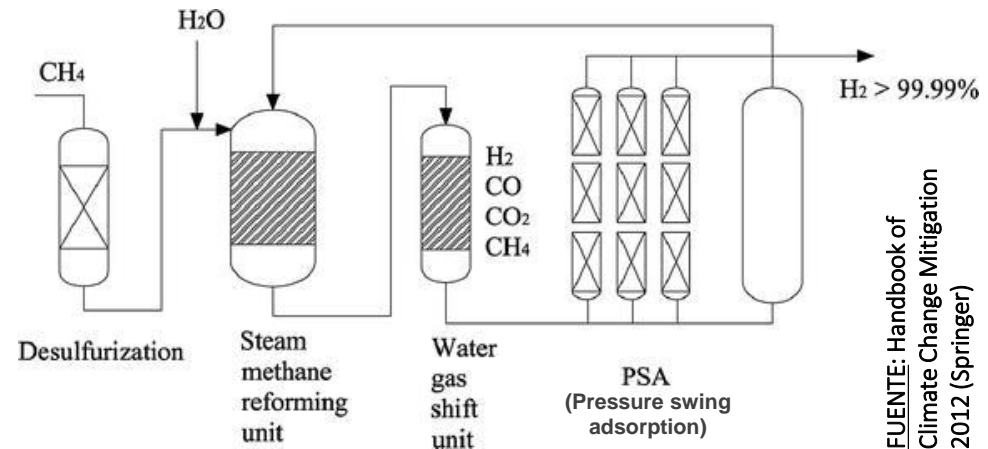
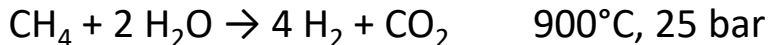


Procesos de Conversión Química

REFORMADO, GASIFICACIÓN, PIRÓLISIS

Se aplican principalmente a combustibles fósiles (carbón e hidrocarburos), aunque también a biomasa. En todos los procesos se produce CO₂, siendo posible secuestrarlo. Métodos:

➤ **Reformado:** Son los más habituales para producir hidrógeno. De todos los procesos existentes, el más utilizado es el reformado con vapor de agua a partir de gas natural (SMR):



FUENTE: Handbook of
Climate Change Mitigation
2012 (Springer)

➤ **Gasificación:** Se trata de una combustión incompleta (con defecto de O₂), en la que se obtiene principalmente CO e H₂ a una temperatura que oscila entre los 700 y 1.600 °C

➤ **Pirólisis:** Consiste en la descomposición de un combustible sólido (carbón o biomasa) mediante la acción directa de calor, para obtener un gas de síntesis (CO y H₂)

2. MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE H₂



Procesos Termoquímicos

TERMÓLISIS, CICLOS TERMOQUÍMICOS

Se basan en la extracción del H₂ de la molécula que lo alberga (hidrocarburo, agua) mediante la aplicación de calor procedente de una fuente externa (nuclear, solar concentrada).

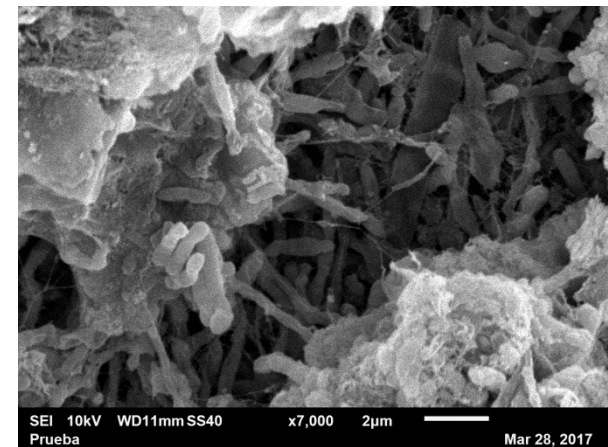
En el caso de la **termólisis directa del agua** se necesitan temperaturas superiores a 2.500°C. La solución pasa por el uso de una serie de **ciclos termoquímicos** que permiten reducir la temperatura por debajo de los 1.000 °C, a través de una serie de reacciones intermedias.

Procesos Biológicos

FERMENTACIÓN, ELECTRÓLISIS MICROBIANA

➤ **Fermentación oscura:** La producción de hidrógeno se consigue a partir de materia orgánica rica en carbohidratos, a través de bacterias anaerobias.

➤ **Electrólisis microbiana:** Se basa en la electrohidrogenesis para la conversión directa de material biodegradable en H₂, gracias a la acción de una serie de bacterias (biocatalizadores del proceso) y a la aplicación de un pequeño voltaje.



2. MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE H₂



Procesos Electrolíticos

ELECTRÓLISIS DEL AGUA

Proceso en el cual, a partir de agua y electricidad se obtiene H₂ y O₂. Su importancia frente al resto de tecnologías de producción de hidrógeno no basada en fósiles, se debe a:

- Utiliza la electricidad como fuente primaria para la ruptura de la molécula de agua, disponiendo de una gran **versatilidad para ser integrada con las distintas formas de producción renovable**, así como la posibilidad de operar en régimen variable.
- Funcionan con sistemas modulares que permiten su **fácil escalado de bajas a altas potencias**, pudiendo ser utilizado tanto para producción centralizada como descentralizada.
- El hidrógeno producido es de **alta pureza**.
- Tecnología disponible en el mercado con **costes aceptables y eficiencias mayores** que el resto de tecnologías en desarrollo.

ALCALINA

ÁCIDA (PEM)

ÓXIDO SÓLIDO



FUENTE: CNH2

2. MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE H₂



Tipos y Clasificación

ETIQUETA SEGÚN LAS EMISIONES EN SU ORIGEN

HIDRÓGENO NEGRO

Es el producido a partir de carbón mediante un proceso de gasificación (gas de síntesis) o a través de hidrocarburos pesados.

HIDRÓGENO GRIS

Es el producido a partir de gas natural u otros hidrocarburos ligeros (CH₄) o GLP, mediante procesos de reformado (SMR).

HIDRÓGENO AZUL

Obtenido de forma similar al hidrógeno gris, pero al que se le aplican técnicas de captura, uso y almacenamiento de carbono.

HIDRÓGENO VERDE

Es el generado a partir de electricidad renovable, utilizando como materia prima el agua, mediante un proceso de electrólisis.

Aquellos que utilizan como materia prima el biogás, la energía nuclear o directamente la electricidad de la red eléctrica (sin certificado de origen renovable), no están aún incluidos en la clasificación anterior por ser difícil cuantificar su impacto ambiental real.

ÍNDICE

- 1. HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO**
- 2. MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO**
- 3. FUNDAMENTOS DE LA ELECTRÓLISIS**
4. ELECTRÓLISIS ALCALINA
5. ELECTRÓLISIS PEM
6. ELECTRÓLISIS DE ALTA TEMPERATURA
7. SISTEMAS COMERCIALES ELECTROLISIS
8. COSTES DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO
9. NORMATIVA AMBIENTAL

3. FUNDAMENTOS DE LA ELECTRÓLISIS

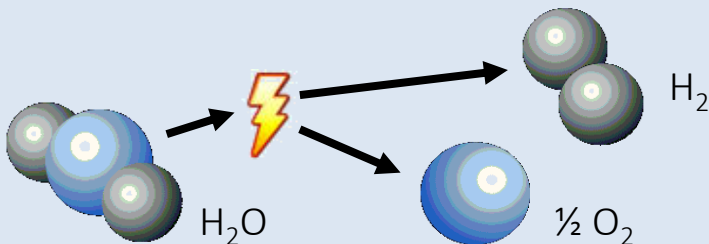


Conceptos Básicos

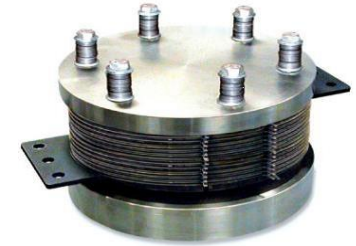
De las distintas vías para producir hidrógeno a través de las energías renovables, la **electrólisis del agua** constituye uno de los procesos más importantes y más utilizados.



LA ELECTRÓLISIS DEL AGUA CONSISTE EN APLICAR UNA DIFERENCIA DE POTENCIAL QUE SUMINISTRE LA ENERGÍA NECESARIA PARA QUE OCURRA LA SEPARACIÓN DEL AGUA EN HIDRÓGENO Y OXÍGENO

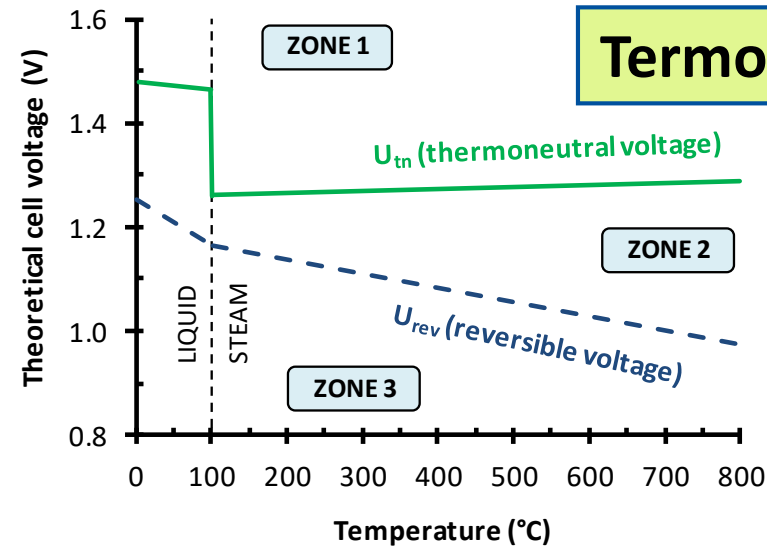
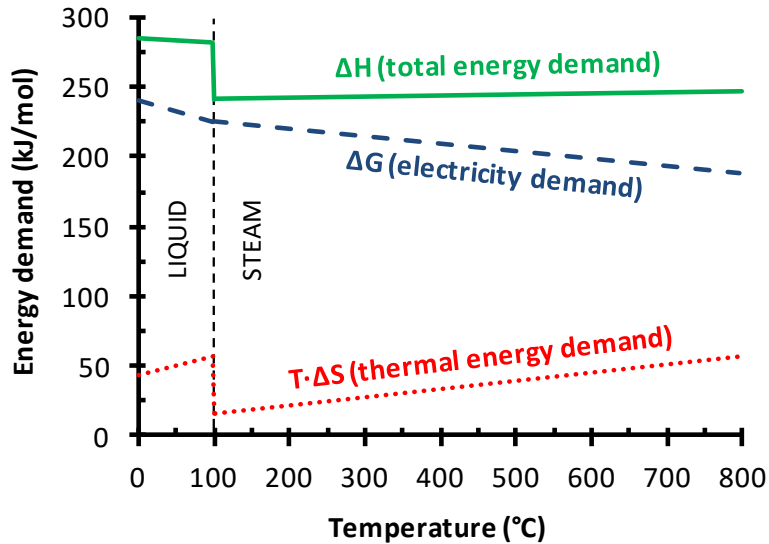


FUENTE: IHT, Hydrogenics, CNH2



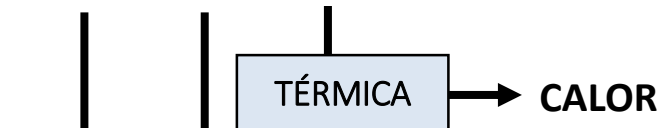
- Existen en el mercado electrolizadores de un amplio rango de potencias (>5 MW en alcalino)
- La tecnología de electrólisis a baja temperatura, es el principal proceso electrolítico (consumo energético en torno a 4.6-5.2 kWh/Nm³)
- Se han desarrollado instalaciones con una gran capacidad de producción (en zonas remotas, con grandes excedentes energéticos). Por ejemplo: Noruega, 1929: 27.900 Nm³/h; Egipto, 1960: 40.000 Nm³/h

3. FUNDAMENTOS DE LA ELECTRÓLISIS



FUENTE: CNH2
(Sustainable Fuel
Technologies
Handbook.
ELSEVIER 2020)

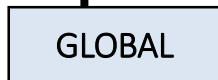
$$\Delta H = \Delta G + T \cdot \Delta S$$



VOLTAJE REVERSIBLE: tensión mínima para dividir el agua en H₂ y O₂

$$U_{rev} = \frac{\Delta g}{z \cdot F}$$

(a 25°C y 1 atm es 1.23V)



VOLTAJE TERMONEUTRO: tensión a aplicar cuando la única energía suministrada es eléctrica, sin generación ni absorción de calor

$$U_{tn} = \frac{\Delta h}{z \cdot F}$$

(a 25°C y 1 atm es 1.48V)

PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA APLICADO A LA ELECTRÓLISIS DEL AGUA

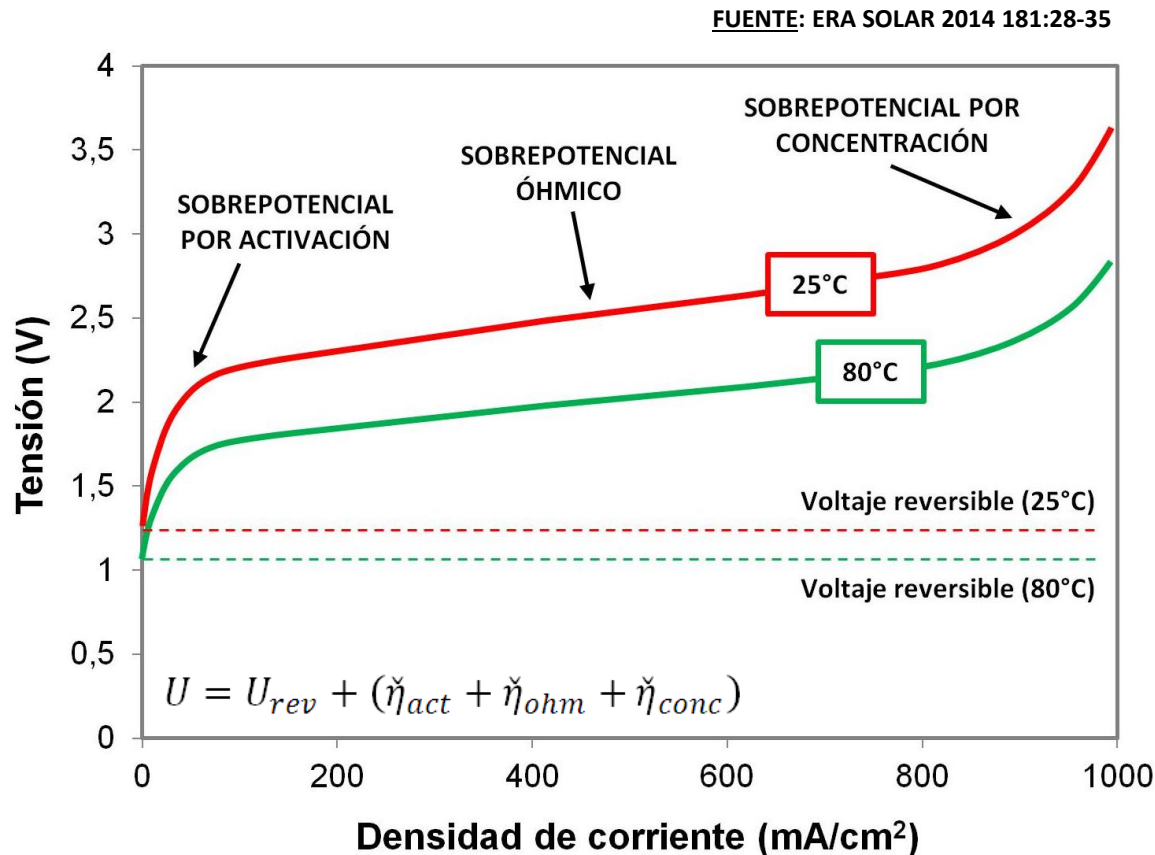
z: electrones transferidos en la electrólisis (2e⁻); F: constante de Faraday (96500 C/mol)

3. FUNDAMENTOS DE LA ELECTRÓLISIS



Caracterización Proceso Electrólisis

CURVA DE POLARIZACIÓN



La relación entre voltaje y corriente, proporciona la **curva característica I-V o curva de polarización**, la cual nos permite analizar el comportamiento de una celda electrolítica, ya que a través de ella podemos comprender la cinética de la reacción de la electrólisis del agua y determinar los diferentes puntos de operación. Además la curva I-V pone de manifiesto el efecto de las irreversibilidades del proceso.

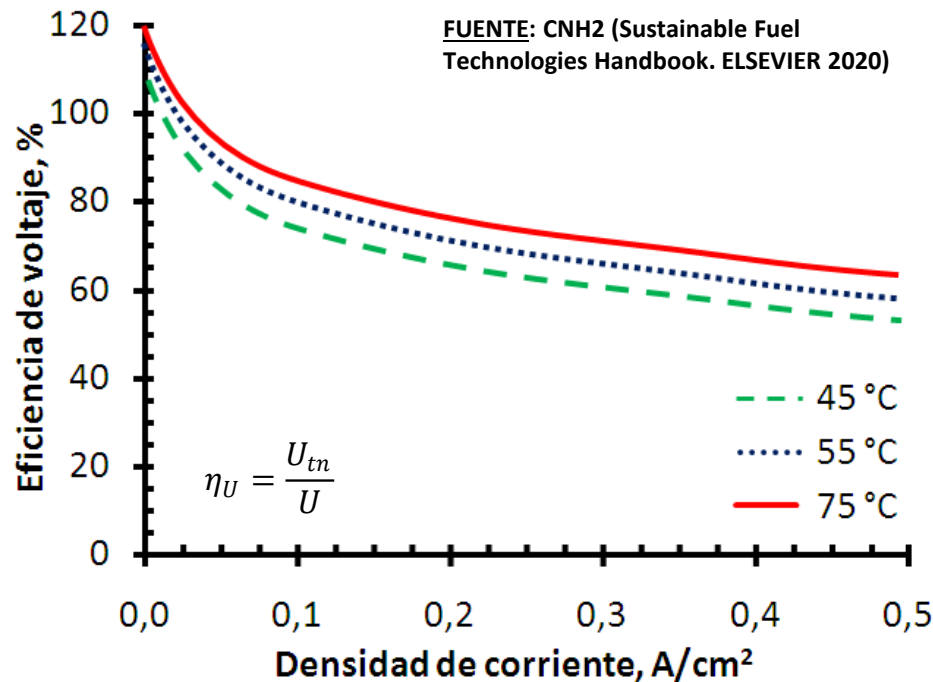
3. FUNDAMENTOS DE LA ELECTRÓLISIS



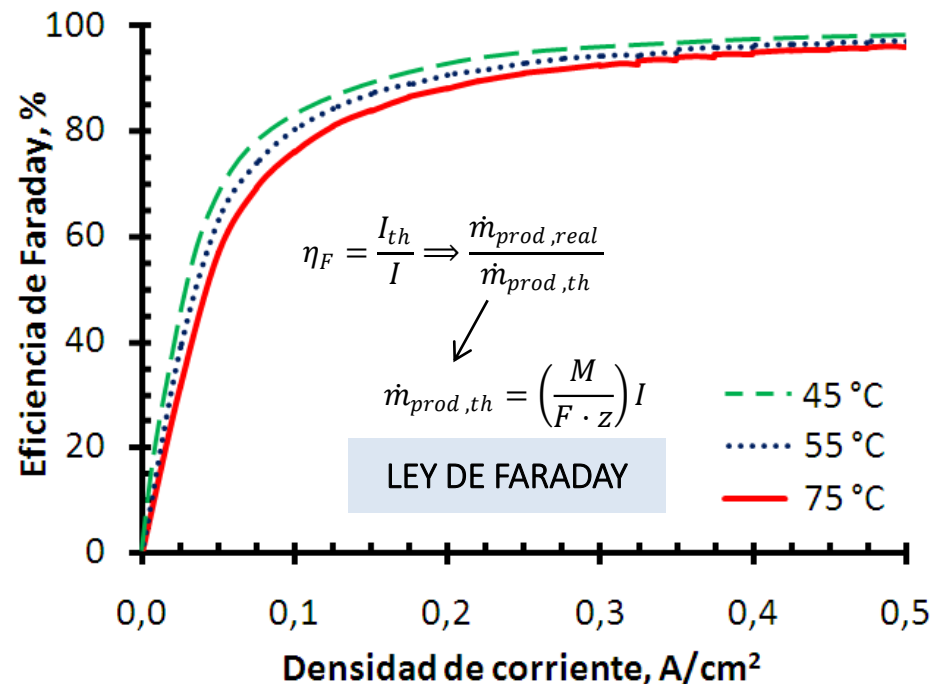
Caracterización Proceso Electrólisis

E1

EFICIENCIAS



La **eficiencia de voltaje** cuantifica la relación que existe entre el voltaje termoneutro y el realmente aplicado en la electrólisis.



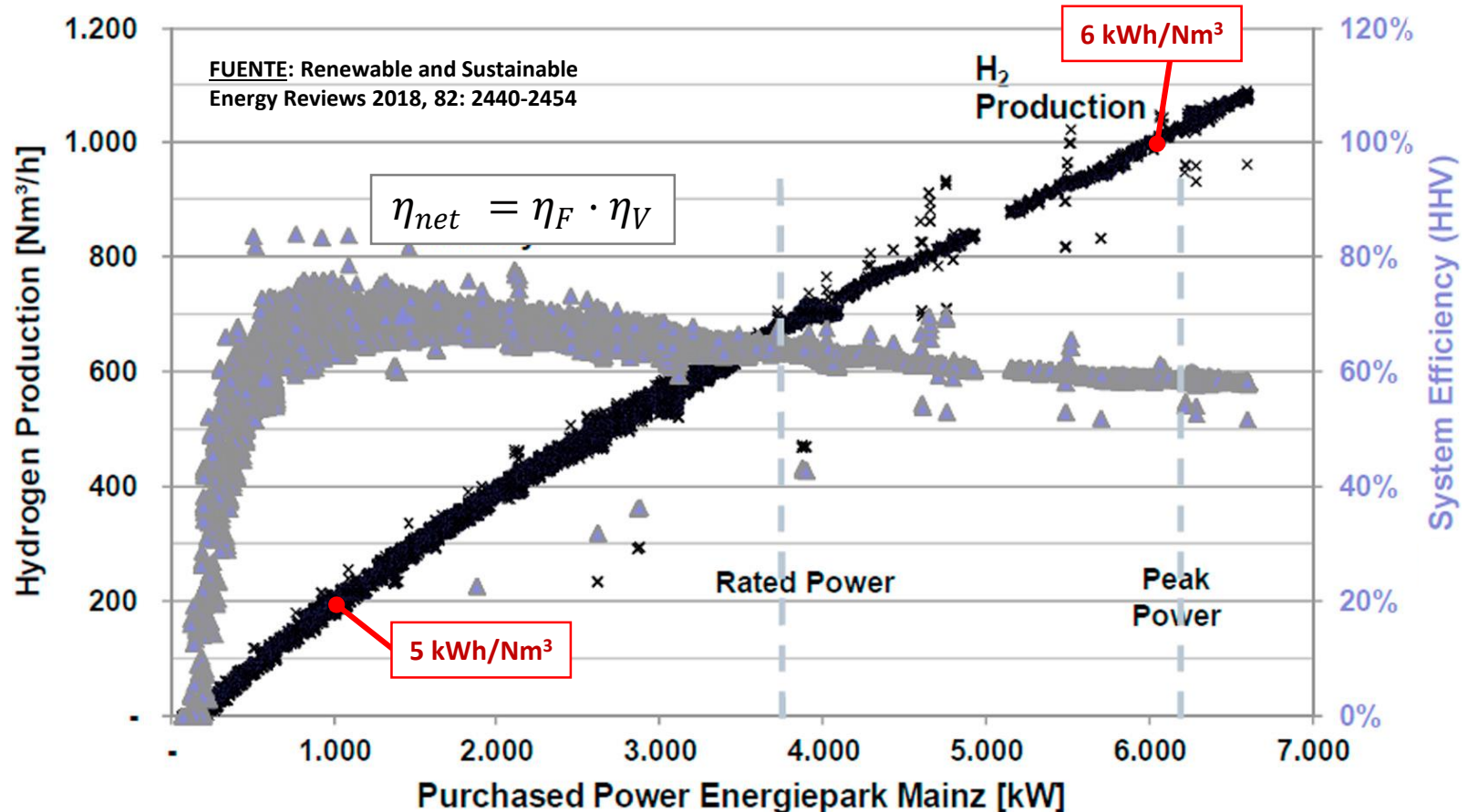
La **eficiencia de Faraday** expresa la relación que existe entre el caudal real de hidrógeno producido y el valor teórico.

