



**COMILLAS**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO  
PRODUCCIÓN Y SUMINISTRO DE HIDRÓGENO A PARTIR DE  
ENERGÍAS RENOVABLES

Autor: Inés Atienza Lama

Director: María del Mar Cledera Castro

Madrid



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
Producción y suministro den hidrógeno a partir de energías renovables en la ETS de  
Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2021/22 es de mi autoría, original e inédito y  
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido  
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Inés Atienza Lama

Fecha: 18/ 07/ 2022

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: María del Mar Cledera Castro

Fecha: 18/ 07/ 2022





**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO  
PRODUCCIÓN Y SUMINISTRO DE HIDRÓGENO A PARTIR DE  
ENERGÍAS RENOVABLES

Autor: Inés Atienza Lama

Director: María del Mar Cledera Castro

Madrid



# PRODUCCIÓN Y SUMINISTRO DE HIDRÓGENO A PARTIR DE ENERGÍAS RENOVABLES

Autor: Atienza Lama, Inés.

Director: Cledera Castro, Mar .

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## RESUMEN DEL PROYECTO

En este proyecto se diseñará la instalación de una hidrogenera en la ciudad de Granada para abastecer a tres líneas de autobuses públicos que funcionan con una pila de combustible. Se estudiará la energía necesaria para la producción, almacenamiento y repostaje del hidrógeno y se estudiará una planta de energía renovable para obtener esta energía eléctrica necesaria.

**Palabras clave:** Hidrógeno, hidrogenera, pila de hidrógeno.

### 1. Introducción

La contaminación es uno de los grandes problemas a los que se enfrenta la sociedad actualmente. No solo afecta con graves consecuencias al medio ambiente, sino también a la salud de los habitantes.

El sector del transporte es una de las causas más contaminantes del aire y es necesario proponer nuevas alternativas a los vehículos de combustión, especialmente en ciudades y núcleos urbanos donde la concentración de los gases contaminantes llega a altos niveles preocupantes. La ciudad de Granada es la segunda ciudad más contaminada de España según un informe del Observatorio de Sostenibilidad de 2020 [1].

El hidrógeno como combustible es interesante no solo porque es el elemento más abundante en el universo, sino que además es capaz de proporcionar más energía por unidad de masa que el resto de los combustibles. Por otro lado, se trata de un combustible limpio ya que, al quemarlo, además de energía, tan solo libera vapor de agua, produciendo cero emisiones nocivas. [2]

De esta forma, el hidrógeno ofrece la posibilidad de realizar un ciclo energético cerrado limpio. Este ciclo consiste en tomar agua de la naturaleza y separarla en sus dos componentes, hidrógeno y oxígeno mediante energía de origen renovable. El hidrógeno obtenido puede ser utilizarlo como combustible a través de pilas de combustible, devolviendo a la naturaleza la misma cantidad de agua que se había tomado y sin emitir gases de efecto invernadero.

Este proyecto tiene como objetivo diseñar una hidrogenera capaz de abastecer a una flota de 3 líneas de autobuses en la ciudad de Granada. Estos autobuses funcionarán a través del hidrógeno que será producido por electrolisis, obteniendo la energía eléctrica necesaria para su producción a partir de energías renovables, por tanto, el proceso completo de producción y uso de hidrógeno como combustible no será contaminante y ayudará a la reducción de los niveles de contaminación en la ciudad de Granada

## **2. Definición del proyecto**

Previamente al estudio de la hidrogenera, se han seleccionado las tres líneas de autobuses que se desean abastecer. Se han elegido las líneas 4, 9 y 33, tres de las líneas más usadas en la ciudad de Granada. Se ha contactado con el área de movilidad de la ciudad y se han conseguido los datos necesarios para el estudio del consumo total de los autobuses. Por otro lado, se ha elegido un autobús de pila de hidrógeno que será el que sustituya a los autobuses actuales, siendo el autobús Caetano H2CityGold el elegido, un autobús que ya se está utilizando en varios proyectos en España. Con todos estos datos se ha calculado los kilogramos necesarios de hidrógeno que se necesita abastecer a los autobuses para su funcionamiento diario.

El proceso de diseñar la hidrogenera conlleva el estudio de varias etapas. Se estudiarán las diferentes opciones de producción, almacenamiento y compresión de hidrógeno. Tras comparar los distintos métodos de producción, se ha elegido estudiar la producción del hidrógeno a través de la electrolisis, un proceso químico no contaminante, para lo que hará falta un electrolizador. El hidrógeno a la salida del electrolizador debe ser almacenado a altas presiones en tanques de hidrógeno, para ello previamente se necesita comprimir y refrigerar el hidrógeno hasta la presión y temperatura deseada. Por último, se estudiará el repostaje de los autobuses a través de un dispensador. A la vez, se estudiará y analizará el consumo de esta maquinaria para poder obtener la energía eléctrica necesaria de una planta de fuente renovable. Así, el proceso completo desde la producción del hidrógeno hasta su uso como combustible será no contaminante.

Una vez estudiados todos los consumos eléctricos de la maquinaria necesaria, se estudiará como obtener esta energía de una fuente renovable. Se ha elegido utilizar una planta fotovoltaica. Se ha dimensionado brevemente una planta fotovoltaica situada a las afueras de Granada con capacidad suficiente para poder abastecer a la hidrogenera.

## **3. Descripción del sistema**

Para el diseño de la hidrogenera, se ha comenzado por el estudio del electrolizador. Se ha estudiado el consumo teórico de la producción del hidrógeno a partir de la electrólisis y se ha calculado el consumo total. El electrolizador elegido ha sido The Plug EX425D.

El hidrógeno a la salida del electrolizador a 40 bar debe ser comprimido para poder ser almacenado a altas presiones. En este caso, se ha elegido repostar el hidrógeno en cascada desde tres presiones distintas por su alta eficiencia y rapidez. Los tanques de los autobuses almacenan el hidrógeno a 350 bar, por lo que se han calculado tres presiones de almacenamiento para que tras el repostaje esta sea la presión final. Las presiones elegidas han sido 250 bar, 300 bar y 450 bar.

Se ha elegido la instalación de tres compresores de la marca Hiperbaric 1 KS 50, un compresor de doble etapa con un refrigerador a la salida. Se ha calculado teóricamente el consumo total de cada compresor. El hidrógeno de salida del compresor será almacenado en tanques según su presión.

Por último, se ha elegido un dispensador, Kraus Global Optima, y se ha calculado su consumo diario a partir de los kilogramos de repostaje necesarios.

Una vez tenemos el consumo total de toda la maquinaria que forma la hidrogenera, se ha decidido obtener esta energía eléctrica necesaria a partir de una planta fotovoltaica. Para ello,

se ha elegido una localización a las afueras de Granada y se ha estudiado la irradiación solar. A partir de estos datos, se han seleccionado unos módulos solares y se ha calculado la energía total que podría generar el diseño de esta planta.

#### 4. Resultados

Analizando los resultados desde el inicio, tras estudiar los kilómetros recorridos por los autobuses y su consumo, se necesitan en total 418,73 Kg de hidrógeno diarios.

Tras realizar el estudio del consumo del electrolizador, los tres compresores y el dispensador llegamos a la siguiente tabla donde se muestra la energía diaria total necesaria.

*Tabla 1: Consumos de la maquinaria de la hidrogenera*

	Consumo por Kg de $H_2$	Número de Kg de $H_2$	Consumo en KWh
<b>Electrolizador</b>	49,9 KWh/Kg	418,73 Kg	20894,63 KWh
<b>Compresor 1 (40 → 250)</b>	$0,89 \frac{KWh}{Kg}$	140 Kg	124,6 KWh
<b>Compresor 2 (40 → 300)</b>	$0,97 \frac{KWh}{Kg}$	140 Kg	135,8 KWh
<b>Compresor 3 (40 → 450)</b>	$1,17 \frac{KWh}{Kg}$	140 Kg	163,8 KWh
<b>Dispensador</b>	$0,2 \frac{KWh}{Kg}$	418,73 Kg	83,75 KWh
<b>Energía total diaria necesaria en KWh</b>			21402,58 KWh

A partir de esta energía necesaria se ha estudiado la planta fotovoltaica. Se ha elegido la ubicación de las Gabias, cerca de la ciudad de Granada. Con los módulos elegidos de BiHiKu 7 CS7N, se consigue una potencia media por módulo de 650 W. Se ha estimado que para llegar a la energía necesaria se necesitará una potencia de pico de alrededor de 7000 KWp. Por lo tanto, se necesitarán un total de 10770 módulos instalados.

Con estos datos y los datos de la irradiación solar media en esta zona se ha estimado la energía media diaria y la energía total por meses.

Tabla 2: Cálculos energía media diaria y total por meses

Radiación Global	PVGIS	Gdm	Energía media diaria	Energía media diaria	Energía total
	kWh/m <sup>2</sup>	KWh/ m <sup>2</sup> día	KWh/día	MWh/día	MWh/mes
1 (Enero)	139,15	4,49	25138,57	25,14	779,30
2 (Febrero)	141,28	5,05	28258,02	28,26	791,22
3 (Marzo)	176,52	5,69	31889,76	31,89	988,58
4 (Abril)	185,51	6,18	34631,01	34,63	1038,93
5 (Mayo)	208,95	6,74	37748,50	37,75	1170,20
6 (Junio)	220,04	7,33	41077,07	41,08	1232,31
7 (Julio)	235,77	7,61	42593,75	42,59	1320,41
8 (Agosto)	229,42	7,40	41446,57	41,45	1284,84
9 (Septiembre)	195	6,50	36402,60	36,40	1092,08
10 (Octubre)	172,58	5,57	31177,97	31,18	966,52
11 (Noviembre)	135,28	4,51	25254,07	25,25	757,62
12 (Diciembre)	136,37	4,40	24636,34	24,64	763,73

Siendo la energía media por día

Energía media por día	33,35 MWh/día
Energía total por año	12185,74 MWh/año

Por lo tanto, una planta de estas dimensiones podría abastecer a la hidrogenera diseñada.

En conclusión, el diseño final de la hidrogenera queda así:

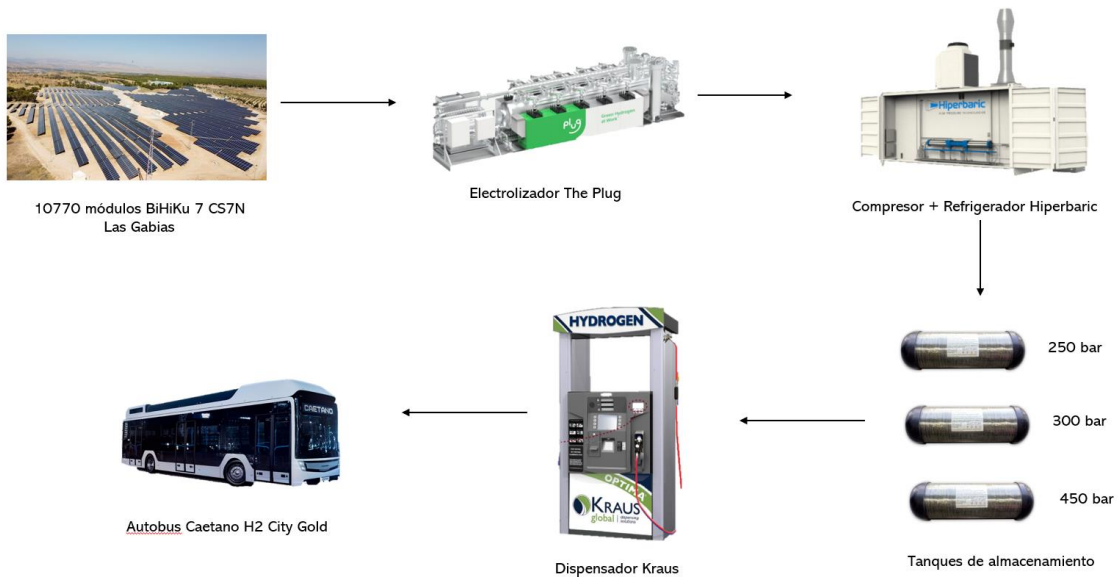


Ilustración 1: Esquema hidrogenera diseñada

## 5. Conclusiones

Tras haber realizado estudio de esta hidrogenera se llega a la conclusión de que a pesar de que es una inversión inicial muy elevada, las consecuencias de instalar esta hidrogenera y sustituir los autobuses públicos por autobuses de hidrogeno mejorarán considerablemente la contaminación es esta ciudad.

