



universidad  
de león



**Escuela de Ingenierías**

**Industrial, Informática y Aeroespacial**

**GRADO EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA  
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

Trabajo de Fin de Grado

**ENERGÍA DOMÉSTICA MEDIANTE PILAS DE  
COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO Y ESTUDIO DE SUS  
SISTEMAS ELECTRÓNICOS Y DE CONTROL.**

**DOMESTIC ENERGY THROUGH HYDROGEN FUEL CELLS  
AND A STUDY OF THEIR ELECTRONICS AND CONTROL  
SYSTEMS.**

Autor: Diego López Gayo  
Tutor: Raúl Mateos González

(Julio, 2022)

**UNIVERSIDAD DE LEÓN**  
**Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y**  
**Aeroespacial**

**GRADO EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA**  
**INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**  
**Trabajo de Fin de Grado**

**ALUMNO:** Diego López Gayo

**TUTOR:** Raúl Mateos González

**TÍTULO:** Energía doméstica mediante pilas de combustible de hidrógeno y estudio de sus sistemas electrónicos y de control.

**TITLE:** Domestic energy through hydrogen fuel cells and a study of their electronics and control systems.

**CONVOCATORIA:** Julio, 2022

**RESUMEN:**

El objetivo del trabajo es el estudio de las pilas de combustible de uso doméstico, centrándonos en hidrógeno como una energía capaz de sustituir a las más convencionales como el gas natural. Para ello se hará un breve resumen sobre su producción, almacenamiento y distribución, así como las particularidades de su uso en pilas de combustible. Se tratará de comprender en profundidad la complejidad de los sistemas electrónicos usados, así como todos y cada uno de los componentes y sus métodos de control. Por último, se plantearán las oportunidades de la implantación de esta energía doméstica basada en hidrógeno en el mundo, incluyendo también una visión hacia el futuro.

**ABSTRACT:**

The aim of this work is to study fuel cells for domestic use, focusing on hydrogen as an energy source capable of substituting more conventional energy sources such as natural gas. Regarding the complexity of the electronic systems used, as well as each and every one of the components, and their control methods I have prepared a brief summary of its production, storage and distribution, as well as the particularities of its use in fuel cells. Moreover, the opportunities for this hydrogen-based by implementing it as a domestic energy in the world for the future.

**Palabras clave:** Combustible, hidrógeno, control, implantación, electrónica, futuro.

**Firma del alumno:**

**VºBº Tutor/es:**

# Agradecimientos

Todavía parece ayer cuando empecé la carrera, y ahora que estoy a punto de acabarla realizando mi Trabajo de Fin de Grado, solo quiero agradecer el apoyo que me ha dado toda la gente que me he encontrado por el camino. Primero quiero dar las gracias a mi madre, Ascensión, por ser mi pilar fundamental durante todos estos años y hacer que este momento se haga realidad. También quiero agradecerlo a mi padre, José Manuel, por mantenerse siempre a mi lado pasase lo que pasase. Gracias Miguel, por alegrarte de las cosas buenas y consolarme cuando no eran tan buenas. Gracias, Santiago, por enseñarme que en la vida hay que ser fuerte. Quiero dar las gracias a todos mis amigos por hacerme reír cuando más lo necesitaba. Y muchas gracias Ali, porque sin ti nada de esto sería posible.

Por último, quiero dar las gracias a Raúl, por transmitirme todos los conocimientos que necesitaba, ayudarme a realizar este proyecto y orientarme en todo momento.

# Índice de contenidos

<b>1</b>	<b>Introducción</b> .....	12
<b>2</b>	<b>Estado del arte</b> .....	13
<b>2.1</b>	<b>TIPOS DE HIDRÓGENO</b> .....	13
<b>2.2</b>	<b>PRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO</b> .....	13
<b>2.2.1</b>	<b>ELECTRÓLISIS</b> .....	14
2.2.1.1	ELECTROLIZADOR DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE PROTONES (PEM).....	14
2.2.1.2	ELECTROLIZADOR ALCALINO (AEC).....	15
2.2.1.3	ELECTROLIZADOR DE ÓXIDO SÓLIDO (SOEC).....	15
<b>2.2.2</b>	<b>REFORMADO DE GAS NATURAL</b> .....	16
2.2.2.1	REFORMADO POR VAPOR DE AGUA.....	16
2.2.2.2	REFORMADO POR OXIDACIÓN.....	17
2.2.2.3	REFORMADO AUTOTÉRMICO.....	17
2.2.2.4	REFORM. MEDIANTE USO DE FUENTES RENOVABLES.....	18
2.2.2.4.1	REFORMADO DE BIOGÁS.....	18
2.2.2.4.2	REFORMADO DE ALCOHOLES.....	19
<b>2.2.3</b>	<b>PIRÓLISIS</b> .....	19
<b>2.2.4</b>	<b>TERMÓLISIS</b> .....	19
<b>2.2.5</b>	<b>GASIFICACIÓN</b> .....	20
<b>2.3</b>	<b>ALMACENAMIENTO, TRANSPORTE Y USOS</b> .....	20
<b>2.3.1</b>	<b>ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO GAS</b> .....	21
2.3.1.1	ALMACENAMIENTO EN TANQUES.....	21
2.3.1.2	ALMACENAMIENTO EN CAVIDADES SALINAS.....	22
<b>2.3.2</b>	<b>TRANSPORTE DE HIDRÓGENO GAS</b> .....	23

2.3.3	<b>ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO LÍQUIDO</b>	24
2.3.4	<b>TRANSPORTE DE HIDRÓGENO LÍQUIDO</b>	24
2.3.5	<b>ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE A TRAVÉS DE OTROS COMPUESTOS</b>	25
2.3.5.1	AMONÍACO COMO PORTADOR DE HIDRÓGENO	26
2.3.5.2	METANOL COMO PORTADOR DE HIDRÓGENO	27
2.3.5.3	OTROS PORTADORES ORGÁNICOS LÍQUIDOS	28
2.3.5.4	METANO SINTÉTICO COMO PORTADOR DE HIDRÓGENO	28
<b>3</b>	<b>Instalaciones por medio de hidrógeno</b>	<b>30</b>
<b>3.1</b>	<b>NECESIDADES DE LA INSTALACIÓN</b>	<b>30</b>
<b>3.1.1</b>	<b>PILAS DE COMBUSTIBLE</b>	<b>31</b>
3.1.1.1	PILAS DE COMBUSTIBLE ALCALINAS (AFC)	32
3.1.1.2	PILAS DE MEMB. DE INTERC. DE PROTONES (PEM)	33
3.1.1.3	PILAS DE ÓXIDO SÓLIDO (SOFC)	33
3.1.1.4	PILAS DE ÁCIDO FOSFÓRICO (PAFC)	34
3.1.1.5	PILA DE COMB. DE CARBONATOS FUNDIDOS (MCFC)	35
<b>3.2</b>	<b>GENERACIÓN DE ENERGÍA DOMÉSTICA A PARTIR DE HIDRÓGENO</b>	<b>35</b>
<b>3.2.1</b>	<b>PLANTA PRODUCTORA DE HIDRÓGENO VERDE</b>	<b>36</b>
3.2.1.1	PARQUE EÓLICO O SOLAR	37
3.2.1.2	CONJUNTO DE BATERÍAS	38
3.2.1.3	NAVE DE ELECTROLIZADORES	38
3.2.1.4	PURIFICADOR Y COMPRESOR	38
3.2.1.5	TANQUES DE ALMACENAMIENTO	39
3.2.1.6	ZONA DE RECARGA	39
3.2.1.7	RED DE DISTRIBUCIÓN	40

<b>3.2.2</b>	<b>USO DE PILAS DE COMBUSTIBLE EN INSTALACIONES DOMÉSTICAS A TRAVÉS DEL HIDRÓGENO</b>	41
3.2.2.1	SISTEMA ENE-FARM H2 KIBOU	41
3.2.2.1.1	CARACTERÍSTICAS	42
3.2.2.2	COMPONENTES DE LA INSTALACIÓN	44
3.2.2.3	COSTES DE LA INSTALACIÓN	50
3.2.2.4	OPINIÓN PERSONAL ACERCA DE LA INSTALACIÓN	51
<b>4</b>	<b>Implantación de la energía basada en hidrógeno en el mundo</b>	54
<b>5</b>	<b>Vistas al futuro</b>	56
<b>6</b>	<b>Conclusión</b>	59
<b>7</b>	<b>Bibliografía</b>	61

# Índice de figuras

Figura 2. 1. Esquema de funcionamiento y reacciones de diferentes tipos de electrolizadores. ....	14
Figura 2. 2. Tipos de reformadores. ....	16
Figura 2. 3. Barco usado en transporte de hidrógeno. ....	25
Figura 3. 1. Tanque destinado al almacenamiento de hidrógeno verde.....	39
Figura 3. 2. Esquema de la planta de producción de hidrógeno verde .....	40
Figura 3. 6. Placas solares instaladas en el tejado del hogar .....	45
Figura 3. 7. Dispositivo H2 KIBOU (5 kW) y conjunto de dispositivos conectados (30 kW). ....	46
Figura 3. 8. Instalación de dispositivo H2 KIBOU en el exterior de la vivienda.....	46
Figura 3. 9. Esquema interno del dispositivo H2 KIBOU. Elaboración propia a partir de .....	48
Figura 3. 10. Aplicación de PC para dispositivo H2 KIBOU. Elaboración propia a partir de .....	49
Figura 3. 11. Pantalla LCD para el control y monitorización de H2 KIBOU. Elaboración propia a partir de.....	49
Figura 3. 12. Simulación real de ahorro mediante placas solares en hogares.....	52
Figura 5. 1. Potencial para producir hidrógeno verde por debajo de 1,5 \$/kg en 2050, en EJ.....	56
Figura 5. 2. Energía primaria proveniente de fuentes renovables en el año 2000.. .....	57
Figura 5. 3. Energía primaria proveniente de fuentes renovables en el año 2019.. .....	57

# Índice de cuadros y tablas

Tabla 2. 1. Poder calorífico según el combustible.....	20
Tabla 2. 2. Tipos de de tanques. Elaboración propia a partir de .....	22
Tabla 3. 1. Tipos de pilas de combustible y características .....	32
Tabla 3. 2. Características del sistema ENE-FARM (1) .....	42
Tabla 3. 3. Características del sistema ENE-FARM (2) .....	43
Tabla 3. 4. Características del sistema ENE-FARM (3) .....	44
Tabla 3. 5. Presupuesto de instalación en hogares .....	51
Tabla 3. 6. Cálculo de VAN y TIR .....	53

# Glosario

**Blending:** Técnica que usa una mezcla con hidrógeno y gas natural para ser inyectada en tuberías de gas.

**Corrosión:** Proceso que empeora el estado de los materiales metálicos y los desgasta.

**Electrólisis:** Proceso de obtención de hidrógeno renovable a través del agua.

**Electrolizador:** Dispositivo que hace posible el proceso de electrólisis.

**Gas de cola Fischer-Tropsch:** Gas usado en el procedimiento Fischer-Tropsch para la obtención de hidrocarburos mediante tratamientos químicos.

**Green Deal:** Pacto realizado entre países europeos para que el continente sea neutro en emisiones en 2050.

**Hidrógeno:** Es un elemento químico caracterizado por ser un gran portador de energía y el más abundante del universo.

**Lixiviación:** Usando una serie de disolventes líquidos consigue separar distintos elementos presentes en una matriz de carácter sólido.

**Pila de combustible:** Componente que es capaz de suministrar una corriente eléctrica gracias a un suministro de combustible y un oxidante.

**Población descarbonizada:** Se llama así a una población que no usa combustibles que contienen carbono.

**Power-to-gas:** Proceso para convertir la electricidad en gas mediante electrólisis y una metanización.

**Reformado:** Proceso químico que puede obtener hidrógeno desde gas natural fósil u otros compuestos.

**AEC:** Electrolizador alcalino.

**AFC:** Pila de combustible alcalina.

**ATR:** Reformado autotérmico.

**CAPEX:** Compra de activos fijos.

**CaNH:** Imida de calcio.

**CH<sub>4</sub>:** Metano.

**CHP:** Generación combinada de calor y electricidad.

**CO:** Monóxido de carbono.

**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de carbono.

**CO<sub>3</sub>:** Trióxido de carbono.

**GLPs:** Buenas prácticas de laboratorio.

**GW:** Gigawatio.

**H<sup>+</sup>:** Cation hidrógeno.

**H<sub>2</sub>:** Molécula de hidrógeno.

**HMI:** Interfaz Hombre-Máquina.

**HTE:** Electrólisis de alta temperatura.

**Hz:** Hertzio.

**K:** Grados Kelvin.

**K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>:** Carbonato de potasio.

**Kg:** Kilogramo.

**kW:** Kilovatio.

**kVA:** Kilovoltiamperio.

**LCD:** Pantalla de Cristal Líquido.

**MCFC:** Pila de Carbonatos Fundidos.

**mm:** Milímetro.

**MW:** Megavatio.

**N<sub>2</sub>:** Molécula de nitrógeno.

**NH<sub>3</sub>**: Amoníaco.

**NO<sub>x</sub>**: Óxidos de nitrógeno.

**O<sub>2</sub>**: Molécula de oxígeno.

**OH<sup>-</sup>**: Hidroxilo.

**PAFC**: Pila de ácido fosfórico.

**PCI**: Poder calorífico inferior.

**PCS**: Poder calorífico superior.

**PEM**: Electrolizador de membrana de intercambio de protones.

**SO<sub>x</sub>**: Óxidos de azufre.

**SOEC**: Electrolizador de estado sólido.

**T<sup>a</sup>**: Temperatura.

**TIR**: Tasa Interna de Retorno.

**TWh**: Teravatios por hora.

**V**: Voltio.

**VAN**: Valor Actual Neto.

**€**: Euro.

**°C**: Grados Celsius.

# 1 Introducción

La contaminación atmosférica y el aumento de la emisión de gases contaminantes se han vuelto fenómenos cada vez más abusivos en la actualidad. Todos los planes de intervención y políticas en contra de la contaminación han evitado una mayor expansión de esta y han comenzado el camino hacia una sociedad descarbonizada, llegando a acordar el final de los combustibles fósiles en el año 2050.