3. FUNDAMENTOS DE LA ELECTRÓLISIS



Caracterización Proceso Electrólisis

RENDIMIENTO GLOBAL Y CONSUMO ENERGÉTICO



3. FUNDAMENTOS DE LA ELECTRÓLISIS

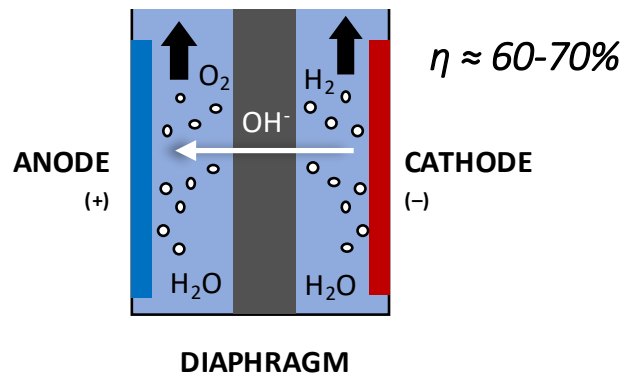


Tipos de Electrólisis

COMPARATIVA TIPOS DE ELECTRÓLISIS

ALCALINA

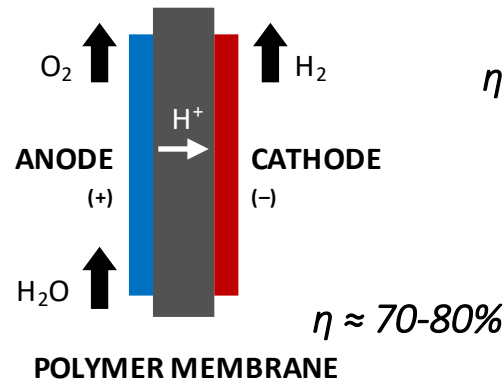
Iones OH^- son los encargados del transporte iónico. El electrolito es una disolución de KOH o NaOH. Las cámaras anódica/catódica se encuentran separadas por un diafragma que impide la mezcla de gases.



aprox. 4.6-5.2 kWh_e/Nm³ H₂

ÁCIDA (PEM)

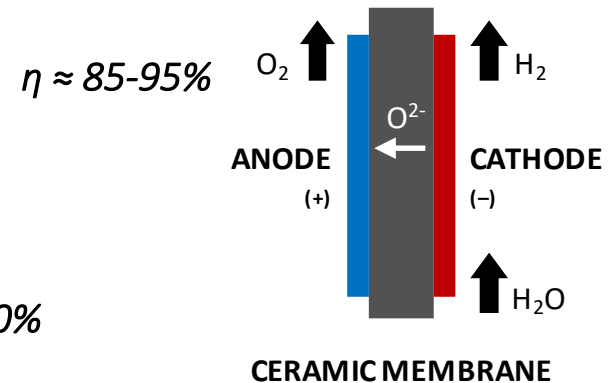
Se usa un polímero de tipo ácido, denominado PEM (membrana de intercambio de protones), como electrolito para transportar los iones H^+ y al mismo tiempo para separar los gases entre las cámaras.



aprox. 4.5-4.8 kWh_e/Nm³ H₂

ÓXIDO SÓLIDO

El consumo de electricidad se reduce, pero se precisa disponer de una fuente térmica de elevada temperatura. Se pueden operar con temperaturas de hasta 1000°C con electrolizadores de óxido sólido



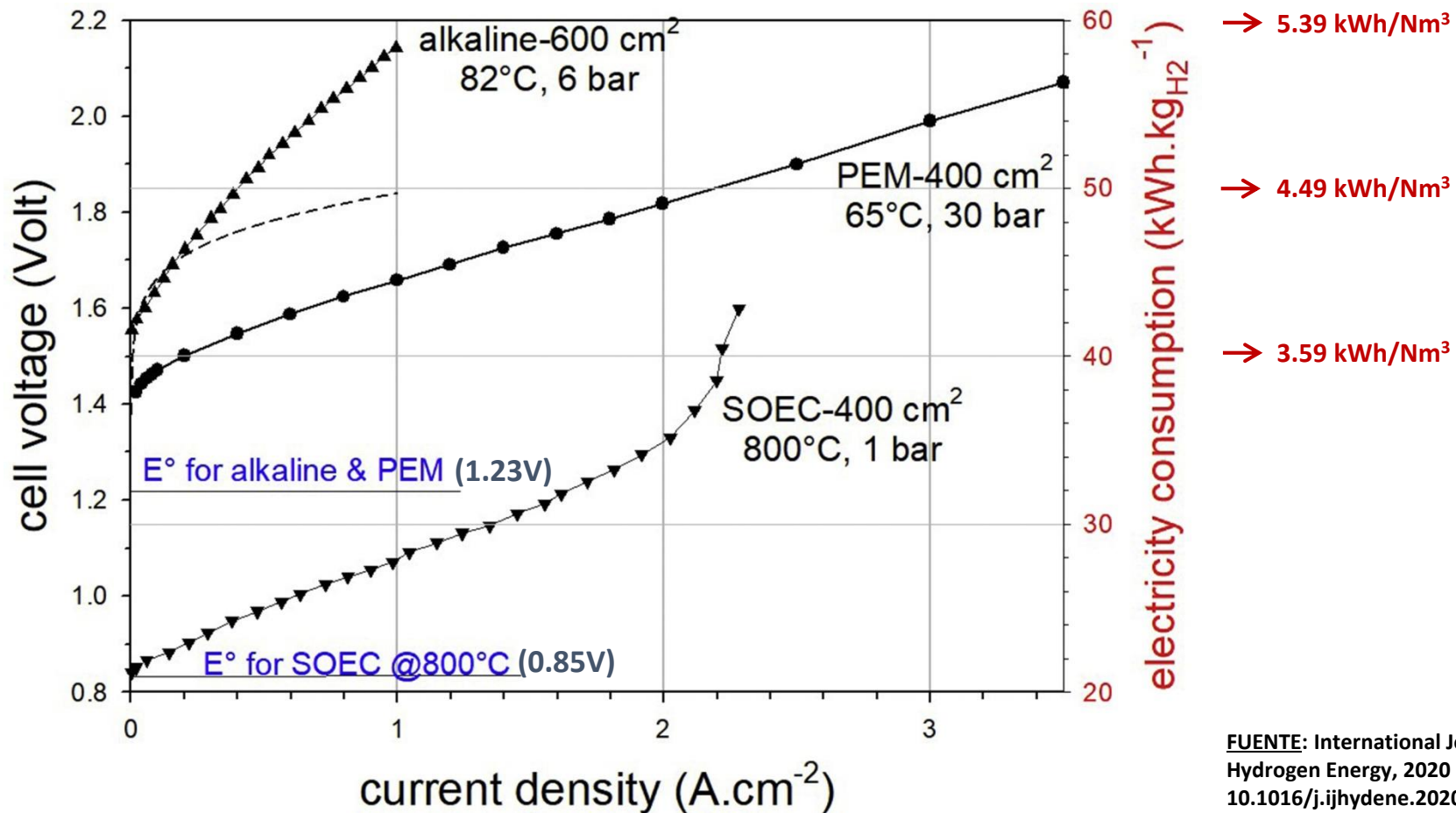
aprox. 3.2-3.5 kWh_e/Nm³ H₂

3. FUNDAMENTOS DE LA ELECTRÓLISIS



Tipos de Electrólisis

COMPARATIVA TIPOS DE ELECTRÓLISIS



FUENTE: International Journal of Hydrogen Energy, 2020 (DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.03.109)

3. FUNDAMENTOS DE LA ELECTRÓLISIS



A1	ALKALINE ELECTROLYSIS	PEM ELECTROLYSIS	SOLID OXIDE ELECTROLYSIS
Semi-reactions	Anode: $2\text{OH}^- \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$ Cathode: $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	Anode: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ Cathode: $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	Anode: $2\text{O}^{2-} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{e}^-$ Cathode: $\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-} + \text{H}_2$
Electrodes and catalysts	Anode: Ni, Fe, metal oxides Cathode: Ni/Ni-Co, metal oxides	Anode: Ti + Ti/RuO ₂ , IrO ₂ Cathode: Graphite, Ti + Pt	Anode: Ceramic (Mn,La,Cr), Ni Cathode: Zr + Ni / CeOx
Separator	Diaphragm (NiO, PAM, Zirfon®)	Membrane (PEM)	Membrane (ceramic)
Electrolyte	KOH (about 32 wt%), NaOH (about 18 wt%)	Solid polymer electrolyte (PFSA, usually Nafion®)	Y ₂ O ₃ -ZrO ₂ , Sc ₂ O ₃ -ZrO ₂ , MgO-ZrO ₂ , CaO-ZrO ₂
Ion transport	OH ⁻	H ⁺	O ²⁻
Temperature (°C)	60 - 85	50 - 80	800 - 1000
Pressure (bar)	< 30	< 35	1 – 5
Current density (mA/cm ²)	200 - 600	≤ 2000	≤ 2000
Energy consumption (kWh/Nm ³ H ₂)	4.3 – 5.0	4.2 – 4.7	3.2 – 3.7
Costs (€/kW)	1000 - 1500	1500 - 2000	Prototypes
Global efficiency	60 – 70 %	70 – 80 %	85 – 95 %
Lifetime (h)	> 95000	50000 – 75000	In research
Advantages	Technology well tested and commercially developed. Technology of greater durability and lower cost	Solid electrolyte. High pressure of the gases produced. Operation at high current densities	Solid electrolyte. Low electricity consumption. Lower demand on water quality
Disadvantages	Corrosive liquid electrolyte. Low pressure of the generated gases. It requires a purification stage for the hydrogen produced	High costs of catalysts and membranes. Great requirement in inlet water	Limited lifetime due to thermal cycles. Limitations on applications due to operating temperatures

ÍNDICE

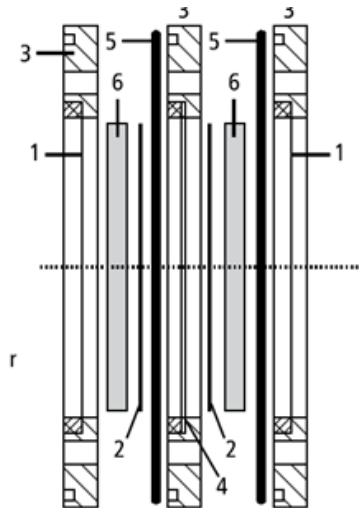
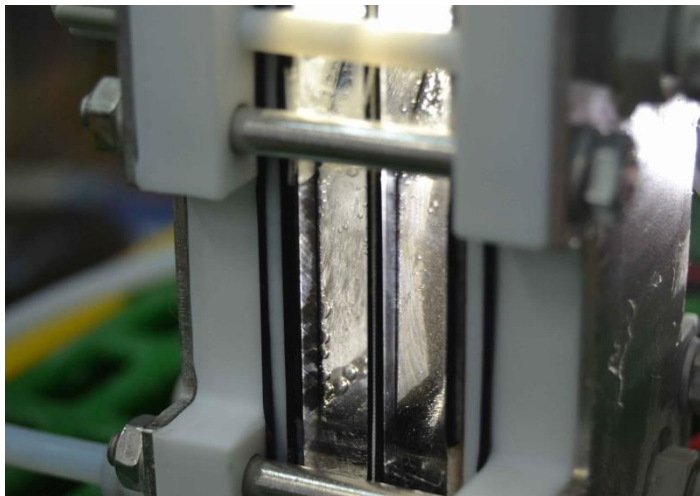
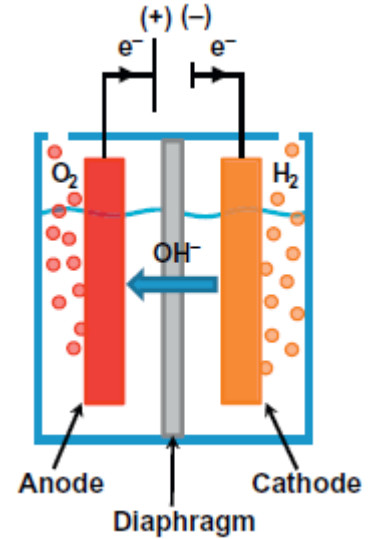
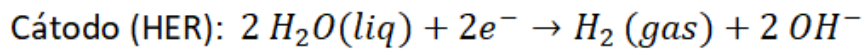
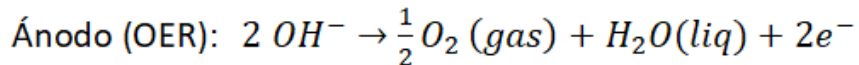
- 1. HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO**
- 2. MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO**
- 3. FUNDAMENTOS DE LA ELECTRÓLISIS**
- 4. ELECTRÓLISIS ALCALINA**
5. ELECTRÓLISIS PEM
6. ELECTRÓLISIS DE ALTA TEMPERATURA
7. SISTEMAS COMERCIALES ELECTROLISIS
8. COSTES DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO
9. NORMATIVA AMBIENTAL

4. ELECTRÓLISIS ALCALINA



Funcionamiento y Diseño

Una celda de **electrólisis alcalina** se compone de dos electrodos inmersos en un electrolito líquido (disolución alcalina acuosa) y un diafragma poroso que actúa como separador entre la cámara catódica y anódica, que permite el transporte iónico (OH^-), pero es impermeable a los gases:



ELECTRODOS

No requieren metales preciosos.

Cátodo: acero ó Ni + Ru/Mo; Ánodo: Ni

ELECTROLITO (acuoso)

Soluciones de KOH (30-35%),
NaOH (15-20%). Aporta iones OH^-

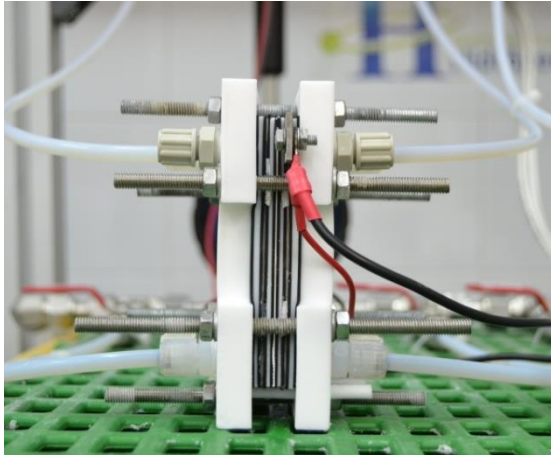
DIAFRAGMA (medio poroso)

Zirfon® es el separador más usado. Se basa en una red de polisulfona y ZrO_2

4. ELECTRÓLISIS ALCALINA



Sistemas de Electrólisis



CELDA

Constituye la **unidad básica de cualquier electrolizador**, donde tienen lugar las reacciones de evolución de hidrógeno y oxígeno

FUENTE: Stack de electrólisis VOLTIANA



STACK

Consiste en el **agrupamiento de diferentes celdas**, habitualmente en serie, lo que permite aumentar la cantidad de H_2 producido. Es el corazón de un sistema de electrólisis



SISTEMAS

Para el adecuado funcionamiento de un stack se necesitan una serie de equipos y sistemas auxiliares. Es lo que constituye el **balance de planta (BoP)**

escalado desde celdas de electrólisis hasta sistema

4. ELECTRÓLISIS ALCALINA



Principales Características

- **Condiciones de operación:** temperatura 60-85°C; presión < 30 bar; eficiencia 60-70%; densidad corriente < 0.6 A/cm²; costes ≈ 1000 €/kW; consumo energético 4.3-5.0 kWh/Nm³
- Tecnología madura, utilizada **a escala industrial**, existiendo equipos a nivel comercial con altas capacidades de producción de hidrógeno (rango MW).
- Sistemas con **bajos costes específicos**, que no requieren el uso de metales nobles.
- La **pureza del hidrógeno producido está por encima del 99.5-99.9%**. Para mayores purezas se requiere el uso de etapas de purificación posteriores (>99.999%).
- La producción de hidrógeno está limitada a un **rango de operación del 15-100%** del funcionamiento nominal, debido a que los gases generados en ánodo y cátodo pueden sufrir difusión a través del diafragma (mezclas explosivas).
- Sistemas de **durabilidad probada** (equipos comerciales con >95.000h de operación), con ratios de degradación muy bajos (1-3 μV/h).

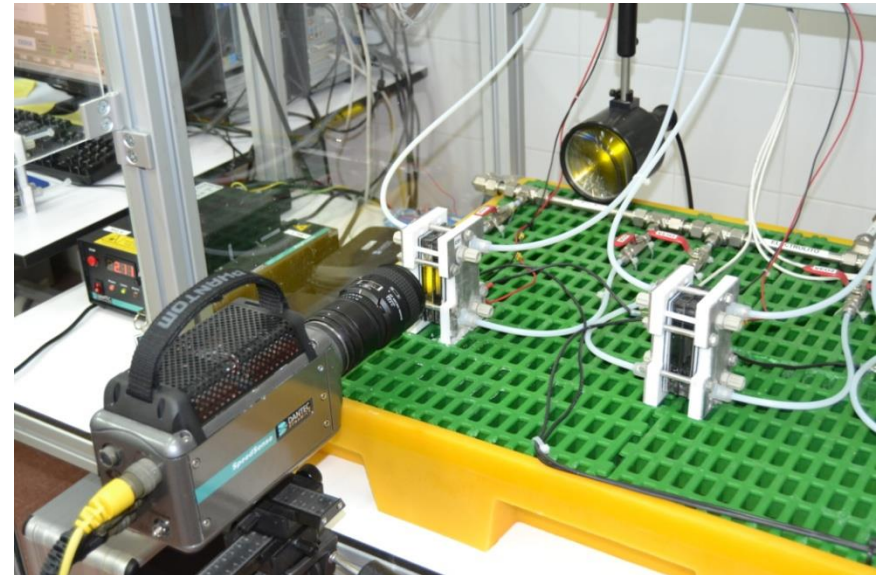
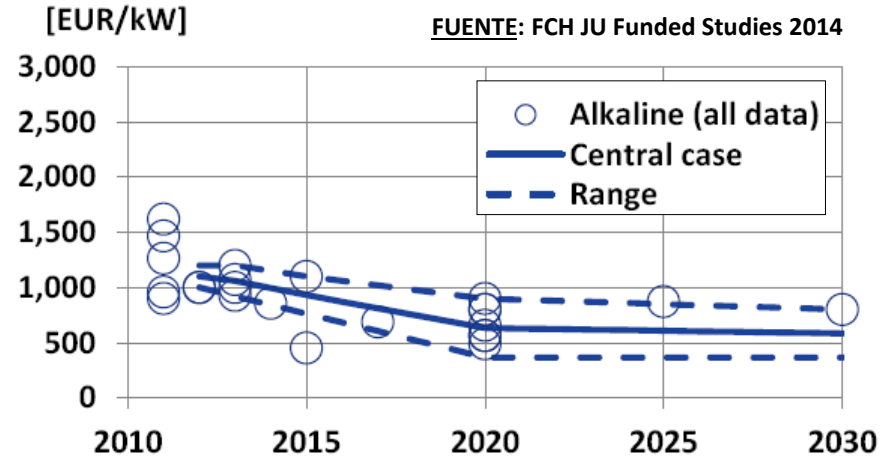
4. ELECTRÓLISIS ALCALINA



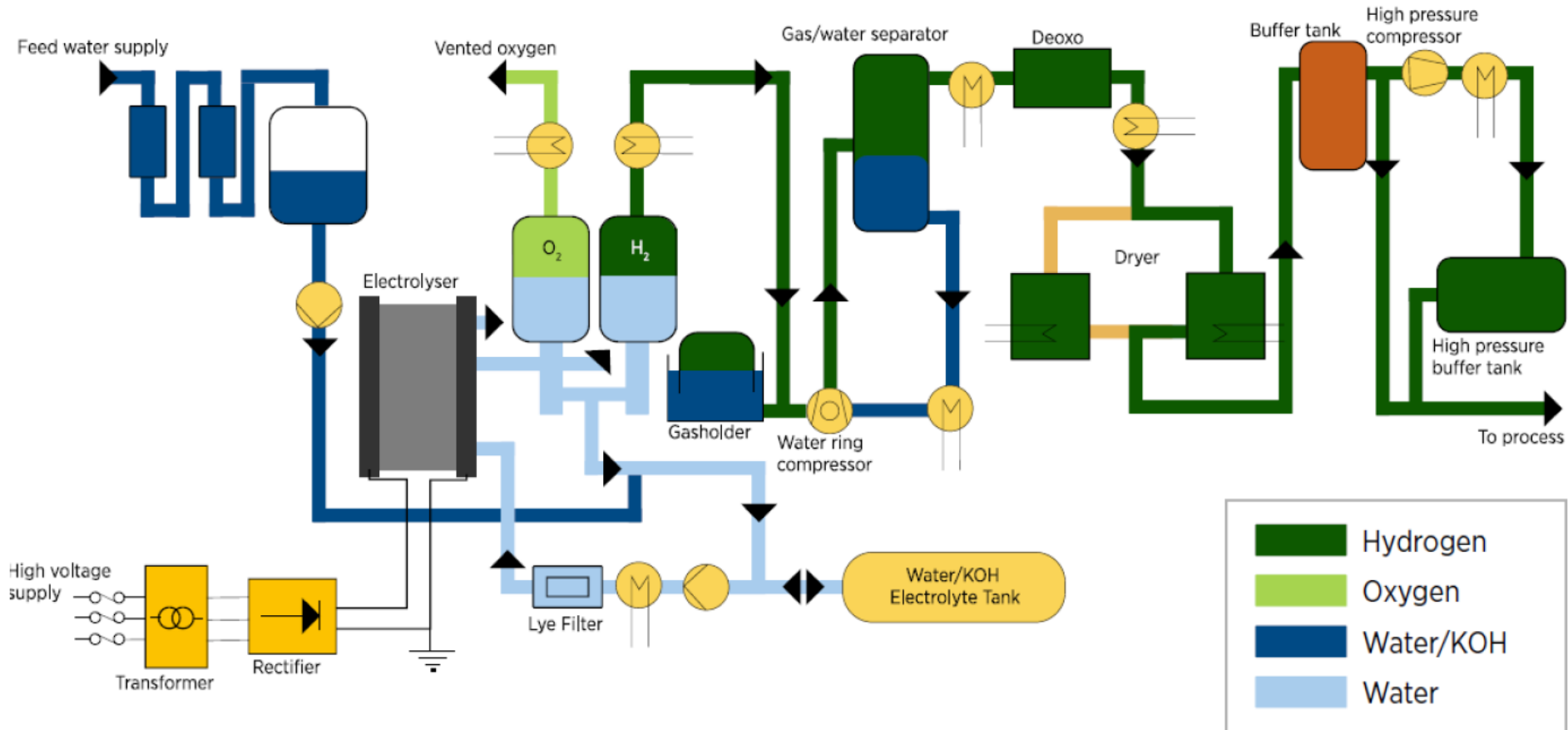
Desarrollo y Retos Futuros

- Desarrollo de materiales avanzados para **mejorar la actividad catalítica** de los electrodos.
- Optimización del **diseño y espacio entre electrodos** para reducir sobrepotenciales y aumentar la densidad de corriente.
- Desarrollo de **membranas de intercambio aniónico (AEM)**, como separadores en celdas de electrólisis, eliminando de este modo el uso de un electrolito líquido y reduciendo la difusión de gases entre cátodo y ánodo.