Con este proyecto también se motiva a la creación de más infraestructuras que trabajen con el hidrógeno, en especial como combustible, ya que el bajo número de hidrogeneras instaladas actualmente hace que sea complicado introducir vehículos de hidrógeno tanto al sector público como privado.

El hidrógeno tiene un gran potencial como combustible y gracias a él podría ser posible diseñar un plan para eliminar totalmente la contaminación del transporte.

## 6. Referencias

[1] Villanueva, J. C. (05 de 11 de 2021). La contaminación en Granada, un problema que no solo está en la capital. *Granada Digital*.

[2] José Ignacio Linares Hurtado, B. Y. (2007). *El hidrógeno y la energía*. Madrid: Asocioación Nacional de Ingenieros ICAI, Universidad Pontificia de Comillas.

# **HYDROGEN PRODUCTION AND SUPPLY FROM RENEWABLE ENERGIES**

**Author:** Atienza Lama, Inés.

**Director:** Cledera Castro, Mar .

**Collaborating Entity:** ICAI - Universidad Pontificia Comillasç

## **PROJECT SUMMARY**

This project will design the installation of a hydrogen plant in the city of Granada to supply three lines of public buses that operate with a fuel cell. The energy required for the production, storage and refueling of hydrogen will be studied and a renewable energy plant will be studied to obtain the necessary electrical energy.

### **1. Introduction**

Pollution is one of the major problems facing society nowadays. Not only does it have serious consequences for the environment, but also for the health of the people.

The transport sector is one of the most polluting causes of air pollution and it is necessary to propose new alternatives to combustion vehicles, especially in cities and urban centers where the concentration of polluting gases reaches high levels of concern. The city of Granada is the second most polluted city in Spain according to a report of the 2020 Sustainability Observatory [1].

Hydrogen as a fuel is interesting not only because it is the most abundant element in the universe, but also because it can provide more energy per unit mass than other fuels. On the other hand, it is a clean fuel since, when burned, in addition to energy, it only releases water vapor, producing zero harmful emissions. [2]

In this way, hydrogen offers the possibility of a clean closed energy cycle. This cycle consists of taking water from nature and separating it into its two components, hydrogen, and oxygen, using renewable energy. The hydrogen obtained can be used as fuel through fuel cells, returning to nature the same amount of water that had been taken and without emitting greenhouse gases.

This project aims to design a hydrogen plant capable of supplying 3 bus lines in the city of Granada. These buses will operate through the hydrogen that will be produced by electrolysis, obtaining the necessary electrical energy for its production from renewable energies, therefore, the whole process of production and use of hydrogen as fuel will not be polluting and will help to reduce the levels of pollution in the city of Granada.

### **2. Project definition**

Prior to the study of the hydrogen plant, the three bus lines to be supplied were selected. Lines 4, 9 and 33 have been chosen, three of the most used lines in the city of Granada. The mobility area of the city has been contacted and the necessary data for the study of the total consumption of the buses have been obtained. On the other hand, a hydrogen fuel cell bus has been chosen to replace the current buses, being the Caetano H2CityGold bus the chosen one, a bus that is already being used in several projects in Spain. With all this data, the

necessary kilograms of hydrogen needed to supply the buses for their daily operation have been calculated.

The process of designing the hydrogen plant involves the study of several stages. The different options for hydrogen production, storage and compression will be studied. After comparing the different production methods, it has been chosen to study the production of hydrogen through electrolysis, a non-polluting chemical process, for which an electrolyzer will be needed. The hydrogen leaving the electrolyzer must be stored at high pressures in hydrogen tanks, for which the hydrogen must first be compressed and cooled to the desired pressure and temperature. Finally, the refueling of buses through a dispenser will be studied. At the same time, the consumption of this machinery will be studied and analyzed in order to obtain the necessary electrical energy from a renewable source plant. Thus, the entire process from the production of hydrogen to its use as fuel will be non-polluting.

Once all the electrical consumption of the necessary machinery has been studied, it will be studied how to obtain this energy from a renewable source. It has been chosen to use a photovoltaic plant. A photovoltaic plant located on the outskirts of Granada with sufficient capacity to supply the hydrogen plant has been briefly dimensioned.

### **3. Description of the system**

For the design of the hydrogen plant, the first step was to study the electrolyzer. The theoretical consumption of hydrogen production from electrolysis has been studied and the total consumption has been calculated. The electrolyzer chosen was The Plug EX425D.

The hydrogen at the outlet of the electrolyzer at 40 bar must be compressed in order to be stored at high pressures. In this case, it was chosen to cascade the hydrogen from three different pressures for its high efficiency and speed. The bus tanks store hydrogen at 350 bar, so three storage pressures have been calculated so that after refueling this is the final pressure. The pressures chosen were 250 bar, 300 bar and 450 bar.

Three Hiperbaric 1 KS 50 compressors have been chosen, a double stage compressor with a cooler at the outlet. The total consumption of each compressor has been calculated theoretically. The compressor output hydrogen will be stored in tanks according to its pressure.

Finally, a dispenser, Kraus Global Optima, has been chosen and its daily consumption has been calculated from the kilograms of refueling required.

Once we have the total consumption of all the machinery that makes up the hydrogen plant, it has been decided to obtain the necessary electrical energy from a photovoltaic plant. For this purpose, a location has been chosen on the outskirts of Granada and the solar irradiation has been studied. From this data, solar modules have been selected and the total energy that could be generated by the design of this plant has been calculated.

### **4. Results**

Analyzing the results from the beginning, after studying the kilometers traveled by the buses and their consumption, a total of 418.73 kg of hydrogen is needed daily.

After studying the consumption of the electrolyzer, the three compressors and the dispenser, the following table shows the total daily energy required.

Tabla 3: Consumption of the hydrogen plant

	Consumo por Kg de H <sub>2</sub>	Número de Kg de H <sub>2</sub>	Consumo en KWh
<b>Electrolizador</b>	49,9 KWh/Kg	418,73 Kg	20894,63 KWh
<b>Compresor 1 (40 → 250)</b>	$0,89 \frac{KWh}{Kg}$	140 Kg	124,6 KWh
<b>Compresor 2 (40 → 300)</b>	$0,97 \frac{KWh}{Kg}$	140 Kg	135,8 KWh
<b>Compresor 3 (40 → 450)</b>	$1,17 \frac{KWh}{Kg}$	140 Kg	163,8 KWh
<b>Dispensador</b>	$0,2 \frac{KWh}{Kg}$	418,73 Kg	83,75 KWh
<b>Total energy needed un one day KWh</b>			21402,58 KWh

Based on this necessary energy, the photovoltaic plant has been studied. The location of Las Gabias, near the city of Granada, has been chosen. With the chosen BiHiKu 7 CS7N modules, an average power per module of 650 W is achieved. It has been estimated that a peak power of about 7000 KWp will be needed to reach the required energy. Therefore, a total of 10770 installed modules will be required.

With this data and the data of the average solar irradiation in this area, the average daily energy and the total energy per month have been estimated.

Tabla 4: Total energy per day and per month

Radiación Global	PVGIS	Gdm	Energía media diaria	Energía media diaria	Energía total
	kWh/m <sup>2</sup>	KWh/ m <sup>2</sup> día	KWh/día	MWh/día	MWh/mes
<b>1 (Enero)</b>	139,15	4,49	25138,57	25,14	779,30
<b>2 (Febrero)</b>	141,28	5,05	28258,02	28,26	791,22
<b>3 (Marzo)</b>	176,52	5,69	31889,76	31,89	988,58
<b>4 (Abril)</b>	185,51	6,18	34631,01	34,63	1038,93
<b>5 (Mayo)</b>	208,95	6,74	37748,50	37,75	1170,20
<b>6 (Junio)</b>	220,04	7,33	41077,07	41,08	1232,31
<b>7 (Julio)</b>	235,77	7,61	42593,75	42,59	1320,41
<b>8 (Agosto)</b>	229,42	7,40	41446,57	41,45	1284,84
<b>9 (Septiembre)</b>	195	6,50	36402,60	36,40	1092,08
<b>10 (Octubre)</b>	172,58	5,57	31177,97	31,18	966,52
<b>11 (Noviembre)</b>	135,28	4,51	25254,07	25,25	757,62
<b>12 (Diciembre)</b>	136,37	4,40	24636,34	24,64	763,73

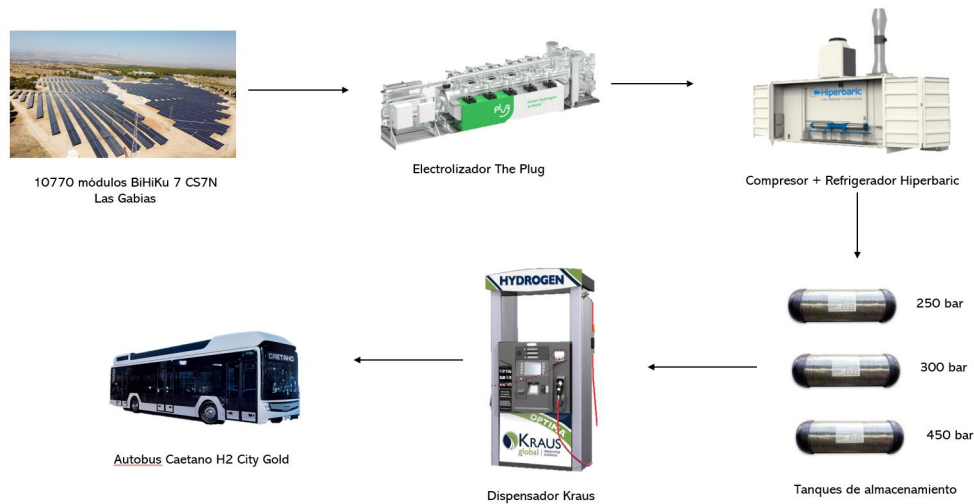
The average energy per day being:

<b>Energía media por día</b>	33,35 MWh/día
------------------------------	---------------

<b>Energía total por año</b>	12185,74 MWh/año
------------------------------	------------------

Therefore, a plant of this size could supply the designed hydrogen plant.

In conclusion, the final design of the hydrogen plant is as follows:



*Ilustración 2: Hydrogen plant*

## 7. Conclusions

After having carried out a study of this hydrogen plant, it is concluded that although it is a very high initial investment, the consequences of installing this hydrogen plant and replacing public buses with hydrogen buses will considerably improve pollution in this city.

This project also encourages the creation of more infrastructures that work with hydrogen, especially as a fuel, since the low number of hydrogen plants currently installed makes it difficult to introduce hydrogen vehicles to both the public and private sectors.

Hydrogen has great potential as a fuel, and thanks to it it could be possible to design a plan to eliminate transport pollution.

## 7. Bibliography

[1] Villanueva, J. C. (05 de 11 de 2021). La contaminación en Granada, un problema que no solo está en la capital. *Granada Digital*.

[2] José Ignacio Linares Hurtado, B. Y. (2007). *El hidrógeno y la energía*. Madrid: Asocioación Nacional de Ingenieros ICAI, Universidad Pontificia de Comillas.