El gran número de dispositivos y aparatos que funcionan con petróleo y sus derivados hacen que el proceso de descarbonización resulte complicado y arduo, pareciendo una meta imposible de alcanzar para la mayoría de la población.

En este proyecto se pretende estudiar el camino hacia una sociedad libre de emisiones contaminantes a través de la molécula más conocida a nivel mundial, el hidrógeno. Prestando atención a sus métodos de obtención y transporte, formas de almacenamiento, cualidades y características se estudia la posibilidad de combinar una simple molécula de hidrógeno con otros dispositivos para convertirla en la principal fuente de energía en todos los hogares del mundo. Se hará hincapié en la capacidad que tiene el hidrógeno para adaptarse a las nuevas tecnologías y combinarse tanto con sistemas conocidos internacionalmente como las placas solares, como con sistemas aún en desarrollo como los cogeneradores de electricidad y calor a través de pilas de combustible.

La razón principal para la elección del tema del trabajo es la grandísima preocupación por la alta demanda de combustibles fósiles que se observa diariamente ya que, como es sabido en el mundo científico, está previsto que se agoten en el año 2040. El alto precio de los mismos es un factor a tener en cuenta, resultando prácticamente insostenible mantener cualquier tipo de instalación o dispositivo que use este tipo de combustibles a largo plazo.

Surge así la idea de una investigación con la que poder dar a conocer una alternativa a estos productos y la forma de integrarla en los hogares usando la infraestructura presente en la actualidad o incluso modificándola si se mira hacia el futuro.

# 2 Estado del arte

## 2.1 TIPOS DE HIDRÓGENO

Los distintos tipos de hidrógeno varían según el método utilizado para su obtención y, aunque el deseo más generalizado es el uso de técnicas de carácter renovable, la realidad es que la mayoría del hidrógeno presente en la sociedad se adquiere a través de combustibles fósiles. Con la diferenciación según el método de obtención se pueden definir tres tipos de hidrógeno:

- **Hidrógeno gris:** Obtenido a partir de procesos de reformado de vapor de gas natural, sin captura de CO<sub>2</sub>. Supone el 95% del hidrógeno actual.
- **Hidrógeno azul:** Obtenido a partir de reformado de vapor de gas natural, pero capturando el CO<sub>2</sub>.
- **Hidrógeno verde:** Obtenido a partir de procesos como la electrólisis, que funcionan con energía adquirida a través de fuentes renovables.

## 2.2 PRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO

El elevado coste del petróleo y de sus derivados, así como su supuesto final cercano, nos hace preguntarnos si es posible la implementación de otro combustible que pueda reemplazar no sólo a este, sino a muchos otros de los productos que nos ayudan a generar energía.

Es aquí donde entra en juego el hidrógeno. Aunque por sí solo no es capaz de sustituir a otras fuentes de energía, si lo combinamos con una pila de combustible obtendríamos una solución a gran parte de los problemas presentes hoy en día respecto a la generación de energía. Pero la gran pregunta es: ¿Cómo se produce el Hidrógeno? Y lo cierto es que no es tan complicado como puede parecer a priori, y en este proyecto vamos a analizar los métodos más comunes.

## 2.2.1 ELECTRÓLISIS

La electrólisis fue postulada en 1834 en la Ley de Faraday. Esta ley decía que “*la masa de sustancia depositada o liberada en un electrodo es proporcional a la cantidad de electricidad que ha atravesado la celda electrolítica*” [1]. Para este proceso se usan electrolizadores, que actuarán de diferentes maneras según qué materiales estemos usando en él.

Tenemos tres tipos de electrolizadores: de membrana de intercambio de protones (PEM), de óxido sólido (SOEC) y alcalinos (AEC).

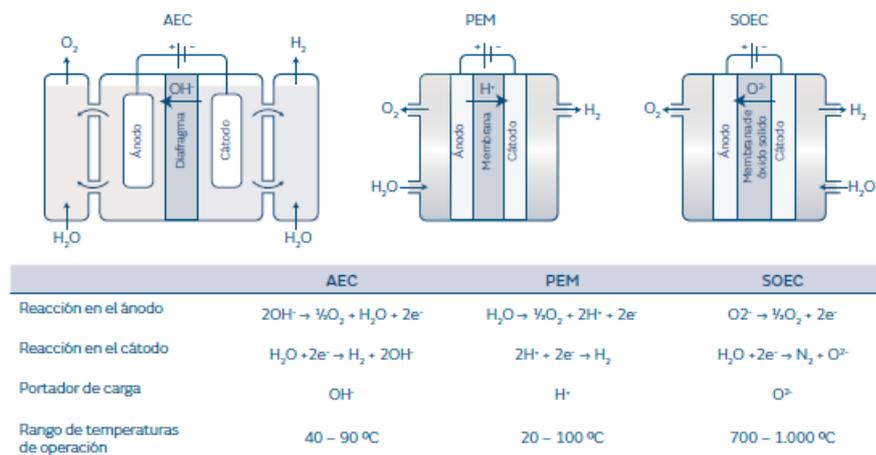


Figura 2. 1. Esquema de funcionamiento y reacciones de diferentes tipos de electrolizadores. [2]

### 2.2.1.1 ELECTROLIZADOR DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE PROTONES (PEM)

Para la división del agua en hidrógeno y oxígeno, ambos por separado, necesitaremos suministrar una corriente eléctrica. Este tipo de electrolizadores se caracterizan por el uso de una membrana especial. La función principal de esta membrana es hacer que los protones del hidrógeno que hemos obtenido anteriormente pasen a través de ella [3], de forma que se forme así hidrógeno en estado gaseoso.

La gran ventaja de los electrolizadores PEM es la obtención de un hidrógeno puro y limpio, además de su facilidad ante la refrigeración. Su único inconveniente: el precio, que es muy alto debido al uso de catalizadores de elevada calidad.

#### 2.2.1.2 *ELECTROLIZADOR ALCALINO (AEC)*

Estos electrolizadores son los más simples de los tres expuestos en este trabajo. Su funcionamiento consiste en una solución electrolítica, que suele ser hidróxido de potasio o hidróxido de sodio, combinada con agua [3].

Para adquirir el gas hidrógeno es necesario el uso consecutivo de celdas, normalmente en serie. Cada celda posee una membrana propia, con el ánodo a un lado y el cátodo al otro.

Mediante la aplicación de una corriente eléctrica lograremos la obtención de burbujas:

- De gas hidrógeno (cátodo).
- De gas oxígeno (ánodo).

Los dos tipos de gases quedarán en lados distintos de la membrana al hacer pasar los iones de hidróxido que usemos desde el cátodo al ánodo a través del electrolito.

#### 2.2.1.3 *ELECTROLIZADOR DE ÓXIDO SÓLIDO (SOEC)*

Este tipo de electrolizador opera con unas temperaturas de entre 500 °C y 850 °C, obteniendo gran eficiencia; por eso podemos decir que realiza una “Electrólisis de Alta Temperatura o HTE [3], como se conoce por sus siglas en inglés.

El funcionamiento es simple. En el cátodo conseguiremos la formación de hidrógeno gaseoso por medio de la combinación de los electrones con agua. En el ánodo, por el contrario, se forma oxígeno gas oxígeno al pasar el oxígeno obtenido por la membrana deslizante y hacerlo reaccionar.

Este tipo de electrolizadores no están tan avanzados como los anteriores, aunque próximamente veremos un mayor desarrollo tecnológico.

## 2.2.2 REFORMADO DE GAS NATURAL

El reformado es uno de los procesos más usados y avanzados en la producción del hidrógeno hoy en día, suponiendo en países como los Estados Unidos hasta el 95% de la producción de hidrógeno total [4].

Cómo es sabido generalmente, hay metano presente en el gas natural, que puede ser usado para un reformado mediante vapor de agua, por oxidación o por un proceso autotérmico, que resulta de la combinación de los dos anteriores.

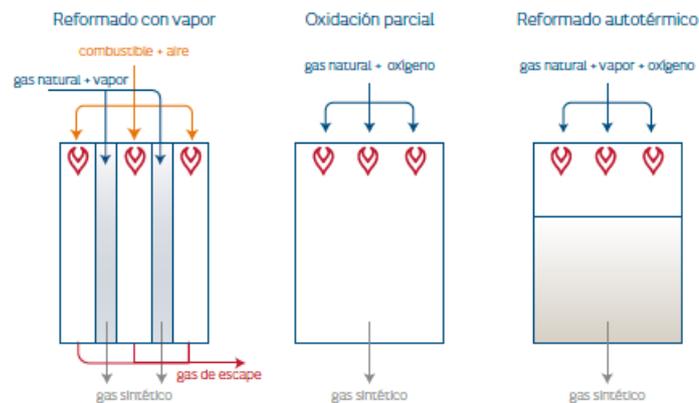
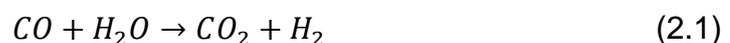


Figura 2. 2. Tipos de reformadores. [2]

### 2.2.2.1 REFORMADO POR VAPOR DE AGUA

El reformado por vapor de agua es uno de los métodos más comunes a la hora de producir hidrógeno, sobre todo si hablamos del que utiliza metano. Debemos someter el vapor de agua a unas temperaturas de entre 700°C-1000°C [4], de forma que consigamos la reacción del metano con este vapor de agua, normalmente a unas presiones no superiores a 25 bares. Es importante destacar que, para que esta reacción tenga lugar, necesitaremos un catalizador.

Para obtener gas hidrógeno se ocasiona la reacción "Water-gas shift":



Como podemos observar en la reacción expuesta anteriormente, aún tendríamos dióxido de carbono, así que se produce una “Adsorción por oscilación de presión”, dejando el hidrógeno puro y eliminando impurezas:



#### 2.2.2.2 REFORMADO POR OXIDACIÓN

La sencillez del reformador por oxidación hace que consigamos hidrógeno puro con facilidad. Esta vez haremos reaccionar metano e hidrocarburos seleccionados previamente con oxígeno, aunque este último en poca cantidad. Podemos hacer la reacción usando aire logrando un proceso más barato, con el inconveniente de la presencia de nitrógeno en el resultado.

Como el proceso también producirá impurezas, se aplicará el mismo funcionamiento que en el reformado por vapor de agua mediante el empleo de “reacciones de desplazamiento agua-gas”.

En conclusión, al hacer el reformado por oxidación logramos un proceso rápido, pero que producirá menos hidrógeno que el reformado por vapor.

#### 2.2.2.3 REFORMADO AUTOTÉRMICO

Aunque los reformados por oxidación y por vapor de agua son los más usados hoy en día, el reformado autotérmico es un procedimiento que también es muy popular, sobre todo por la gran cantidad de materias primas que admite para la producción de hidrógeno.

Como podemos ver en la *Figura 2.2.*, este tipo de procedimiento se lleva a cabo combinando los reformados por oxidación por vapor, de manera que usaremos vapor de agua y oxígeno conjuntamente para conseguir hidrógeno.

Aunque normalmente hacemos uso del gas natural, el reformado ATR admite otras materias primas como algunos gases residuales procedentes de la refinería, nafta, GLPs, gas de cola Fischer-Tropsch o gas preformado [5]. Dependiendo del tipo de producto que usemos para el reformado se deberá proceder con una desulfuración, para que posteriormente sea precalentado y pre-reformado antes de entrar al ATR donde se someterá a unas altas presiones de hasta 100 bares.

El siguiente paso sería hacer reaccionar el gas que hayamos elegido con vapor de agua y oxígeno, para después hacer que la mezcla obtenida alcance un equilibrio a nivel termodinámico, y obtener un gas de síntesis de calidad, que cuando se enfríe resultará en un vapor de alta presión.

#### 2.2.2.4 REFORMADO MEDIANTE USO DE FUENTES RENOVABLES

En cuanto a las fuentes renovables, podemos decir que hablamos de algo muy interesante y esperanzador a la hora de disminuir la contaminación lo máximo posible. Entre los métodos más usados se encuentran el reformado de biogás y el de alcoholes.

##### 2.2.2.4.1 REFORMADO DE BIOGÁS

Poco a poco este tipo de reformado va avanzando en la industria, hasta el punto de ser una de las iniciativas más prometedoras de cara al futuro. El biogás contiene una alta cantidad de metano, o biometano al provenir de este compuesto, que nos resultará muy útil como ya vimos en los otros procesos de reformado a la hora de producir hidrógeno [2].

Además, si a esto le sumamos el bajo coste y la seguridad que nos proporciona, así como la posibilidad de producir un hidrógeno verde con una huella de carbono insuperable [6], se llega a la conclusión de que es un método a tener en cuenta de cara al futuro.

#### 2.2.2.4.2 REFORMADO DE ALCOHOLES

Las reacciones del metanol y el etanol son las más estudiadas. Al hablar del reformado del metanol, debemos indicar que es una reacción realizada en presencia de un catalizador (catalítica) [7]. El catalizador es importante, ya que nos ayudará a lograr mayor cantidad de hidrógeno gas y menor cantidad de impurezas y dióxido de carbono.

#### 2.2.3 PIRÓLISIS

La pirólisis es un proceso que se dedica a la obtención de hidrógeno sin la necesidad de oxígeno mediante la descomposición del metano [8], quedando así un método de generación sin producción de dióxido de carbono.

El principal problema es que al descomponer el metano se generará carbón en estado sólido, pudiendo atascar reactores y otros aparatos. Actualmente se está trabajando en la viabilidad a la hora de usar materiales que puedan soportar temperaturas muy altas sin desestabilizarse, consiguiendo así que el carbón flote en la superficie de la fundición obtenida, facilitando su retirada [9].