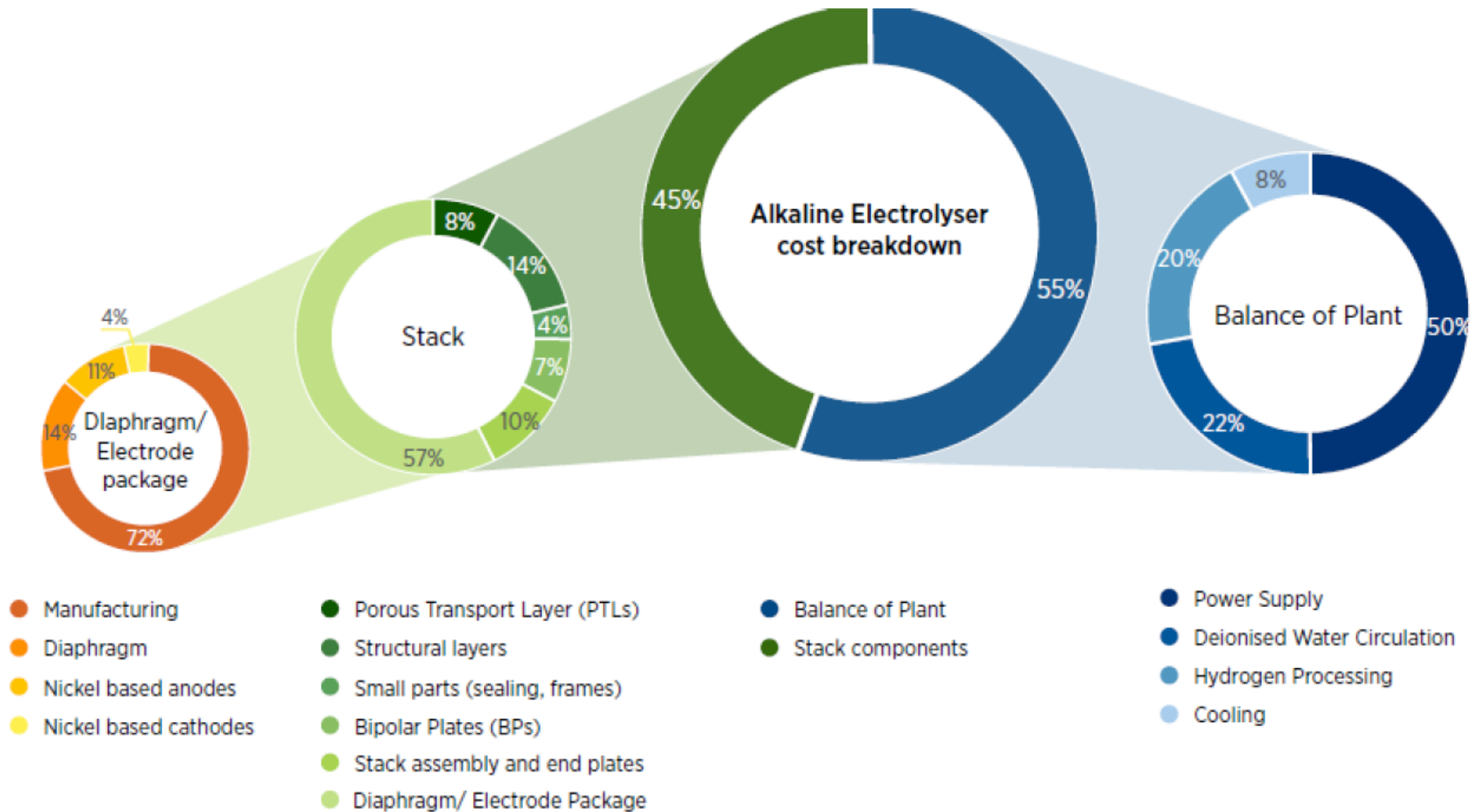
**LABORATORIO DE ELECTRÓLISIS
ALCALINA (CNH2)**



4. ELECTRÓLISIS ALCALINA



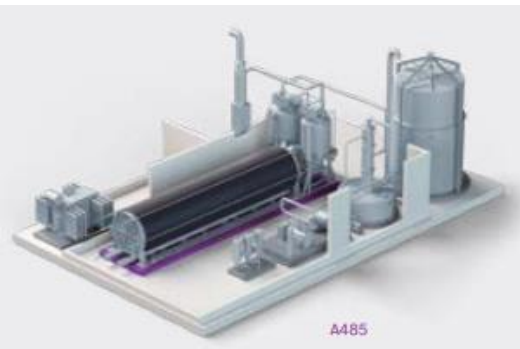
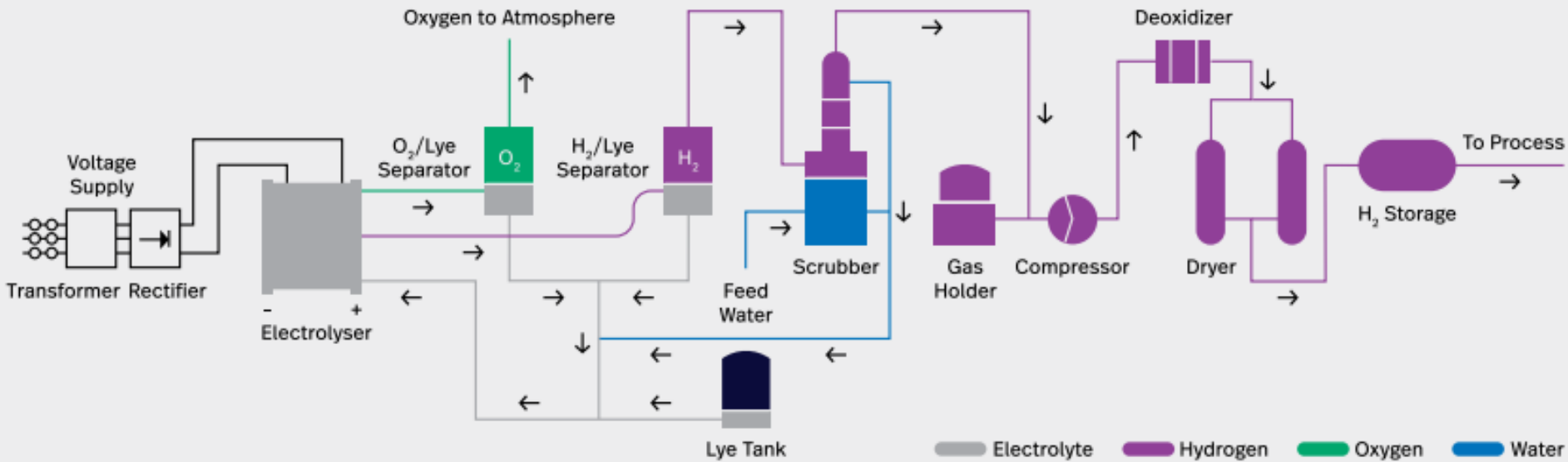
4. ELECTRÓLISIS ALCALINA



4. ELECTRÓLISIS ALCALINA

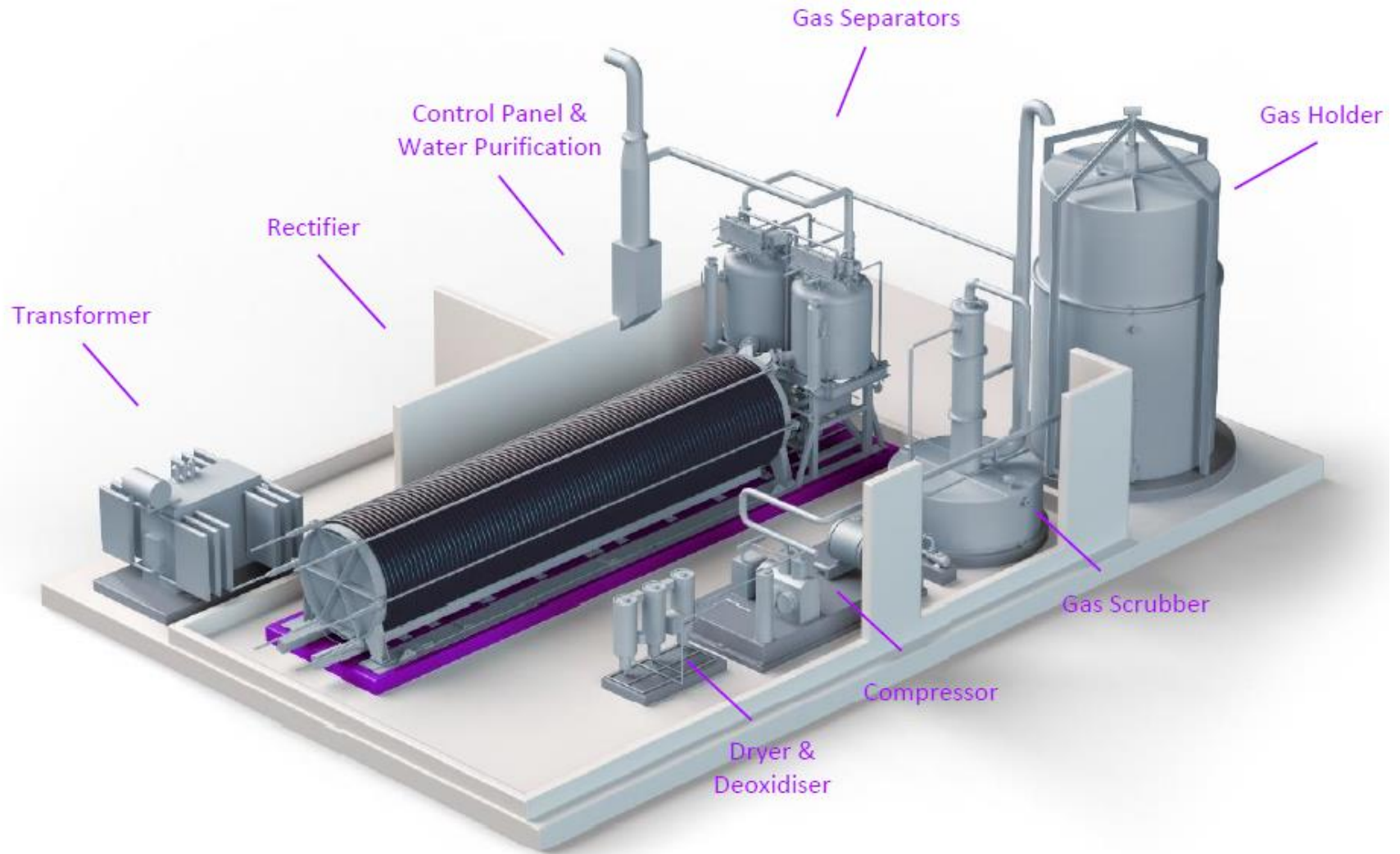


Electrolysis is the process of splitting the water molecule into hydrogen and oxygen using electricity. The inputs to this process are simply feed water and the current supplied to the electrolyser.

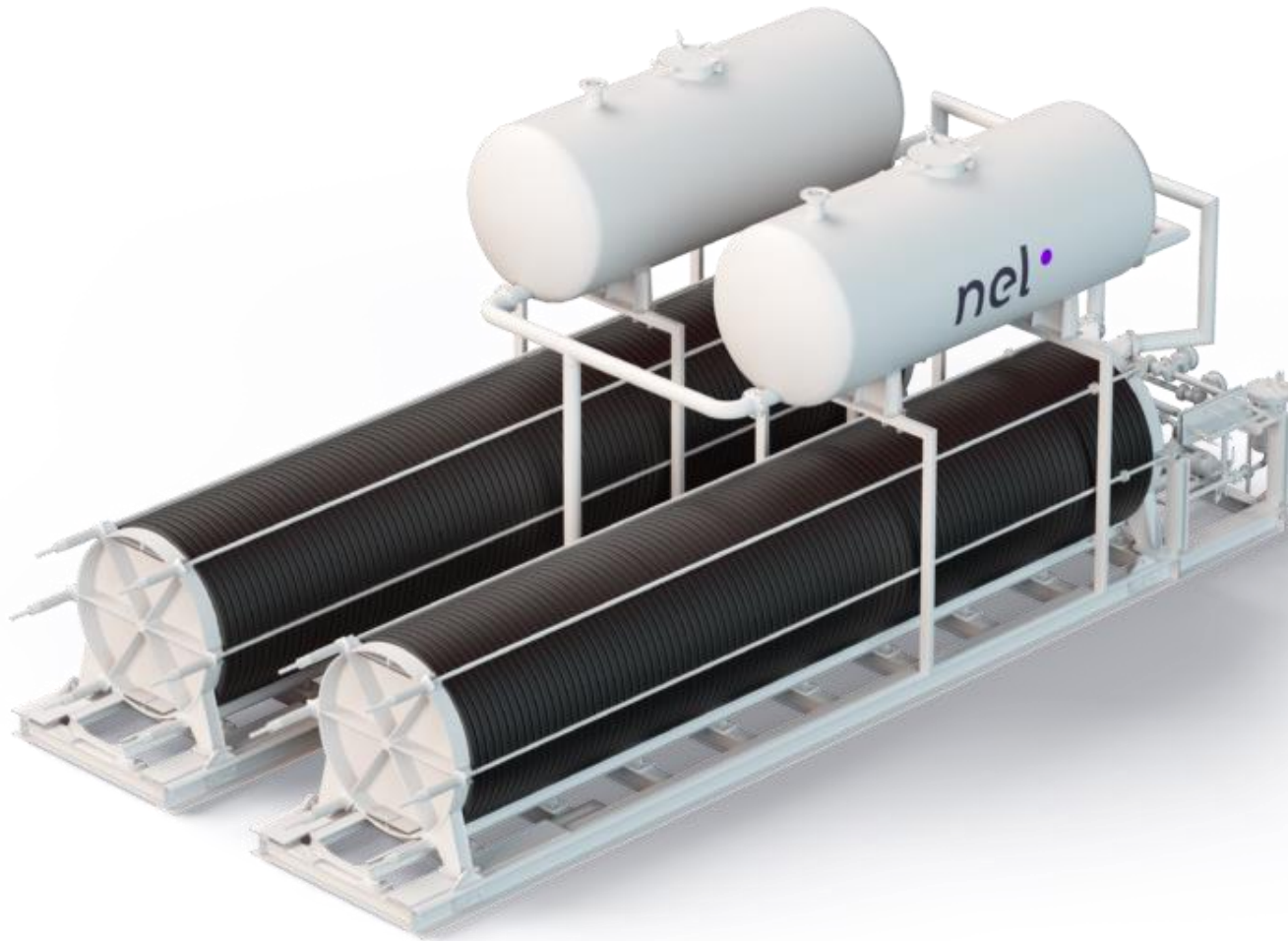


**ELECTROLIZADOR ALCALINO.
SOLUCION CONTAINER Y NAVE
INDUSTRIAL.
POTENCIAS DE 1 HASTA 400 MW.
COSTE: 0,8-0,9 MILLONES €/MW. 1 MW
– 400 kg/día.**

4. ELECTRÓLISIS ALCALINA



4. ELECTRÓLISIS ALCALINA



4. ELECTRÓLISIS ALCALINA



4. ELECTRÓLISIS ALCALINA



Project develop.: 400MW renewable H2 plant to outcompete natural gas reforming

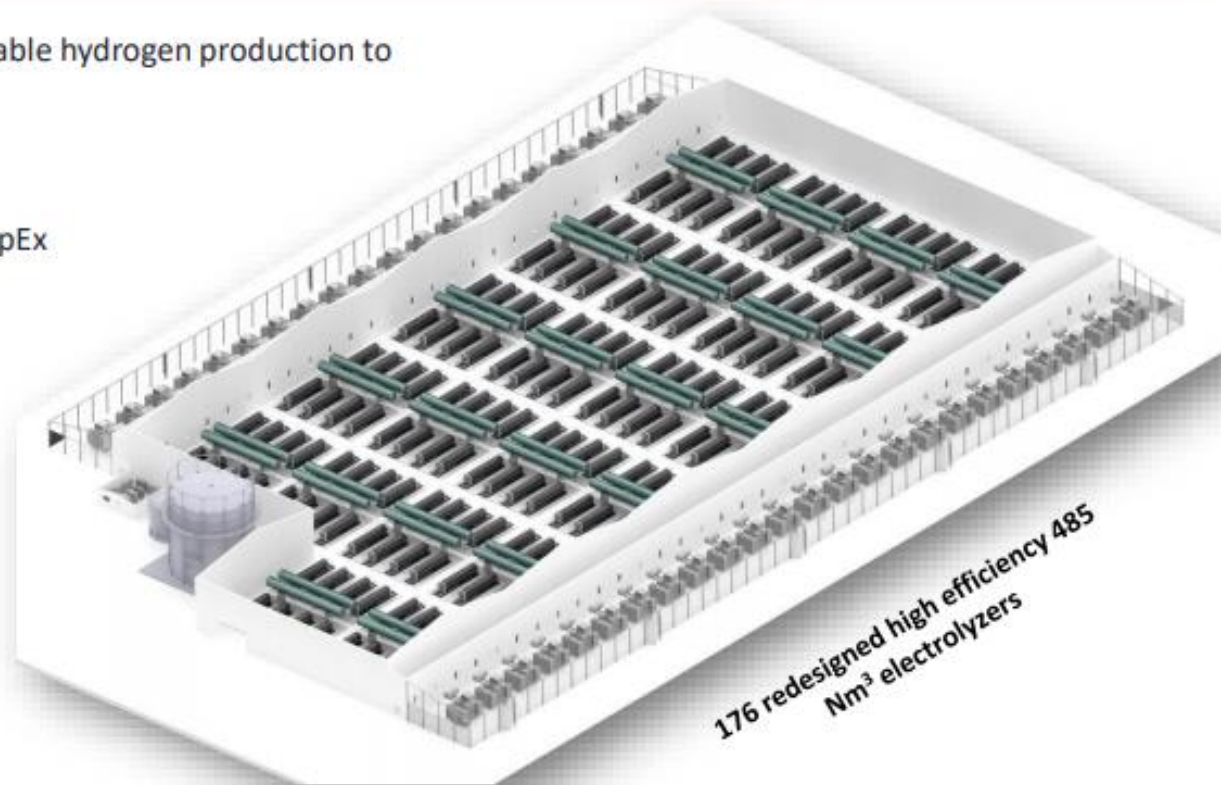
General market update

- Progressing on mega scale concept for renewable hydrogen production to **outcompete** natural gas reforming
- International industrial client
- Have developed “cluster design” to reduce CapEx

8-Cluster Electrolyzer



- Benchmark CapEx ratio:
 - 450 \$/kW



4. ELECTRÓLISIS ALCALINA



Net Production Rate	50-150 Nm ³ /h	150-300 Nm ³ /h	300-485 Nm ³ /h	600-970 Nm ³ /h	2400-3880 Nm ³ /h
Production Capacity Dynamic Range	15-100% of flow range	15-100% of flow range	15-100% of flow range	15-100% of flow range	15-100% of flow range
Power Consumption at Stack	3.8-4.4 kWh/Nm ³	3.8-4.4 kWh/Nm ³	3.8-4.4 kWh/Nm ³	3.8-4.4 kWh/Nm ³	3.8-4.4 kWh/Nm ³
H ₂ Purity	99.9 ± 0.1 %	99.9 ± 0.1 %	99.9 ± 0.1 %	99.9 ± 0.1 %	99.9 ± 0.1 %
H ₂ Purity (with Optional Purification)	99.99-99.999 %	99.99-99.999 %	99.99-99.999 %	99.99-99.999 %	99.99-99.999 %
O ₂ -Content in H ₂	< 2 ppm v	< 2 ppm v	< 2 ppm v	< 2 ppm v	< 2 ppm v
H ₂ O-Content in H ₂	< 2 ppm v	< 2 ppm v	< 2 ppm v	< 2 ppm v	< 2 ppm v
O ₂ Purity	99.5 ± 0.2 %	99.5 ± 0.2 %	99.5 ± 0.2 %	99.5 ± 0.2 %	99.5 ± 0.2 %
Delivery Pressure	1-200 barg	1-200 barg	1-200 barg	1-200 barg	1-200 barg
Dimensions	~150m ²	~200m ²	~225m ²	~350m ²	~770m ²
Ambient Temperature	5-35° C (41-95° F)	5-35° C (41-95° F)	5-35° C (41-95° F)	5-35° C (41-95° F)	5-35° C (41-95° F)
Electrolyte	25% KOH Aqueous Solution	25% KOH Aqueous Solution	25% KOH Aqueous Solution	25% KOH Aqueous Solution	25% KOH Aqueous Solution



4. ELECTRÓLISIS ALCALINA



2.7.3 Design Codes and Standards

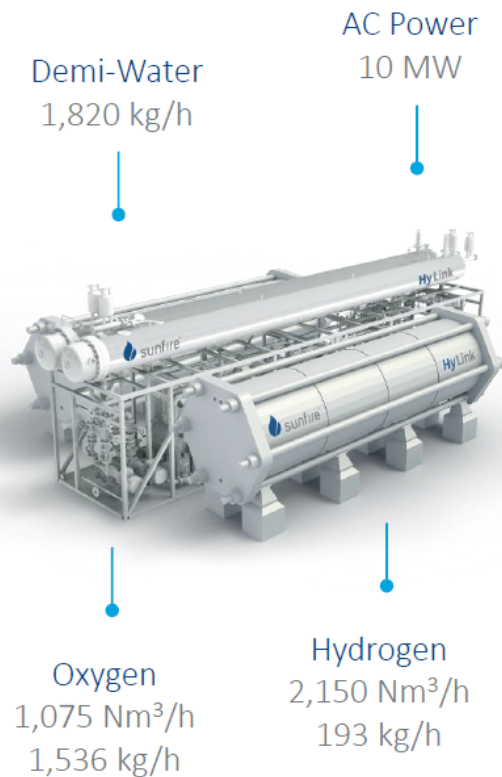
Nel AC150 is CE-marked and designed to meet all relevant requirements related to the European Directives as follows:

- PED 97/23/EC
- Merkblätter 2000
- Machinery Safety Directive 2006/42/EC
- EMC 2014/108/EC
- ATEX 2014/34/EC

4. ELECTRÓLISIS ALCALINA



Performance under pressure



Hydrogen production

Production capacity dynamic range	15 ... 100 %
Delivery pressure	5 ... 30 bar(g) without additional compression
Hydrogen purity	> 99.6 % before gas cleaning ¹⁾
Operating temperature	up to 85 °C

Power input and electrical efficiency

Specific power consumption at system level (AC)	4.7 kWh/Nm ³
System electrical efficiency ²⁾	64 %

Feedstock

Electrolyte	30 % KOH aqueous solution
-------------	---------------------------

Other specs

Proven system runtime	> 30 years
Stack lifetime	> 90,000 h
Footprint ³⁾	~ 600 m ²
Ambient temperature	5 ... 40 °C

1) Up to 99.999% after gas cleaning 2) Lower heating value of hydrogen referred to AC power input

3) Average space requirement for a 10 MW system comprising all auxiliary systems

ÍNDICE

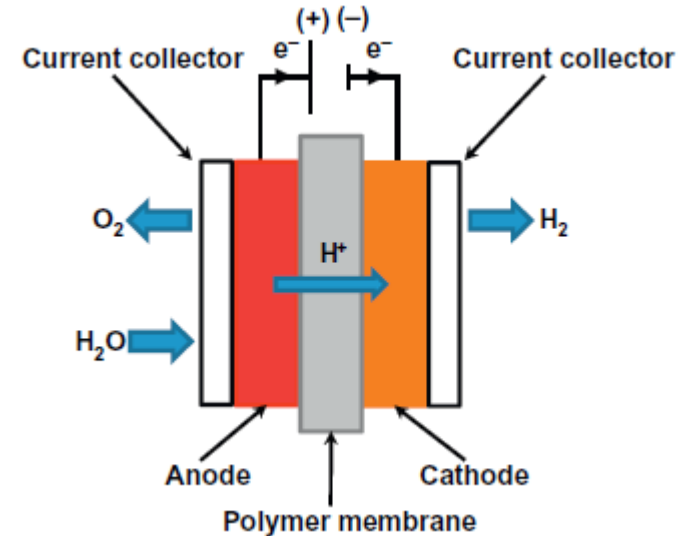
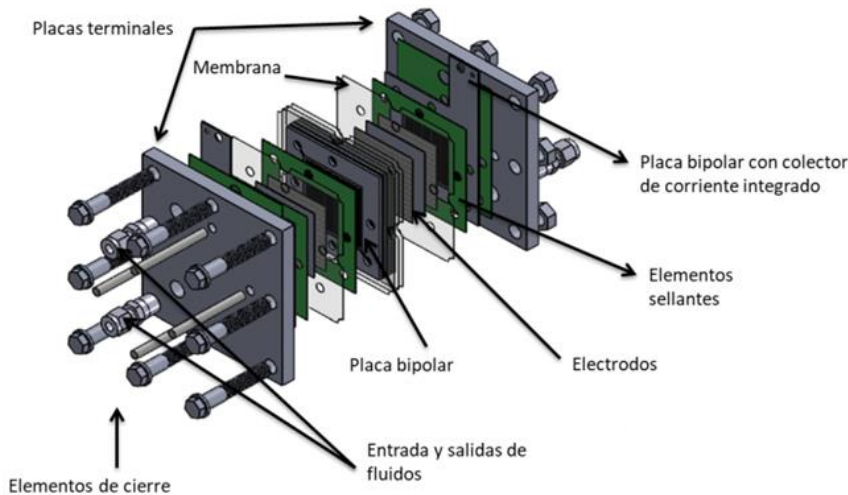
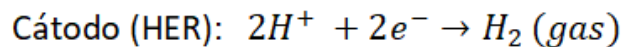
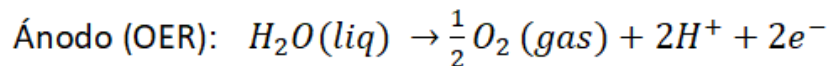
1. **HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO**
2. **MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO**
3. **FUNDAMENTOS DE LA ELECTRÓLISIS**
4. **ELECTRÓLISIS ALCALINA**
5. **ELECTRÓLISIS PEM**
6. ELECTRÓLISIS DE ALTA TEMPERATURA
7. SISTEMAS COMERCIALES ELECTROLISIS
8. COSTES DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO
9. NORMATIVA AMBIENTAL

5. ELECTRÓLISIS PEM



Funcionamiento y Diseño

La **electrólisis PEM** consiste en usar un electrolito polimérico sólido, que funciona como separador de gases y como membrana, permitiendo la migración de los protones (H^+) a través de la misma.