## Índice

<b>1. Introducción .....</b>	<b>6</b>
1.1 Motivación del proyecto.....	7
1.2 El problema de la contaminación en España.....	8
1.3 Objetivos de desarrollo sostenible.....	10
<b>2. Estado de la Cuestión .....</b>	<b>12</b>
3.1 Estudio del hidrógeno como combustible frente a otros combustibles.....	12
2.2 Métodos de producción del hidrógeno .....	14
2.3 Pilas de combustible.....	18
2.4 Métodos de almacenamiento y transporte del hidrógeno .....	21
2.5 Estaciones de servicio .....	24
2.6 Proyectos de algunas ciudades de España en la actualidad .....	26
2.6.1 <i>Autobús Caetano H2. City Gold, fabricado por CaetanoBus línea 4 Madrid.....</i>	<i>26</i>
2.6.2 <i>Barcelona recibe el primer autobús de hidrógeno e inaugura la primera hidrogenera verde pública.....</i>	<i>27</i>
<b>3. Descripción del modelo desarrollado.....</b>	<b>29</b>
3.1 Objetivos y especificación.....	29
3.2 Especificaciones de los autobuses .....	29
3.3 Distancias recorridas diariamente en las 3 rutas.....	33
3.4 Cálculo del consumo eléctrico para la producción de Hidrógeno .....	37
3.4.1 <i>Cálculo del electrolizador.....</i>	<i>38</i>
3.4.2 <i>Cálculo del compresor .....</i>	<i>42</i>
3.4.3 <i>Cálculo del consumo del dispensador.....</i>	<i>58</i>
3.4.4 <i>Gasto total energético: .....</i>	<i>60</i>
<b>4. Producción de la energía eléctrica necesaria.....</b>	<b>61</b>
4.1 Tipos de energía renovable en Granada .....	61
4.2 Estudio de la planta fotovoltaica .....	62
4.3 planta fotovoltaica las gabias.....	63
4.4 planta fotovoltaica guadix .....	64
4.4.1 <i>Estudio y cálculos de la planta fotovoltaica.....</i>	<i>65</i>
<b>5. Seguridad y presupuesto de la hidrogenera .....</b>	<b>69</b>

5.1	Normativa.....	69
5.2	Presupuesto.....	70
5.3	Establecimiento del dispensador .....	71
<b>6.</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>72</b>
6.1	Conclusiones .....	72
6.2	Análisis de resultados.....	73
6.3	Futuros estudios.....	76
<b>7.</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>78</b>
<b>8.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>87</b>
8.1	Índice de anexos .....	87

## *Índice de figuras*

Ilustración 1: Esquema hidrogenera diseñada .....	10
Ilustración 2: Hydrogen plant .....	15
Ilustración 3: Distribución de la generación de la energía eléctrica Fuente: Red eléctrica de España.....	9
Ilustración 4 Alternativas para la producción de hidrógeno.....	15
Ilustración 5: Obtención de hidrógeno verde por electrólisis de agua a partir de fuentes de energía renovable.....	17
Ilustración 6:Esquema de una pila de combustible PEM con los reactantes y productos formados .....	19
Ilustración 7:Densidad energética del hidrógeno .....	22
Ilustración 8: Depósito de hidrógeno de alta presión del Toyota Mirai .....	23
Ilustración 9: Mapa de estaciones de servicio con hidrogeneras en España .....	24
Ilustración 10: Plan despliegue de red mínima de hidrogeneras .....	26
<i>Ilustración 11:Autobús modelo H2 City Gold fabricado por Caetano Bus .....</i>	<i>27</i>
Ilustración 12: Hidrogenera verde en Barcelona construida por Iberdrola .....	28
Ilustración 13:Autobús Caetano H2 City Gold.....	30
Ilustración 14: Proceso de funcionamiento de los autobuses H2CityGold .....	31
Ilustración 15: Ficha técnica y especificaciones de los autobuses H2CityGold.....	32
Ilustración 16: Ruta Línea 4 Chana-Zaidín .....	33
Ilustración 17: Ruta Línea 9 Los Rebites-Chana.....	34
Ilustración 18:Ruta Línea 33 Cenes de la Vega- Estación de Autobuses.....	35
Ilustración 19: Esquema proceso de una hidrogenera .....	38
Ilustración 20: Ficha técnica electrolizador EX425D.....	41
Ilustración 21: Diagrama p-v proceso compresión.....	44
Ilustración 22: Ciclo termodinámico y su vinculación con el mecanismo de compresión..	44
Ilustración 23: Esquema de una compresión en dos etapas.....	47
Ilustración 24: Diagrama p-v compresión doble etapa.....	48
Ilustración 25: Ficha técnica autobus H2CityGold.....	49

Ilustración 26: Tanque de almacenamiento QUANTUM.....	50
Ilustración 27: Gráfica de las presiones del tanque durante el sistema de llenado en cascada .....	52
Ilustración 28: Ficha técnica del compresor Hiperbaric .....	57
Ilustración 29: Dispensador Kraus .....	58
Ilustración 30: Esquema llenado en cascada .....	59
Ilustración 31: Planta fotovoltaica Las Gabias .....	63
Ilustración 32: Localización de la planta Las Gabias .....	63
Ilustración 33: Planta Fotovoltaica Guadix .....	64
Ilustración 34: Ubicación planta fotovoltaica Guadix .....	65
Ilustración 35: Zona de las Gabias .....	65
Ilustración 36: Módulos Canadian Solar .....	66
Ilustración 37: Página PVGIS.....	67
Ilustración 38: Datos irradiación solar en la ubicación Las Gabias.....	67
Ilustración 39: Ubicación donde se repostarán los autobuses .....	71
Ilustración 40: Esquema final de la hidrogenera .....	76

## *Índice de tablas*

Tabla 1: Consumos de la maquinaria de la hidrogenera.....	9
Tabla 2: Cálculos energía media diaria y total por meses .....	10
Tabla 3: Consumption of the hydrogen plant .....	14
Tabla 4: Total energy per day and per month.....	14
Tabla 5: Densidades energéticas de diversos combustibles .....	13
Tabla 6: Datos línea 4.....	34
Tabla 7: Datos línea 9.....	35
Tabla 8: Datos línea 33.....	36
Tabla 9: Resumen datos de las líneas .....	36
Tabla 10: Densidad del hidrógeno en sus distintos estados y a distintas presiones .....	50
Tabla 11: Gasto energético total Opción 1 .....	60
Tabla 12: Datos generales potencia eléctrica renovable Granada y Andalucía (MW).....	62
Tabla 13: Cálculos de la energía producida por la planta FV .....	68
Tabla 14: Tabla de resultados de la energía calculada .....	75

# 1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto tiene como objetivo reducir las abundantes emisiones de gases nocivos procedentes de los vehículos de motor de combustión. La contaminación es uno de los mayores problemas de la sociedad actual. Los altos niveles de contaminación en las zonas urbanas no solo crean graves problemas en el medio ambiente, sino que también provocan importantes consecuencias en la salud de los habitantes.

A pesar de que distintas organizaciones como la Organización Mundial de la Salud o los gobiernos han puesto varias medidas para ayudar a reducir esta contaminación, aún queda un largo camino para acabar con la emisión de gases nocivos. En 2021 se registraron en España niveles más bajos de aire contaminado que otros años, sin embargo, se estima que la contaminación ha seguido afectando a casi 35 millones de personas (73% de la población) según la OMS.[1]

Para poder reducir los altos niveles de contaminación y emisiones de gases nocivos es necesario recurrir a las energías renovables. Las energías renovables son una fuente de energía limpia, no producen emisiones contaminantes perjudiciales para el medio ambiente en operación. El uso y la instalación de las energías renovables ha ido creciendo considerablemente a lo largo de los años. Existen varios tipos de energías renovables, siendo las más comunes la energía hidráulica, procedente de los ríos o corrientes de agua, la energía eólica, procedente del viento o la energía solar, procedente del sol.

El sector del transporte es una de las causas más contaminantes del aire. Los vehículos que funcionan por combustión emiten no solo abundantes cantidades de dióxido de carbono, sino también de otros muchos gases nocivos como el óxido nítrico, metano y ozono entre otros. Es necesario proponer nuevas alternativas en este sector, especialmente en ciudades y núcleos urbanos donde la concentración de los gases contaminantes llega a altos niveles preocupantes. En los últimos años, han surgido nuevos vehículos capaces de producir cero emisiones. Existen varios tipos de esta clase de vehículos que se clasifican en tres grupos:

eléctricos, híbridos enchufables y de hidrógeno. Sin embargo, las desventajas de este tipo de vehículos son la autonomía y la falta de infraestructuras para su repostaje.

A lo largo de los últimos años, varios países han optado por elegir este tipo de vehículos cero emisiones para el transporte público de las ciudades. En concreto, en 2021 la Comunidad de Madrid puso en marcha el primer autobús de hidrógeno en la zona del Corredor del Henares, con intención de incluirlo en las líneas regulares del transporte público en un futuro [2]. Muchos gobiernos están apostando por el hidrógeno como una innovación tecnológica para impulsar futuros vehículos.

Sin embargo, la contaminación en España no está solo en la capital y aún debemos recorrer un largo camino para acabar con la ella en otras muchas ciudades. En concreto, la ciudad de Granada es la segunda ciudad más contaminada de España según un informe del Observatorio de Sostenibilidad de 2020 [3].

Este proyecto tiene como objetivo crear una hidrogenera capaz de abastecer a una flota de autobuses en la ciudad de Granada. Estos autobuses funcionarán a través del hidrógeno que será obtenido a través de energías renovables, por tanto, este tipo de transporte tendrá cero emisiones en operación y ayudará a la reducción de los niveles de contaminación en la ciudad de Granada.

## **1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO**

En este proyecto se estudiará la implantación de una hidrogenera en la ciudad de Granada que abastecerá a una flota de autobuses. Se estudiará el proceso de obtención del hidrógeno a través de la electrólisis con energías renovables como fuente de energía.

La gran motivación detrás de este proyecto es acabar con las emisiones nocivas procedentes de los vehículos de motor. A pesar de que, en los últimos años, numerosos países y gobiernos han establecido restricciones para disminuir los gases nocivos, la contaminación sigue siendo un grave problema para la sociedad actual y es necesario buscar nuevas alternativas menos contaminantes.

El sector del transporte por carretera ha reducido en un 20% su emisión de CO<sub>2</sub> por cada tonelada/kilómetro en los últimos años según la Asociación de Transporte Internacional por Carretera (ASTIC). Sin embargo, el sector genera actualmente el 4,5% de las emisiones totales de gases nocivos en la Unión Europea. [7]

En España, un 34% de la población en España afirma utilizar el transporte público local frecuentemente según Global Consumer Survey de Statista. Esta opción solo se supera por el uso habitual del coche, que según el sondeo lo usan un 76% de los encuestados. [8]

Buscar alternativas para el combustible y el tipo de vehículos de transporte público puede mejorar considerablemente los niveles de contaminación de las zonas urbanas.

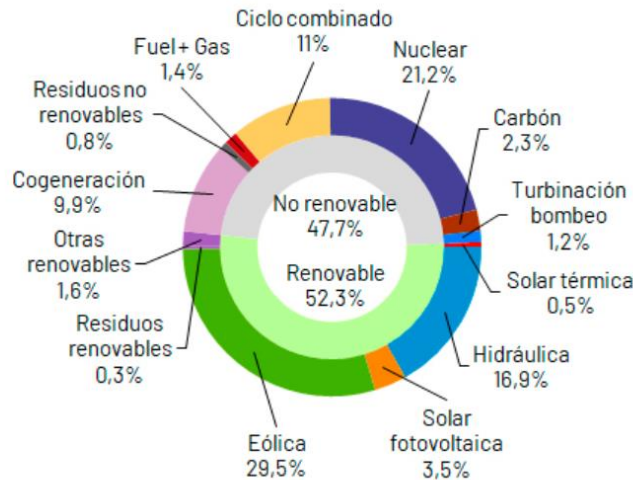
## **1.2 EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN EN ESPAÑA**

La Unión Europea tiene como objetivo para 2030 reducir un 40% las emisiones de gases de efecto invernadero [4]. Estos objetivos deben alcanzarse a través de cambios en el modo que generamos y consumimos la energía.

Tanto España como muchos otros países llevan tomando medidas para reducir esta contaminación e incrementar el uso de energías renovables desde hace años. Sin embargo, las energías renovables tienen una serie de desventajas. Por un lado, hasta hace poco no eran tan efectivas y baratas como las no renovables. Por otro lado, suelen necesitar grandes instalaciones y un flujo constante de fuente de energía. Los procesos de energía eólica y solar dependen tanto del viento como del sol, de forma que si en algún momento no tenemos alguno de estos dos recursos no habrá producción eléctrica.

En los últimos años, los coches eléctricos e híbridos han ganado mucha fama. En 2021 la matriculación de vehículos eléctricos subió un 37.76% respecto a 2020 [5]. A pesar de que estos vehículos son cero emisiones en operación, la energía que los mueve proviene de energías no renovables muy contaminantes. La energía eléctrica en España se genera en 47.7% de energías no renovables [6].