#### 2.2.4 TERMÓLISIS

Consiste en el uso del calor de la luz solar para la producción de hidrógeno mediante un proceso químico, realizado a alta temperatura para que la descomposición del agua sea más sencilla.

Se tiene otro procedimiento similar llamado fotólisis, que usará los fotones solares para producir hidrógeno directamente de sistemas electroquímicos o biológicos. La posibilidad de realizar la fotólisis se la debemos a organismos fotosintéticos como la cianobacteria o el alga verde [10].

## 2.2.5 GASIFICACIÓN

Aunque el método de gasificación más conocido es el realizado mediante el uso de carbón, tenemos otras formas de convertir materia orgánica tales como la biomasa y todo tipo de residuos.

La idea principal es someter un material sólido a una corriente de vapor de agua a gran temperatura, obteniendo así hidrógeno en forma de gas (y otros compuestos como monóxido de carbono o dióxido de carbono) [11] que tendrá múltiples usos, como el de combustible y forma de energía, que es lo que vamos a estudiar en este proyecto.

## 2.3 ALMACENAMIENTO, TRANSPORTE Y USOS

El hidrógeno presenta un gran poder calorífico másico (ver Tabla 2.1.) frente a otros combustibles químicos, indicado por el poder calorífico inferior (PCI) y el poder calorífico superior (PCS). También cabe destacar su poder calorífico volumétrico, medido en kJ/L, donde sí se observa que el valor es menor al de otros compuestos, haciendo que su almacenamiento en forma gaseosa resulte muy complicado. Pese a esto, el hidrógeno sigue siendo un elemento con gran capacidad como fuente de energía. Además, no produce emisiones a la atmósfera y tiene menor impacto en el medio ambiente. Entonces, ¿por qué su uso no es tan elevado cómo debería?

Tabla 2. 1. Poder calorífico según el combustible. [12]

Combustible	Densidad kg/m <sup>3</sup>	PCI kJ/kg	PCS kJ/kg	Combustible	Densidad kg/m <sup>3</sup>	PCI kJ/kg	PCS kJ/kg
Gas natural	(*)	39900	44000	Gas de agua	0'711	14000	16000
Gas de hulla	0'50		46900	Gas ciudad	0'650	26000	28000
Gas de coquería	0'56	31400	35250	Gas de agua carburado	0'776	26400	27200
Gas de aire	----	10000	12000	Propano	506 (l) 1'85 (g)	46350	50450
Hidrógeno	0'0899	120011	141853	Butano	580 (l) 2'4 (g)	45790	49675

(\*) Varía según el país de procedencia

(l), (g) Densidad a 20 °C en estado líquido y gaseoso, respectivamente.

P.C. Medio del biogás = 5554 kcal/m<sup>3</sup>

El primer inconveniente es que el hidrógeno es un portador de energía, y que tenemos que producirlo, ya que sólo se encuentra en el agua o hidrocarburos [13]. Como pudimos ver en apartados anteriores, hay muchos métodos para la obtención de hidrógeno, y todos ellos conllevan un coste, que en otros casos no habría que pagar al tener directamente una fuente de energía y no ser necesaria su producción.

El segundo problema es la baja  $T^a$  de ebullición del hidrógeno, de tan sólo 33 K (-252,8 °C), que hace muy complicado su almacenamiento al tener que cumplir unos requisitos tan altos y exigentes.

Teniendo en cuenta estos factores, podemos distinguir algunos métodos de almacenamiento según la forma en la que queramos reunir el hidrógeno.

### **2.3.1 ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO GAS**

Almacenar hidrógeno en su forma gaseosa es algo complejo y muy costoso, debido principalmente a la baja densidad energética (o el bajo poder calorífico volumétrico) de este compuesto.

El método más común y más avanzado de almacenamiento de hidrógeno en su forma gaseosa es por medio de tanques de almacenamiento, aunque también contamos con otras formas como el uso de cavidades salinas.

#### **2.3.1.1 ALMACENAMIENTO EN TANQUES**

Como se comentó anteriormente, este es el método más utilizado para el almacenamiento. Los tanques son normalmente cilíndricos y diseñados con materiales compuestos [14], pudiendo tener revestimientos variados, que suelen ser la fibra de carbono o de vidrio. Algunas veces se presentan costuras horizontales alrededor del tanque, que simplemente proporcionarán una mayor resistencia a las presiones interiores y una seguridad adicional en el momento del transporte.

No siempre necesitaremos la misma cantidad de hidrógeno, ni tampoco en las mismas condiciones. Es por esto que cuando se quiere almacenar el hidrógeno en su forma gaseosa, debemos hacerlo en tanques de diferentes tamaños y que admitan presiones distintas. Si necesitamos hidrógeno para su uso en laboratorios de pequeño tamaño usaremos un tanque pequeño, de tipo I probablemente; sin embargo, para transportar hidrógeno en un camión o tráiler usaríamos un tanque mucho más grande, hablando de tanques de tipo III o IV.

Los tanques varían según su uso, dependiendo de si son para almacenamiento fijo o para su recarga en estaciones de hidrógeno, siendo estos últimos destinados a su utilización en coches impulsados por hidrógeno, en sustitución de los carburantes conocidos hoy en día.

Como podemos ver en la Tabla 2.2. existen distintos tipos de tanques, que variarán según su destinatario y la tarea que se quiera desempeñar con ellos.

Tabla 2. 2. Tipos de de tanques. Elaboración propia a partir de [15]

Tipo de tanque	Materiales	Presión admitida (bar)	Características principales
 Tipo I	Acero o Aluminio, sin costuras.	175-200	Muy pesado y con paredes gruesas. Usado para hidrógeno comprimido en laboratorios.
 Tipo II	Acero o Aluminio, sin costuras y con revestimiento de fibra de carbono y vidrio.	400-1000	Usado en aplicaciones estacionarias o en industrias hidrogeneras.
 Tipo III	Normalmente de Aluminio, con o sin costuras y revestimiento de fibra de carbono o vidrio.	Hasta 700	Son más ligeros que los de tipo I y II. Más caros que los otros tipos.
 Tipo IV	Forro interno de polietileno y reforzado con fibras de carbono y vidrios.	Hasta 700	Usados en tráilers para transporte.

### 2.3.1.2 ALMACENAMIENTO EN CAVIDADES SALINAS

Las cavidades salinas son cavidades subterráneas con una capa de sal o halita. Las encontramos a unos 800 metros de profundidad, ya que la sal es soluble en agua. Aunque las cavidades salinas que nos encontramos son de origen natural, precisan de una excavación realizada por lixiviación [16].

El almacenamiento de hidrógeno en cavidades salinas nos proporciona una alternativa eficiente y que ya está comenzando a usarse, con un funcionamiento más que correcto. Esta solución nos permite acumular cantidades inmensas de hidrógeno de una forma muy barata [17].

La idea principal es reunir espacios amplios. Así conseguiremos que el gas no esté tan comprimido, de forma que la solución al problema de las grandes presiones que nos surge en los tanques se solventa ofreciendo un espacio de volúmenes muy grandes.

Muchos se preguntarán el por qué las cavidades tienen que ser necesariamente salinas. La respuesta es sencilla: las paredes de este tipo de formaciones naturales no producen reacciones químicas al interactuar con el hidrógeno, así que podremos almacenar nuestro hidrógeno gaseoso sin preocuparnos de si sufrirá algún tipo de alteración o no.

### **2.3.2 TRANSPORTE DE HIDRÓGENO GAS**

El transporte del hidrógeno en su forma gaseosa supone un gran reto hoy en día, de manera que actualmente no podríamos hablar de un método totalmente rentable.

Numerosos estudios indican que es probable que en el año 2050 los métodos de transporte de hidrógeno gas estén mucho más avanzados y que contemos con tecnologías más rentables y eficaces que las que se tienen. El transporte generalmente se realiza por carretera, en camiones adecuados para ello.

Los principales inconvenientes del transporte por carretera son:

- Las altas presiones del hidrógeno (De hasta 700 bares).
- Las pequeñas cantidades que podemos transportar en cada viaje (de unos 1000 kg/viaje).
- La ausencia de gasoductos con capacidad de llegar hasta el usuario.

Si consiguiésemos estabilizar el proceso de transporte podríamos obtener unos costes muy bajos en grandes volúmenes (precios de entre 0,1- 0,17 €/kg de Hidrógeno), que supondrían un gran ahorro en el consumo de la población.

Una de las alternativas que se proponen es el *blending* del hidrógeno con gas natural, que consiste en mezclar estos dos compuestos en esas zonas donde no se puede contemplar el diseño de una red específica para hidrógeno.

### 2.3.3 ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO LÍQUIDO

Como hemos podido ver, almacenar y transportar hidrógeno en su forma gaseosa es costoso y complicado, así que con el paso del tiempo se han buscado alternativas, siendo una de las más viables el almacenamiento y transporte de hidrógeno líquido.

Al almacenar el hidrógeno licuado conseguimos aumentar la densidad de este compuesto, de forma que posteriormente consigamos un transporte más sencillo y barato. Se calcula que aproximadamente se podría almacenar hasta 4 veces más hidrógeno en su fase líquida que en la gaseosa. El problema de este tipo de almacenamiento es la baja temperatura de licuado del hidrógeno, de unos -253 °C.

El diseño de tanques que aguanten unas temperaturas tan bajas es complejo y supone un reto. Además, durante el proceso de licuado se pierde de forma estimada un 30% de la energía total que podríamos producir con esa cantidad de hidrógeno. Tienen un CAPEX elevado [18] que hace que las empresas no quieran invertir en este tipo de tecnología.

### 2.3.4 TRANSPORTE DE HIDRÓGENO LÍQUIDO

El primer paso que debemos tener en cuenta en el transporte de hidrógeno líquido es pasar el hidrógeno gaseoso a su forma líquida. Es un proceso simple con las tecnologías adecuadas, ya que solo tendremos que llevar el hidrógeno hasta su  $T^a$  de ebullición. El reto comienza a la hora de mantener este hidrógeno licuado a una  $T^a$  tan baja durante un transporte o almacenado en cualquier tipo de tanque.

Si somos capaces de mantener el hidrógeno licuado obtendríamos un gran potencial en el transporte intercontinental, consiguiendo llevar a su destino hasta 4 veces más de hidrógeno en cada porte que en su fase gaseosa, como ya se mencionó en el apartado anterior.

Sin embargo, la única manera de transportarlo actualmente es en camiones que cuentan con personal especializado para su manejo y transporte, al ser un producto tan delicado. La necesidad de una formación concreta para la manipulación de este compuesto es el principal problema que presenciamos, además claro está, de los costes.

Hoy en día se están empezando a investigar barcos como el que se ve más abajo en la Figura 2.3. para este tipo de transporte, aunque todavía se encuentran en estado de prueba y no existen al uso.



*Figura 2. 3. Barco usado en transporte de hidrógeno. [19]*

### **2.3.5 ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE A TRAVÉS DE OTROS COMPUESTOS**

Con el paso del tiempo, se ha comprobado que una de las grandes posibilidades para el almacenamiento y transporte del hidrógeno es mediante el uso de otros

compuestos que nos permitan una manejabilidad más sencilla y sobre todo más barata.

La idea principal es utilizar compuestos conocidos desde hace muchos años como el metanol o el amoníaco, y aprovechar la energía que producen, tanto ellos mismos como combinados con hidrógeno, al reaccionar con el oxígeno del aire [20]. También se plantea la posibilidad de usar portadores orgánicos líquidos que formen un compuesto similar a un derivado del petróleo, o metano sintético, resultado de la combinación de  $\text{CO}_2$  con  $\text{H}_2$  para formar un gas natural sintético.

#### 2.3.5.1 AMONÍACO COMO PORTADOR DE HIDRÓGENO

Como ya es sabido, el amoníaco es un compuesto químico presente en nuestra sociedad desde hace muchos años. Desde su uso en el hogar como desinfectante hasta para tratar picaduras de insectos o como gas refrigerante, el amoníaco es utilizado a diario con distintos propósitos. Al ser tan conocido, su manejo y uso se hacen más sencillos que el de otros compuestos como por ejemplo el hidrógeno.

El amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) está formado por moléculas de hidrógeno y nitrógeno, de manera que la idea principal es aprovechar el  $\text{NH}_3$  como portador del hidrógeno.

Para su obtención bastará con realizar el famoso proceso *Haber-Bosch* que nos facilitará la unión de  $\text{H}_2$  con  $\text{N}_2$ , produciendo una molécula estable y manejable como el amoníaco. Los sistemas de almacenamiento son sencillos, en tanques donde se recoge en estado líquido y después es enviado a evaporadores, aunque esto dependerá del uso que se le quiera dar [21]. El gran problema en la utilización de amoníaco como portador de hidrógeno es cómo recuperar el hidrógeno presente en el amoníaco. Aunque han surgido muchas teorías sobre cuál es la mejor manera de hacerlo sin consumir mucha energía, el empleo de distintos tipos de catalizadores como el Níquel consigue unos resultados excelentes. Sin embargo, para utilizar el Níquel de forma que adsorba el amoníaco en su superficie son necesarias temperaturas muy altas, y es por esto que surge el compuesto  $\text{CaNH}$  (imida de Calcio) [22], que en combinación con el Níquel permite unas temperaturas de operación muy inferiores a las mencionadas. Otra de las opciones que aún están

en desarrollo es el uso de platino electrodepositado en forma de flor [23], que obtiene un hidrógeno con pureza cercana al 100%. El uso de catalizadores es sin duda la mejor opción en la recuperación del hidrógeno directamente del amoníaco, pero el precio es bastante alto.