MEMBRANA

Elemento central de la celda. Se encuentra ensamblada junto con los electrodos para conformar la MEA. Las membranas de Nafion® son las más utilizadas

ELECTRODO (capa catalítica)

Se requieren metales preciosos como catalizador.
Cátodo: Ti + Pt; Ánodo: Ti + Ir, Ru

PLACAS BIPOLARES

Se encargan de hacer llegar el agua a los puntos de reacción y extraer el gas generado en la celda

5. ELECTRÓLISIS PEM



Principales Características

- **Condiciones de operación:** temperatura 40-80°C; presión ≈ 30 bar; eficiencia 70-80%; densidad corriente ≤ 2 A/cm²; costes 1500-2000 €/kW; consumo energético ≈ 4.5 kWh/Nm³
- Utilizan una membrana de intercambio protónico (PEM), lo que **evita utilizar un electrolito corrosivo** como ocurre en electrólisis alcalina.
- Permite trabajar **a altas densidades de corriente**.
- Presenta **dinámicas más rápidas** que los electrolizadores alcalinos, por lo que pueden ser integrados más fácilmente con energías altamente fluctuantes, como las renovables.
- El hidrógeno producido es de **alta pureza** y puede ser producido a alta presión en el propio electrolizador.
- Se trata de una tecnología disponible en el mercado con **eficiencias mayores** que el resto de tecnologías en desarrollo.

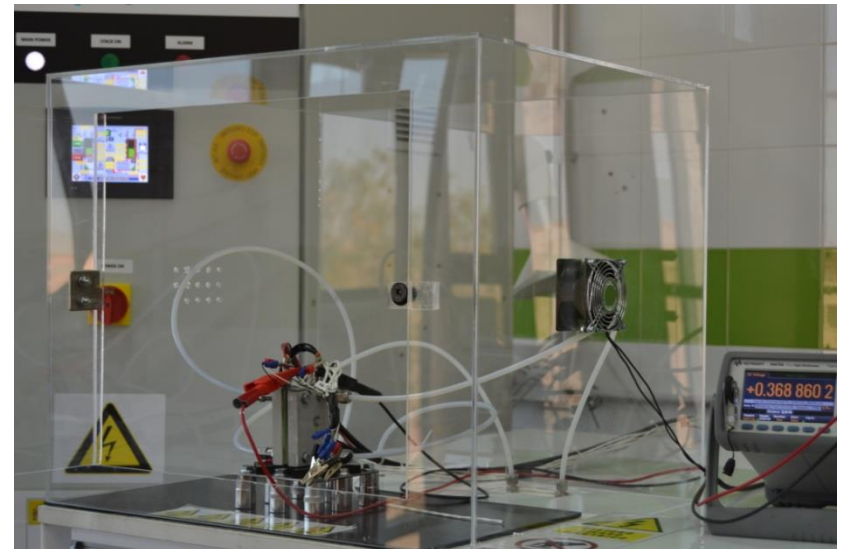
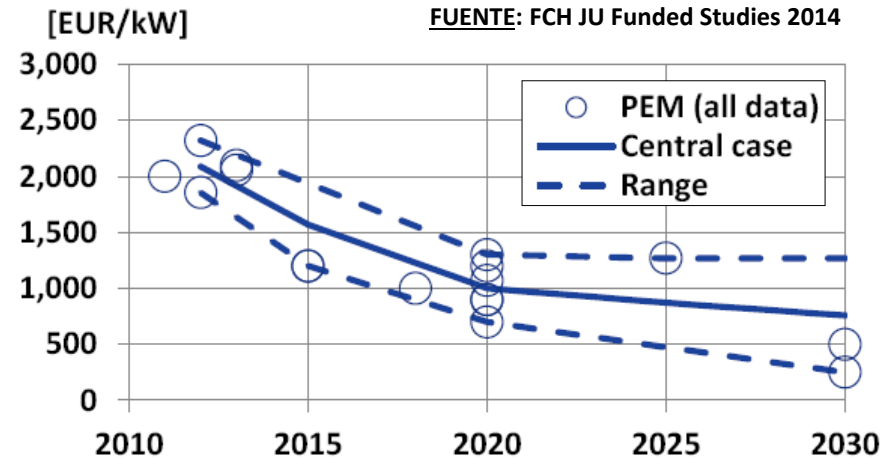
5. ELECTRÓLISIS PEM



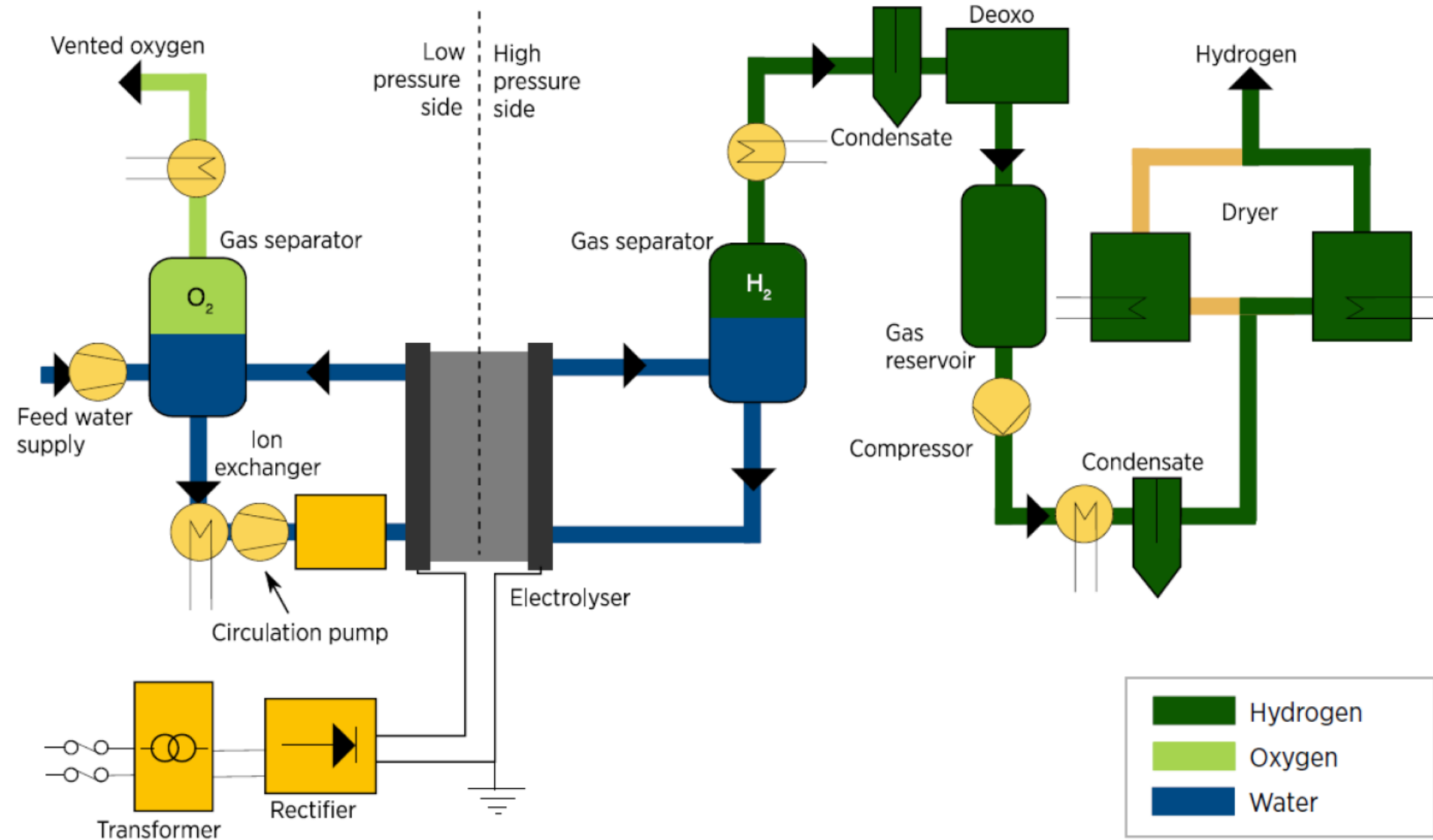
Desarrollo y Retos Futuros

- Presenta **altos costes de inversión**, por el uso de metales preciosos y de materiales capaces de resistir el medio ácido que se produce en una celda de electrólisis PEM.
- Reducción de los **procesos de degradación** que se producen, principalmente en la capa catalítica y en la membrana. Ratios de degradación actuales de hasta 8 $\mu\text{V}/\text{h}$.
- Aumento de la **durabilidad de los equipos** comerciales (actualmente en torno a las 60.000 h de operación).

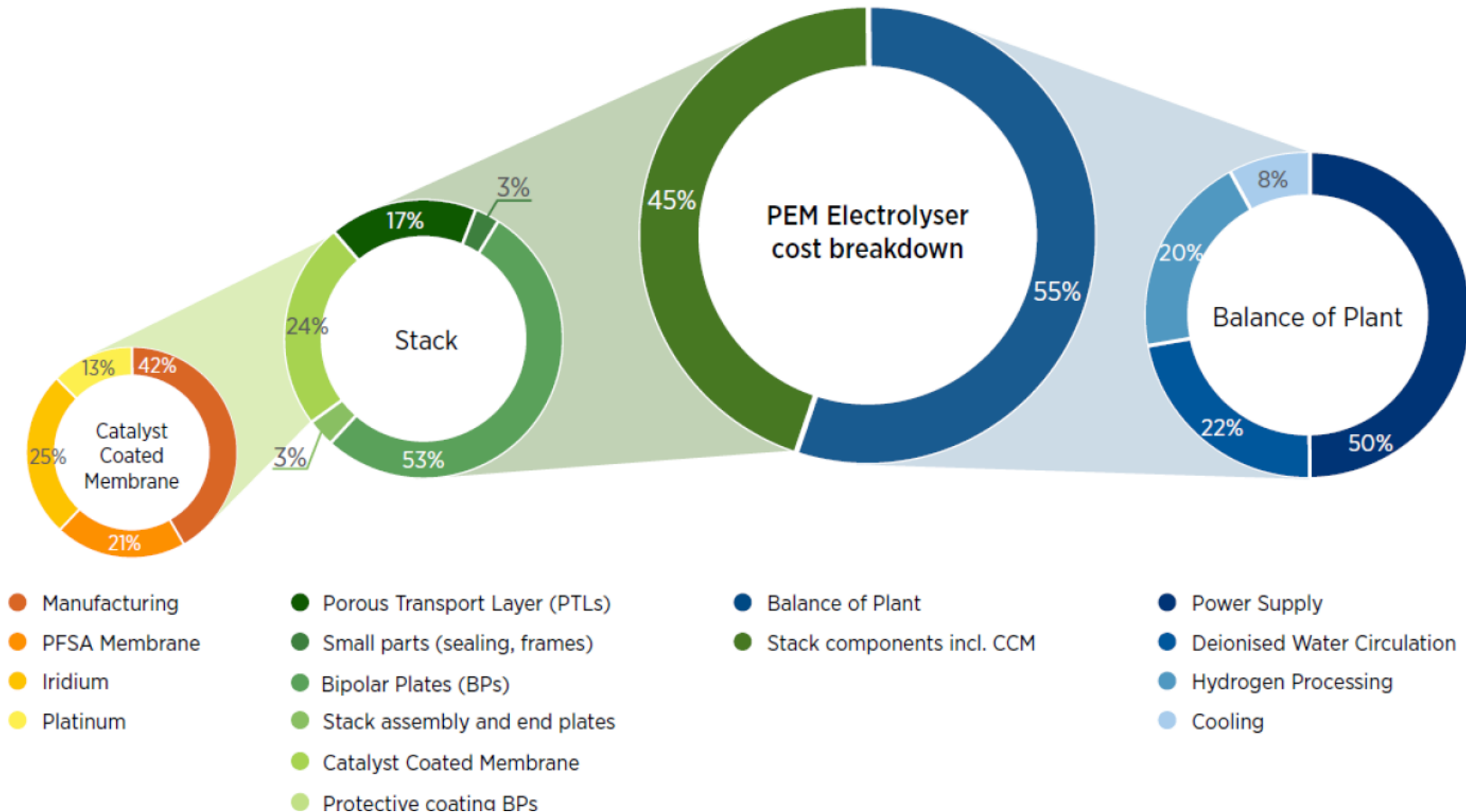
**LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN Y
ESCALADO DE TECNOLOGÍA PEM (CNH2)**



5. ELECTRÓLISIS PEM



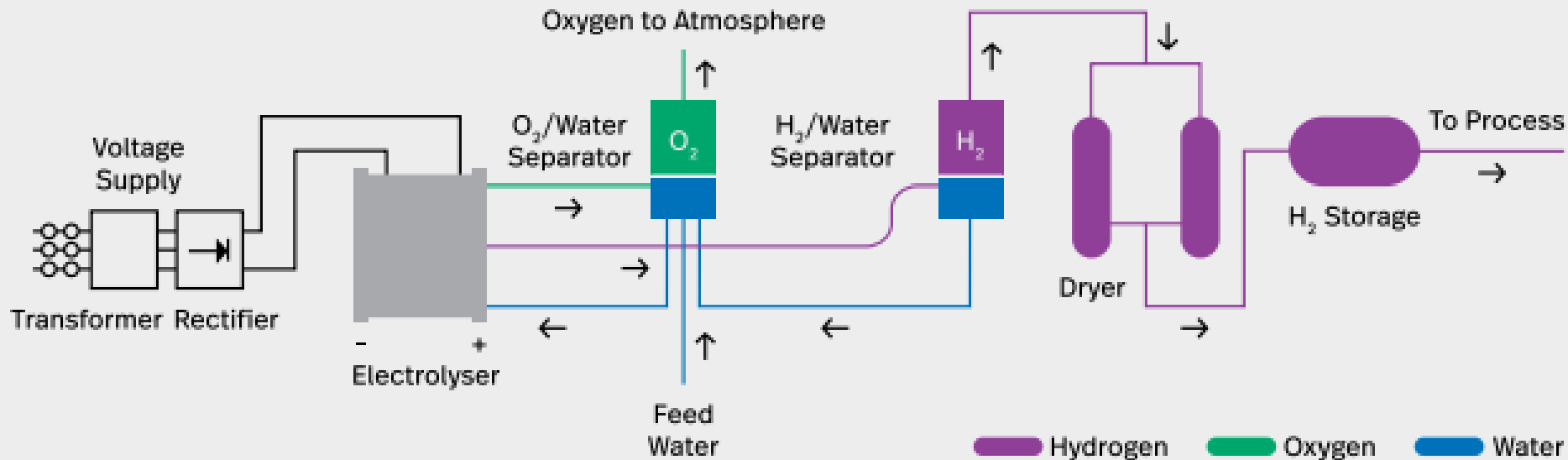
5. ELECTRÓLISIS PEM



5. ELECTRÓLISIS PEM



Electrolysis is the process of splitting the water molecule into hydrogen and oxygen using electricity. The inputs to this process are simply feed water and the current supplied to the electrolyser.



**ELECTROLIZADOR POLIMERICO.
SOLUCION CONTAINER Y NAVE
INDUSTRIAL.
POTENCIAS DE 1 HASTA 400 MW.
COSTE: 1,2 – 1,4 MILLONES €/MW. 1 MW
– 400 kg/día.**

5. ELECTRÓLISIS PEM



Source: NEL HYDROGEN.

5. ELECTRÓLISIS PEM



SPECIFICATIONS	MC100	MC200	MC400
Capacity per Unit	103 Nm ³ /h	207 Nm ³ /h	413 Nm ³ /h
Production Capacity Dynamic Range	10-100%	10-100%	10-100%
Average Power Consumption at Stack ¹	4.53 kWh/Nm ³	4.53 kWh/Nm ³	4.53 kWh/Nm ³
Purity – with optional high purity dryer	99.9998%	99.9998%	99.9998%
O ₂ -Content in H ₂	< 1 ppm v	< 1 ppm v	< 1 ppm v
H ₂ O-Content in H ₂	< 2 ppm v	< 2 ppm v	< 2 ppm v
Outlet Pressure	30 barg	30 barg	30 barg
Dimensions			
Footprint	NA	NA	NA
Rectifier Transformer Area – W x D x H	3.5 m x 3 m x 3 m	3.5 m x 3 m x 3 m	4 m x 3.5 m x 3.5 m
Electrolyser Container – W x D x H	12.2 m x 2.5 m x 3 m	12.2 m x 2.5 m x 3 m	12.2 m x 2.5 m x 3 m
Power Supply Container – W x D x H	12.2 m x 2.5 m x 3 m	12.2 m x 2.5 m x 3 m	12.2 m x 2.5 m x 3 m
Ambient Temperature ²	5-40° C	5-40° C	5-40° C
Electrolyte	Proton Exchange Membrane	Proton Exchange Membrane	Proton Exchange Membrane
Feed Water Consumption	0.9 l/Nm ³	0.9 l/Nm ³	0.9 l/Nm ³

For reference only – specifications are subject to change. Please contact Nel Hydrogen for solutions to best fit your needs.

M Series electrolyzers are available from 100-400 Nm³/h, in increments of 50 Nm³/h. Contact Nel Hydrogen for details.

¹ *Total power consumption will be higher and dependent upon system configuration.*

² *Additional cold ambient and high ambient temperature options available.*

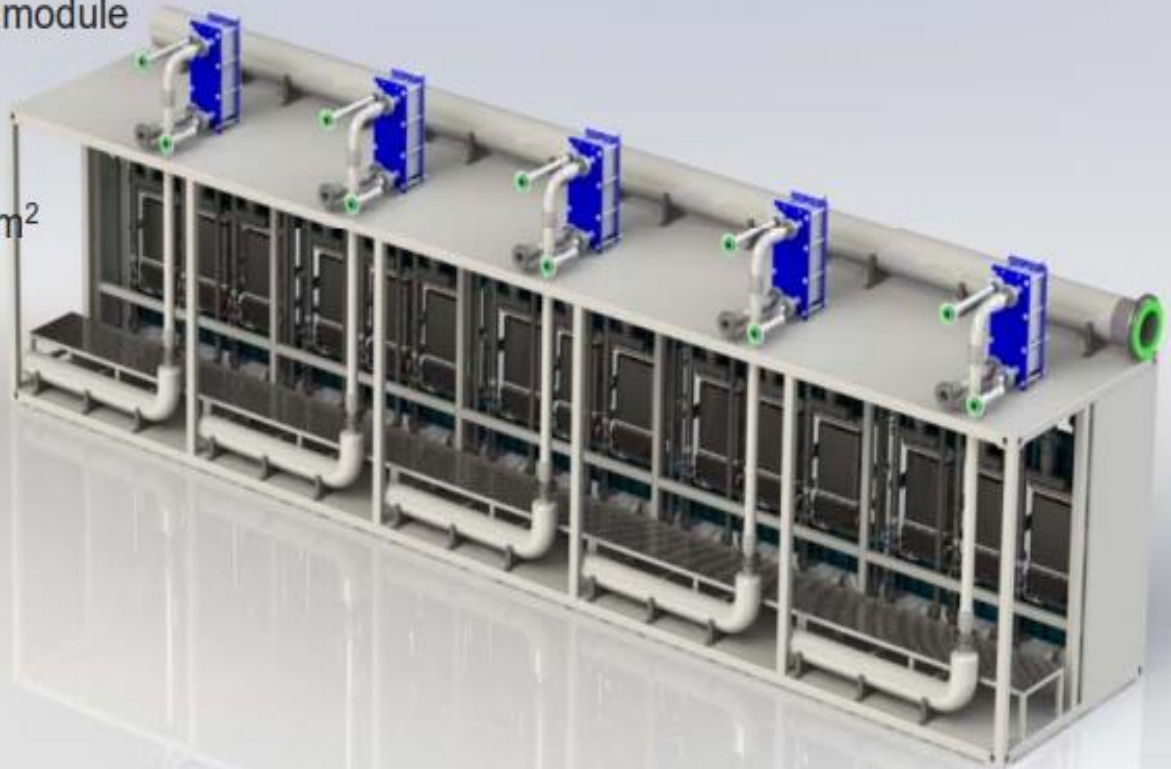
Source: NEL HYDROGEN.