**Estructura de generación de enero de 2021**



*Ilustración 3: Distribución de la generación de la energía eléctrica Fuente: Red eléctrica de España*

Otra nueva alternativa a estos coches son los coches impulsados por hidrógeno. Estos vehículos emiten cero emisiones en operación ya que el hidrógeno reacciona con el aire, generando electricidad y liberando agua (H<sub>2</sub>O) en forma de vapor. De esta forma, se genera electricidad de una manera totalmente limpia. Sin embargo, la obtención del hidrógeno como elemento aislado puede ser complicado y puede necesitar fuentes no renovables.

Existe la opción de obtener el hidrógeno a partir de hidrocarburos: gas natural y carbón. Siendo esta forma una manera contaminante ya que expulsa grandes cantidades de dióxido de carbono. A pesar de que la obtención del hidrógeno sea contaminante, su uso como combustible seguiría sin emitir ningún gas nocivo. Pero el hidrógeno también puede generarse sin producir nada de contaminación, a través de la electrólisis. Mediante este proceso, el agua se descompone para formar hidrógeno y oxígeno. Por este motivo, si somos capaces de obtener la energía necesaria para que ocurra la electrólisis de energías renovables, conseguiríamos que no solo el uso del hidrógeno como combustible no emita ningún tipo de emisión contaminante, sino que tampoco lo haría su producción.

### **1.3 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE**

Los Objetivos de desarrollo sostenible forman parte del plan de la ONU para conseguir un futuro sostenible. En total forman 17 objetivos y este proyecto se alinea con una serie de ellos:

- **Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante.** Uno de los objetivos fundamentales de este proyecto es la creación de un ciclo de producción y consumo del hidrógeno que no sea contaminante. Se estudiará el uso del hidrógeno como combustible, sin producir ningún tipo de residuo contaminante. Por otro lado, obtendremos la energía necesaria para la producción del hidrógeno de energías renovables. De esta forma el ciclo completo de este proyecto estará basado en las energías renovables y en evitar cualquier tipo de contaminación.
- **Objetivo 9: Industria, Innovación e Infraestructura.** Con la creación de la infraestructura de una hidrogenera se pretende motivar a la creación y desarrollo de estas en España. A pesar de que actualmente existe un plan de desarrollo en el que se pretende construir una red de hidrogeneras en España, aún queda mucho por recorrer y por desarrollar este nuevo tipo de combustible. La creación de nuevas hidrogeneras, especialmente públicas es fundamental para motivar a la población y gobiernos al uso de este nuevo combustible.
- **Objetivo 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles.** Este proyecto, especialmente ubicado en Granada, está destinado a reducir la contaminación de esta ciudad. Se invierte en cambiar el transporte público actual por autobuses de hidrógeno no contaminantes, de manera que se mejoraría la contaminación producida por el transporte público. Se intenta convertir la zona urbana de una ciudad muy contaminante en una zona más limpia y sostenible.
- **Objetivo 13: Acción por el clima.** Se busca con este proyecto encontrar un ciclo de energía y consumo que no sea contaminante en el sector del transporte. Se apuesta

precisamente por el hidrógeno ya que al usarse como combustible no libera ningún tipo de gas nocivo que sea dañino para la atmósfera. De este modo, se estaría buscando mejorar las condiciones atmosféricas y reducir los efectos del calentamiento global provocados por la contaminación. [9]

## **2. ESTADO DE LA CUESTIÓN**

### **3.1 ESTUDIO DEL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE FRENTE A OTROS COMBUSTIBLES**

La energía eléctrica ha sido desde hace un siglo esencial para la industria y la sociedad. El sector eléctrico ha experimentado una gran transformación en los últimos años. Debido al cambio climático, se han estado buscando alternativas menos contaminantes para la producción de energía que se están aplicando tanto al sector industrial como a sectores de uso cotidiano como viviendas o el transporte.

Actualmente, debido al control y producción del petróleo de los países árabes el precio de este varía constantemente por sus condiciones al mercado laboral. Este motivo entre otros muchos hace que sea necesario encontrar nuevas alternativas. La comunidad científica cree que el hidrógeno es el combustible del futuro debido a sus numerosas ventajas frente al resto de combustibles.

El hidrógeno no solo es el elemento más abundante en el universo, sino que es capaz de proporcionar más energía por unidad de masa que el resto de los combustibles con 33.59 kWh por kg, frente a los 13,93 kWh del gas natural o los 12,36 kWh del petróleo, por ejemplo. Por otro lado, se trata de un combustible limpio ya que, al quemarlo, además de energía, tan solo libera vapor de agua, produciendo cero emisiones nocivas. [10]

	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Energía almacenada		
		Volumen [kWh/m <sup>3</sup> ]	Volumen [kWh/Nm <sup>3</sup> ]	Masa [kWh/kg]
H <sub>2</sub> líquido (1 bar; -252,8°C)	70,71	2.375	3	33,59
H <sub>2</sub> gas (300 bar; 25°C)	20,55	690		
H <sub>2</sub> gas (700 bar; 25°C)	47,96	1.611		
Gas natural (1 bar; 25°C)	0,65	9,1	10	13,93
Butano líquido (25°C)	550	7.000	33	12,73
Gasolina	750	9.270	–	12,36

*Tabla 5: Densidades energéticas de diversos combustibles*

*Fuente: El hidrógeno y la energía, José Ignacio Linares*

Sin embargo, el hidrógeno no se encuentra en estado libre en la naturaleza. Es necesario producirlo a través de otras materias primas como el gas natural, carbón, agua o energías renovables, siguiendo transformaciones que requieren de algún tipo de energía. Lo más interesante del hidrógeno es que es capaz de ofrecer la posibilidad de realizar un ciclo energético cerrado limpio. Este ciclo consiste en tomar agua de la naturaleza y separarla en sus dos componentes, hidrógeno y oxígeno mediando energía de origen renovable. El hidrógeno obtenido puede ser utilizarlo como combustible a través de pilas de combustible, devolviendo a la naturaleza la misma cantidad de agua que se había tomado y sin emitir gases de efecto invernadero.

Además, el hidrógeno es un eficiente vector energético, por lo que es posible almacenarlo y transportarlo para convertirlo después en otras formas de energía. Esta es una de las grandes diferencias con la electricidad, la cual no puede almacenarse, se debe transformar en otros tipos de energía para ello.

Por todos estos motivos, el hidrógeno resulta un sustituto muy atractivo al resto de combustibles, en especial si se utilizan pilas de combustible. Estos dispositivos son capaces de convertir la energía química almacenada del hidrógeno en energía eléctrica mediante un proceso que no está sometido al ciclo Carnot. Por lo tanto, la eficiencia energética es de dos a tres veces mayor que la de un motor térmico. Las aplicaciones de la energía eléctrica producida por las pilas de combustible pueden ser tanto fines domésticos como de transporte.

A lo largo de los últimos años, se han diseñado también los llamados vehículos de pila de hidrógeno, vehículos que tienen instalado en ellos una pila de combustible. Al suministrarles hidrógeno como combustible son capaces de generar energía eléctrica en la pila para el funcionamiento del coche.

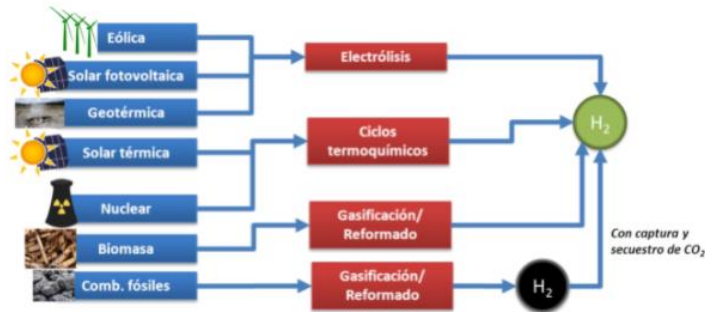
## **2.2 MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO**

A pesar de que el hidrógeno sea el elemento más abundante en la Tierra, raramente se encuentra en estado elemental. Suele presentarse combinado con otros elementos como el oxígeno, H<sub>2</sub>O, o el carbono, CH<sub>4</sub>.

Existen numerosos métodos de producción del hidrógeno. Se puede producir a partir de distintos procesos, con distintas materias primas y fuentes de energía. El hidrógeno puede ser producido localmente, en grandes instalaciones o en unidades localizadas en el lugar de uso. Esta forma de producción, llamada “in situ” es la más común.

Existen tres procesos principales para la producción del hidrógeno: la electrólisis, ciclos térmicos, gasificación y reformado. Estos procesos se pueden realizar a partir de distintos tipos de energía y varias de ellas comparten procesos.

De esta forma, como se muestra en la ilustración a continuación, la energía necesaria para el proceso de electrólisis puede proceder de energía renovable eólica, fotovoltaica y geotérmica. La energía necesaria para los ciclos térmicos puede proceder de energía solar térmica o energía nuclear. Y el proceso de gasificación y reformado puede realizarse con energía procedente de biomasa o de combustibles fósiles. Todo esto se muestra en la siguiente imagen.



*Ilustración 4 Alternativas para la producción de hidrógeno*

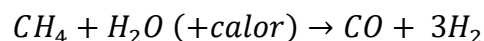
*Fuente: Hidrógeno y transporte, Ciencia y Presencia*

Actualmente, la mayoría del hidrógeno usado como combustible se obtiene a partir de combustibles fósiles. [11]

Las técnicas de producción del hidrógeno son las siguientes:

1) Procesos de conversión química: Reformado, Gasificación y Pirólisis

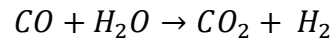
Este tipo de proceso necesita algún tipo de aporte de energía térmica. El proceso de reformado con vapor es uno de los procesos más comunes para producir hidrógeno a partir de gas natural, normalmente metano (CH<sub>4</sub>). Este tipo de proceso se realiza a altas temperaturas, entre 700° C-1000° C. El metano reacciona con el vapor de agua a una presión entre los 3 y 25 bares en presencia de un catalizador.



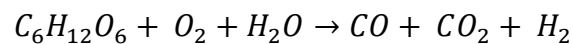
Esta reacción produce hidrógeno, monóxido de carbono y una pequeña cantidad de dióxido de carbono.

Posteriormente, el monóxido de carbono y el vapor reaccionan en presencia de un catalizador para producir dióxido de carbono y más cantidad de hidrógeno. Por último, se eliminan el

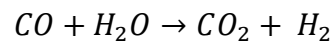
dióxido de carbono y otras impurezas, dejando principalmente hidrógeno puro (99,999% volumen). [12][13]



La Gasificación es un proceso que convierte materiales carbonosos orgánicos o fósiles a altas temperaturas, mayores a 700°C, sin necesidad de combustión. La biomasa es un recurso renovable orgánico que incluye distintos tipos de residuos tanto agrícolas, forestales, orgánicos o desechos animales. Este proceso comienza con la reacción de la biomasa junto con oxígeno y vapor de agua para obtener monóxido de carbono, dióxido de carbono y hidrógeno.



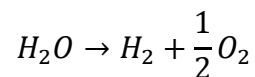
Posteriormente, el monóxido de carbono reacciona con agua para obtener dióxido de carbono y más hidrógeno.



La pirólisis es la gasificación de la biomasa sin la presencia del oxígeno. [14]

2) Procesos termolíticos: Termólisis directa y por Ciclos Termoquímicos.

La termólisis directa es la descomposición del agua por procesos térmicos.



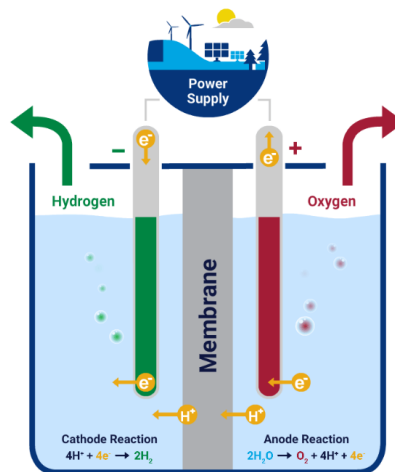
Los inconvenientes de este proceso son las elevadas temperaturas que se necesitan para la disociación, alrededor de 3000K, y la necesidad de una técnica efectiva de separación del hidrógeno y el oxígeno. Por este motivo, se suele recurrir a ciclos termoquímicos para poder reducir las temperaturas. [15] [16]

Los ciclos termoquímicos consisten en un proceso de descomposición termoquímica de agua en hidrógeno y oxígeno mediando una serie de reacciones químicas que se dan en distintas etapas.