El problema en cuanto al almacenaje es el elevado coste energético y económico que supone, ya que mantener unas instalaciones con estas características supone un gran reto. Debemos tener en cuenta también la pérdida energética que supondría la reconversión del amoníaco a hidrógeno, inclusive a que las plantas que tenemos actualmente no existen a gran escala, planteándonos la cuestión de si es viable o no la construcción de centrales de almacenaje de gran tamaño.

En cuanto al transporte, se lleva realizando décadas y no propone una logística muy complicada. El problema es de nuevo el coste de formación del personal ya que, aunque el  $\text{NH}_3$  es usado en hogares y aparentemente de manejo fácil, la realidad es que es un producto muy tóxico y peligroso cuando se manipula en altas proporciones.

#### 2.3.5.2 METANOL COMO PORTADOR DE HIDRÓGENO

El metanol es un tipo de alcohol muy sencillo, incoloro y muy tóxico para el ser humano. Normalmente se usa como anticongelante, combustible o disolvente [24], aunque como vamos a ver a continuación, podría servir como portador de energía a través del hidrógeno.

Podemos obtener metanol como resultado de la combinación de  $\text{H}_2$  con  $\text{CO}$ , para formar un compuesto líquido, denso, estable y “biodegradable”. Aunque su uso como portador de hidrógeno aún está en desarrollo, se prevé que podría tener un potencial altísimo como combustible de barcos o en la combustión química, así como también en complemento al biometanol.

Al igual que en el resto de métodos, supondría un coste energético muy elevado, que sumado al coste económico resultaría una inversión altísima. Asimismo, la presencia de una fuente de carbono cerca del lugar de abastecimiento es casi obligatoria si se pretende proporcionar un transporte eficiente. Como se observó en

el caso del amoníaco, trataríamos con un compuesto que precisa un manejo por personal especializado y que es corrosivo con algunos metales y polímeros, obligándonos a usar materiales concretos en su transporte y almacenamiento, sumado a que tiene una alta toxicidad.

Pese a todos estos inconvenientes, el metanol se ve por los expertos como una de las alternativas más prometedoras en cuanto a la adición de hidrógeno con otras moléculas por el posible uso de la infraestructura actual y su alto potencial en el transporte intercontinental.

#### 2.3.5.3 OTROS PORTADORES ORGÁNICOS LÍQUIDOS

Aunque no son tan comunes como el amoníaco, el benceno y el tolueno son portadores orgánicos muy usados a nivel químico y que están presentes en productos como la gasolina, algunos tipos de barniz, pinturas, etc.

La idea es unir el hidrógeno al benceno o el tolueno para formar compuestos que sean similares a un derivado del petróleo mediante procesos de hidrogenación-deshidrogenación, facilitándonos un compuesto reutilizable y que nos proporciona un almacenamiento estacional, es decir, que se almacenará y producirá durante épocas en la que su consumo es más bajo para después poder abastecer en gran medida cuando su demanda sea mayor.

En este caso, como en todos los demás, el coste energético es alto, y debemos tener en cuenta unas pérdidas en la reconversión de aproximadamente un 30% del total. El transporte por lo general es bastante sencillo y ya está siendo integrado en hidrogeneras por su estabilidad y la reutilización de activos que permite. El problema es que los viajes tienen que ser de ida y vuelta, suponiendo un gasto doble frente a otros tipos de transporte.

#### 2.3.5.4 METANO SINTÉTICO COMO PORTADOR DE HIDRÓGENO

Los sistemas *Power-to-Gas* nos proporcionan una solución sencilla para convertir toda la electricidad renovable sobrante en gases, como el hidrógeno y el metano

[25], que son las alternativas principales en la transición energética que estamos viviendo y que viviremos en los próximos años.

El propósito principal es unir  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$  de manera que formemos un gas sintético, más manejable y accesible que el hidrógeno. El proceso de unión de estas dos moléculas es bastante simple.

Una de las principales ventajas del metano sintético es que podría sustituir completamente al gas natural que tenemos actualmente, de forma que usase toda la infraestructura que hay instalada en los hogares.

En mi opinión, el uso del metano sintético es la opción que menos futuro tiene, ya que no consigue un ahorro muy grande y los costes de producción son demasiado altos.

# 3 Instalaciones por medio de hidrógeno

Actualmente, la mayoría de combustibles usados tanto en la industria como en los hogares son fósiles. Como se explicó anteriormente, todos estos recursos ya están comenzando a agotarse. Según los planes de intervención ya aprobados se pretende que en el año 2050 se haga uso tan sólo de un 20% de carbón, un 50% de gas y un 70% de petróleo para frenar casi por completo el cambio climático [26].

Julio Verne publicó en 1875 su novela *La isla misteriosa*, donde el ingeniero Cyrus Smith respondió con la siguiente cita a la pregunta de qué pasaría cuando se agotase el carbón: *“Creo que el agua se usará un día como combustible, que el hidrógeno y el oxígeno que la constituyen, utilizados aislada y simultáneamente, producirán una fuente de calor y de luz inagotable y de una intensidad mucho mayor que la de la hulla. [...] Creo que, cuando estén agotados los yacimientos de hulla, se producirá el calor con agua. El agua es el carbón del porvenir.”* [27]. Aunque ya hace más de un siglo desde que el autor dijo estas palabras, parece que no estaba tan desencaminado, ya que el núcleo central del uso del hidrógeno como fuente de energía doméstica es su obtención principalmente por electrólisis que, como se vio en el subapartado 2.2.1., consiste en extraer el H<sub>2</sub> a partir del agua.

## 3.1 NECESIDADES DE LA INSTALACIÓN

Al hablar de una instalación que funcione mediante hidrógeno cabe destacar que la mejor opción es que este sea verde, es decir, hidrógeno generado a partir de métodos de obtención renovables como por ejemplo la energía eólica, la solar o la geotérmica, entre otras [28]. Sin embargo, en la actualidad no disponemos de suficientes estaciones de obtención de hidrógeno verde, así que también se pueden plantear instalaciones mediante hidrógeno gris, que no son tan eficaces a la hora de combatir la contaminación pero que supondrían una alternativa más realista.

Aunque actualmente aún supone un gran reto, conseguir generación de calor y electricidad en nuestros hogares podría ser posible haciendo uso de pilas de combustible. Las pilas deberán estar conectadas en serie entre sí, combinadas en celdas unas con otras que después se conectarán en paralelo. La idea principal es hacer funcionar estas pilas con hidrógeno que provenga directamente de fuentes renovables como las mencionadas anteriormente.

Para comprender todos y cada uno de los componentes de nuestra instalación, primero debemos analizar las distintas tecnologías disponibles para las pilas de combustible, además de las diferencias entre el hidrógeno verde, el gris y el azul.

### **3.1.1 PILAS DE COMBUSTIBLE**

Cuando queremos usar el hidrógeno para obtener potencia eléctrica, la mejor opción es el uso de pilas de combustible. Estas pilas nos permiten generar electricidad sin necesidad de una reacción de combustión que, como ya sabemos, provoca la expansión de gases nocivos hacia la atmósfera. Para suplir la reacción de combustión se realiza una de oxidación, que no sólo disminuye las emisiones de CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y otros compuestos dañinos para el medio ambiente, sino que también nos proporcionará una mayor eficiencia energética.

Para que la pila funcione se le proveerá de hidrógeno, que reaccionará con el oxígeno generando agua [2]. Por añadidura, la reacción dejará consigo un rastro de electrones que serán retirados para dar pie a la corriente eléctrica que más adelante alimentará nuestros hogares.

La pila contendrá las llamadas celdas conectadas en paralelo, que poseerán tanto ánodo como cátodo, alejados entre sí por medio de un electrolito. Aplicamos el hidrógeno en el ánodo y aire (del que se extraerá directamente el oxígeno) en el cátodo para conseguir la reacción de oxidación-reducción. El electrolito favorecerá la propagación de los iones en los dos electrodos.

Al analizar todo el procedimiento, contemplamos una serie de ventajas frente a los procesos de combustión.

1. **Gran versatilidad.** Ya que tienen un gran número de aplicaciones posibles, desde su uso en todo tipo de vehículos hasta en instalaciones a nivel doméstico.
2. **Mayor eficiencia energética frente a la combustión.**
3. **Reducción de emisiones.** Al estudiar todas las fases de producción de electricidad mediante pilas de combustible se concluye que el único “residuo” que generan las pilas de combustible surtidas con hidrógeno es agua, a diferencia de la combustión, que desencadena innumerables gases nocivos y de efecto invernadero.
4. **Seguridad.** No sólo a nivel mecánico, sino también ante cualquier tipo de explosiones.

Actualmente existen numerosos tipos de pilas de combustible, que varían en función del tipo de electrolito, el combustible que precisan para el funcionamiento, el rango de temperaturas de operación, etcétera.

*Tabla 3. 1. Tipos de pilas de combustible y características. [29]*

	AFC	PEM	SOFC	DMFC	MCFC	PAFC
Nombre	Alcalina	Membrana de intercambio Protónico	Óxidos Sólidos	Metanol Directo	Carbonatos Fundidos	Acido Fosfórico
Carga	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	O <sup>2-</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	H <sup>+</sup>
Temperaturas	90-100°C	50-120 °C	700-1000°C	50-100 °C	600-700°C	150-200°C
Eficiencias	60-70%	60%	60%	40%	45-50%	40%
Electrolito	KOH disuelto en Agua	Membrana de polímeros	Óxidos Sólidos	Membrana de polímeros	Carbonatos fundidos	Acido Fosfórico
Combustible	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub>	Metanol	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>

### 3.1.1.1 PILAS DE COMBUSTIBLE ALCALINAS (AFC)

Las pilas de combustible alcalinas son comúnmente conocidas por ser la principal fuente de energía que permitió la llegada del ser humano a la Luna. Llevan décadas siendo usadas en viajes espaciales, como el proyecto Apolo.

Esta clase de pilas es muy delicada, ya que puede sufrir un fenómeno llamado envenenamiento, que consiste en la aparición de carbonato potásico (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)

cuando el electrolito entra en contacto con el  $\text{CO}_2$ . Para evitar que se produzca, se debe procurar que siempre sean alimentadas con oxígeno de gran pureza o aire que haya sido previamente purificado [30]. Asimismo, constan de una matriz que normalmente está hecha de asbesto, que impedirá que el hidróxido de sodio o de potasio presentes en una solución electrolítica conduzcan la electricidad. Cabe destacar que la  $T^a$  de operación de estas pilas es de unos  $65\text{ }^\circ\text{C}$ , aunque podrían llegar a alcanzar baremos más altos, de hasta unos  $90\text{-}100\text{ }^\circ\text{C}$ .

Por último, solo queda hablar del catalizador, que será el responsable de aumentar la velocidad de la reacción química entre el hidrógeno y el oxígeno. Normalmente se usa el platino, pero existen otras alternativas más baratas como el níquel o algunos óxidos de carácter metálico [31].

### 3.1.1.2 PILAS DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE PROTONES (PEM)

La pila de membrana de intercambio de protones o pila polimérica comenzó su producción en los años 70, convirtiéndose en una de las pilas de combustible más comercializadas a día de hoy. Aunque su eficiencia no es muy alta con respecto a otras tecnologías presentes en nuestra sociedad, la pila PEM será el núcleo principal de este proyecto por varias razones:

1. **Rápida puesta en marcha.** Puede llegar a ser de tan sólo 1 o 2 minutos, facilitándonos una producción casi inmediata.
2. **Bajas temperaturas de operación** situadas entre  $50\text{-}120\text{ }^\circ\text{C}$ , resultando especialmente interesantes para su uso en hogares.

Su funcionamiento se ve impulsado por catalizadores de un precio muy alto en el mercado. Esto implicará una gran subida en el coste total, que hará que las pilas PEM no estén al alcance de cualquiera, al menos por ahora.

### 3.1.1.3 PILAS DE ÓXIDO SÓLIDO (SOFC)

Estas celdas de combustible utilizan materiales de carácter cerámico, formando una pila totalmente sólida. Al tratarse de una pieza sólida, serán necesarias unas

temperaturas muy altas para que su funcionamiento sea el esperado. Este será su principal inconveniente por la posible aparición de la corrosión, que irá debilitando poco a poco todos y cada uno de los elementos más significativos de la pila.

Sin embargo, con un rango de temperaturas que puede alcanzar los 2.000 °C se obtiene una eficiencia que puede alcanzar valores cercanos al 80%. Debido a esto, podemos permitirnos sustituir minerales preciosos como el oro o el platino por materiales cerámicos que actúen como catalizadores, disminuyendo así considerablemente el precio.

En conclusión, no es la opción más interesante en lo referido a una instalación doméstica, pero a nivel industrial supone una alternativa muy llamativa.

#### 3.1.1.4 *PILAS DE ÁCIDO FOSFÓRICO (PAFC)*

Las pilas de ácido fosfórico, también conocidas como PAFC, llegaron al mercado antes que las demás utilizándose en muchos sistemas de calefacción. Como su propio nombre indica, funcionan con una membrana con electrolito de ácido fosfórico, que utiliza minerales preciosos en calidad de catalizador siendo el platino el más popular. Aunque su implementación para generar energía presenta una eficiencia muy alta, las temperaturas de operación son demasiado elevadas para garantizar la durabilidad de los componentes.

La extensa superficie necesaria para su instalación y el alto precio de los catalizadores requeridos suponen un gran problema, provocando con el paso del tiempo que empresas y particulares prioricen otros métodos en la cogeneración de energía.

La transición energética es un proceso lento de forma que, aunque las pilas de ácido fosfórico no sean la mejor alternativa, siguen siendo a día de hoy una de las tecnologías más implementadas a nivel mundial.

### 3.1.1.5 PILA DE COMBUSTIBLE DE CARBONATOS FUNDIDOS (MCFC)

La pila de combustible de carbonatos fundidos comparte muchas características con la de óxido sólido por las altas temperaturas de operación y el uso de níquel tanto en el ánodo como en el cátodo, pero su utilización no es la más apropiada cuando se quiere alimentar mediante hidrógeno. No obstante, si operamos utilizando metano conseguiremos unas eficiencias de aproximadamente un 60 %, pudiendo alcanzar valores superiores si se combina más de una celda.