5. ELECTRÓLISIS PEM



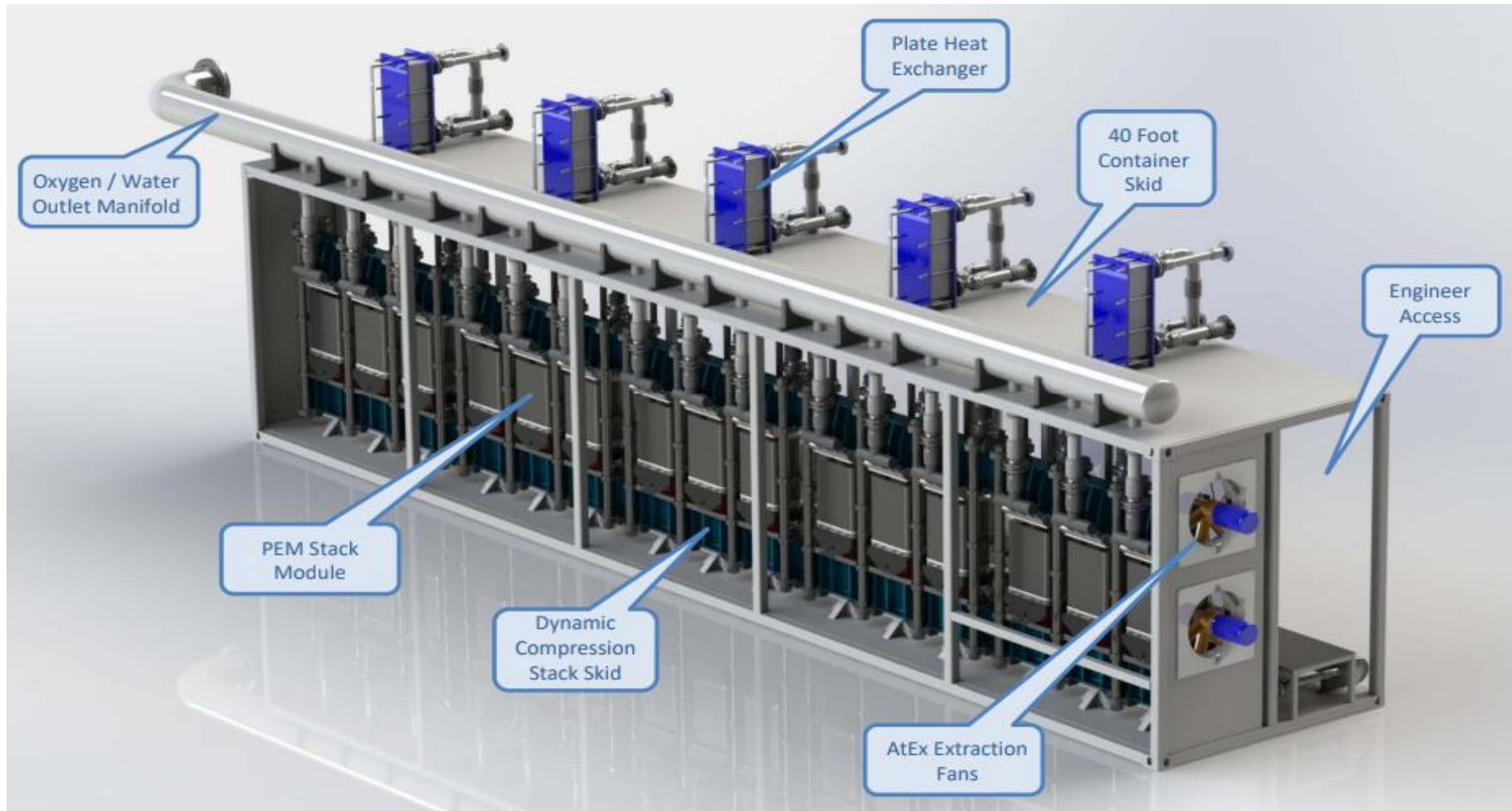
10MW stack skid

- 10MW stack skid in a 40 foot container
- Individual control of each 2MW module
- Waste heat recovery option
- Integrated ventilation strategy
- Energy density of $>8,000\text{kWhr/m}^2$
(when run for 24 hrs)



Source: ITM.

5. ELECTRÓLISIS PEM



Source: ITM.

5. ELECTRÓLISIS PEM



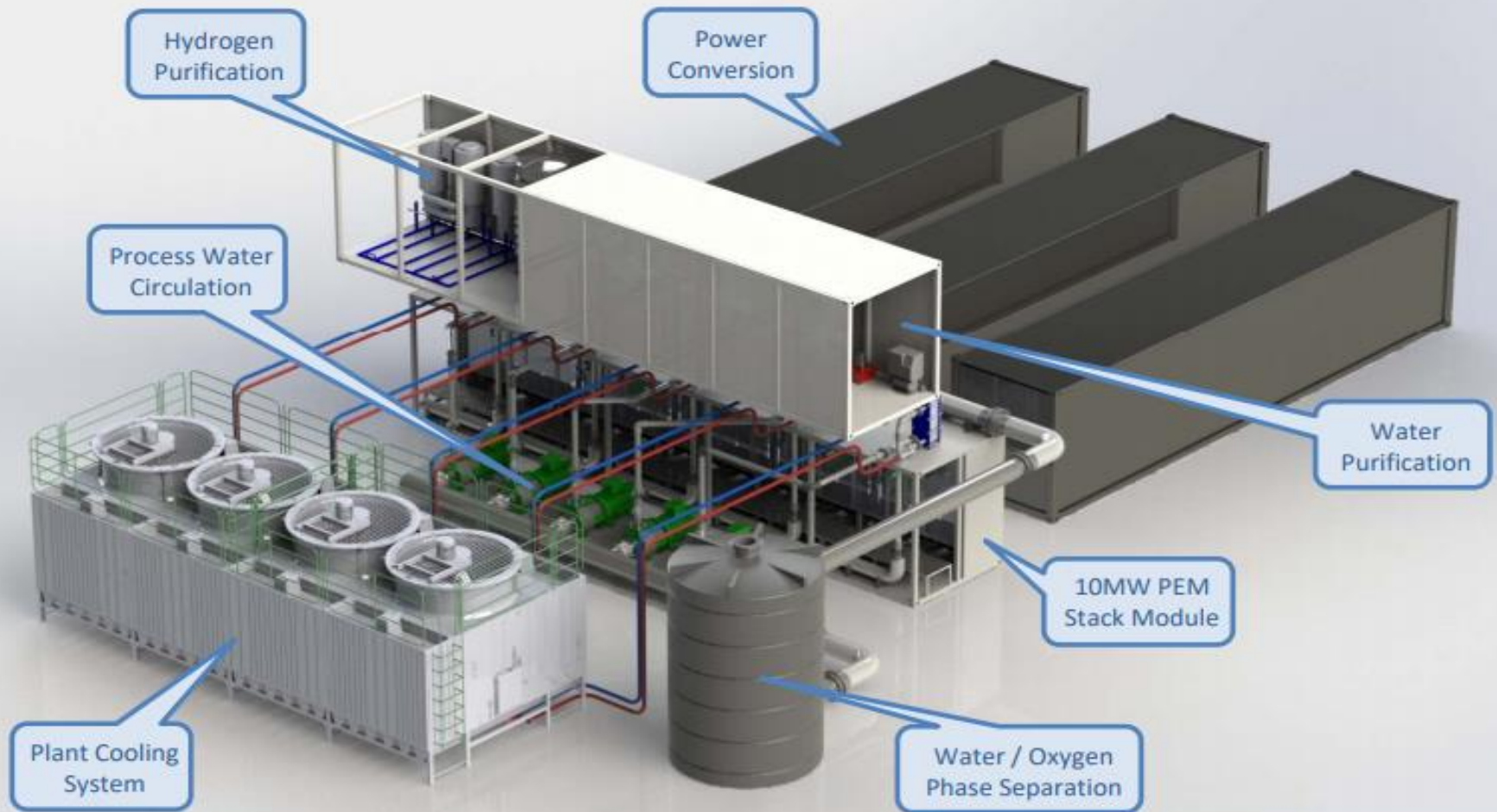
Purification module

- Packaged in 30 foot container frame
- Input water purification
- Output hydrogen purification
- Fuel cell grade hydrogen



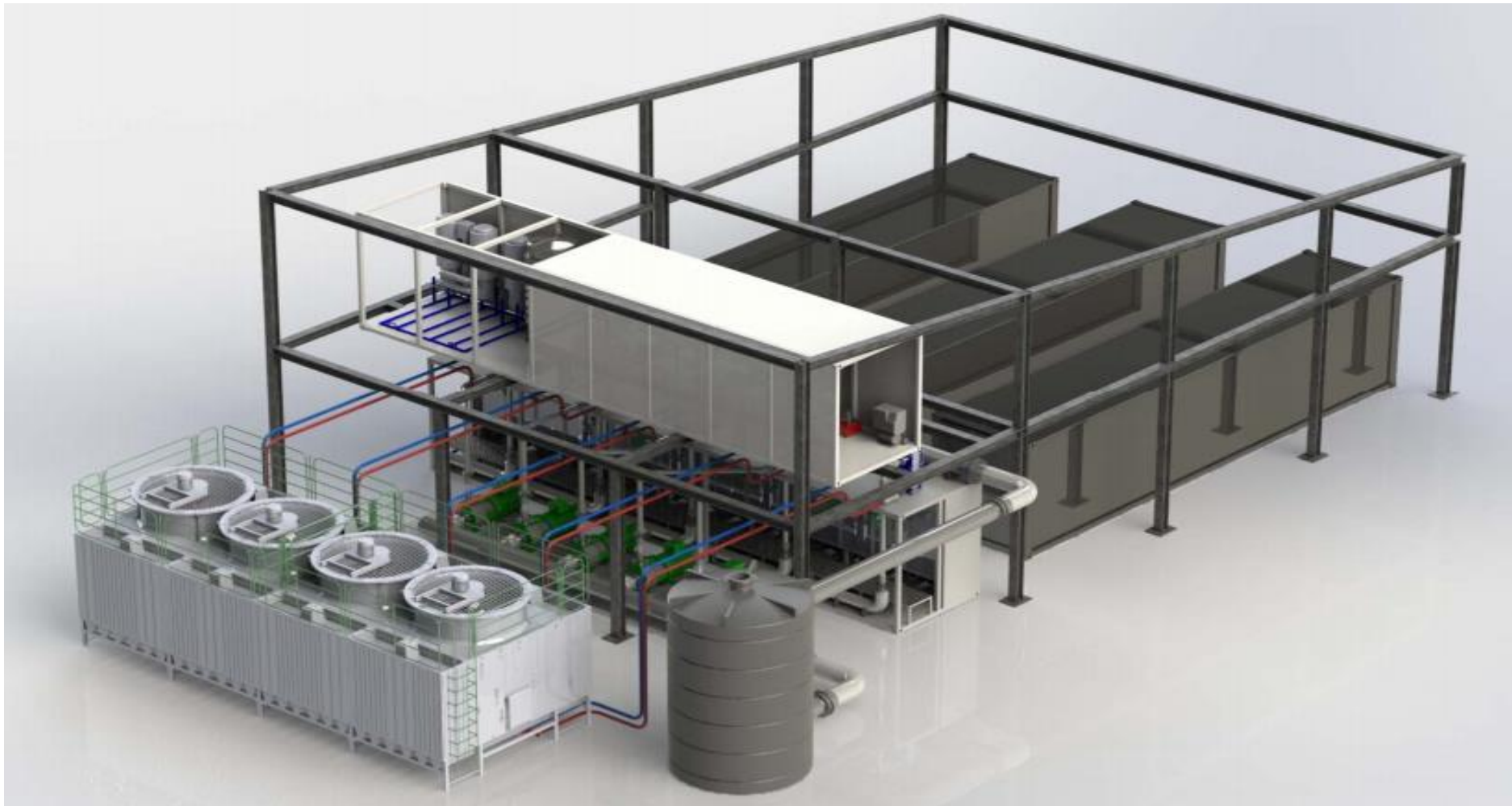
Source: ITM.

5. ELECTRÓLISIS PEM



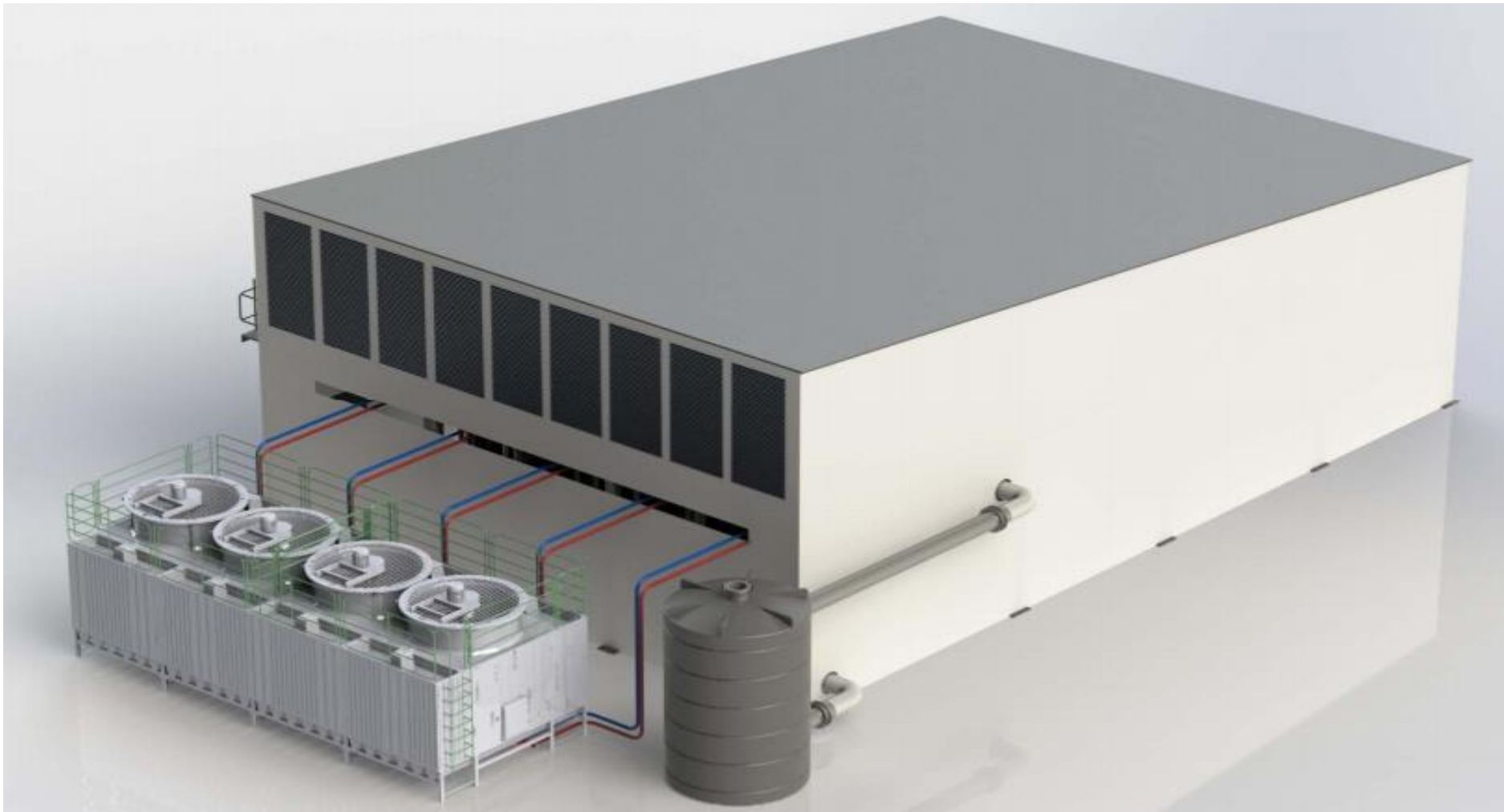
Source: ITM.

5. ELECTRÓLISIS PEM



Source: ITM.

5. ELECTRÓLISIS PEM



Source: ITM.

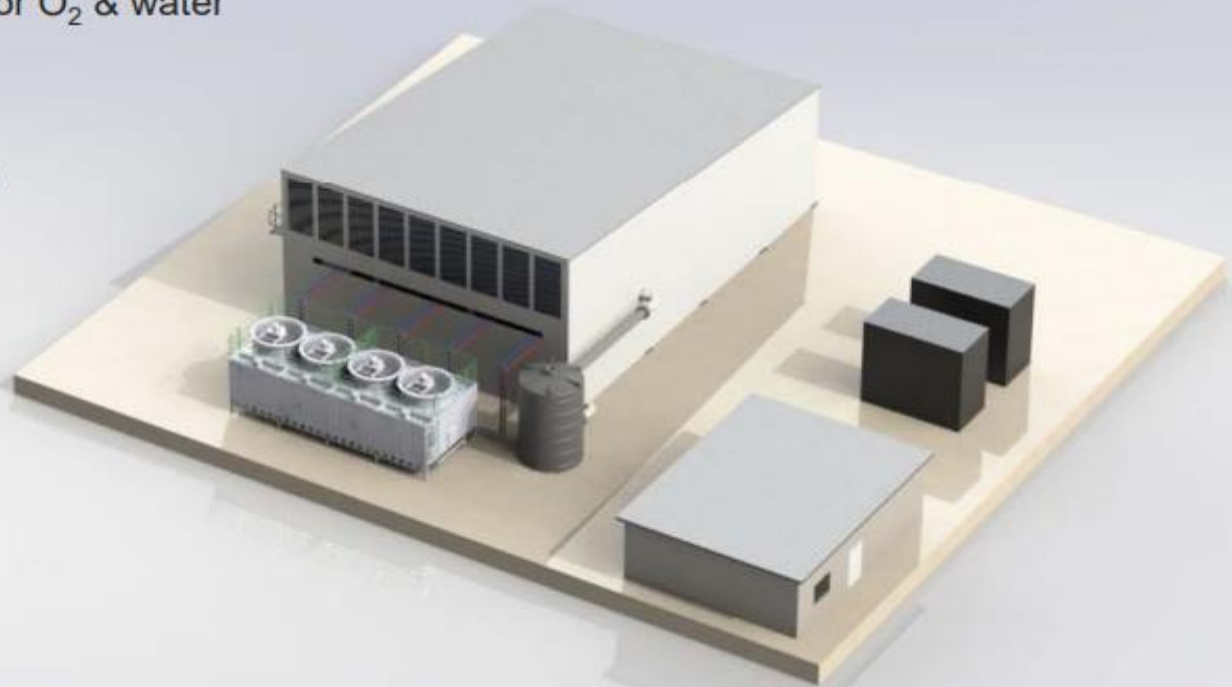
5. ELECTRÓLISIS PEM



10MW MODULE

Fully integrated | drop in BoP

- Low cost building
 - Polymer fusion welded pipes for O₂ & water
 - Minimised cable runs
 - Integrated heat recovery
 - Compact | modular | low noise
 - Wide capacity offering
 - Industrial scale
-
- 20 x 14m building



Source: ITM.

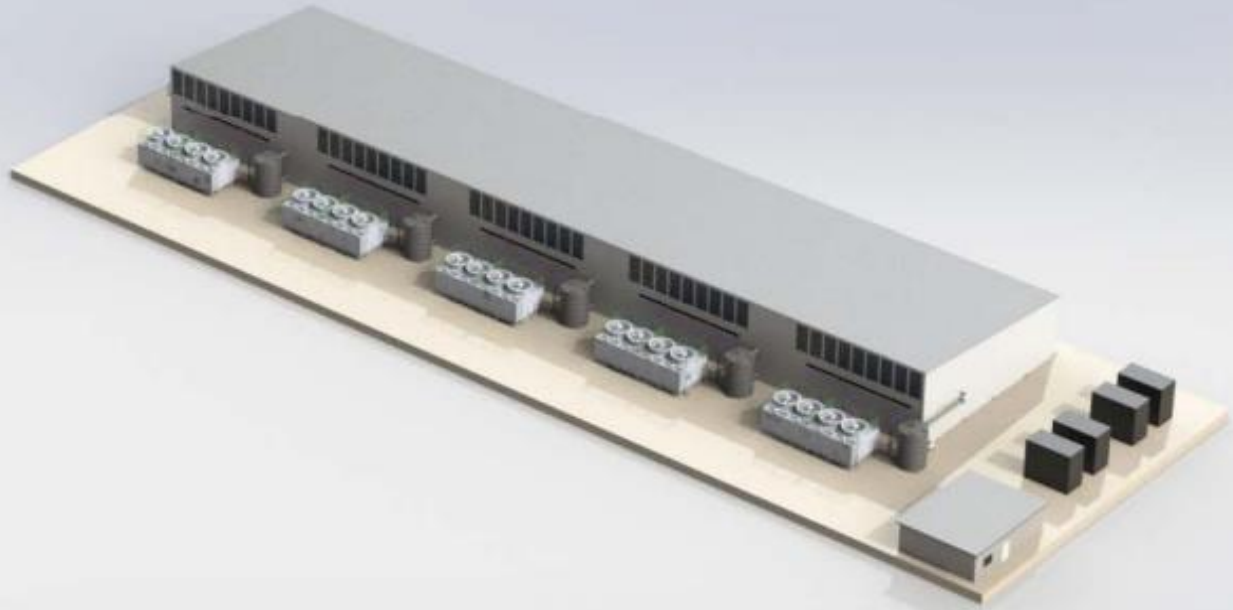
5. ELECTRÓLISIS PEM



50MW SYSTEM

Scale up through replication

- Replication maintains standardisation
- Multiple layout options to suit different sites
- 20 x 87m building



Source: ITM.

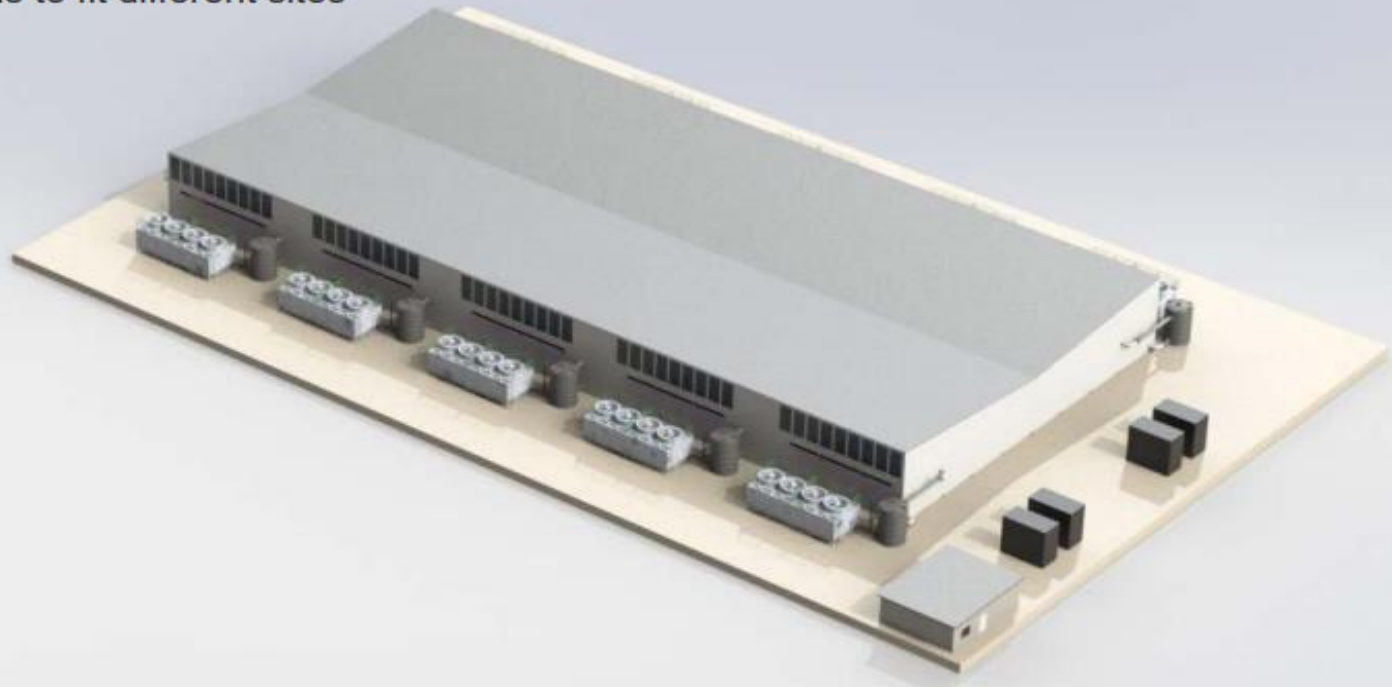
5. ELECTRÓLISIS PEM



100MW SYSTEM

Scale up through replication

- Replication maintains standardisation
- Multiple layout options to fit different sites
- 40 x 87m building



Source: ITM.