El proceso consiste en tres etapas: la obtención del oxígeno, la producción del hidrógeno y por último la regeneración de materiales. Este proceso no requiere de temperaturas tan elevadas, pero aun así sigue siendo necesario altos niveles térmicos. [17]

### 3) Procesos electrolíticos: Electrólisis.

El hidrógeno obtenido a través de este proceso se llama hidrógeno verde, ya que si el aporte energético que se necesita se obtiene de una fuente renovable el proceso es no contaminante. El proceso de electrólisis consiste en la descomposición electroquímica del agua a través de una corriente eléctrica que circula entre dos electrodos dentro de una solución acuosa conductora.

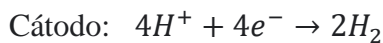
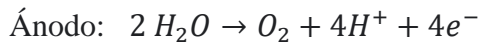


*Ilustración 5: Obtención de hidrógeno verde por electrólisis de agua a partir de fuentes de energía renovable.*

*Fuente: Wood Mackenzie*

El electrolizador está formado por un cátodo con carga negativa, un ánodo con carga positiva y una membrana. La reacción suele llevarse a cabo en una disolución de ácido sulfúrico.

Las reacciones que se dan a cada uno son las siguientes:



De esta manera, comienzan a aparecer burbujas de gas de hidrógeno y oxígeno en los dos electrodos.

Hay tres tipos principales de electrolizadores: membrana de intercambio de protones (PEM), óxido sólido y alcalino. [18]

#### 4) Procesos fotónicos: Fotoelectrólisis, Fotobiólisis y Fotocatálisis.

Estos procesos consisten en el uso de la energía fotovoltaica, de combustibles fósiles y gas natural para la obtención del hidrógeno.

## 2.3 PILAS DE COMBUSTIBLE

Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico que transforma la energía química directamente a energía eléctrica. Para poder producir energía se necesita de un combustible (el hidrógeno) y normalmente de un agente oxidante como el oxígeno. La gran diferencia entre una pila de combustible y una batería son las limitaciones que tienen. A una batería no se le suministra de forma externa los reactantes necesarios para producir energía, de modo que cuando estos se acaben, ya no se podrá generar energía. En cambio, en una pila de combustible, los reactantes y combustible son suministrados y, por tanto, se seguirá generando energía mientras se mantenga el suministro de estos.

Una pila de combustible consta de tres partes, ánodo, cátodo y un electrolito, un material que hace de membrana entre las dos primeras partes que permite el paso de iones, pero no permite pasar a los electrones.

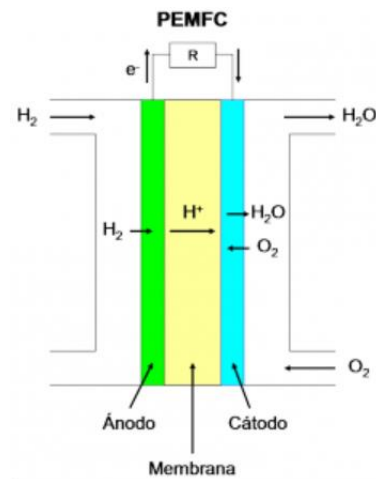
El combustible, en ese caso el hidrógeno, alimenta al ánodo y el aire alimenta al cátodo. Gracias a un catalizador ocurren las siguientes reacciones en las distintas partes de la pila:

Reacción en el ánodo:  $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

Reacción en el cátodo:  $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$

Reacción global:  $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$

En el ánodo, se disocia el hidrógeno suministrado en protones y electrones. Los protones viajan hacia el cátodo mientras que los electrones deben viajar por un circuito externo ya que el electrolito no permite su paso. De esta manera, los electrones crean un flujo de electricidad, produciendo energía. Por otro lado, en el cátodo, las moléculas de oxígeno reaccionan junto con los protones y con los electrones (que llegan a través del circuito eléctrico) para formar agua, el único residuo que produce una pila de combustible. [19]



*Ilustración 6: Esquema de una pila de combustible PEM con los reactantes y productos formados*

*Fuente: Apilados, Tipos de pilas de combustible y su clasificación.*

Existen distintos tipos de pilas de combustible según el tipo de electrolito que se use. También depende del tipo de combustible que se use, ya que algunas usan diesel o metanol. Sin embargo, actualmente la mayoría de las pilas de combustible funcionan con hidrógeno y oxígeno.

1) PEMFC (Pilas de combustible de electrolito polimérico)

Este tipo de pila esta alimentada por hidrógeno. Tienen lugar dos reacciones químicas, una en el ánodo donde se disocia el hidrógeno dando lugar a dos protones y dos electrones. Los protones son conducidos a través del electrolito hacia el cátodo mientras que los electrones circulan por un circuito externo generando corriente eléctrica. En el cátodo reaccionan los protones que llegan con el oxígeno generando agua como único producto. Los protones viajan a través de una membrana. Las membranas que normalmente se usan son membranas poliméricas formadas por un ionómero perfluorosulfonado, como por ejemplo el Nafion. Esta membrana debe estar correctamente hidratada para poder conducir los protones. Por este motivo los gases de entrada deben estar humificados.

Normalmente se utilizan catalizadores para facilitar las reacciones químicas. Hasta ahora, los catalizadores más utilizados son derivados del Platino. Debido a su alto coste, se han estudiado otros tipos de catalizadores también como nuevos materiales de carbono con propiedades texturales y química superficial controlables. Estos catalizadores se colocan tanto en el lado del ánodo como en del cátodo. [20] [21]

1) DMFC (Pilas de Metanol Directo)

Este tipo de pilas se caracteriza por el uso de metanol como combustible para el intercambio de protones. Este tipo de pilas permite evitar un reformado catalítico y un mejor almacenamiento que el hidrógeno. La densidad volumétrica del metanol es mucho mayor que la del hidrógeno. Esta pila se basa en la oxidación del metanol sobre un catalizador, de manera que se forma dióxido de carbono, protones (iones de  $H^+$ ) y electrones. De igual manera que en la pila anterior, los protones viajan a través de una membrana y reaccionan con el oxígeno para formar agua, mientras que los electrones viajan por un circuito externo creando corriente.

2) MCFC (Pilas de combustible de carbonato fundido)

Estas pilas se caracterizan por el uso de una solución líquida de carbonato de litio o carbonato de potasio como electrolito. El ánodo está formado por polvo de níquel sinterizado y una pequeña cantidad de cromo. El cátodo está formado por óxido de níquel con litio. Pueden utilizar distintos combustibles, como el monóxido de carbono o gas natural. Se operan a altas temperaturas del orden de 650°C. [22]

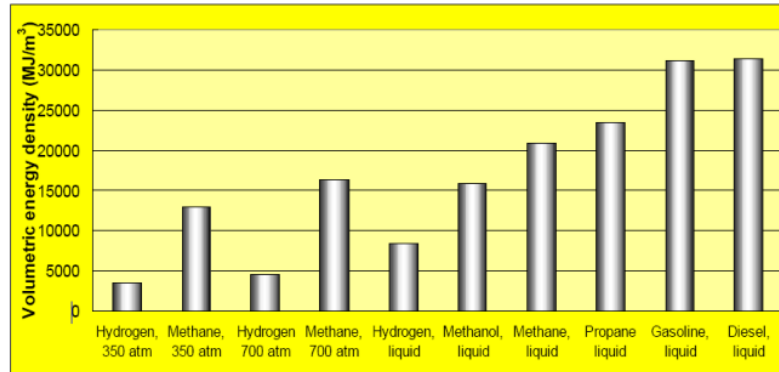
3) Óxido Sólido (SoFC)

Esta pila es capaz de transformar directamente la energía química de un combustible en electricidad. El electrolito está formado por óxido metálico. Operan a altas temperaturas, alrededor de los 1000 °C

En este proyecto, la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento del autobús se obtendrá a partir de pilas de hidrógeno. El autobús elegido para este proyecto es el H2 City Gold. Un autobús eléctrico que utiliza una pila de combustible diseñada por Toyota llamada Toyota FC Stack. El tipo de pila es de electrolito de polímero sólido y catalizador de platino con una potencia nominal de 60 kW.

## **2.4 MÉTODOS DE ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DEL HIDRÓGENO**

A pesar de que la densidad energética del hidrógeno es muy buena, siendo por ejemplo tres veces superior que la de la gasolina, si nos fijamos en la densidad volumétrica, la del hidrógeno es relativamente baja comparada con el resto de los combustibles.



*Ilustración 7: Densidad energética del hidrógeno*

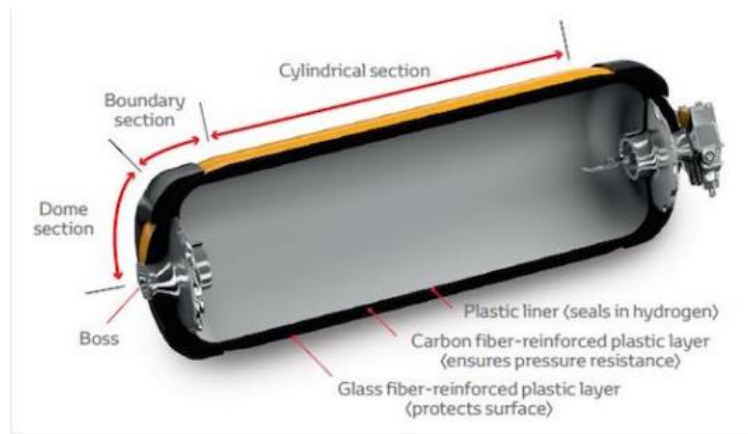
*Fuente: Azkarate, I.*

Por este motivo, el hidrógeno es un gas difícil de almacenar. Debido al aumento de su uso en los últimos años, se han desarrollado distintas maneras de almacenar el hidrógeno dependiendo de su uso.

En la imagen se puede observar que el hidrógeno líquido y a presión de 700 bar son las mejores formas para almacenar el hidrógeno.

En automoción, los tanques a presión son la forma más común de almacenar el hidrógeno. Se almacena a presión en botellas de acero o en tanques de fibra de carbono capaces de operar a 200 bar, 350 bar (estándar hace años), y actualmente el estándar empleado es de 700 bar. Actualmente, se han desarrollado tanques más ligeros a base de materiales compuestos.

Estos tanques están formados por una capa interna de un polímero plástico a base de nylon con una baja permeabilidad al hidrógeno. La segunda capa es resina epoxy con fibra de carbono que aporta rigidez, y, por último, una capa externa fabricada a base de fibra de vidrio para proteger al depósito. Este tipo de tanques son mucho más ligeros.



*Ilustración 8: Depósito de hidrógeno de alta presión del Toyota Mirai*

Estos tanques se pueden transportar por carretera en camiones, ferrocarril o barco. Se está estudiando para en un futuro, cuando se cree una red del transporte del hidrógeno, diseñar sistemas de interconexión por tuberías que lo hagan llegar a las hidrogeneras.

Otra opción para almacenar el hidrógeno es en estado líquido a temperaturas criogénicas (-253°C). La gran ventaja de este tipo de almacenamiento es la alta densidad volumétrica del hidrógeno líquido comparado con el hidrógeno gas. Este método se suele utilizar para almacenar grandes cantidades de hidrógeno. Sin embargo, no puede mantenerse almacenado durante mucho tiempo debido a su elevado coste. BMW ha apostado por el hidrógeno líquido para la producción de pequeños tanques. El hidrogeno almacenado de esta manera también se transporta a través de camiones, ferrocarriles o barcos, pero su coste es mucho menor que el de transportar gas a presión. Un camión que lleva hidrógeno líquido podría ser sustituido por 30 camiones de hidrógeno gaseoso.