A nivel doméstico, las pilas de MCFC no son nada atractivas y ni siquiera suponen una opción rentable. Normalmente las vemos integradas en grandes instalaciones de unos cuantos MW.

## 3.2 GENERACIÓN DE ENERGÍA DOMÉSTICA A PARTIR DE HIDRÓGENO

El uso de hidrógeno verde como principal método para la generación de energía supone un reto que cada vez está más cerca de conseguirse. Aunque su principal objetivo en este momento es la sustentación energética de vehículos, también se propone utilizarlo en hogares e industrias, dado su gran potencial como fuente de energía.

Hoy en día, algunos países como Japón están muy avanzados en cuanto a la generación de hidrógeno verde y su utilización en sistemas de cogeneración. Nos encontramos en un punto en el que casi todo el hidrógeno comercializado y usado a nivel mundial es hidrógeno gris. Sin embargo, en Europa cada vez se dispone de un mayor compromiso con el medio ambiente.

Según indica el Green Deal, en el año 2050 Europa debería ser el primer continente neutro en términos climáticos y, aunque ahora no dispongamos de los métodos necesarios para ello, sí que estamos correctamente encaminados para conseguirlo. Como ya se explicó anteriormente, el hidrógeno verde se obtiene directamente de fuentes de energía renovables, como pueden ser la eólica o la solar. La idea sería

hacer uso de este modelo de producción y combinarlo con electrolizadores que consigan un hidrógeno puro mediante electrólisis.

El primer paso para acercarnos a este objetivo desde el punto de vista del país será diseñar una planta que sea capaz de producir hidrógeno verde por sí misma, para después almacenarlo en tanques o inyectarlo directamente a la red.

Sin embargo, actualmente la mejor opción es el diseño de una instalación propia realizada directamente en el hogar, que sea respetuosa con el medio ambiente y que también sea capaz de abastecerse por sí misma.

### 3.2.1 PLANTA PRODUCTORA DE HIDRÓGENO VERDE

En España ya contamos con plantas de hidrógeno verde para uso industrial, como la que fabricó Iberdrola en Puertollano. Esta infraestructura consta de una instalación de placas solares de 100 MW de potencia. La planta solar fotovoltaica cuenta con paneles bifaciales que tendrán dos superficies capaces de captar energía a través de la luz solar, e inversores *string* que consiguen que tengamos un rendimiento mucho mayor de lo habitual. Con la energía que se obtiene de los paneles solares y la ayuda de unas baterías de hasta 5 MW se abastecen los electrolizadores, que son los encargados de obtener el hidrógeno con unos valores de hasta 360 kg/hora. Este hidrógeno es enviado a tanques, que permiten almacenar hasta seis mil kg de H<sub>2</sub> verde cada uno [32]. Con una instalación como esta, Iberdrola evita la emisión de unas treinta y nueve mil toneladas de CO<sub>2</sub> al año.

Se calcula que en el año 2030 habrá una instalación capaz de producir 4 GW en España, que conseguiría que el 25% del hidrógeno consumido actualmente sea de carácter renovable. En este proyecto se plantea la posibilidad de aumentar considerablemente las instalaciones de producción de H<sub>2</sub> verde, para que este pueda ser inyectado directamente en la red de gas natural del país o para permitir un mayor almacenamiento que ayude cuando la producción sea más baja.

La instalación de Puertollano es actualmente la más grande de Europa, pero si se consiguieran distribuir más centros de producción de hidrógeno de tamaño inferior quizás cabría la posibilidad de llegar con mayor facilidad a los hogares e industrias.

A continuación, se presenta un modelo de planta de hidrógeno verde más pequeña y por lo tanto más adaptable, por necesitar menos espacio para su construcción.

### 3.2.1.1 PARQUE EÓLICO O SOLAR

Se decidirá el tipo de energía renovable a utilizar según la zona donde se quiera realizar la instalación, siendo una mejor elección el parque eólico en las zonas donde hay corrientes de aire fuertes y constantes y el parque solar en aquellos sitios donde el sol predomine.

La fuente de energía usada en la planta de hidrógeno será principalmente la solar, siendo la encargada de proporcionar la electricidad con la que funcionarán los electrolizadores. La potencia necesaria deberá ser de unos 10 MW. Se tratará en todo momento de garantizar el mejor rendimiento posible, aprovechando al máximo las características de la instalación. Con este propósito se procederá a la implementación de un centro de control para los paneles solares [33] que contará con:

- **HMI (Interfaz Hombre-Máquina).** Integrado mediante una pantalla de alta definición para que el operario controle los procesos a su gusto.
- **PLC (Control Lógico Programable).** Adaptado para su uso conjunto con el HMI y conectado directamente a un servidor web para informar en todo momento del sistema de alarmas, consiguiendo reducir los gastos en mantenimiento.
- **Algoritmo único.** Hará que los paneles se sitúen en la posición más óptima según las condiciones climatológicas, facilitando una producción de electricidad mejorada.

Aplicar sistemas de control a cualquier tipo de instalación es una opción innovadora y revolucionaria que ayudará a obtener unos resultados casi imposibles de conseguir sin la aplicación de estas tecnologías.

### 3.2.1.2 *CONJUNTO DE BATERÍAS*

El sistema de producción vendrá con un conjunto de baterías incorporado, que serán las encargadas de almacenar la energía sobrante de las placas solares y redirigirla a los electrolizadores cuando la situación meteorológica impida una producción óptima, es decir, cuando no haya suficiente luz solar como para abastecer completamente a la planta.

Estas baterías contarán con una potencia en torno a 3 MW, que es más que suficiente para una instalación de este tamaño.

### 3.2.1.3 *NAVE DE ELECTROLIZADORES*

La nave de electrolizadores, como su propio nombre indica, constará de un conjunto de electrolizadores que estarán colocados en serie unos con otros, consiguiendo una potencia conjunta de unos 5-6 MW que bastará para que la planta tenga un alto rendimiento. Ya se indicó previamente el funcionamiento de los distintos tipos de electrolizadores (ver subapartado 2.2.1.) y se comprobó que todos ellos suponen una solución óptima a la hora de obtener hidrógeno mediante un proceso de electrólisis. En este caso el tipo de electrolizador no influirá en gran medida en el resultado, pudiendo usar tanto el alcalino (AEC) como el de membrana de intercambio de protones (PEM) o el de óxido sólido (SOEC).

Aunque se intuye dada la naturaleza de la instalación y el proceso de obtención de hidrógeno, hay que destacar que el hidrógeno producido será verde por dos razones: por provenir de una fuente de energía renovable, ya sea solar o eólica, y porque la electrólisis no emite ninguna clase de emisiones a la atmósfera.

### 3.2.1.4 *PURIFICADOR Y COMPRESOR*

Cuando el electrolizador haya completado el proceso de obtención de hidrógeno, este será enviado a un purificador que examinará la corriente y, con la ayuda de un catalizador, eliminará el O<sub>2</sub> y el agua que puedan estar aún presentes en el flujo de

H<sub>2</sub>. Al terminar de quitar las impurezas se someterá al H<sub>2</sub> a un proceso de adsorción, en el que los átomos indeseados que permanezcan en el hidrógeno quedarán atrapados en la superficie externa de un material capacitado para esta función.

Al completarse estos pasos el hidrógeno obtenido del purificador viajará hasta un compresor, que ayudará a su distribución a presiones muy altas de una forma segura y eficiente.

### 3.2.1.5 TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Anteriormente, vimos con profundidad todos los tipos de tanques y sus distintos usos en la industria (ver Tabla 2.2.). Para esta clase de planta, teniendo en cuenta su tamaño y características, lo más apropiado será usar tanques del mayor volumen posible para poder almacenar el hidrógeno a unas presiones de 60-70 bares.



*Figura 3. 1. Tanque destinado al almacenamiento de hidrógeno verde. [34]*

### 3.2.1.6 ZONA DE RECARGA

La zona de recarga será el lugar donde los camiones recogerán los tanques para transportarlos hasta las industrias o zonas de difícil acceso que los necesiten. El

tanque estará adaptado para su anclaje total en el camión evitando movimientos demasiado bruscos, de forma que el hidrógeno que lleva dentro pueda viajar de una forma segura.

### 3.2.1.7 RED DE DISTRIBUCIÓN

La red de distribución será la encargada de llevar el hidrógeno a todos los hogares a través de la infraestructura para el gas natural. En España contamos con una de las mejores instalaciones de gas a nivel mundial, así que sería una pena no hacer uso de ella de forma directa.

Otra opción, al menos durante la transición energética, es realizar *blending* con estas tuberías de gas y el hidrógeno producido. El *blending* es un proceso mediante el que realizamos una mezcla de hidrógeno y gas natural aplicada directamente a la red de distribución que permite inyectar hasta un 25% de H<sub>2</sub> sin modificar la instalación ya existente.

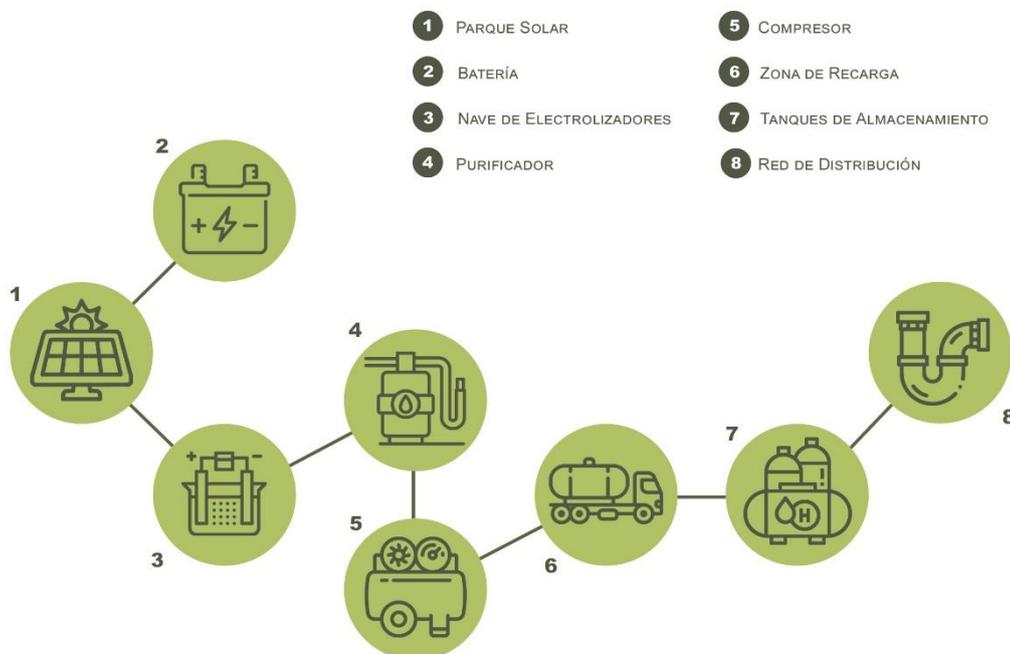


Figura 3. 2. Esquema de la planta de producción de hidrógeno verde. Elaboración propia.

### 3.2.2 USO DE PILAS DE COMBUSTIBLE EN INSTALACIONES DOMÉSTICAS A TRAVÉS DEL HIDRÓGENO

La posibilidad de generar energía y calor en hogares a través del hidrógeno es una alternativa a tener en cuenta en estos días, ya que mediante la combinación de una serie de procesos y fuentes renovables de energía cabe la posibilidad de abastecer por completo una casa e incluso zonas de mayor tamaño como una nave industrial.

Para que la instalación sea rentable se propone una solución sencilla, sin necesidad de modificar la red de gas natural ya existente y que conseguirá una gran disminución en las emisiones a la atmósfera. Su nombre es *Panasonic Hydrogen Fuel Cell* (H2 KIBOU comercialmente) y es un tipo de sistema ENE-FARM que a continuación veremos con más profundidad

#### 3.2.2.1 SISTEMA ENE-FARM H2 KIBOU

Ante los deseos a nivel mundial de una población descarbonizada, gran cantidad de países han planteado una serie de soluciones con el propósito de tener cero emisiones para el año 2050. Una de las alternativas más interesantes es el uso de las energías renovables, aunque tienen algunos inconvenientes como la alta dependencia del clima, de forma que cuando no haya sol o viento la producción de energía solar y eólica será muy pobre. Además, es complicado gestionar un centro de producción de energía teniendo en cuenta la gran demanda que existe actualmente y es indispensable usar baterías de al menos 3 MW para almacenar la energía sobrante en la producción.

El hidrógeno cada vez adquiere más valor como principal sustituto a los combustibles fósiles presentes en la actualidad por su gran poder calorífico y su alta abundancia. Hoy por hoy, ante la imposibilidad de combinar las energías renovables para obtener hidrógeno verde a gran escala y el alto precio del hidrógeno en el mercado, se plantean otras opciones rentables y que permiten la cogeneración de calor y electricidad en hogares por medio de hidrógeno.

A finales del año 2009 Panasonic lanzó al mercado los sistemas ENE-FARM. Estos dispositivos son una opción rentable en cuanto a tecnologías compactas y que ofrecen cogeneración de electricidad y calor. Los sistemas ENE-FARM pertenecen entonces a la rama de dispositivos CHP (Combined Heat and Power), y más concretamente a los micro-CHP por tener una potencia inferior a 20kW [2]. La característica principal de estos dispositivos es su capacidad para extraer hidrógeno directamente del gas natural permitiendo tener energía en hogares sin necesidad de realizar cambios en la infraestructura actual [35].