5. ELECTRÓLISIS PEM



Directives	Name / Information
Pressure Equipment Directive 2014/68/EU	DIRECTIVE 2014/68/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 15 May 2014 on the harmonization of the laws of the member states about the provision of imprints on the market.
Machinery Directive 2006/42/EG	DIRECTIVE 2006/42/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 17 May 2006 on machinery, and amending Directive 95/16/EC
Low Voltage Directive 2014/35/EU	DIRECTIVE 2014/35/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 26 February 2014 on the harmonization of the laws of Member States
EMV Directive 2014/30/EU	DIRECTIVE 2014/30/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 26 February 2014 on the harmonization of the laws of the Member States relating to electromagnetic compatibility

Source: SIEMENS.

ÍNDICE

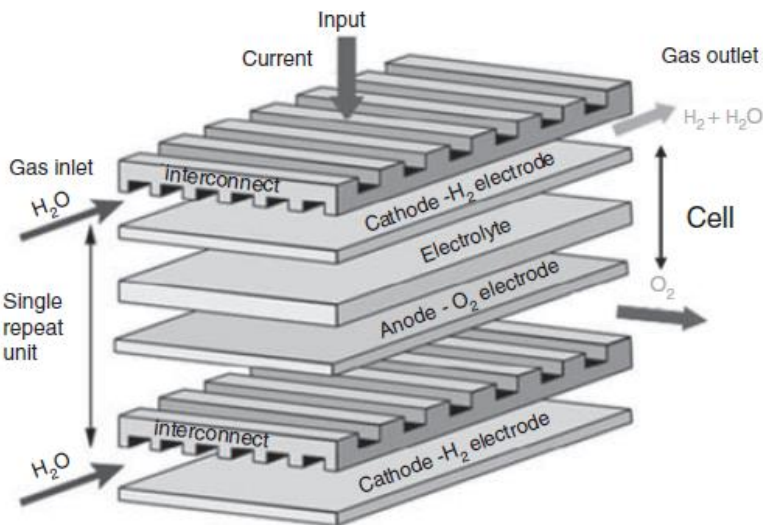
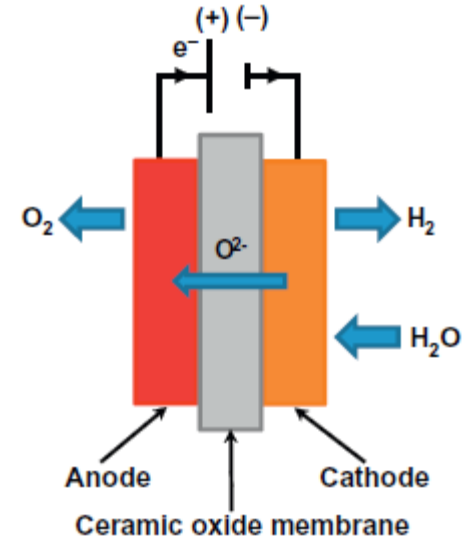
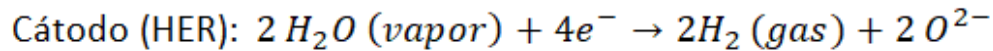
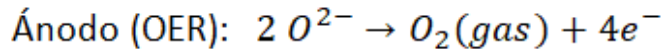
- 1. HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO**
- 2. MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO**
- 3. FUNDAMENTOS DE LA ELECTRÓLISIS**
- 4. ELECTRÓLISIS ALCALINA**
- 5. ELECTRÓLISIS PEM**
- 6. ELECTRÓLISIS DE ALTA TEMPERATURA**
7. SISTEMAS COMERCIALES ELECTROLISIS
8. COSTES DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO
9. NORMATIVA AMBIENTAL

6. ELECTRÓLISIS DE ALTA TEMPERATURA



Funcionamiento y Diseño

Una celda **SOEC** es similar una pila de combustible de óxido sólido (SOFC) que funciona en sentido inverso. El cátodo es alimentado con vapor de agua, que se reduce en H_2 y O^{2-} . Los iones O^{2-} migran al ánodo a través de un electrolito aniónico, para producir O_2 :



ELECTROLITO SÓLIDO (membrana cerámica)

Óxido de circonio estabilizado con óxido de itrio (YSZ)

ELECTRODOS

Materiales cerámicos porosos. Cátodo: Ni/YSZ;
Ánodo: óxidos mixtos con estructura tipo *perovskita*

INTERCONECTORES

Unen diferentes celdas. Sirven para conducir la corriente eléctrica y asegurar la distribución de gas

6. ELECTRÓLISIS DE ALTA TEMPERATURA



Principales Características

- Funcionan a **altas temperaturas** (600-1.000°C), lo que aumenta la eficiencia eléctrica del electrolizador.
- Emplea un **electrolito sólido** (como en la tecnología PEM) y al trabajar con vapor de agua se limitan los problemas asociados con la distribución líquido/gas.
- Se precisa disponer de **vapor de agua y una fuente térmica de alta temperatura** (nuclear, geotermia, concentración solar), lo que puede limitar las aplicaciones de esta tecnología.
- Se requiere el uso de **componentes resistentes a las altas temperaturas** que se producen en estos procesos, por lo que los materiales suelen ser cerámicos.
- La eficiencia general en SOEC puede ser mejorada mediante **procesos de co-electrólisis**.
- Gran potencial para utilizar **dispositivos reversibles** que puedan funcionar como pila de combustible (SOFC) y/o electrolizador (SOEC).

6. ELECTRÓLISIS DE ALTA TEMPERATURA



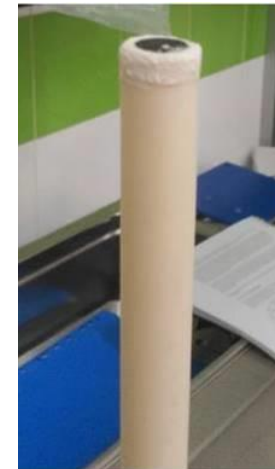
Desarrollo y Retos Futuros

- Es la tecnología de electrólisis menos desarrollada.
- El uso de altas temperaturas requiere **materiales más costosos y métodos de fabricación más complejos**.
- Los diferentes componentes de una celda SOEC pueden presentar **diferentes coeficientes de dilatación térmica**, por lo que los ciclos de apagado/encendido pueden ser perjudiciales para el contacto interfacial entre los electrodos y el electrolito.
- Para aumentar las propiedades de conducción, los diferentes componentes deben ser muy delgados, lo que los hace muy **frágiles**, dificultando así el ensamblaje.

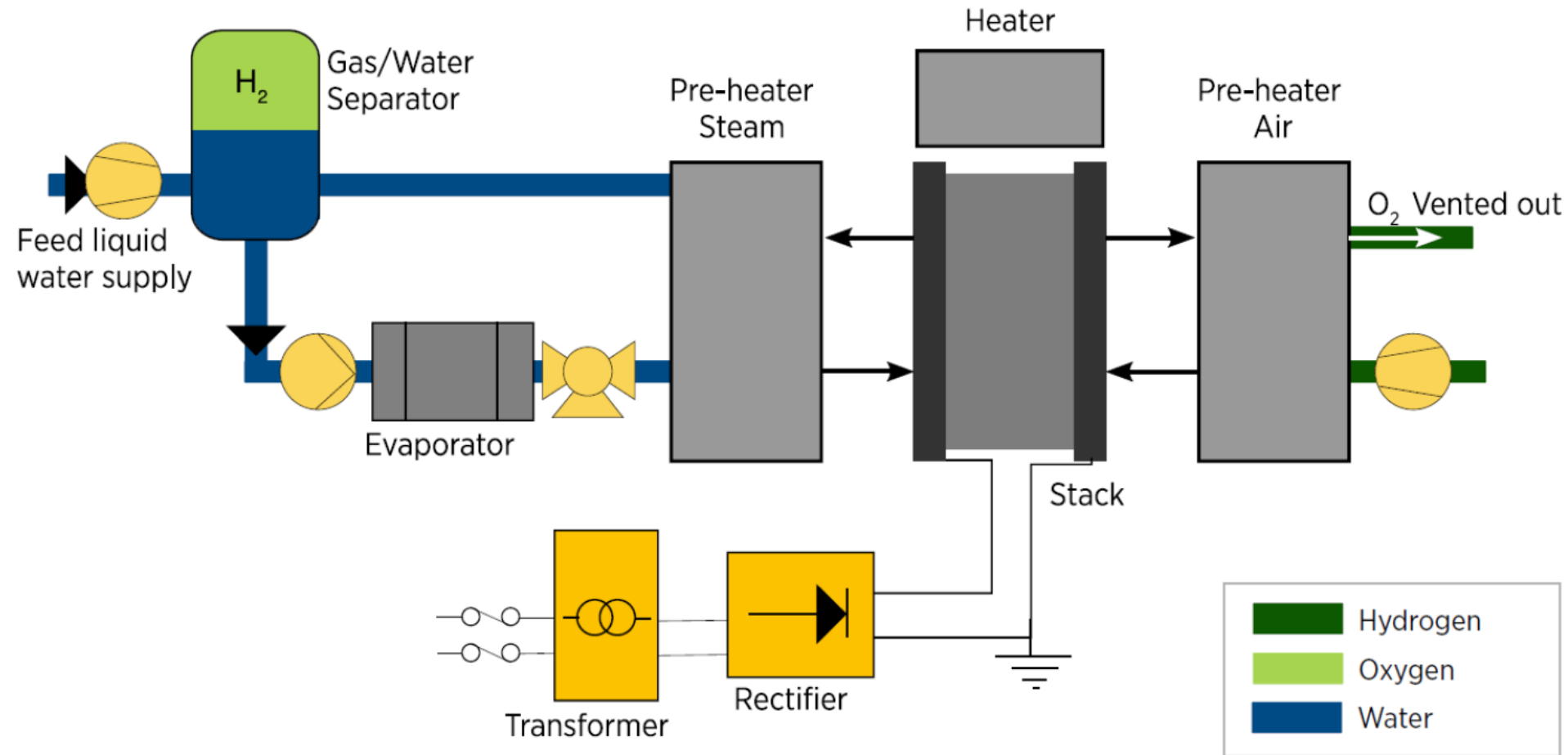
LABORATORIO DE ÓXIDO SÓLIDO (CNH2)



FUENTE: Electrochemical energy storage for renewable sources and grid balancing, ELSEVIER 2014



6. ELECTRÓLISIS DE ALTA TEMPERATURA



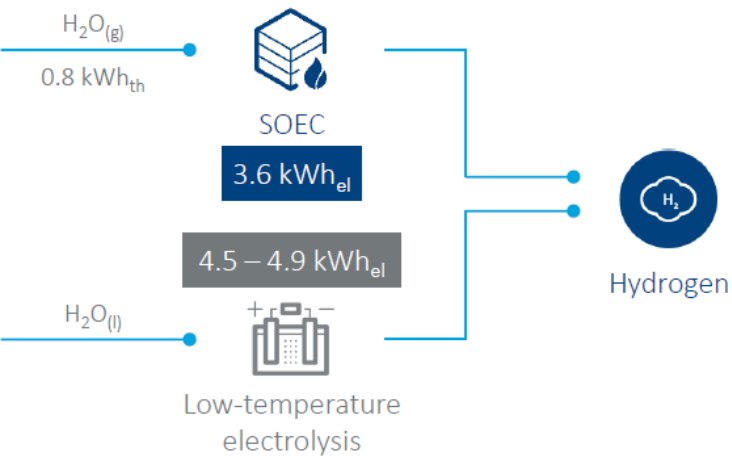
6. ELECTRÓLISIS DE ALTA TEMPERATURA



SOEC achieves superior electrical efficiency and produces syngas in one step

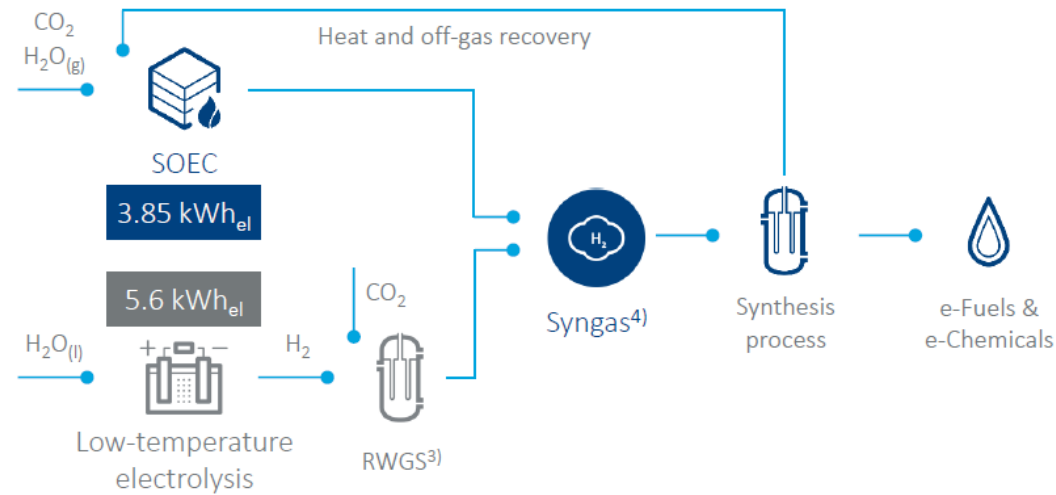
Electrical Efficiency¹⁾

$3.6 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{Nm}^3$



CO_2 utilization capability

One-step syngas production



- SOEC uses heat (provided as steam) as additional energy feed to electricity, thus lowering electricity demand
- The efficiency advantage translates into electricity savings of up to 25 %

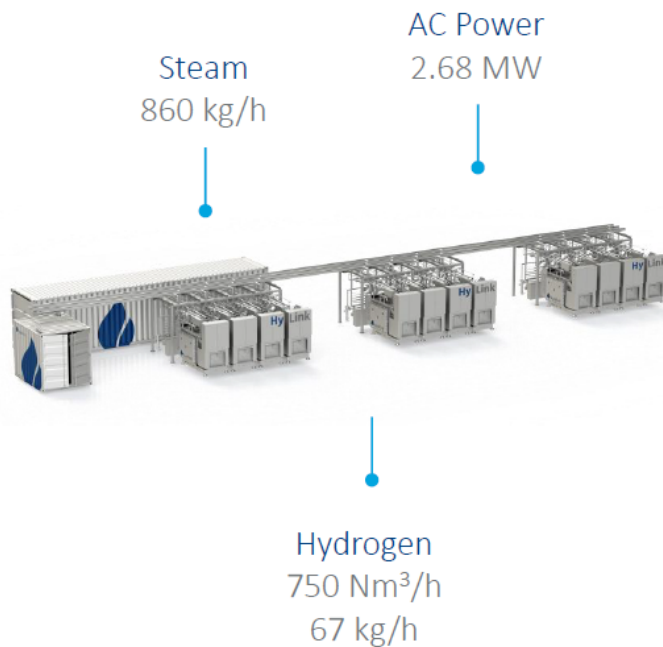
- Production of syngas for e-Fuels and e-Chemicals requires a more CAPEX and energy intensive 2-step process using low-temperature electrolysis
- With a one-step SOEC co-electrolysis of CO_2 and H_2O to syngas, significant CAPEX and OPEX savings can be realized

1) Lower heating value of hydrogen referred to AC power input 2) Provided as steam
3) Reverse-Water-Gas-Shift reaction is required in order to generate Carbon monoxide (CO) 4) $3.169 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$ lower heating value of syngas ($\text{H}_2:\text{CO} = 2$)

6. ELECTRÓLISIS DE ALTA TEMPERATURA



Highest electrical efficiency



Hydrogen production

Production capacity dynamic range	5 ... 100 %
Delivery pressure	1 ... 40 bar(g) after compression
Hydrogen purity	up to 99.999 % after gas cleaning
Hot idle ramp time	< 10 min
Operating temperature	up to 850 °C

Power input and electrical efficiency

Specific power consumption at system level (AC) ¹⁾	3.6 kWh/Nm ³
System electrical efficiency ²⁾	84 %

Steam input

Temperature	150 ... 200 °C
Pressure	3.5 ... 5.5 bar(g)

Other specs

Footprint ³⁾	~ 300 m ²
Ambient temperature	- 20 ... 40 °C

1) Power consumption at ambient pressure 2) Lower heating value of hydrogen referred to AC power input

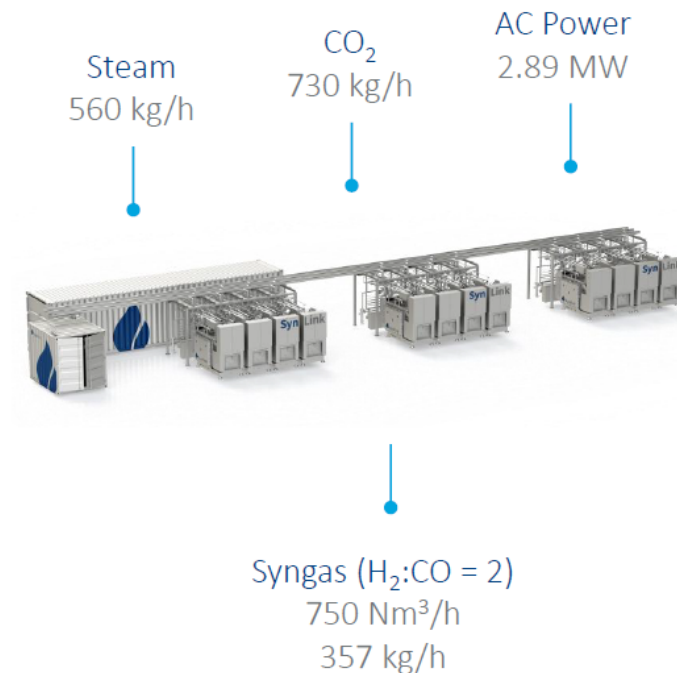
3) Average space requirement for a 2.68 MW system comprising all auxiliary systems

6. ELECTRÓLISIS DE ALTA TEMPERATURA



Direct conversion of CO₂ and H₂O into syngas

Syngas production	
Production capacity dynamic range	5 ... 100 %
Delivery pressure	1 ... 40 bar(g) after compression
Hot idle ramp time	< 10 min
Available H ₂ :CO ratios	1.5 ... 3.5
Power input and electrical efficiency	
Specific power consumption at system level (AC) ¹⁾	3.85 kWh/Nm ³
System electrical efficiency ²⁾	82 %
Steam input	
Temperature	150 ... 200 °C
Pressure	3.5 ... 5.5 bar(g)
CO ₂ input	
Temperature	0 ... 40 °C
Pressure	6 ... 8 bar(g)
Other specs	
Footprint ³⁾	~ 300 m ²
Ambient temperature	- 20 ... 40 °C



1) Power consumption at ambient pressure 2) Lower heating value of syngas (H₂:CO = 2) referred to AC power input
3) Average space requirement for a 2.89 MW system comprising all auxiliary systems

ÍNDICE

- 1. HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO**
- 2. MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO**
- 3. FUNDAMENTOS DE LA ELECTRÓLISIS**
- 4. ELECTRÓLISIS ALCALINA**
- 5. ELECTRÓLISIS PEM**
- 6. ELECTRÓLISIS DE ALTA TEMPERATURA**
- 7. SISTEMAS COMERCIALES ELECTROLISIS**
- 8. COSTES DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO**
- 9. NORMATIVA AMBIENTAL**

7. SISTEMAS DE ELECTRÓLISIS

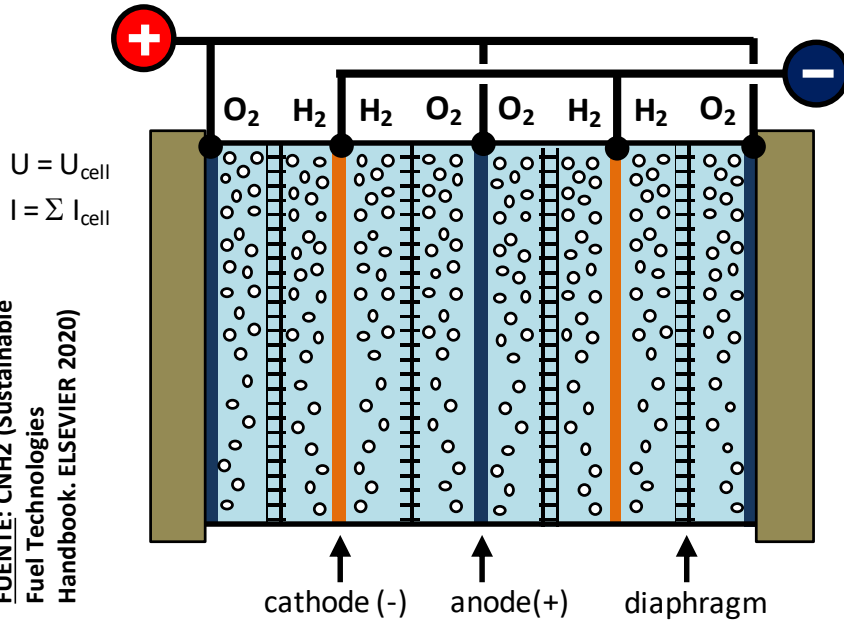


Ensamblado de celdas

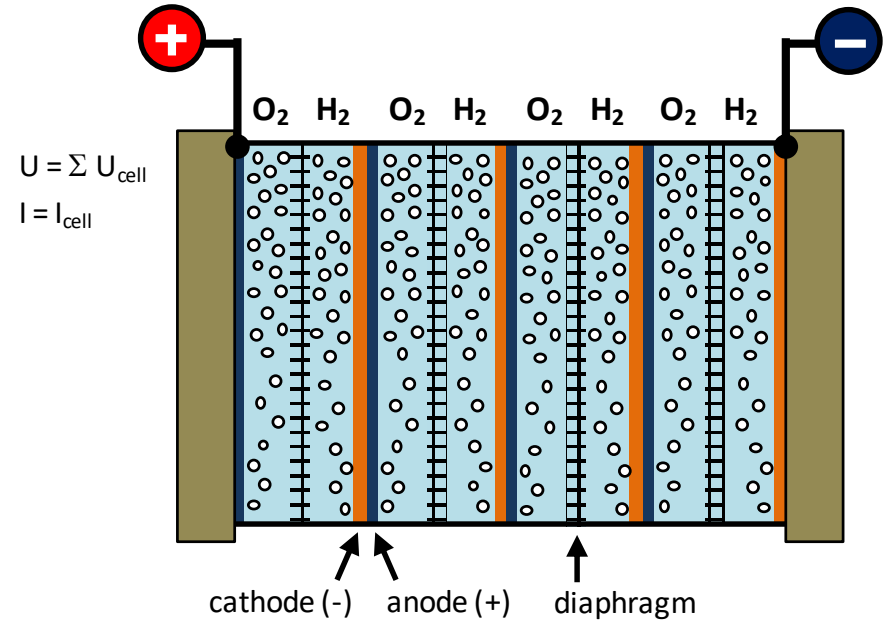
STACK DE ELECTRÓLISIS

Una única celda de electrólisis produce muy poca cantidad de hidrógeno, por lo que suelen agruparse diferentes celdas para constituir un “*stack*” o apilamiento. En función de cómo estén conectadas eléctricamente estas celdas, existen dos posibles configuraciones:

CONFIGURACIÓN MONOPOLAR



CONFIGURACIÓN BIPOLAR

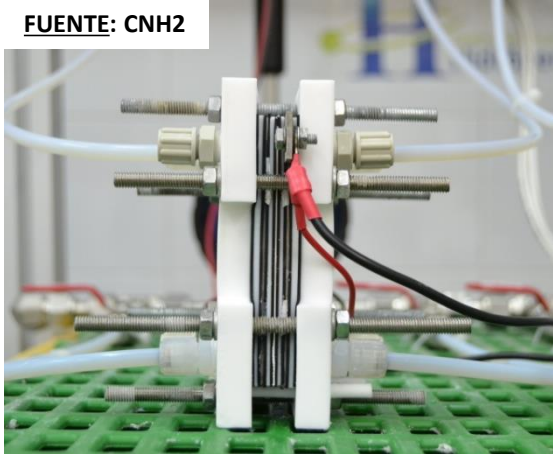


7. SISTEMAS DE ELECTRÓLISIS



Escalado Tecnología Electrólisis

FUENTE: CNH2



CELDAS

Constituye la **unidad básica de cualquier electrolizador**, donde tienen lugar las reacciones de evolución de hidrógeno y oxígeno

FUENTE: Stack de electrólisis VOLTIANA



STACK

Consiste en el **agrupamiento de diferentes celdas**, habitualmente en serie, lo que permite aumentar la cantidad de H_2 producido. Es el corazón de un sistema de electrólisis



FUENTE: CNH2

SISTEMAS

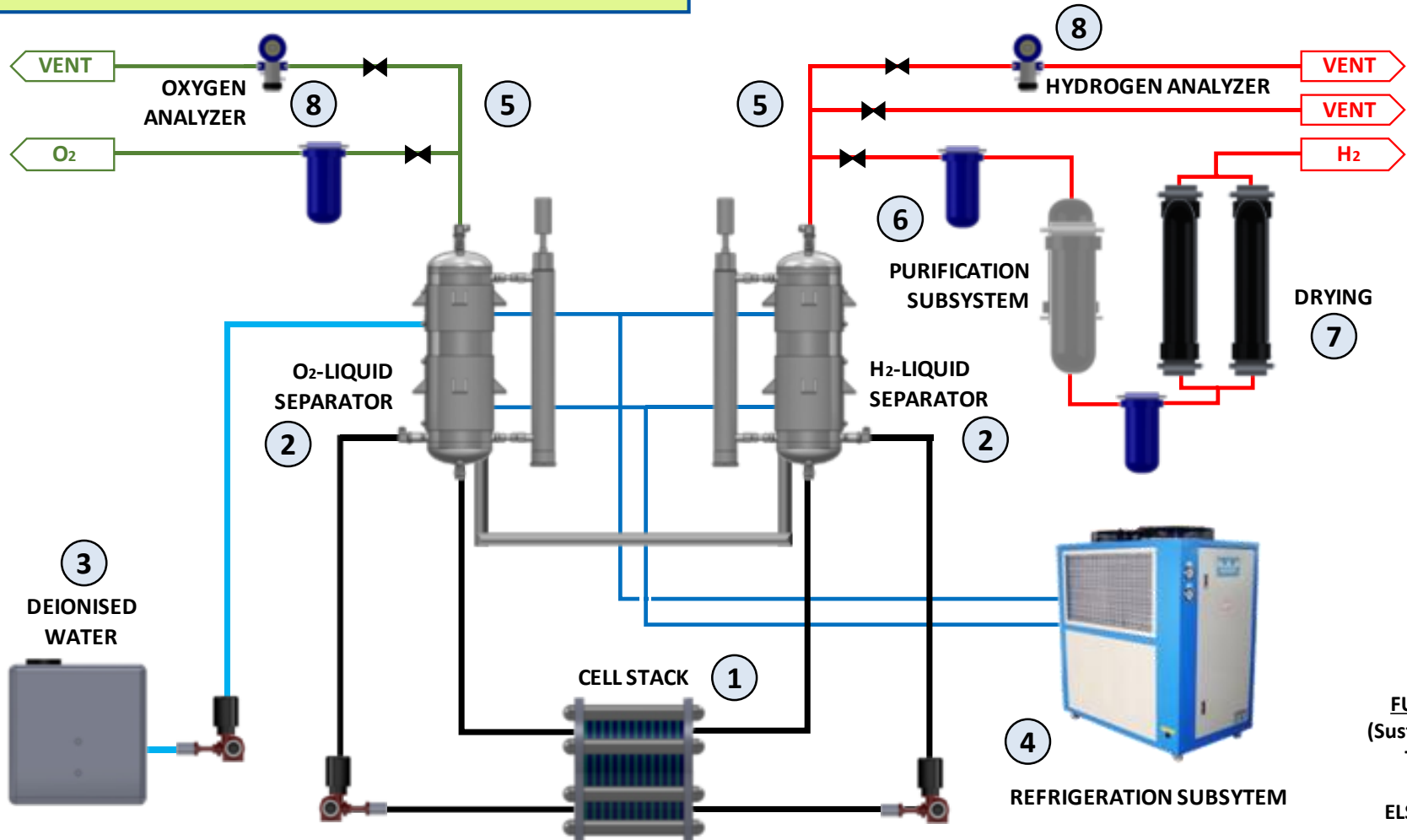
Para el adecuado funcionamiento de un *stack* se necesitan una serie de equipos y sistemas auxiliares. Es lo que constituye el **balance de planta (BoP)**

escalado desde celdas de electrólisis hasta sistema

7. SISTEMAS DE ELECTRÓLISIS



Balance de planta (BoP)



FUENTE: CNH2
(Sustainable Fuel
Technologies
Handbook.
ELSEVIER 2020)

7. SISTEMAS DE ELECTRÓLISIS



Balance de planta (BoP)

SISTEMAS AUXILIARES (ALCALINA Y PEM)

① STACK DE ELECTRÓLISIS

Componente donde se produce la electrólisis. Las burbujas de O_2 e H_2 que se generan son arrastradas a la parte superior del *stack* desde donde fluyen hasta los separadores.

② SUBSISTEMA SEPARACIÓN GAS-LÍQUIDO

Las mezclas bifásicas que se producen en el *stack* son llevadas a los depósitos-separadores, donde se dividen en dos corrientes: por cabeza el gas (H_2 u O_2 , según el depósito) y por fondo el agua o el electrolito, que se recircula de nuevo al *stack*.

③ SUBSISTEMA DE AGUA DESIONIZADA

Como el agua se va consumiendo en el *stack* durante la electrólisis es necesario reponer agua desionizada con una pureza y conductividad determinada ($\sim 0.9 \text{ L agua/Nm}^3 H_2$).

FUENTE: CNH2



7. SISTEMAS DE ELECTRÓLISIS



Balance de planta (BoP)

SISTEMAS AUXILIARES (ALCALINA Y PEM)

④ SUBSISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Una parte importante de la energía eléctrica suministrada al *stack* se transforma en calor, siendo necesario un sistema de refrigeración para mantener la temperatura. Este control se hace a través del enfriamiento del agua o del electrolito que es recirculado a las celdas.

⑤ SUBSISTEMA DE CONTROL DE PRESIÓN

La manera en la que se crea presión en un electrolizador consiste en retener en el sistema, el O_2 e H_2 que se van produciendo, de manera que a medida que se va acumulando el gas, aumenta también la presión hasta la consigna de las válvulas reguladoras de presión:

- En el caso de **electrolizadores alcalinos** esta gestión es crítica debido a que las celdas utilizan diafragmas porosos, produciéndose una difusión de H_2/O_2 a través de estos diafragmas. Para minimizar esa difusión, la diferencia de presión entre los depósitos-separadores debe ser mínima.
- En el caso de **electrolizadores PEM** este efecto se minimiza debido a la utilización de una membrana “impermeable a los gases”, lo que permite trabajar a diferentes presiones en ánodo y cátodo.

7. SISTEMAS DE ELECTRÓLISIS



Balance de planta (BoP)

SISTEMAS AUXILIARES (ALCALINA Y PEM)

⑥ SUBSISTEMA DE PURIFICACIÓN

En el caso de necesitar un H_2 de mayor pureza, es necesario instalar un reactor *de-oxo* para eliminar las impurezas de O_2 que son arrastradas. Estos sistemas se basan en un catalizador (Pd), donde el O_2 residual reacciona con H_2 produciendo vapor de agua.

⑦ SUBSISTEMA DE SECADO

Las corrientes gaseosas que abandonan los depósitos-separadores, pasan por un sistema de acondicionamiento formado por trampas de condensados, filtros de coalescencia, sistemas de enfriamiento y filtros desecantes que permiten eliminar al máximo posible el líquido que es arrastrado por las corrientes gaseosas y obtener así el hidrógeno lo más seco posible.

⑧ SUBSISTEMA DE ANÁLISIS DE GASES

Una parte del H_2 y del O_2 es enviado a unos analizadores, de manera que siempre se conozca la proporción de oxígeno e hidrógeno que hay en las canalizaciones por razones de seguridad, así como para cuantificar la pureza de las corrientes gaseosas producidas.

7. SISTEMAS DE ELECTRÓLISIS



Balance de planta (BoP)

SISTEMAS AUXILIARES (ALCALINA Y PEM)

SUBSISTEMA DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA

La energía eléctrica que llega al *stack* debe ser DC, por lo que es necesario incorporar al sistema la electrónica de potencia adecuada para su integración con las fuentes disponibles.

SUBSISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL

Permite adquirir toda la información proveniente de sensores y transductores, y realizar las acciones necesarias para permitir el funcionamiento adecuado y seguro del sistema.

LA CONFIGURACIÓN FINAL DE CADA UNO DE ESTOS SUBSISTEMAS DEPENDERÁ DEL SISTEMA DE ELECTRÓLISIS EN CUESTIÓN, DEPENDIENDO DE LA TECNOLOGÍA CONSIDERADA, LA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y LOS PRINCIPALES PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO. ADEMÁS, LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE ELECTRÓLISIS PRESENTAN LA VENTAJA DE SER MODULARES, POR LO QUE LOS TAMAÑOS DE LOS SISTEMAS DE ELECTRÓLISIS PUEDEN IR DESDE UNOS POCOS VATIOS HASTA UNA ESCALA DE MW, MEDIANTE EL APILAMIENTO DE VARIOS SISTEMAS O STACKS, LO QUE HACE QUE SEA UNA TECNOLOGÍA MUY FLEXIBLE EN CUANTO A LA APLICACIÓN FINAL.

7. SISTEMAS DE ELECTRÓLISIS



Electrolizadores Comerciales

FABRICANTES Y EQUIPOS EN EL MERCADO

Debido al diferente estado de desarrollo de la tecnología, el número de fabricantes es muy diferente para electrolizadores alcalinos, PEM o de óxido sólido.



FUENTE: CNH2 –
Electrolizador alcalino 100kW
(proyecto DESPHEGA)



FUENTE: CNH2 – Electrolizador
alcalino 60kW CLANTECH
(suministro hidrogenera)



FUENTE: CNH2 – Banco de
ensayos electrólisis alcalina 15kW
(Laboratorio Electrólisis Alcalina)



FUENTE: CNH2 – Electrolizador
alcalino 5kW NITIDOR
(proyecto SINTER)



FUENTE: CNH2 – Electrolizador
PEM 1kW HydrogenWorks
(proyecto SINTER)

ISO 22734:2019 - HYDROGEN GENERATORS USING WATER ELECTROLYSIS

Define los requisitos de construcción, funcionamiento y seguridad de los equipos de generación de hidrógeno mediante la electrólisis del agua. Está destinada para usarse con un propósito de certificación.

7. SISTEMAS DE ELECTRÓLISIS



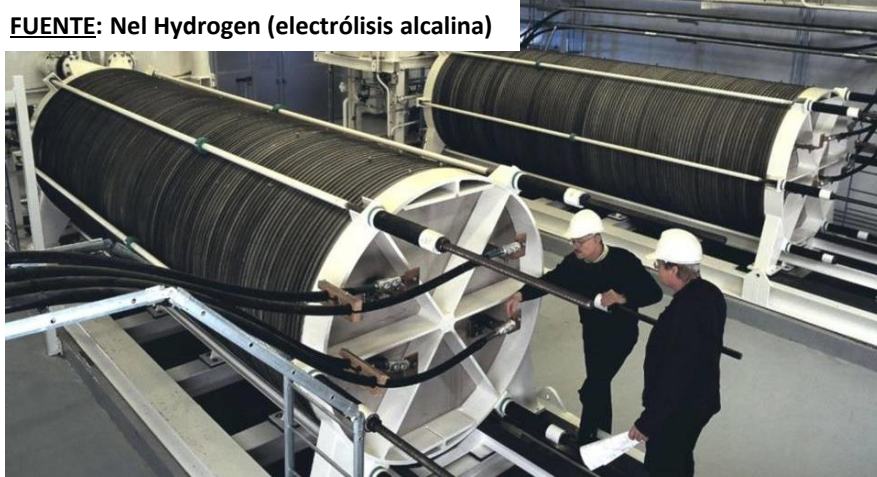
Technology	Company	Location	Nominal power [kW] ⁽ⁱ⁾	H ₂ rate [Nm ³ /h] ⁽ⁱⁱ⁾	Energy consumption [kWh/Nm ³] ⁽ⁱⁱⁱ⁾	Max. pressure [bar] ^(iv)	Reference ^(v)	A2
Alkaline electrolysis	ELB Elektrolyse Technik	Germany	1 - 7000	200 - 1400	4.30	30	http://elektrolyse.de/wordpress/	
	Ener Blue	Switzerland	5 - 1000	1 - 200	4.30	60	http://www.ener-blue.com	
	ErreDue	Italy	3 - 850	0.66 - 170	5.30	30	https://www.erreduegas.it	
	GreenHydrogen	Denmark	390	1 - 90	5.50	35	http://greenhydrogen.dk	
	HT-Hydratechnik	Germany	200 - 700	40 - 140	5.00	15	http://www.ht-hydratechnik.de	
	Hydrogen Pro	Norway	50 - 1000	10 - 210	5.35	30	http://www.hydrogen-pro.com/	
	Hydrogenics	Canada	20 - 300	4 - 60	4.90	10	https://www.hydrogenics.com	
	Idroenergy	Italy	2 - 400	0.40 - 80	5.60	6	https://idroenergy.it	
	IHT Industrie Haute Technology	Switzerland	4000	760	4.45	32	http://www.iht.ch/	
	McPhy	France	2 - 4000	0.40 - 800	4.50	30	https://mcphy.com/	
	NEL Hydrogen	Norway	2200	485	4.40	30	https://nelhydrogen.com/	
	PERIC	China	2800	600	4.60	15	http://www.peric.ac.cn/en/index.asp	
	Sagim	France	2.50 - 25	0.50 - 5	5.25	8	https://sagim-gip.com/en/products/	
	Suzhou Jingli	China	10 - 4700	2 - 1000	4.80	15	https://www.jingli-hydrogenplant.com	
	Teledyne Energy Systems	USA	300 - 400	56 - 80	5.00	10	http://www.teledynees.com	
PEM electrolysis	Tianjin Mainland	China	0.50 - 5000	0.10 - 1000	5.00	30	http://www.cnthe.com	
	Enapter (former ACTA) ^(vi)	Italy	2.50	0.50	4.80	30	https://www.enapter.com/aem-electrolyser/	
	Angstrom Advanced	USA	5 - 60	1 - 10	4.00	4	http://www.angstrom-advanced.com	
	AREVA H2Gen	France	25 - 1000	5 - 200	4.70	35	https://www.arevah2gen.com/	
	GINER ELX	USA	150 - 1000	30 - 200	4.80	40	https://www.ginerelex.com/electrolyzer-systems	
	GreenHydrogen	Denmark	4.95 - 390	1 - 90	5.00	35	http://greenhydrogen.dk	
	H2B2	Spain	3.20 - 1000	0.50 - 200	4.70	40	http://h2b2.es/hydrogen/	
	Hidrogena Desarrollos Energéticos	Spain	0.25 - 50	0.06 - 10	4.50	50	http://hidrogena.com/	
	Hydrogenics	Canada	5 - 1250	1 - 250	5.20	30	https://www.hydrogenics.com/	
	H-TEC	Germany	225 - 1000	47 - 210	4.90	30	https://www.h-tec-systems.com	
Solid oxide electrolysis	ITM Power	UK	12 - 1100	2.40 - 220	4.80	30	https://www.itm-power.com/	
	Proton OnSite (acquired by NEL)	USA	2000	400	4.53	30	https://www.protononsite.com/	
	Siemens	Germany	1125	225	4.76	35	https://new.siemens.com/global/en/products/energy/renewable-energy/hydrogen-solutions.html	
Solid oxide electrolysis	Sunfire	Germany	150	40	3.70	10	https://www.sunfire.de/	

NOTES: (i) Calculated for 5 kW for 1 Nm³/h H₂; (ii) Nominal production ranges for the different product offered; (iii) Specific energy consumption defined by the manufacturer (5 kWh/Nm³ when not available); (iv) Maximum pressure without external compression system; (v) Some manufacturers supply electrolysis systems consisting of several stacks (modular design); (vi) Alkaline electrolysis membrane (AEM)

7. SISTEMAS DE ELECTRÓLISIS



FUENTE: Nel Hydrogen (electrólisis alcalina)



FUENTE: AREVA H2Gen (electrólisis PEM)



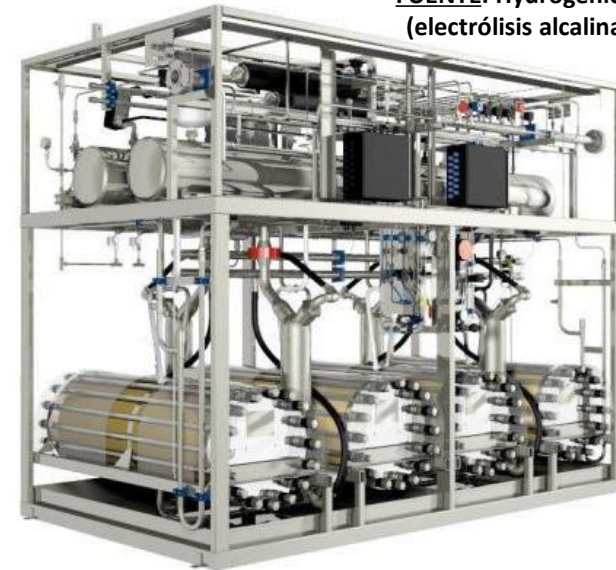
FUENTE: SIEMENS
(electrólisis PEM)



FUENTE: McPhy
(electrólisis alcalina)



FUENTE: Hydrogenics
(electrólisis alcalina)



7. SISTEMAS DE ELECTRÓLISIS



Electrolizadores Comerciales

FABRICANTES Y DISTRIBUIDORES EN ESPAÑA



H2B2 es una empresa que promueve, desarrolla, diseña, integra, construye, opera y mantiene sistemas de producción de hidrógeno basados en electrólisis PEM.

CLAN TECNOLOGICA es una empresa dedicada al desarrollo e integración de soluciones en generación de gases mediante tecnología PEM para pequeñas aplicaciones y mediante electrólisis alcalina en sistemas industriales.



HIDRÓGENA es una empresa dedicada a la fabricación de equipos de generación de hidrógeno por electrólisis PEM.

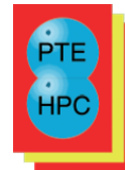
ARIEMA realiza trabajos de ingeniería e instalación “llave en mano”, junto a la puesta en marcha, operación y mantenimiento de equipos alcalinos y PEM.



LISTADO DE EMPRESAS Y ENTIDADES RELACIONADAS CON EL SECTOR DEL HIDRÓGENO EN ESPAÑA



ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DEL HIDRÓGENO - www.aeh2.org



PLATAFORMA TECNOLÓGICA ESPAÑOLA DEL HIDRÓGENO Y DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE - www.ptehpc.org

7. SISTEMAS DE ELECTRÓLISIS



Electrolizadores Comerciales

A3

INDICADORES DE INTERÉS

ENERGY CONSUMPTION

Cantidad de energía requerida para producir una cierta cantidad de hidrógeno. **Rangos habituales: 4.5 – 5.0 kWh/Nm³ (aprox. 50-55 kWh/kg).**

● ALCALINA ≈ PEM ●

FLEXIBILITY

Capacidad de funcionar del equipo a carga parcial, respecto al rango de operación del sistema. **Rangos habituales: PEM (0-120%), alcalina (10-100%).**

↓ ALCALINA < PEM ↑

STACK LIFETIME

Tiempo necesario antes de reemplazar el stack de electrólisis por uno nuevo. **Rangos habituales: alcalino (90.000 h), PEM (60.000 h).**

↑ ALCALINA > PEM ↓

COLD START-UP TIME

Tiempo de encendido del equipo hasta su capacidad de producción nominal. **Rangos habituales: alcalino (minutos), PEM (segundos).**

↑ ALCALINA > PEM ↓

DEGRADATION

Aumento de la energía requerida para mantener la producción de hidrógeno por degradación del sistema de electrólisis. **Rangos habituales: 4-2 %/año**

↓ ALCALINA < PEM ↑

PLANT FOOTPRINT

Espacio ocupado por el sistema de electrólisis respecto a su potencia. **Rangos habituales: 10-25 kW/m² (doble espacio en alcalino respecto a PEM).**

↑ ALCALINA > PEM ↓

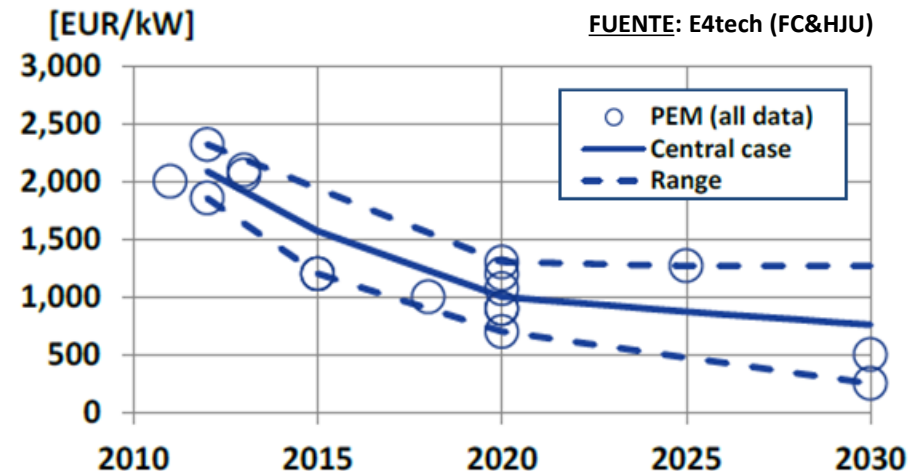
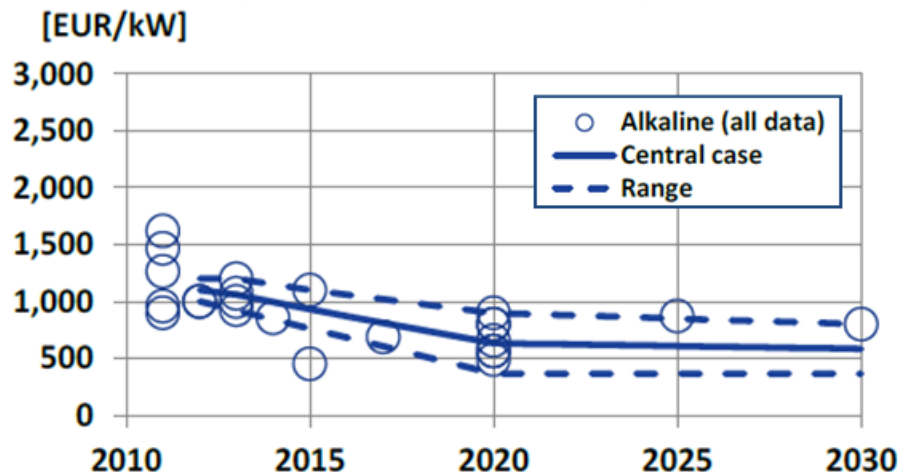
7. SISTEMAS DE ELECTRÓLISIS



Costes Sistemas Electrólisis

PREVISIONES CAPEX Y OPEX

De acuerdo a los escenarios disponibles, pueden establecerse diferentes costes de inversión (CAPEX) para cada una de las tecnologías de electrólisis, aunque es necesario tener en cuenta que estos datos son más fiables cuanto mayor es el grado de desarrollo e implantación de la tecnología. Así, el **coste de los sistemas de electrólisis alcalina y PEM están abalados por suministradores y fabricantes** que tienen cientos de kW instalados. Sin embargo, en los **sistemas SOEC existe una elevada incertidumbre sobre sus costes**, dado su carácter pre-industrial.