Otro método, mucho menos utilizado que los anteriores, es en forma de hidruros metálicos. El hidrógeno forma hidruros con metales o aleaciones como magnesio, titanio, hierro, manganeso, níquel o cromo. Los átomos de hidrógeno se almacenan dentro de la estructura metálica, por este motivo, se consigue una mayor densidad de almacenamiento que con hidrógeno comprimido. El problema de este tipo de almacenamiento es el elevado peso de los metales. Para liberar el hidrógeno de los hidruros metálicos se requiere de calor.

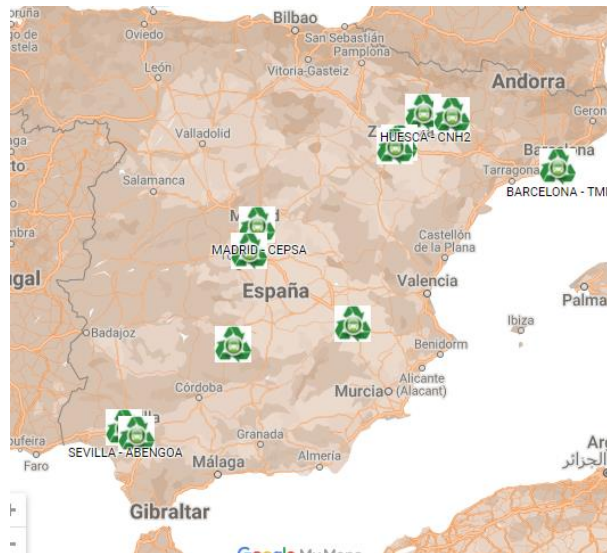
Hoy en día, se ha logrado una solución suficientemente buena para poder almacenar el hidrógeno de manera eficiente en automoción. Sin embargo, siguen abiertas muchas líneas de investigación relacionadas con este tema y se han desarrollado nuevas tecnologías de almacenamiento como por ejemplo con el uso de películas metálicas ultrafinas [MEPhI]. [39]

## 2.5 ESTACIONES DE SERVICIO

Actualmente, la infraestructura de hidrogeneras en el mundo se ha desarrollado considerablemente en los últimos años con un número actual de hidrogeneras de 685. Japón lidera el número de hidrogeneras con 159, mientras que Europa tan solo tiene 37 y América del Norte 13. Se contempla la instalación de 320 nuevas hidrogeneras hasta 2025. [23]

En 2022 en España tan solo hay 11 hidrogeneras en funcionamiento. Sin embargo, todas ellas son privadas, aunque tienen la posibilidad de recargar de forma privada con cita previa.

La ubicación de estas hidrogeneras se puede observar en la siguiente imagen:



*Ilustración 9: Mapa de estaciones de servicio con hidrogeneras en España*

*Fuente: Glpautogas*

Encontramos tres en Castilla la Mancha, una en Cataluña, cuatro en Aragón, dos en Andalucía y una en Madrid. [24]

Todas estas hidrogeneras son de uso privado, por lo que no están abiertas cara al público. No obstante, existen ya varios proyectos donde se pretende instalar en los próximos años varias estaciones de Hidrógeno de carácter público. En Barcelona ya lleva operativa la primera hidrogenera de uso público en España situada en el polígono de la Zona Franca de Barcelona. [25]

Un equipo de investigadores españoles del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) va a desarrollar la una hidrogenera verde autosuficiente en España de servicio público. Esta hidrogenera estará ubicada en Zaragoza y será capaz de generar in situ 60 kg de hidrógeno verde para abastecer a autobuses, turismos y camiones. Para abastecer a esta hidrogenera se utilizará placas fotovoltaicas como suministro eléctrico. [26][27][28]

España está desarrollando un plan donde se llegue a construir una red de al menos 100-150 hidrogeneras de acceso público en 2030 por todo el territorio nacional con una máxima distancia entre cada una de ellas de 250 km. El primer desarrollo de hidrogeneras se realizará en núcleos urbanos donde se abastecerá a flotas de autobuses en municipios de más de 100.000 habitantes. Esta red urbana no cubre todos los objetivos ya que la distancia entre cada estación sería de 400 km por lo que no cumple el objetivo de la distancia ni es capaz de abastecer a los camiones para largas distancias. El segundo paso del plan será dar servicio a los corredores y rutas con mayor intensidad media diaria de vehículos/día. Esta red complementa a la primera y garantiza los recorridos a larga distancia. [29]



*Ilustración 10: Plan despliegue de red mínima de hidrogeneras*

## 2.6 PROYECTOS DE ALGUNAS CIUDADES DE ESPAÑA EN LA ACTUALIDAD

En España, los vehículos de pila de hidrógeno ya se han puesto en marcha en varias ciudades. El Gobierno ha realizado varios proyectos donde se está implementando los autobuses públicos de pila de hidrógeno para realizar varias líneas dentro de ciudades como Madrid o Barcelona. Muchos de estos proyectos están en fase de prueba, pero el objetivo es ir implementándolos poco a poco dentro del transporte público.

### 2.6.1 AUTOBÚS CAETANO H2. CITY GOLD, FABRICADO POR CAETANOBUS LÍNEA 4 MADRID

El primer autobús urbano propulsado por hidrógeno en España se ha puesto en marcha este 2022 en la línea 4 en la ciudad de Torrejón de Ardoz, siendo el primero autobús de pila de hidrógeno que forma parte de la red de transporte público de la Comunidad de Madrid.

El autobús es el modelo H2 City Gold fabricado por Caetano Bus. Utiliza el hidrógeno como fuente de energía con una pila de combustible y es 100% cero emisiones, emitiendo tan solo vapor de agua.

Este proyecto puesto en marcha por la compañía Alsa, es parte de un plan para el futuro en el que prevén que todos los autobuses urbanos en España de esta compañía sean cero emisiones en 2035.

Este autobús reposta en la primera hidrogenera instalada en Madrid para autobuses urbanos, Don Quixote H2 Station, que cuenta con una capacidad de cara de 50 Kg al día. Ha sido realizada por Carburos Metálicos y está instalada en el parque empresarial Ajusta en Albacete.[30] [31]



*Ilustración 11:Autobús modelo H2 City Gold fabricado por Caetano Bus*

*Fuente: Artículos Híbridos y eléctricos*

## **2.6.2 BARCELONA RECIBE EL PRIMER AUTOBÚS DE HIDRÓGENO E INAUGURA LA PRIMERA HIDROGENERA VERDE PÚBLICA**

En diciembre de 2021 llegó a Barcelona el primero de ocho autobuses de pila de hidrógeno para comenzar la descarbonización en el transporte público. Estos autobuses son también construidos por CaetanoBus y es el modelo H2 City Gold LHD, entrarán en servicio en 2022, después de haber pasado un periodo de prueba.

Repostarán en la hidrogenera inaugurada hace poco en la Zona Franca de Barcelona. Esta planta será capaz de abastecer con 20 kilos diarios de hidrógeno a los autobuses. Está

impulsada por el Consorcio de la Zona Franca de Barcelona (CINEA) y Transportes Metropolitanos de Barcelona (TMB) y ha sido construida por Iberdrola.

El objetivo de esta nueva hidrogenera no es solo abastecer a los autobuses del transporte público de Barcelona sino también abastecer a viajeros y mercancías en la ciudad.

Gracias esta hidrogenera verde, se asegura que haya cero emisiones de gases de efecto invernadero tanto en el consumo como en la producción del hidrógeno. [28]



*Ilustración 12: Hidrogenera verde en Barcelona construida por Iberdrola*

*Fuente: Cadena de Suministro*

## **3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO**

### **DESARROLLADO**

#### **3.1 OBJETIVOS Y ESPECIFICACIÓN**

Una vez estudiado la capacidad del hidrógeno como combustible al igual que su producción y almacenamiento, se propone con este proyecto implantar una hidrogenera en la ciudad de Granada que abastezca de hidrógeno a los autobuses de tres líneas públicas de esta ciudad.

Se sustituirán todos los autobuses de estas tres líneas por autobuses de pila de hidrógeno, de modos que la contaminación producida por los antiguos autobuses desaparecerá y la única sustancia liberada por estos nuevos autobuses será vapor de agua.

La hidrogenera deberá ser capaz de producir el hidrógeno diario necesario para que todos los autobuses de las líneas funcionen correctamente y sean capaces de hacer el recorrido completo sin necesidad de parar a repostar.

#### **3.2 ESPECIFICACIONES DE LOS AUTOBUSES**

En los últimos años se han desarrollado varios autobuses de pila de hidrógeno de distintas marcas que se han puesto en marcha en numerosos proyectos por todo el mundo. Se han estudiado varios autobuses y finalmente se ha elegido para este proyecto el autobús de pila de combustible Caetano H2 City Gold. Este autobús destaca por su modularidad, autonomía y simplicidad de uso. Este autobús se ha puesto en marcha en varias ciudades de España durante 2021 tanto en Barcelona como en Toledo.

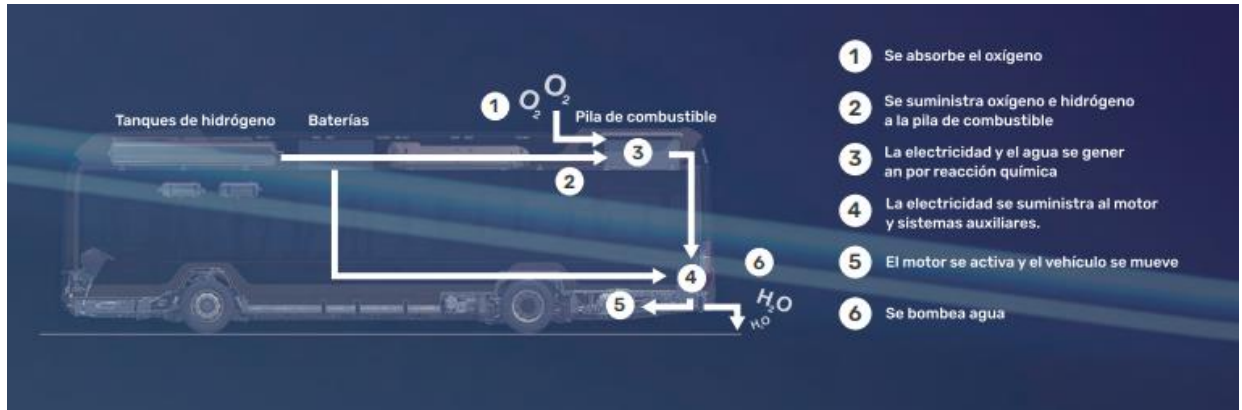


*Ilustración 13:Autobús Caetano H2 City Gold*

*Fuente: Caetano Bus*

Este autobús tiene doce metros de longitud. Incorpora una pila de combustible de Toyota FC Stack con 60 kW de potencia nominal y almacena el hidrógeno gracias a cinco tanques de hidrógeno tipo 4 con una capacidad total de 37,5 Kg a 350 bar. El motor de Siemens síncrono de imanes permanentes tiene una potencia máxima de 180 kW. Toda la potencia del motor la gestiona el inversor de tensión ELFA 2. El sistema es complementado también con baterías de tracción de iones tipo LTO con una capacidad de 44kWh, donde la energía generada por la pila de combustible y la energía generada por el sistema de frenado es almacenada. También cuenta con un sistema de frenado regenerativo. Tiene una autonomía de 400 km y un consumo desde 6kg/100 km. Se estima que el consumo medio diario sea de 20 kg. [40]

En la siguiente imagen se muestra el proceso de funcionamiento de este autobús con los pasos enumerados después de haber recibido el hidrógeno.



*Ilustración 14: Proceso de funcionamiento de los autobuses H2CityGold*

*Fuente: Catálogo Caetano Bus*

La ficha técnica con las especificaciones de los autobuses es la siguiente, se puede encontrar el catálogo completo en el anexo 1.