### 3.2.2.1.1 CARACTERÍSTICAS

Al analizar la Figura 3.3., el tipo de pila de combustible usada es de electrolito polimérico o PEFC que funciona con hidrógeno puro a una presión de 50 kPa. La Tª de operación varía entre -10 °C a 40 °C y puede ser instalado hasta una altitud de 500 m sobre el nivel del mar. Esta última característica hace complicada su utilización en zonas muy elevadas, aunque se prevé que los sistemas ENE-FARM irán mejorando sus prestaciones conforme se adentren en el mercado europeo.

*Tabla 3. 2. Características del sistema ENE-FARM (1). [35]*

Tipo de pila de combustible		Tipo de electrolito polimérico (PEFC)
Número de modelo		FC-5KLR1HS
medio ambiente	tipo de gases	Hidrógeno puro (Densidad de hidrógeno: más del 99,97%)
	Presión de suministro de gas	50 kPa
	Temperatura ambiente de instalación	-10°C a 40°C (Suponiendo que el producto siempre está energizado)
	Altitud instalable	Hasta 500 m sobre el nivel del mar

En cuanto a sus dimensiones, tal y como se indica en la Figura 3.4., el sistema ENE-FARM mide 834 mm (ancho) x 417 mm (profundidad) x 1766 mm (alto). Para que pueda ser instalado son necesarios unos márgenes laterales de 600 mm y uno

superior de 1 m. Todo esto hace que su montaje sea simple y sencillo siempre y cuando se disponga de una estancia adecuada.

*Tabla 3. 3. Características del sistema ENE-FARM (2). [35]*

Instalación	Dimensión	834 mm (ancho) × 417 mm (profundidad) × 1766 mm (alto) (incluido el panel de diseño)
	Masa operativa	205 kg (incluido el panel de diseño)
	Distancia de instalación (espacio de mantenimiento)	Frente: 600mm
		Espalda: 600 mm
Superior: 1.000 mm		
		Lados izquierdo y derecho: 600 mm

A continuación, se observa una de sus características más notables: su potencia de salida de 5 kW que se ajusta perfectamente a la demanda de una vivienda o una instalación a pequeña escala. Con una eficiencia eléctrica del 56% (95% de eficiencia total) y una puesta en marcha prácticamente inmediata, los dispositivos ENE-FARM se sitúan en lo más alto de la industria.

Tabla 3. 4. Características del sistema ENE-FARM (3). [35]

Rendimiento básico	Salida de potencia		5000 W (Salida durante un corte de energía: 2500 VA)
	Tensión de salida		1 $\phi$ 3 W 200 V CA (Durante el funcionamiento automático: 1 $\phi$ 2 W 100 V CA)
	Tiempo de generación de energía		Hasta 120 horas
	El consumo de energía	Valor máximo durante el funcionamiento normal	Hasta 155W
		Calentador de prevención de congelamiento	Calentador de prevención de congelamiento: 578 W
		Sin carga (En espera)	Hasta 30W
	Consumo de gas	Al generar la potencia nominal	49,6 NL/m
		Al generar la máxima potencia	51,6 NL/m
	Salida térmica	Temperatura de recuperación de calor	Aprox. 60°C
		Potencia térmica al generar la potencia nominal	3480W
	Eficiencia	Eficiencia eléctrica (LHV/HHV)	56%/47,3%
		Eficiencia de recuperación de calor (LHV/HHV)	39%/32,9%
	Tiempo de empezar		Aprox. 1 minuto (aprox. 7 minutos para alcanzar la salida nominal)
	Tiempo normal de parada		Aprox. 30 segundos
	Agua de drenaje		Aprox. 1,2 l/h
	Interconexión del sistema		Certificación adquirida
Con supresión de subida de tensión			
Con flujo de potencia inverso			
Soporta detección de operación independiente			

### 3.2.2.2 COMPONENTES DE LA INSTALACIÓN

Aunque el sistema ENE-FARM es una solución ideal para cualquier hogar, es necesaria su combinación con otros componentes para que el proceso de obtención de energía en forma de calor y electricidad sea más rentable y, sobre todo, más acorde a la idea de acabar por completo con las emisiones de gases contaminantes. Por ello la instalación constará de un conjunto de placas solares

instaladas en el tejado (ver Figura 3.6.) que obtengan la energía directamente del calor del Sol convirtiendo la corriente continua en corriente alterna apta para el consumo en el hogar. La instalación de las placas no afectará en absoluto, ya que se usará la red de distribución ya conocida. El sistema ENE-FARM mencionado anteriormente necesita electricidad para su funcionamiento, y las placas también se encargarán de esta función. Las placas fotovoltaicas se dedicarán a recoger toda la energía suficiente durante el día y entregarla al sistema ENE-FARM, que almacenará la electricidad sobrante en unas baterías integradas de forma que tengamos electricidad en las horas en las que la producción de energía es menor, es decir, las horas nocturnas en las que la presencia del Sol es nula. Además de esto, el almacenamiento del sistema ENE-FARM permite producir hidrógeno durante todo el verano aprovechando que el Sol tiene más energía y guardarlo para el invierno, donde no se tendrán las suficientes horas de Sol ni con la suficiente intensidad.



*Figura 3. 3. Placas solares instaladas en el tejado del hogar. [36]*

El sistema ENE-FARM que se usará se llama H2 KIBOU y pertenece a Panasonic, empresa conocida a nivel mundial. Como ya se explicó con anterioridad, es capaz de extraer el hidrógeno directamente de la red de gas natural presente en la mayoría de hogares. H2 KIBOU se sitúa en el exterior de la vivienda como norma general e incluso podría hacerse dentro de ella de forma individual. Como un cogenerador H2 KIBOU tiene 5 kW de potencia, muchas veces no se cumplen las exigencias de una vivienda si es de gran tamaño o si se habla de un edificio formado

por diferentes viviendas. En estos casos se disponen varios de ellos en serie para aumentar la potencia deseada consiguiendo así satisfacer por completo las necesidades del hogar.



*Figura 3. 4. Dispositivo H2 KIBOU (5 kW) y conjunto de dispositivos conectados (30 kW). [37]*

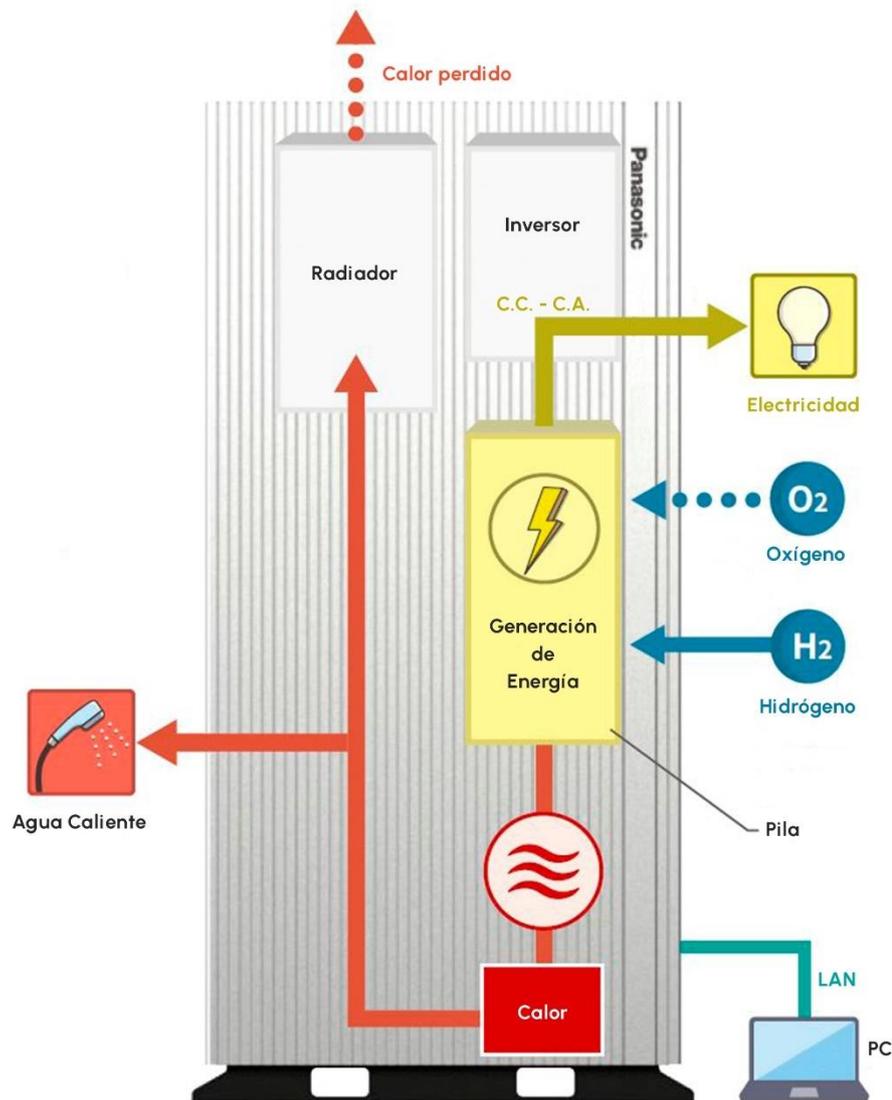
Como norma general, una potencia de salida de 5 kW es más que suficiente para cubrir todas las necesidades de una vivienda por lo que la opción de conectar más dispositivos está principalmente direccionada hacia la alimentación de edificios. Como se ve en la Figura 3.8., el dispositivo ENE-FARM de Panasonic no precisa mucho espacio para su instalación, así que no es necesario tener un lugar previamente adaptado para este fin.



*Figura 3. 5. Instalación de dispositivo H2 KIBOU en el exterior de la vivienda. [38]*

Si se presta atención a la Figura 3.9. detalladamente puede comprenderse el funcionamiento de este dispositivo por celdas de combustible perfectamente. H2 KIBOU se conecta directamente a las placas solares previamente instaladas en el tejado mediante un generador de energía, es decir, un electrolizador con pilas de combustible que funcionan gracias al hidrógeno obtenido por reformado de gas natural de la infraestructura del hogar y oxígeno que obtendrá directamente del aire. Mediante un proceso de electrólisis se consigue la cogeneración deseada en todo momento:

- Se consigue electricidad gracias a un inversor, situado a la mayor altura posible para evitar el desgaste producido por el vapor desprendido de las baterías, que se encargará de convertir la corriente continua recibida del proceso de electrólisis en corriente alterna senoidal apta para el consumo a 230 V y 50 Hz [39] como la proveniente de la red eléctrica. Además, existe la posibilidad de que el sistema siga funcionando solo con hidrógeno incluso en caso de un corte de luz proporcionando hasta 2,5 kVA durante 120 horas.
- Se aprovecha el calor residual provocado por la reacción en el interior del electrolizador para calentar agua que se almacena en un acumulador que sirva para el consumo y para poner en funcionamiento el sistema de calefacción, calentando los radiadores del hogar.



*Figura 3. 6. Esquema interno del dispositivo H2 KIBOU. Elaboración propia a partir de [40].*

Aunque puede parecer complicado de gestionar, esta clase de dispositivo permite un control simultáneo de todos los procesos mediante una aplicación instalable en tu propio ordenador personal. Con ella se puede iniciar o detener la generación de energía cuando el usuario lo desee, comprobar el nivel de agua caliente en los acumuladores o visualizar todo tipo de errores en el sistema si los hubiese.

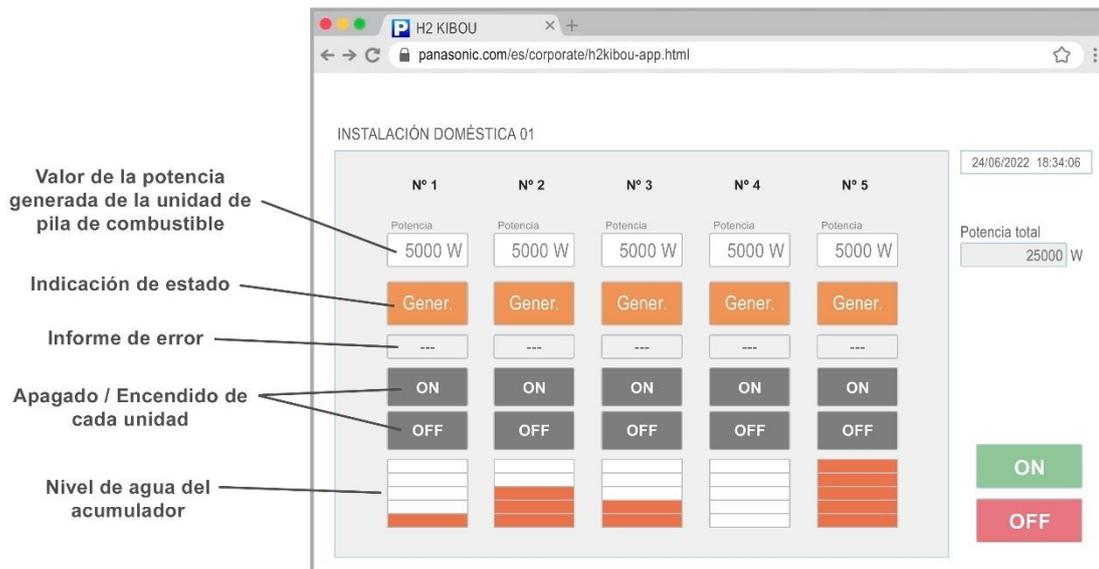


Figura 3. 7. Aplicación de PC para dispositivo H2 KIBOU. Elaboración propia a partir de [40].

El sistema trae consigo dispositivos de control remoto que normalmente se instalarán en la cocina y en el baño según indica el fabricante, aunque el lugar podrá variar si el usuario lo desea. Desde una pequeña pantalla LCD de unas 4,5 pulgadas se podrá acceder al nivel de temperatura de la calefacción, la energía con la que está trabajando el dispositivo de cogeneración o la potencia que empleará el dispositivo.