7. SISTEMAS DE ELECTRÓLISIS



Costes Sistemas Electrólisis

PREVISIONES CAPEX Y OPEX

SISTEMAS DE ELECTRÓLISIS ALCALINA

- Actualmente se encuentra en el rango de **2500-5000 €/kW** cuando la potencia está por debajo de los **100 kW**, mientras que a nivel de **MW** el coste llega hasta **800-1500 €/kW**.
- La tecnología alcalina podría alcanzar un **coste alrededor de los 580 €/kW para 2030**.
- Los **costes operativos (OPEX)** suelen estar en torno al **2-3 % del CAPEX** (según potencia).

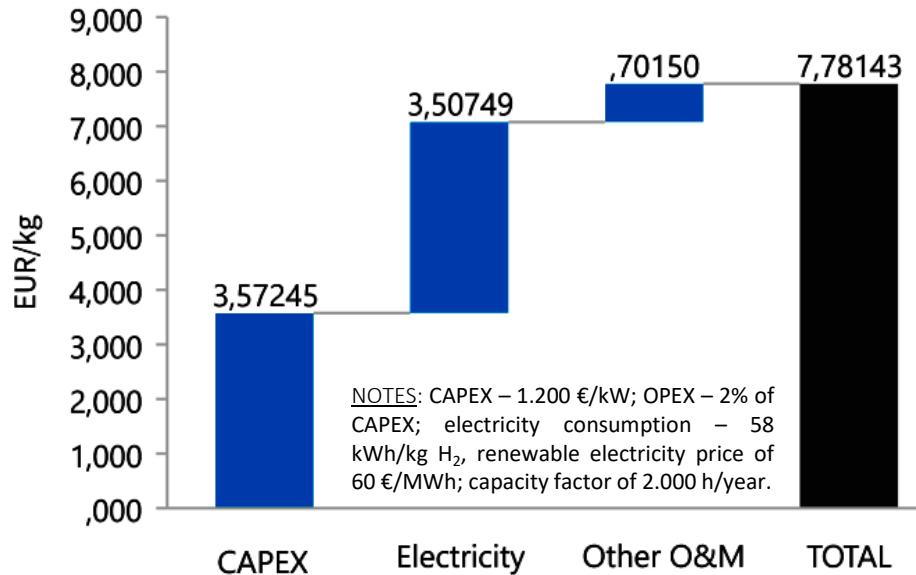
SISTEMAS DE ELECTRÓLISIS PEM

- La tecnología de electrólisis PEM presenta un **CAPEX entre 1500-2000 €/kW para potencias por encima de los 500 kW**.
- Grandes capacidades de reducción de costes pudiendo llegar hasta los **760 €/kW en 2030**.
- Los **costes operativos se encuentran alrededor del 3-5 % del CAPEX** por año.

7. SISTEMAS DE ELECTRÓLISIS



Costes Sistemas Electrólisis

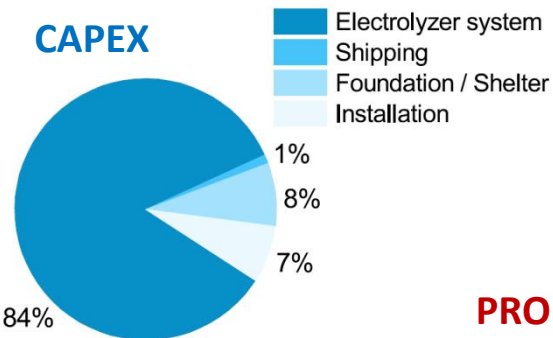


DESGLOSE COSTES PRODUCCIÓN

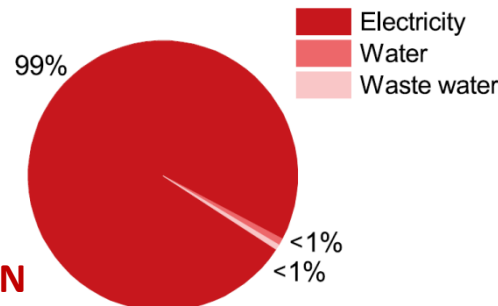
- Costes actuales de producción de H₂ mediante **electrólisis: 6-10 €/kg.**
- Costes actuales de producción de H₂ mediante **SMR: 2-3 €/kg.**
- Previsiones para 2030: **< 3 €/kg** (con una capacidad de electrólisis > 40 GW).

FUENTE: Strategic Research and Innovation Agenda (Julio 2020). Hydrogen Europe 2020

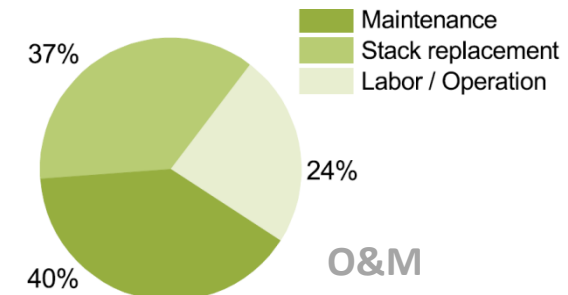
CAPEX



PRODUCCIÓN



FUENTE: Int Journal of Hydrogen Energy 2015, 40(5):2084-2090

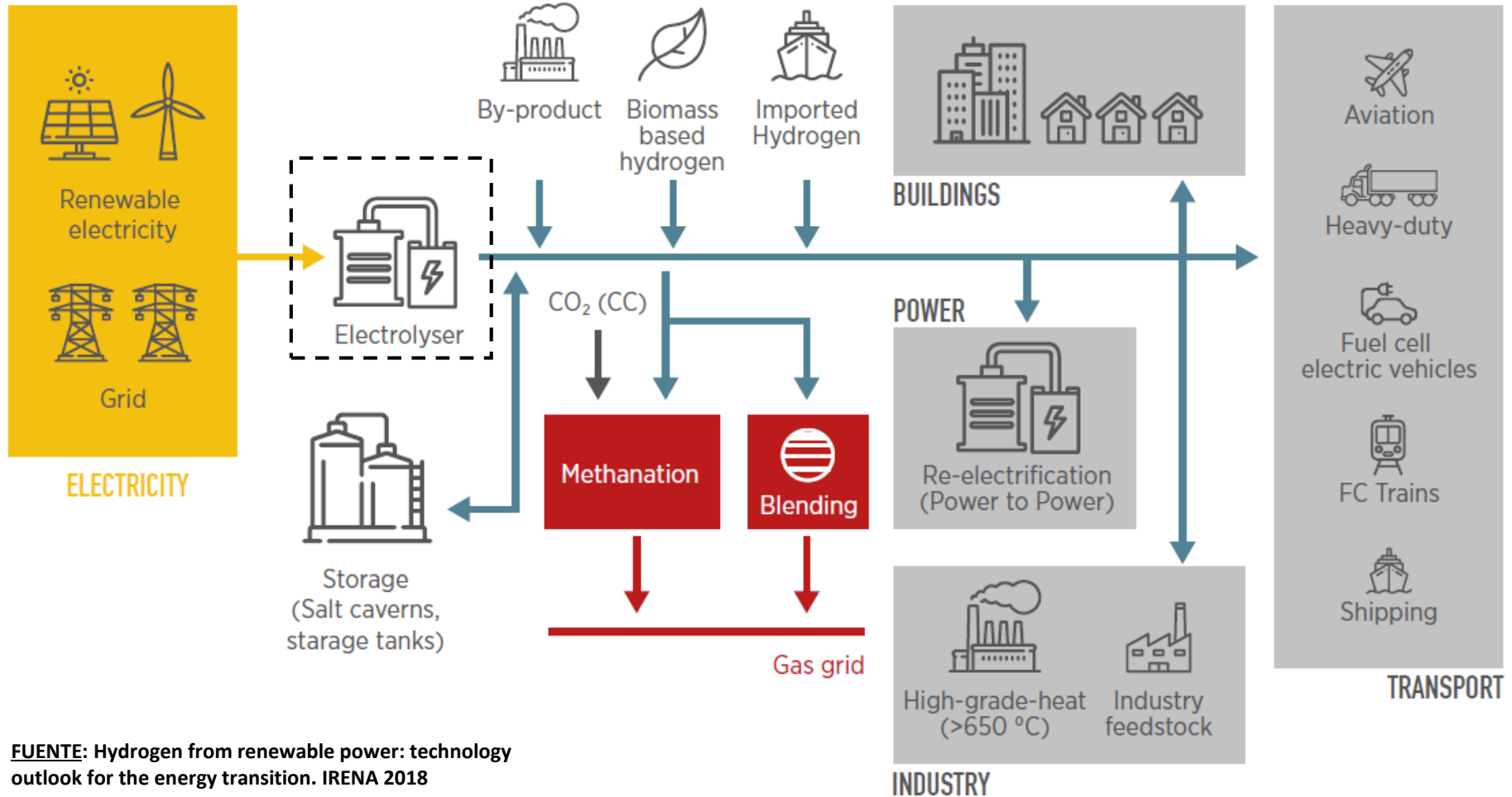


7. SISTEMAS DE ELECTRÓLISIS



Integración con EERR

USOS Y CONSUMO DE HIDRÓGENO VERDE



FUENTE: Hydrogen from renewable power: technology outlook for the energy transition. IRENA 2018

ÍNDICE

1. **HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO**
2. **MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO**
3. **FUNDAMENTOS DE LA ELECTRÓLISIS**
4. **ELECTRÓLISIS ALCALINA**
5. **ELECTRÓLISIS PEM**
6. **ELECTRÓLISIS DE ALTA TEMPERATURA**
7. **SISTEMAS COMERCIALES ELECTROLISIS**
8. **COSTES DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO**
9. **NORMATIVA AMBIENTAL**

8. COSTES DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO



		Alkaline electrolysis (ALK)						Polymer electrolyte membrane electrolysis (PEM)					
		2017 @ P atm			2025 @ 15 bar			2017 @ 30 bar			2025 @ 60 bar		
	Units	1 MW	5 MW	20 MW	1 MW	5 MW	20 MW	1 MW	5 MW	20 MW	1 MW	5 MW	20 MW
Minimum power	% Pnom	15%			10%			5%			0%		
Peak power – for 10 min	% Pnom	100%			100%			160%			200%		
Pressure output	Bar	0 bar			15 bar			30 bar			60 bar		
Power consumption @ P nom	kWhe/kg	58	52	51	55	50	49	63	61	58	54	53	52
Water consumption	L/kg	15 L/kg											
Lifetime – system	Years	20 years											
Lifetime – stack @ full charge	hr	80,000 h			90,000 h			40,000 h			50,000 h		
Degradation – system	%/1000 h	0.13%/1,000 h			0.11%/1,000 h			0.25%/1,000 h			0.20%/1,000 h		
Availability	%/year	>98%											
CAPEX – total system equipment	EUR/kW	1,200	830	750	900	600	480	1,500	1,300	1,200	1,000	900	700
OPEX – electrolyser system	% CAPEX	4%	3%	2%	4%	3%	2%	4%	3%	2%	4%	3%	2%
CAPEX – stack replacement	EUR/kW	420	415	338	315	300	216	525	455	420	300	270	210

8. COSTES DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

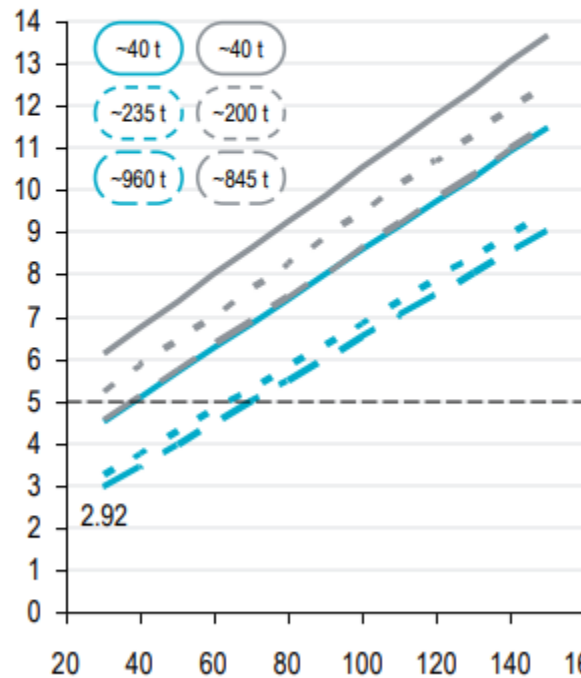


Indicative/Simplified

Approximation of cost of green H₂ – 2017 Scenario

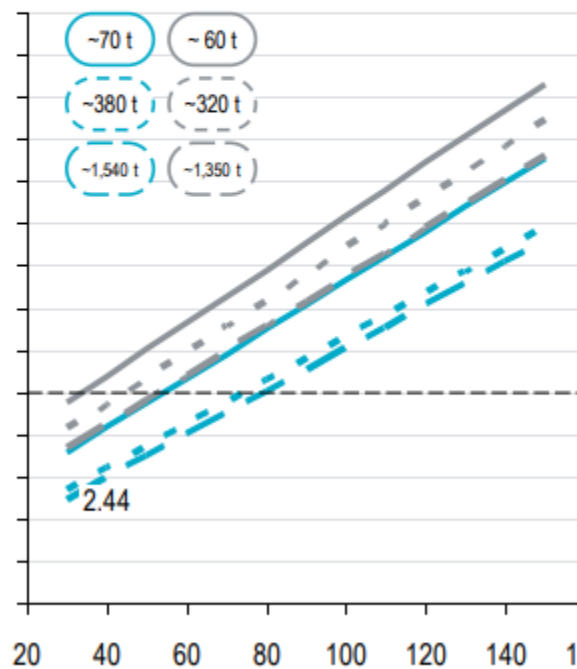
@ 2,500 hrs FTE p.a.

... e.g. onshore wind central EU
EUR/kg



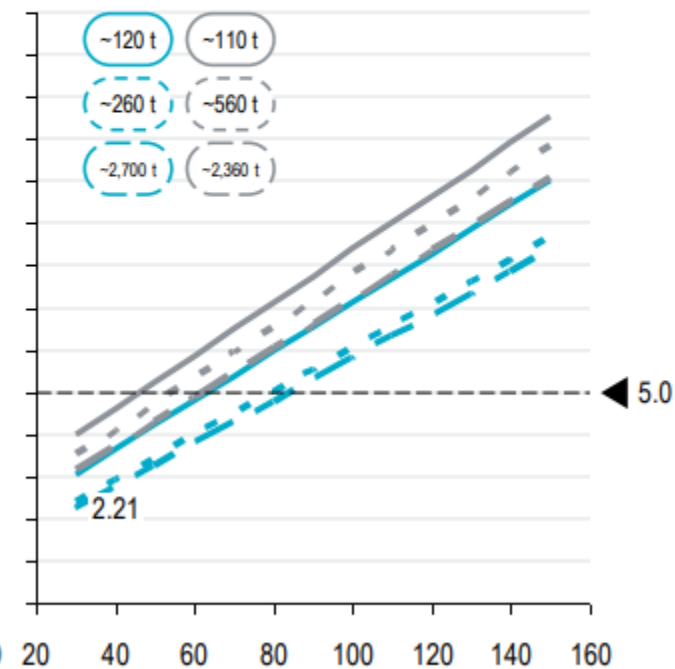
@ 4,000 hrs FTE p.a.

... offshore wind northern EU



@ 7,000 hrs FTE p.a.

... baseload hydropower central/northern EU



EUR/MWh effective electricity cost
excl. revenues from grid services

— ALK 1 MW — ALK 5 MW — ALK 20 MW — PEM 1 MW — PEM 5 MW — PEM 20 MW
○ Annual hydrogen production

8. COSTES DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO



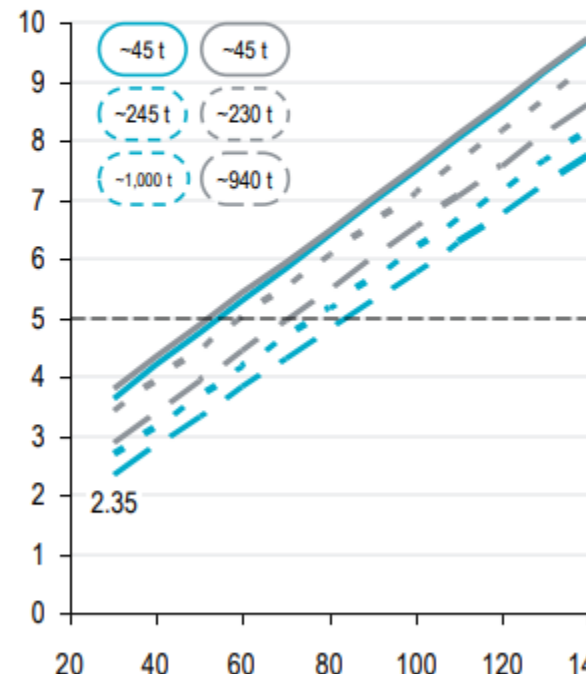
Approximation of cost of green H₂ – 2025 Scenario

Indicative/Simplified

@ 2,500 hrs FTE p.a.

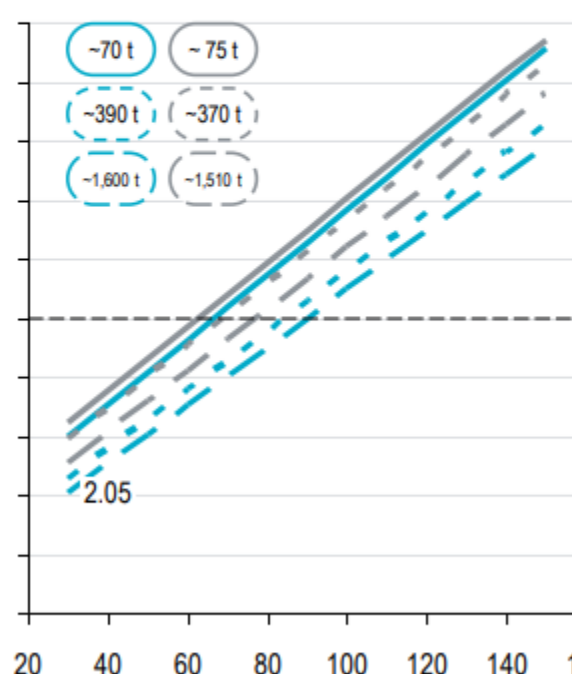
... e.g. onshore wind central EU

EUR/kg



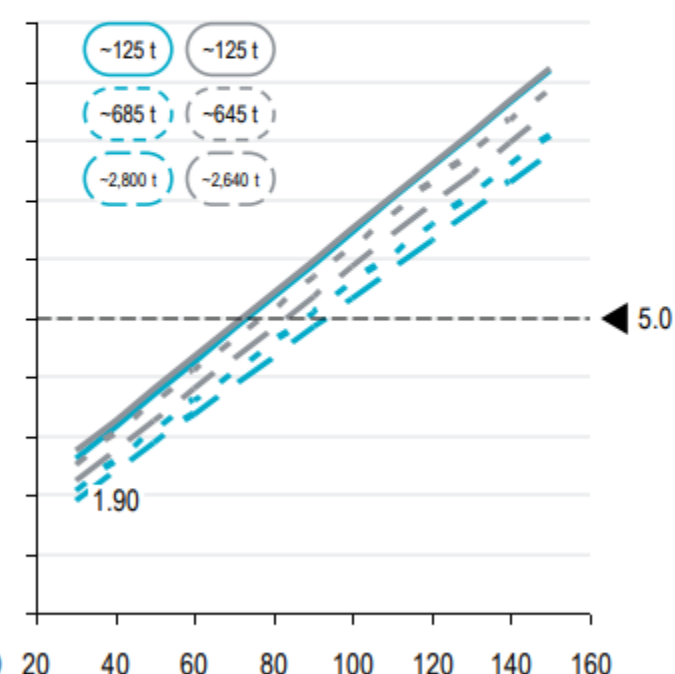
@ 4,000 hrs FTE p.a.

... offshore wind northern EU



@ 7,000 hrs FTE p.a.

... baseload hydropower central/northern EU



EUR/MWh effective electricity cost
excl. revenues from grid services

— ALK 1 MW - - ALK 5 MW — ALK 20 MW — PEM 1 MW - - PEM 5 MW — PEM 20 MW
○ Annual hydrogen production

Source: FCH2.JII, Roland Berner

ÍNDICE

1. HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO
2. MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO
3. FUNDAMENTOS DE LA ELECTRÓLISIS
4. ELECTRÓLISIS ALCALINA
5. ELECTRÓLISIS PEM
6. ELECTRÓLISIS DE ALTA TEMPERATURA
7. SISTEMAS COMERCIALES ELECTROLISIS
8. COSTES DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO
9. NORMATIVA AMBIENTAL

9. NORMATIVA AMBIENTAL



La actividad se encuentra incluida en el anexo I, grupo 5, epígrafe 2º.i. industria química, producción de productos químicos inorgánicos, de la Ley 21/2013, de 9 de diciembre de evaluación ambiental, y en el anexo I, epígrafe a.2º industria química, producción de productos químicos inorgánicos básicos, de la Ley 4/2007, de Evaluación Ambiental en Castilla - La Mancha. Deberán aportar estudio de impacto ambiental para la tramitación de Evaluación de impacto ambiental ordinaria ante el órgano sustantivo correspondiente.

2.º Productos químicos inorgánicos:

i) Gases y, en particular, el amoníaco, el cloro o el cloruro de hidrógeno, el flúor o fluoruro de hidrógeno, los óxidos de carbono, los compuestos de azufre, los óxidos del nitrógeno, el hidrógeno, el dióxido de azufre, el dicloruro de carbonilo.

Grupo 5. Industria química, petroquímica, textil y papelera.

a) Instalaciones químicas integradas, es decir, instalaciones para la fabricación a escala industrial de sustancias mediante transformación química, en las que se encuentran yuxtapuestas varias unidades vinculadas funcionalmente entre sí, y que se utilizan para:

1.ª La producción de productos químicos orgánicos básicos.

2.ª La producción de productos químicos inorgánicos básicos.

9. NORMATIVA AMBIENTAL



Se informa asimismo que la planta está incluida en el anexo I, epígrafe 4.2.a, instalaciones químicas para la fabricación de productos químicos inorgánicos, del Real Decreto Legislativo 1/2016, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación, la instalación requerirá de autorización ambiental integrada, la documentación correspondiente deberá ser entregada en esta Administración

4. Industrias químicas.

A efectos de la presente sección y de la descripción de las categorías de actividades incluidas en la misma, fabricación, significa la fabricación a escala industrial, mediante transformación química o biológica de los productos o grupos de productos mencionados en los puntos 4.1 a 4.6.

4.2 Instalaciones químicas para la fabricación de productos químicos inorgánicos como:

a) Gases y, en particular, el amoníaco, el cloro o el cloruro de hidrógeno, el flúor o fluoruro de hidrógeno, los óxidos de carbono, los compuestos de azufre, los óxidos del nitrógeno, el hidrógeno, el dióxido de azufre, el dicloruro de carbonilo.

MUCHAS GRACIAS POR VUESTRA ATENCION.