<b>Grupo propulsor</b>	Motor - 180 kW - Siemens (síncrono de imanes permanentes) Transmisión - directa al eje (sin caja de cambios)	
<b>Baterías</b>	LTO (óxido de litio-titanato)	
<b>Sistema de pila de combustible</b>	Tanques de hidrógeno - tipo 4 de composite: 5 x 3121 (máx. 37,5kg: 350 bar)	
	Tipo de suministro - < 9 min (de acuerdo con SAE 32601-2 & SAE 32799 - IR)	
	Potencia nominal de la pila de combustible - 60 kW (Toyota FC Stack) Arranque en frío - desde - 25 °C sin energía externa - opcional	
<b>Autonomía estimada</b>	Hasta 400 km	
<b>Consumo estimado</b>	Desde 6 kg/100 km	
<b>Sistema de frenado</b>	Sistema de frenado electroneumático (WABCO EBS 3), ABS con sistema de frenado regenerativo (ASR) Sistema electrónico de estabilidad (ESC) - opcional	
<b>Chasis</b>	Chasis de piso bajo de acero de alta resistencia	
<b>Ejes</b>	Eje delantero - Suspensión independiente ZF RL 82 EC	
	Eje trasero - Eje motor tipo pórtico rebajado para autobuses de piso bajo	
<b>Suspensión</b>	ECAS 2 - Suspensión neumática controlada electrónicamente	
	Sistema de inclinación (kneeling)	
	Accionamiento manual y automático de subida y bajada de la carrocería	
<b>Carrocería</b>	Carrocería de aluminio con sistema CO-BOLT	
<b>Capacidad</b>	Hasta 64 pasajeros	Hasta 87 pasajeros
<b>Puertas</b>	2 o 3 puertas	

*Ilustración 15: Ficha técnica y especificaciones de los autobuses H2CityGold*

*Fuente: Catálogo autobuses H2CityGold*

### **3.3 DISTANCIAS RECORRIDAS DIARIAMENTE EN LAS 3 RUTAS**

Las tres rutas que se han elegido para realizar este proyecto son las más demandadas en la ciudad de Granada.

#### **Línea 4: Chana-Zaidín**

Con cabeceras en Sagrada Familia y en el Hospital del Parque Tecnológico de Ciencias de la Salud, lleva el siguiente recorrido:



*Ilustración 16: Ruta Línea 4 Chana-Zaidín*

*Fuente: Movilidad Granada*

Tras haber contactado con los responsables del transporte público en Granada, se ha conseguido los siguientes datos, que incluyen tanto el número de autobuses por línea, el número de recorridos, el número de kilómetros por recorrido y el dato más importante, el número total de kilómetros recorridos al día por cada línea.

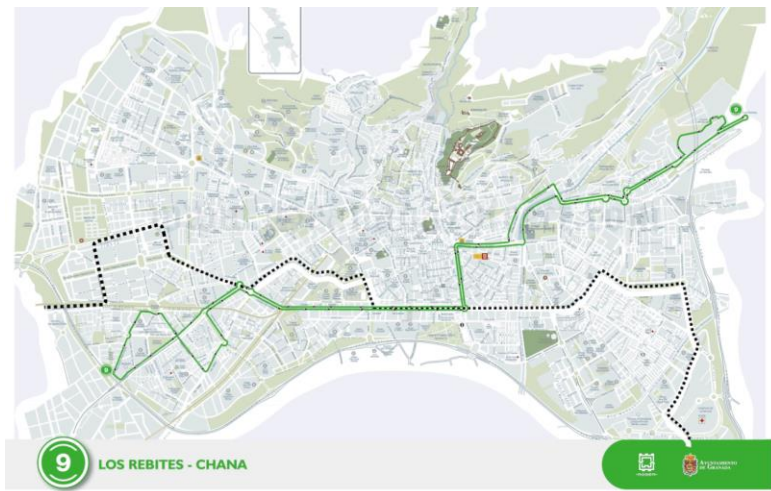
En concreto, los datos de esta línea son:

*Tabla 6: Datos línea 4*

	<i>Nº autobuses por línea</i>	<i>Nº recorridos diarios totales</i>	<i>Km/recorrido</i>	<i>Km totales</i>	<i>Nº máximo de recorridos diarios por autobús</i>
<b>Línea 4</b>	16	120	18,163	2179,56	11

### **Línea 9: Los Rebites- Chana**

Con cabeceras en la Escuela de Gerencia y en los Rebites.



*Ilustración 17: Ruta Línea 9 Los Rebites-Chana*

*Fuente: Movilidad Granada*

Los datos de esta línea son los siguientes,

*Tabla 7: Datos línea 9*

	<i>Nº autobuses por línea</i>	<i>Nº recorridos diarios totales</i>	<i>Km/recorrido</i>	<i>Km totales</i>	<i>Nº máximo de recorridos diarios por autobús</i>
<b>Línea 9</b>	21	107	18,936	2026,15	11

### **Línea 33: Cenes de la Vega- Estación de Autobuses**

Con cabeceras en Estación de Autobuses y en los Pinillos



*Ilustración 18: Ruta Línea 33 Cenes de la Vega- Estación de Autobuses*

*Fuente: Movilidad Granada*

Los datos de esta línea son:

*Tabla 8: Datos línea 33*

	<i>Nº autobuses por línea</i>	<i>Nº recorridos diarios totales</i>	<i>Km/recorrido</i>	<i>Km totales</i>	<i>Nº máximo de recorridos diarios por autobús</i>
<b>Línea 33</b>	19	120	23,109	2773,08	11

En resumen, los datos de las tres líneas de autobuses forman la siguiente tabla:

*Tabla 9: Resumen datos de las líneas*

	<i>Nº autobuses por línea</i>	<i>Nº recorridos diarios totales</i>	<i>Km/recorrido</i>	<i>Km totales</i>	<i>Nº máximo de recorridos diarios por autobús</i>
<b>Línea 4</b>	16	120	18,163	2179,56	11
<b>Línea 9</b>	21	107	18,936	2026,15	11
<b>Línea 33</b>	19	120	23,109	2773,08	11
<b>TOTAL</b>	56	Media: 115,6	Media:20,07	6978,79	11

### **3.4 CÁLCULO DEL CONSUMO ELÉCTRICO PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO**

Una hidrogenera cuenta con numerosas etapas hasta obtener el hidrógeno preparado para dispensarlo a los vehículos.

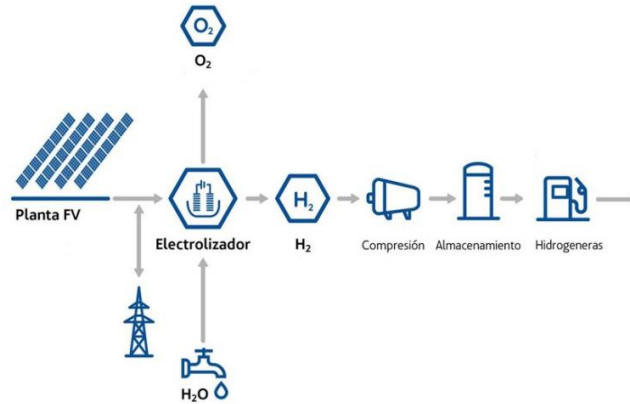
El primero paso es producir hidrógeno, ya que este no se encuentra en la naturaleza en su estado elemental. En este caso, hemos elegido el proceso de electrólisis, un proceso no contaminante que gracias a una reacción química y energía eléctrica es capaz de producir hidrógeno. La máquina que realiza este proceso es un electrolizador. La selección y el estudio del electrolizador será el primer paso para el diseño de la hidrogenera. Se calculará previamente los kg de hidrógeno necesarios para el consumo de los autobuses.

Una vez se ha producido el hidrógeno, es necesario almacenarlo. Normalmente se almacena a alta presión debido a su baja densidad, por lo que se necesita comprimirlo. El siguiente paso por tanto será calcular el consumo de uno o varios compresores que compriman el hidrógeno hasta la presión deseada, que se almacenará en tanques de hidrógeno. Debido al cambio de presión, la temperatura del hidrógeno se eleva tras la compresión por lo que es necesario que pase por un refrigerador antes de poder dispensarlo a los vehículos. Se estudiará también este proceso. Existen muchos compresores que tienen instalado el refrigerador directamente a su salida.

Una vez comprimido y almacenado a alta presión, se transporta a la estación de servicio y a través de un dispensador se rellena los tanques de los autobuses y el hidrógeno está listo para su uso como combustible.

Se estudiará el consumo de todas estas máquinas elegidas para el diseño de la hidrogenera y se dimensionará entonces una planta fotovoltaica que sea capaz de generar la energía eléctrica necesaria.

En el siguiente esquema se puede ver representado el proceso completo de la hidrogenera:



*Ilustración 19: Esquema proceso de una hidrogenera*

*Fuente: Proyecto de producción de hidrógeno verde mediante tecnología solar fotovoltaica. Merme.*

*EOI*

Comenzamos calculando los kg de hidrógeno necesarios para el consumo de las tres líneas de autobuses.

Si sumamos todos los kilómetros recorridos diariamente por los tres autobuses llegamos al siguiente valor:

$$2179,56 + 2026,15 + 2773,08 = 6978,79 \text{ Km diarios}$$

Teniendo en cuenta que el consumo de los autobuses seleccionador es de  $\frac{6\text{Kg}}{100\text{Km}}$ , el número de kilogramos que necesitaremos para abastecer a las tres líneas de autobuses será:

$$6978,79\text{Km} * \frac{6\text{Kg}}{100\text{Km}} = 418,7274 \text{ Kg}$$

### 3.4.1 CÁLCULO DEL ELECTROLIZADOR

En este apartado calcularemos el consumo de un electrolizador genérico teóricamente y más tarde se elegirá un aparato en concreto del cual se obtendrá su consumo real a partir de la ficha técnica de la máquina.

- Consumo teórico del electrolizador:

A partir de la primera ley de Faraday de la electrólisis podemos obtener la siguiente expresión que expresa la energía necesaria para separar las moléculas en el proceso de electrólisis.

$$W_{el} = n_{e^-} * F * E$$

Donde:

- $n_{e^-}$  son los moles de electrones que a su vez son

$$n_{e^-} = n \text{ (número de moles)} * Z \text{ (número de electrones intercambiados por mol)}$$

-F es la constante de Faraday que vale  $F = 96485 \frac{C}{mol e^-}$ .

-E es el potencial de activación para la reacción de oxidación- reducción. La tensión mínima necesaria para que la reacción tenga lugar es de 1,48 V.

Para determinar el valor de esta tensión definimos las siguientes dos tensiones,

$$\Delta G_d^{\circ}(H_2O) = 237,22 \frac{KJ}{mol} \rightarrow E^{\circ} = \frac{\Delta G_d^{\circ}(H_2O)}{n * F} = 1,23 V$$

$$\Delta H_d^{\circ}(H_2O) = 237,22 \frac{KJ}{mol} \rightarrow U^{\circ} = \frac{\Delta H_d^{\circ}(H_2O)}{n * F} = 1,48 V$$

Si la diferencia de potencial en el proceso de electrólisis es menor a  $E^{\circ}$  la electrolisis no se produce. Si el valor se encuentra entre  $E^{\circ}$  y  $U^{\circ}$ , la reacción comienza pero no habrá suficiente energía para mantener la termicidad del sistema. Y por último, si la diferencia de potencial es mayor a  $U^{\circ}$  se podrá producir la reacción. [32]

Por este motivo, elegiremos un valor de la tensión superior a 1,48 para que la reacción de la electrólisis pueda tener lugar. En los siguientes cálculos se utilizará un valor de  $E = 1,7V$ .