Figura 3. 8. Pantalla LCD para el control y monitorización de H2 KIBOU. Elaboración propia a partir de [40].

Hoy en día es muy importante poder monitorizar todos los procesos desde un solo sitio y más aún que cualquier persona pueda encargarse de ello sin dificultad alguna. Al incorporar aplicaciones para ordenador y sistemas de control con pantalla LCD entendibles visualmente se consigue que el producto llegue mejor al usuario que lo va a consumir, consiguiendo que cualquier persona que no tenga conocimientos de electrónica o de informática pueda usarlos y comprenderlos.

Se concluye así que el proceso de instalación es muy sencillo por dos razones: sólo se necesitan placas fotovoltaicas para obtener energía y el diseño de H2 KIBOU es compacto, es decir, no necesita contar con dispositivos aparte ya que tiene todos los componentes integrados. Es cierto que la instalación al completo puede parecer costosa y larga, pero a continuación se estudiará con más detalle cómo realizando una pequeña inversión se pueden obtener grandes beneficios a largo plazo.

### 3.2.2.3 *COSTES DE LA INSTALACIÓN*

Siempre que se realiza una instalación de cualquier tipo se debe tener en cuenta que es primordial invertir dinero si lo que se pretende es mejorar la calidad de vida a largo plazo. Actualmente, el elevado precio de los materiales hace que sea cada vez más complicado llevar a cabo cualquier tipo de reforma en una casa, incluyendo esto la instalación de placas fotovoltaicas. Sin embargo, el presupuesto sólo pretende dar una idea aproximada del coste de un montaje de este tamaño.

En España, el montaje y la instalación de placas solares cuesta de media unos cuatro mil euros. Cabe destacar que no solo se necesitan las placas, sino que existen otros componentes indispensables en la instalación: el inversor de corriente que, como ya se mencionó, será quien convierta la corriente continua en corriente alterna; un regulador de carga que controle la cantidad de energía que se destina a las baterías, que en este caso estarán integradas en el sistema ENE-FARM; un contador bidireccional que contabiliza la energía que fluye de la red eléctrica al usuario y viceversa; un sistema de monitorización que permita comprobar en todo momento la situación y el estado de la instalación, permitiendo reconocer averías y alargando la vida útil de todo el montaje; y estructuras de soporte encargadas de

soportar el peso de las placas y asegurar su fijación sea cual sea la situación meteorológica [41].

A todos estos componentes hay que sumar el generador de energía mediante celdas de hidrógeno que, aunque actualmente no se comercializa en Europa, tiene un precio en Japón que al cambio supone unos 21.200 €.

*Tabla 3. 5. Presupuesto de instalación en hogares. Elaboración propia.*

Componente	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Inversor de Corriente	1	<u>665,27 €</u>	665,27 €
Regulador de carga	1	<u>248,36 €</u>	248,36 €
Contador bidireccional	1	<u>89,65 €</u>	89,65 €
Sistema de monitorización (integrado)	1	0,00 €	0,00 €
Estructura de soporte	1	<u>130,95 €</u>	130,95 €
Placas solares	10	<u>233,63 €</u>	2.336,30 €
H2 KIBOU Panasonic	1	<u>21.203,78 €</u>	21.203,78 €
<b>PRECIO TOTAL</b>		<b>24.674,31 €</b>	

#### 3.2.2.4 OPINIÓN PERSONAL ACERCA DE LA INSTALACIÓN

Como se ha comprobado en el apartado anterior la inversión necesaria, realizada con un cálculo estimado, supone unos 24.700 € redondeando el precio. Si analizamos esta cantidad, podemos concluir que es un coste bastante elevado y que tardaríamos años en amortizar a largo plazo, pero si miramos desde un punto de vista más ecológico creo que todos estaríamos de acuerdo en que supone una gran inversión teniendo en cuenta la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases nocivos que evitaríamos que fuesen expandidos por la atmósfera.

Veinticinco mil euros es un coste que no todos los hogares pueden soportar, pero no es un precio tan elevado si lo comparamos con el de un coche de gama media-alta. Mientras que con un coche movido por combustibles fósiles contribuimos a aumentar los gases contaminantes y será necesario que invirtamos más dinero con el paso del tiempo, con una instalación promovida con hidrógeno en casa se podría

conseguir un ahorro de casi mil euros al año sólo con la instalación de las placas (ver figura 3.12.), que sumado al ahorro del sistema de celdas de hidrógeno puede suponer un ahorro total anual que ronde los 1.500 €.

### Resultado de la simulación



Figura 3. 9. Simulación real de ahorro mediante placas solares en hogares. [42]

En mi opinión, y viendo el ahorro anual que podemos conseguir, creo que la instalación es rentable pero no tanto como se podría pensar en un principio. Suponiendo que consigamos los flujos de caja anuales señalados en la tabla 3.6., con un interés del 10%, que es el que normalmente suele aplicarse para el cálculo de VAN y TIR, vemos que en once años tendríamos unas pérdidas de más o menos 15.000 €. Podríamos amortizar por completo la instalación en unos veintisiete años si ampliamos el cálculo, que es demasiado tiempo como para ser rentable en su totalidad. El problema que observo es que los sistemas ENE-FARM aún no se comercializan en Europa, ni en América, habiéndose instaurado únicamente en países como Japón donde sí sale rentable la instalación por las grandes ayudas que se destinan a la instauración de estos dispositivos y por el alto nivel de vida que se tiene, de forma que para ellos un gasto mayor supone menos esfuerzo, como norma general.

Tabla 3. 6. Cálculo de VAN y TIR. [43]

Inversión inicial	Año	Valor (€)
25.000,00 €	0	- 25.000,00 €
Tasa de interés (i)	1	1.634,00 €
	2	1.468,00 €
10% (0,10)	3	1.587,00 €
VAN	4	1.479,00 €
	5	1.598,00 €
-14.994,44 €	6	1.421,00 €
	7	1.458,00 €
TIR	8	1.736,00 €
	9	1.369,00 €
-5,976506%	10	1.541,00 €
	11	1.647,00 €

En cuanto al diseño del dispositivo de celdas de hidrógeno, creo que sería más atractivo si trajese consigo un sistema de control más sofisticado, es decir, una pantalla que nos facilite las mismas prestaciones que la aplicación del ordenador y que no haga necesario el movimiento del ordenador cada vez que se quiera comprobar alguna incidencia. Por lo demás me parece un diseño muy compacto, con grandes características y que, con más desarrollo, podría ser una de las opciones a tener en cuenta en un futuro no muy lejano.

## 4 Implantación de la energía basada en hidrógeno en el mundo

En la Unión Europea existe una demanda energética de aproximadamente 20.000 TWh de los cuales 3.100 TWh se destinan al consumo anual como electricidad, siendo el cupo calculado y determinado por la UE de forma tan precisa que no tolera cambios en cuanto a sus diferentes usos. Esto quiere decir que, al menos en el presente, el manejo de la electricidad en procesos de electrólisis es inviable para la producción de hidrógeno. Sin embargo, si se hace hincapié hacia el futuro y se realiza un pequeño cálculo que tenga en cuenta el potencial de producción de electricidad de la UE y le reste la demanda de la misma y el coste energético que supone su conversión a hidrógeno. Claro está que la operación no es ni mucho menos exacta y sólo supone una aproximación, tomando como referencia un potencial eléctrico renovable presente en el plan de inversiones del Parlamento Europeo de 14.000 TWh/año. [2]

A corto y medio plazo, la mejor opción es mezclar en la red de distribución de gas natural hidrógeno y metano, estando el hidrógeno presente en menor medida; y a largo plazo, prestando especial atención al cálculo aproximado realizado, se puede declarar que la producción de hidrógeno verde será más que viable y que la inyección de mezcla de hidrógeno y metano en la infraestructura actual de gas natural incorpore más hidrógeno cada vez. Respecto a la implantación de los sistemas de generación mediante pilas de hidrógeno estudiados en este trabajo, y teniendo en consideración todos los aspectos comentados, se puede decir con seguridad que todavía se encuentra demasiado lejos de una posible instalación rentable y funcional a nivel doméstico, simplemente atendiendo al cálculo del VAN y el TIR realizados en el apartado anterior, donde los resultados eran muy desfavorables.

En países como Japón, donde la apuesta por el hidrógeno como principal fuente de energía está más avanzada que en Europa, se encuentran mejores posibilidades

respecto a estos dispositivos, además de contar con la construcción a corto plazo de centros masivos de producción de hidrógeno como el RE-100. Prestando atención a esto y a las ayudas implantadas por su gobierno para favorecer la implantación de sistemas ENE-FARM se concluye que únicamente en Japón, donde las condiciones son extremadamente favorables, la instalación doméstica mediante pilas de combustible a través de hidrógeno será de gran rentabilidad. En los países más pobres de Asia es complicado que este tipo de dispositivos puedan llegar a verse a corto plazo y largo plazo, aunque quizás cabe la posibilidad de que sean viables en otros más desarrollados como Corea del Sur o Israel.

Sería totalmente incoherente hablar acerca de la implantación de estos sistemas en África, donde casi no hay desarrollo tecnológico, exceptuando algunas zonas del sur del continente.

En América del norte, y en concreto en EEUU, la preocupación por las energías renovables y el hidrógeno verde no es precisamente elevada, así que su implantación tardará más tiempo en llegar que a los países europeos. En cambio, en países de América del Sur como Brasil existe una gran cantidad de fuentes de energía renovables, pero no el dinero suficiente para la implementación de sistemas de cogeneración en los hogares.

En Oceanía sucede algo similar al norte de América. No existen grandes apuestas por las energías renovables, de forma que si esta clase de sistemas llegan al continente lo harán de una forma tardía.

## 5 Vistas al futuro

Es cada vez más común la conversación acerca del hidrógeno como una de las energías del futuro, por ser este renovable y no contaminante, además de su característica más importante, su gran abundancia.

La principal ventaja del hidrógeno frente a otros tipos de combustible usados hoy en día es la cantidad de subproductos que genera. Mientras que el carbón, el petróleo u otros combustibles tradicionales llenan la atmósfera de dióxidos y monóxidos de carbono durante su combustión, el hidrógeno se limitaría a generar únicamente vapor de agua. Estaríamos hablando de una fuente de energía segura para el medio ambiente y para todos los seres humanos, igual de útil que las que tenemos actualmente y mucho más barata.

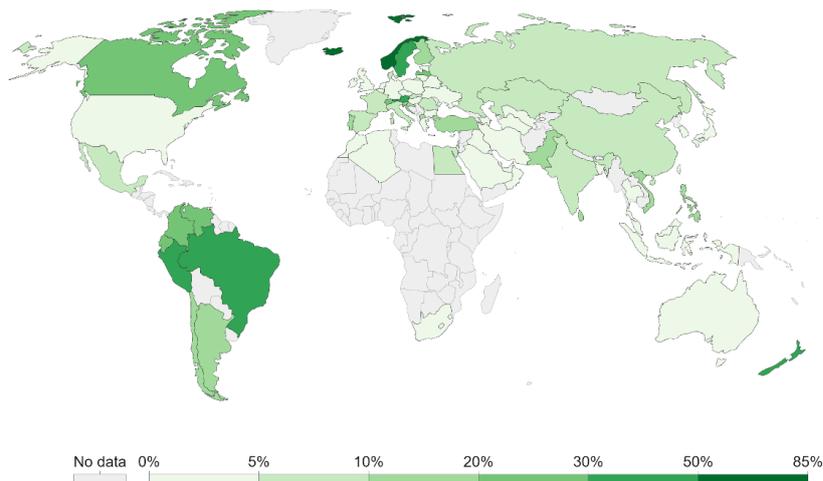
Hay que añadir a esto que los combustibles petrolíferos tienen “los días contados”, aunque personalmente creo que esto no es del todo cierto, sino que las tasas por hacer uso de este tipo de combustibles cada vez serán más altas obligándote indirectamente a operar con otras de carácter renovable, como por ejemplo el hidrógeno, implicando que cada vez se vea más exigida su implementación.

Se prevé que este tipo de combustible pueda introducirse en torno al año 2050, cuando la producción de hidrógeno verde combinada con otras muchas energías renovables sean lo suficiente altas como para abastecer a gran parte de la población.

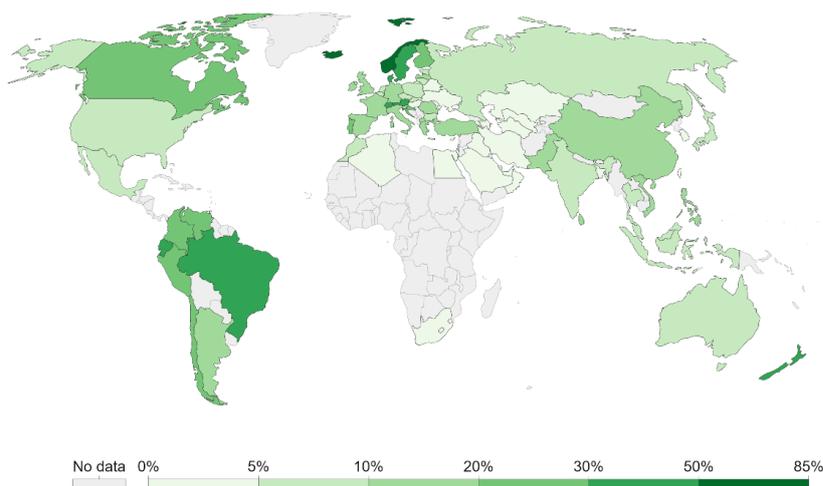


Figura 5. 1. Potencial para producir hidrógeno verde por debajo de 1,5 \$/kg en 2050, en EJ. [44]

En las figuras 5.2. y 5.3. se observa cómo en tan sólo dos décadas la implementación de las energías renovables ha aumentado considerablemente. Hay que tener en cuenta que actualmente el uso de las energías renovables está mucho más avanzado que al principio del siglo XXI, y que cada año el empleo de energías limpias y seguras será mayor y estará más demandado y, eso, obviamente incluye al hidrógeno.



*Figura 5. 2. Energía primaria proveniente de fuentes renovables en el año 2000.*  
[45]



*Figura 5. 3. Energía primaria proveniente de fuentes renovables en el año 2019.*  
[45]

En el año 2040 probablemente nos enfrentemos a una de las peores situaciones en cuanto a contaminación mundial, de manera que, una energía que sustituya los combustibles fósiles será totalmente necesaria para un mundo seguro y en un entorno libre de emisiones y de gases dañinos. Además, el hidrógeno puede combinarse con otras tecnologías, como placas solares fotovoltaicas, que generen la electricidad necesaria para el funcionamiento.

## 6 Conclusión

En este trabajo se ha evaluado la posibilidad de emplear tecnologías innovadoras como los generadores de energía eléctrica y térmica combinados con pilas de combustible para abastecer a los hogares. Cabe destacar la gran dificultad existente para acceder a la información apropiada para la investigación principalmente debido a que, por ahora, los sistemas de cogeneración no están implantados en la sociedad y las empresas que los desarrollan prefieren proporcionar sólo una minúscula parte de los datos. Sabiendo esto, se ha intentado exponer y comprender la implementación del hidrógeno en la sociedad pasando por todas sus fases, desde sus métodos de producción y transporte hasta su empleo en pilas de combustible, además de un breve estudio de su posible viabilidad a futuro.

El núcleo central de la investigación son los sistemas ENE-FARM mencionados con anterioridad. Durante todo el escrito se observa la enorme necesidad de combinar sistemas de control accesibles (pantallas LCD o aplicaciones web) con elementos electrónicos que ofrezcan grandes rendimientos (conjuntos de baterías, acumuladores, inversores de corriente...). Surge así una instalación en la que cooperan los dispositivos de cogeneración con métodos renovables de obtención de energía, como las placas solares fotovoltaicas. Para estudiar la factibilidad de estos dispositivos se dispone de una simulación de los costes donde se aprecia que la inversión necesaria rondaría los veinticinco mil euros, precio demasiado elevado como para ser amortizado en un período de tiempo razonable.

También se aprecia la idea de construir una planta productora de hidrógeno, que supone una gran complicación por la falta de recursos. En esta clase de recintos se debe destacar la importancia de la interfaz hombre-máquina (HMI) y el algoritmo de programación, que proporcionarán una mejora en los resultados obtenidos de forma proporcional a lo avanzados que sean.

Comparando los datos y prestando atención a los detalles, creo que, aunque se han planteado grandes ideas todavía precisan de un gran desarrollo e innovación.

Con todo esto se concluye que, mejorando los componentes electrónicos y sus materiales, además de los sistemas de monitorización y de control, la implantación de sistemas de generación mediante pilas de hidrógeno podría hacerse realidad.

# 7 Bibliografía

- [1] R. G. Ehl and A. J. Ihde, "FARADAY'S ELECTROCHEMICAL LAWS AND THE DETERMINATION OF EQUIVALENT WEIGHTS'."
- [2] J. Ramón, M. Teresa, A. Gotzon, G. J. Guilera, A. Tarancón, and M. Torrell, *Hidrógeno Vector energético de una economía descarbonizada*, vol. 35.
- [3] "Electrolizador | Factor clave en la producción de hidrógeno verde - Iberdrola." <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/electrolizador> (accessed Mar. 24, 2022).
- [4] "Hydrogen Production: Natural Gas Reforming | Department of Energy." <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming> (accessed Mar. 25, 2022).
- [5] "Generación de gas de síntesis por reformado autotérmico (ATR) | Air Liquide." <https://www.engineering-airliquide.com/es/generacion-gas-sintesis-por-reformado-autotermico-atr> (accessed May 05, 2022).
- [6] "Tecnologías de producción de hidrógeno verde a partir de biogás - Artículos y Reportajes." <https://www.retema.es/articulo/tecnologias-de-produccion-de-hidrogeno-verde-a-partir-de-biogas-PjDsH> (accessed Mar. 29, 2022).
- [7] M. De, L. A. Comisión, P. Araya, and J. C. Salgado, "REFORMADO DE ALCOHOLES PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO," 2008.
- [8] M. Klug, "Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa," *RevQuim*, vol. 26, n.º 1-2, pp. 37–40, 2012.
- [9] T. Geißler *et al.*, "Hydrogen production via methane pyrolysis in a liquid metal bubble column reactor with a packed bed," *Chemical Engineering Journal*, vol. 299, pp. 192–200, Sep. 2016, doi: 10.1016/J.CEJ.2016.04.066.
- [10] D. Gardner, "Hydrogen production from renewables," *Renewable Energy Focus*, vol. 9, no. 7, pp. 34–37, Jan. 2009, doi: 10.1016/S1755-0084(09)70036-5.

- [11] “Obtención de hidrógeno mediante gasificación de sólidos carbonosos con vapor y agua supercrítica - Dialnet.”  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=256757> (accessed Mar. 29, 2022).
- [12] “Termodinámica y Termotecnia. Tablas Tema 3: Combustibles.”
- [13] A. Züttel, “Hydrogen storage methods,” *Naturwissenschaften*, vol. 91, no. 4, pp. 157–172, Apr. 2004, doi: 10.1007/S00114-004-0516-X/FIGURES/6.
- [14] “Tanque de hidrógeno.”  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Tanque\\_de\\_hidr%C3%B3geno](https://es.wikipedia.org/wiki/Tanque_de_hidr%C3%B3geno) (accessed May 01, 2022).
- [15] “Almacenamiento de hidrógeno comprimido: tipos de tanques | Apilados.”  
<https://apilados.com/blog/almacenamiento-hidrogeno-comprimido-tipos-tanques/> (accessed Apr. 18, 2022).
- [16] M. L. B. M. B. del D. G. S. M. G. A. Díaz Castaño and María Luisa Busto Méndez, “EOI\_EvaluacionSubterraneos\_2014”.
- [17] “Métodos de almacenamiento y transporte de hidrógeno para una economía descarbonizada.”  
[https://www.youtube.com/watch?v=wjpuQ8Fz178&ab\\_channel=3IEEnerg%C3%ADa](https://www.youtube.com/watch?v=wjpuQ8Fz178&ab_channel=3IEEnerg%C3%ADa) (accessed Apr. 19, 2022).
- [18] “¿En qué consiste el CAPEX y por qué es una magnitud tan importante para la pyme?” <https://www.pymesyautonomos.com/fiscalidad-y-contabilidad/en-que-consiste-el-capex-y-por-que-es-una-magnitud-tan-importante-para-la-pyme> (accessed Apr. 26, 2022).
- [19] “El primer buque del mundo que transporta hidrógeno líquido, bajo investigación por un incidente nada más zarpar.” <https://www.motorpasion.com/futuro-movimiento/primer-buque-mundo-que-transporta-hidrogeno-liquido-investigacion-incidente-nada-zarpar> (accessed Apr. 27, 2022).
- [20] “¿Qué es y cómo puede aplicarse el amoníaco a los sectores de la energía y el transporte marítimo?” Accessed: Apr. 27, 2022. [Online]. Available:

<https://sectormaritimo.es/que-es-y-como-puede-aplicarse-el-amoniac-a-los-sectores-de-la-energia-y-el-transporte-maritimo>

- [21] J. Vío Ulloa, *GUÍA DE USO Y MANEJO DEL AMONÍACO EN LA REFRIGERACIÓN DE FRUTAS Y HORTALIZAS FRESCAS: PLAN DE EMERGENCIA*, ASOEX. Chile: Gobierno de Chile, 2012.
- [22] “Rompiendo el amoníaco: Un nuevo catalizador para generar hidrógeno a partir de amoníaco a bajas temperaturas.”  
<https://www.quimica.es/noticias/1172538/rompiendo-el-amonaco-un-nuevo-catalizador-para-generar-hidrogeno-a-partir-de-amonaco-a-bajas-temperaturas.html> (accessed Jun. 29, 2022).
- [23] “Un gran avance: Una novedosa técnica convierte sin problemas el amoníaco en hidrógeno verde.” <https://www.quimica.es/noticias/1172322/un-gran-avance-una-novedosa-tcnica-convierte-sin-problemas-el-amonaco-en-hidrogeno-verde.html> (accessed Jun. 29, 2022).
- [24] “Información sobre la seguridad química del metanol.”  
<https://www.chemicalsafetyfacts.org/es/metanol/> (accessed May 04, 2022).
- [25] F. Gutiérrez-Martín, L. M. Rodríguez-Antón, and M. Legrand, “Renewable power-to-gas by direct catalytic methanation of biogas,” *Renewable Energy*, vol. 162, pp. 948–959, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.RENENE.2020.08.090.
- [26] “¿Cuándo se acabaran los combustibles fósiles? | Blog - Umeme Energía.”  
<https://www.umeme.es/cuando-se-acabaran-los-combustibles-foviles/> (accessed May 09, 2022).
- [27] J. Verne, *La isla misteriosa*, Sáenz de Jubera. Madrid, 1930. [Online]. Available: <https://onemorelibrary.com>
- [28] F. Guerra, A. Rodríguez, and F. Ferrera, “El hidrógeno: vector energético del futuro,” vol. 8, pp. 20–27, 2010.
- [29] “Pilas de Combustible.” <https://www.ariema.com/pilas-de-combustible> (accessed May 17, 2022).

- [30] “Pila de combustible alcalina - Perspectivas de negocio, Geometría de la pila, Electrolito, Reacción | KripKit.” <https://kripkit.com/pila-de-combustible-alcalina/> (accessed May 17, 2022).
- [31] “La pila de combustible | Formación de ingenieros.” <https://www.tecpa.es/pila-combustible/> (accessed May 18, 2022).
- [32] “Planta de hidrógeno verde de Puertollano - Iberdrola.” <https://www.iberdrola.com/conocenos/lineas-negocio/proyectos-emblematicos/puertollano-planta-hidrogeno-verde> (accessed May 22, 2022).
- [33] “STI Norland confía a Schneider Electric el control de su seguidor solar.” <https://www.energynews.es/sti-norland-schneider-electric/> (accessed May 22, 2022).
- [34] “La fiebre del hidrógeno verde eclosiona en la industria y el parque | Mercados | Cinco Días.” [https://cincodias.elpais.com/cincodias/2021/02/12/mercados/1613147437\\_281336.html](https://cincodias.elpais.com/cincodias/2021/02/12/mercados/1613147437_281336.html) (accessed May 23, 2022).
- [35] “Panasonic Launches 5 kW Type Pure Hydrogen Fuel Cell Generator | Headquarters News | Panasonic Newsroom Global.” <https://news.panasonic.com/press/global/data/2021/10/en211001-4/en211001-4.html> (accessed May 25, 2022).
- [36] “El calor extremo también afecta a los paneles fotovoltaicos.” <https://betsolar.es/el-calor-extremo-tambien-afecta-a-los-paneles-fotovoltaicos/> (accessed Jun. 24, 2022).
- [37] “Panasonic Launches 5 kW Type Pure Hydrogen Fuel Cell Generator | Headquarters News | Panasonic Newsroom Global.” <https://news.panasonic.com/press/global/data/2021/10/en211001-4/en211001-4.html> (accessed Jun. 27, 2022).
- [38] “Células de combustible de hidrógeno para la calefacción y la electricidad - Panasonic España.”

- <https://www.panasonic.com/es/corporate/sostenibilidad/soluciones-y-productos-energeticos-sostenibles/celulas-de-combustible-de-hidrogeno-para-la-calefaccion-y-la-electricidad.html> (accessed Jun. 27, 2022).
- [39] “Inversores solares | Máxima calidad en AutoSolar.”  
<https://autosolar.es/inversores> (accessed Jun. 28, 2022).
- [40] “Esperanza para una sociedad de hidrógeno, Eso es ‘H2 KIBOU,’” Jan. 2021.  
Accessed: Jun. 25, 2022. [Online]. Available:  
<https://panasonic.biz/appliance/FC/hydrogen/index.html>
- [41] “Instalar placas solares: precios, pasos de la instalación y permisos.”  
<https://selectra.es/autoconsumo/info/instalacion> (accessed Jun. 28, 2022).
- [42] “Naturgy Solar.”  
[https://solar.naturgy.es/simulator/tech\\_data\\_step\\_1?origen=sem&vn=12116675930&campaign\\_code=CC\\_a3b8e0eb-2739-4f91-9379-372e8641dcf4&\\_ga=2.7750577.2002500582.1656436711-1544375361.1656436711&\\_gac=1.58411992.1656436711.CjwKCAjwzeqVBhAoEiwAOrEmzTfCWmbKDVlcBr4OoUdyCabXskby6hellHYQQByDJelkL8kJRtdiohoCGQ8QAvD\\_BwE](https://solar.naturgy.es/simulator/tech_data_step_1?origen=sem&vn=12116675930&campaign_code=CC_a3b8e0eb-2739-4f91-9379-372e8641dcf4&_ga=2.7750577.2002500582.1656436711-1544375361.1656436711&_gac=1.58411992.1656436711.CjwKCAjwzeqVBhAoEiwAOrEmzTfCWmbKDVlcBr4OoUdyCabXskby6hellHYQQByDJelkL8kJRtdiohoCGQ8QAvD_BwE) (accessed Jun. 29, 2022).
- [43] “Calculadora de VAN y TIR | Calcuvio.” <https://www.calcuvio.com/van-tir> (accessed Jul. 04, 2022).
- [44] “IRENA – International Renewable Energy Agency.” <https://www.irena.org/> (accessed Jul. 05, 2022).
- [45] “Share of primary energy from renewable sources, 2020.”  
<https://ourworldindata.org/grapher/renewable-share-energy> (accessed Jul. 05, 2022).