Con los valores anteriores definidos y teniendo en cuenta que cada molécula de agua da lugar a dos electrones. Podemos obtener la siguiente energía eléctrica necesaria por mol de hidrógeno:

$$W_{el} = 2 \left[ \frac{\text{mol } e^-}{\text{mol } H_2} \right] * 96485 \left[ \frac{C}{\text{mol } e^-} \right] * 1,7 V = 328049 \left[ \frac{J}{\text{mol } H_2} \right] = 328.049 \left[ \frac{W*s}{\text{mol } H_2} \right]$$

Normalmente los electrolizadores trabajan en las unidades KWh/ Kg H<sub>2</sub> por lo que necesitamos la energía eléctrica en esas unidades:

$$328.049 \left[ \frac{W * s}{\text{mol } H_2} \right] * \frac{1h}{3600s} * \frac{1 \text{ mol } H_2}{2 \text{ g } H_2} * \frac{1000g}{1 \text{ Kg}} * \frac{1 \text{ KW}}{1000 \text{ W}} = 45,56 \frac{\text{KWh}}{\text{Kg } H_2}$$

Por lo tanto, teóricamente un electrolizador consume un total de 45,56 KWh por cada kilogramo de hidrógeno. [41]

- Consumo real de electrolizador:

En nuestro caso, el electrolizador elegido ha sido el siguiente:

EX-425D System Specifications	
<p>The Plug EX-425D provides up to 425 kg/day of high-quality on-site hydrogen.</p> <p><b>Instant Load Following</b> Hydrogen production rate adjusts as electric capacity is available, making this a perfect product for use with grid or renewable energy resources.</p> <p><b>Compact</b> Containerized solution is easy to site near point of use.</p> <p><b>Modular and Scalable</b> Pair multiple units for high demand and availability.</p> <p>Corporate Headquarters 968 Albany Shaker Rd, Latham, NY 12110 518.782.4004</p>	
<b>Input</b>	
Stack Power Consumption	Up to 1MW
Voltage & Frequency	480VAC, 60HZ (USA) 400VAC, 50HZ (EU)
Water Consumption	13 liters per kg of H2 produced
<b>Output (Hydrogen Gas)</b>	
Volume	200 Nm <sup>3</sup> / hour
Mass	425 kg / day
Purity	Up to 99.999%
Pressure	40 barg / 580 psig (w/o compressor)
<b>Operational</b>	
Start Up Time	30 sec warm / < 5 min cold
Average Stack Efficiency	49.9 kWh / kg
Load Following	Instantaneous
<b>Physical / Environment</b>	
Installed Footprint	29.3m <sup>2</sup> / 320 ft <sup>2</sup>
Ambient Temperature	-20°C to +40°C (wider temperature range optional)
<b>Other</b>	
Compliance / Certifications	ISO 22734, NFPA 2, CE

*Ilustración 20: Ficha técnica electrolizador EX425D*

*Fuente: The Plug Electrolyzers*

Se trata del electrolizador The Plug EX425D de la marca Plug Power, un electrolizador basado en la electrólisis PEM. Con un caudal de hasta  $200 \frac{Nm^3}{h}$ , puede producir hasta 425 Kg de hidrógeno al día con una alta pureza. La presión de salida del hidrógeno es de 40 bar. El consumo de este electrolizador es de 49.9 KWh/Kg.

Consumo por Kg electrolizador EX425D	49,9 KWh/Kg
--------------------------------------	-------------

Si en total necesitamos producir 418,73 Kg de hidrógeno al día, el consumo del electrolizador diario será:

$$49,9 \frac{KWh}{Kg} * 418,73 Kg = 20894,63 KWh$$

Consumo diario electrolizador EX425D	20894,63 KWh
---	--------------

### 3.4.2 CÁLCULO DEL COMPRESOR

Los compresores se pueden clasificar en dos grupos:

-Compresores volumétricos: Están basados en las variaciones del volumen de una cámara. Pueden dividirse a su vez en rotativos y alternativos.

-Turbocompresores: Se basan en la variación del momento cinético que se traduce en variaciones de energía cinética en energía de presión.

El compresor elegido para comprimir el hidrógeno es un compresor volumétrico alternativo multietapa refrigerador, que consiste en una serie de compresores para reducir el consumo con un refrigerador a la salida para bajar la temperatura del hidrógeno tras haber sido comprimido.

En los compresores alternativos multietapa se divide el salto de presiones en varios, en caso de este compresor, en dos. De modo que se conectan dos compresores en serie, separados entre sí por un intercambiador que refrigera el gas antes de ir al siguiente.

Se ha elegido comprimir y almacenar el hidrógeno por etapas y en cascada. Este método es más efectivo ya que los autobuses se van a abastecer de este modo. El modo en que este sistema funciona es el siguiente:

El sistema cuenta con tres tanques de almacenamiento a distinta presión, uno a baja presión, 250 bar, otro a media presión, 300 bar, y otro a alta presión, 450 bar. Por lo tanto, necesitaremos de tres compresores que aumenten la presión desde 40 bar, presión de salida del hidrógeno del electrolizador, hasta las tres diferentes presiones deseadas.

### ***3.4.2.1 Modelo termodinámico del compresor***

El compresor disipa cierto calor al exterior a la vez que consume un trabajo. El primer principio es el siguiente:

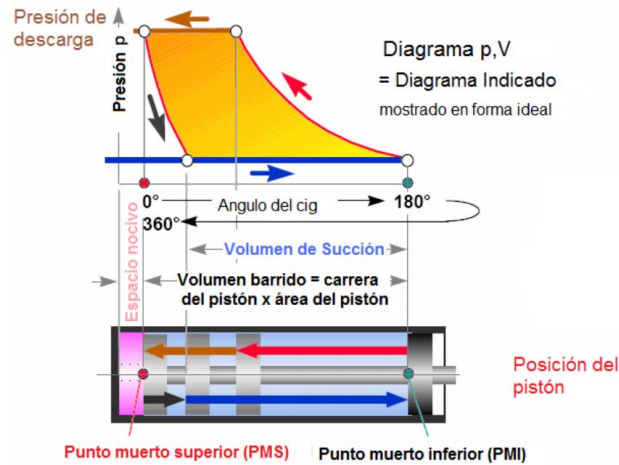
$$\dot{W} = m * (h_s - h_e) + \dot{Q}$$

Existen dos tipos de compresores según el calor disipado:

-Compresores adiabáticos: El proceso interno de compresión presenta irreversibilidades, pero es adiabático. Sin embargo, las pérdidas mecánicas generan un calor que se disipa.

-Compresores refrigerados: Existe un calor que se ha de retirar para que el proceso de compresión sea internamente reversible, siendo un proceso politrópico. Dicho calor se puede determinar a partir del calor específico asumiendo que la compresión es internamente reversible. Además de este calor, existe otro debido a las pérdidas mecánicas. La suma de ambos calores es lo que representa la fórmula anterior.

El diagrama p-v de un compresor es el siguiente:

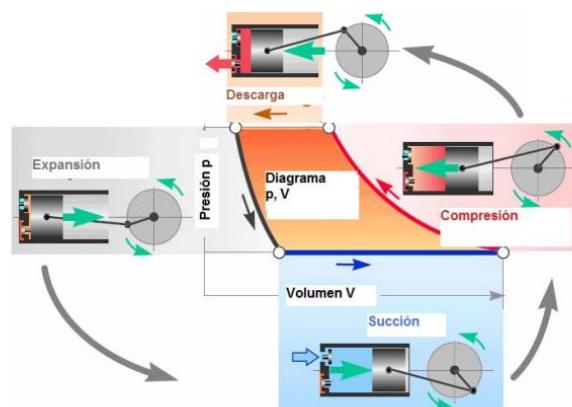


*Ilustración 21: Diagrama p-v proceso compresión*

*Fuente: Ancap Compresores*

En esta imagen podemos comparar el diagrama p-v según el movimiento del pistón.

El ciclo se divide en cuatro etapas con el siguiente diagrama:



*Ilustración 22: Ciclo termodinámico y su vinculación con el mecanismo de compresión*

*Fuente: Ancap Compresores*

Al no ser el diagrama p-v un ciclo cerrado no podemos calcular el trabajo teórico de compresión como el área de dicho ciclo, sino que debemos hacerlo como suma de los trabajos de las diferentes etapas del proceso:

$$W_t = \int_1^2 p * dV + \int_2^3 p * dV + \int_3^4 p * dV + \int_4^1 p * dV$$

Teniendo en cuenta que tenemos dos etapas con

- procesos politrópicos con componentes n (etapas 1-2 y 3-4):

$$\int_e^s p * dV = \frac{m}{1-n} * (p_s * v_s - p_e * v_e)$$

- procesos a presión constante (etapas 2-3 y 1-4):

$$\int_e^s p * dV = p * (V_{final} - V_{inicial})$$

Por lo tanto, el trabajo en cada etapa es el siguiente:

Etapa 1-2: Etapa de compresión

$$W_{12} = \int_1^2 p * dV = \frac{m_1}{1-n} * (p_2 * v_2 - p_1 * v_1)$$

Etapa 2-3: Etapa de descarga

$$W_{23} = \int_2^3 p * dV = p_2 * (V_3 - V_2) < 0$$

Etapa 3-4: Etapa de expansión

$$W_{34} = \int_3^4 p * dV = \frac{m_1 - m}{1-n} * (p_4 * v_4 - p_3 * v_3)$$

Etapa 4-1: Etapa de succión

$$W_{41} = \int_1^2 p * dV = p_4 * (V_1 - V_4) > 0$$

Si consideramos que  $p_4=p_1$  y que  $p_3=p_2$ , y, por otro lado,  $T_3=T_2$ , podemos llegar a los siguiente:

$$\left. \begin{array}{l} p_2V_3 = p_3V_3 = (m_1 - m)RT_3 = (m_1 - m)RT_2 \\ p_2V_2 = m_2RT_2 = m_1RT_2 \end{array} \right\} p_2(V_3 - V_2) = -mRT_2 = \int_2^3 + \int_4^1 = -mR(T_2 - T_1) =$$

$$\left. \begin{array}{l} p_1V_1 = m_1RT_1 \\ p_1V_4 = p_4V_4 = (m_1 - m)RT_4 = (m_1 - m)RT_1 \end{array} \right\} p_1(V_1 - V_4) = mRT_1 = -m(p_2v_2 - p_1v_1)$$

Sumando los cuatro trabajos de las cuatro etapas se llega a la siguiente expresión para calcular el trabajo del pistón.

$$W_t = \frac{n}{1-n} * m * [p_2 * v_2 - p_1 * v_1] = \frac{n}{1-n} * m * p_1 * v_1 * \left[ \frac{p_2 * v_2}{p_1 * v_1} - 1 \right]$$

$$= -\frac{n}{n-1} * m * R * T_1 * \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

El signo negativo indica que el trabajo es absorbido por la máquina, como era de esperar al tratarse de una compresión.

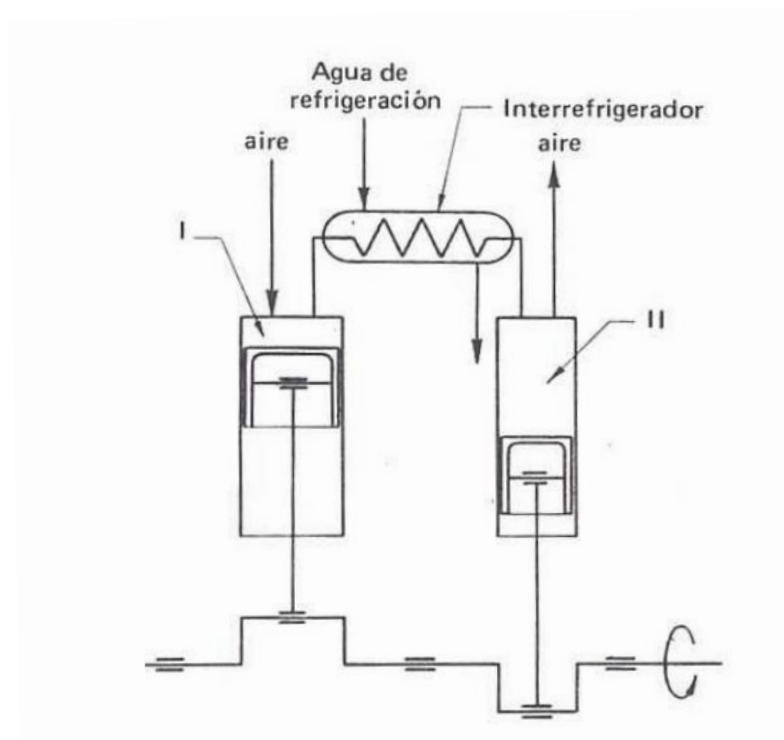
Si trabajamos en valor absoluto, el resultado final de la fórmula para obtener el trabajo total es la siguiente:

$$W = \frac{n}{n-1} * m * R * T_1 * \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

### 3.4.2.2 Compresor multietapa

La compresión multietapa consigue una elevada relación de presión sin una caída elevada del rendimiento volumétrico. Reduce también el trabajo de compresión y hace posible la refrigeración entre etapas.

El esquema de un rendimiento de doble etapa es el siguiente:



*Ilustración 23: Esquema de una compresión en dos etapas*

*Fuente: Mataix, 1982*

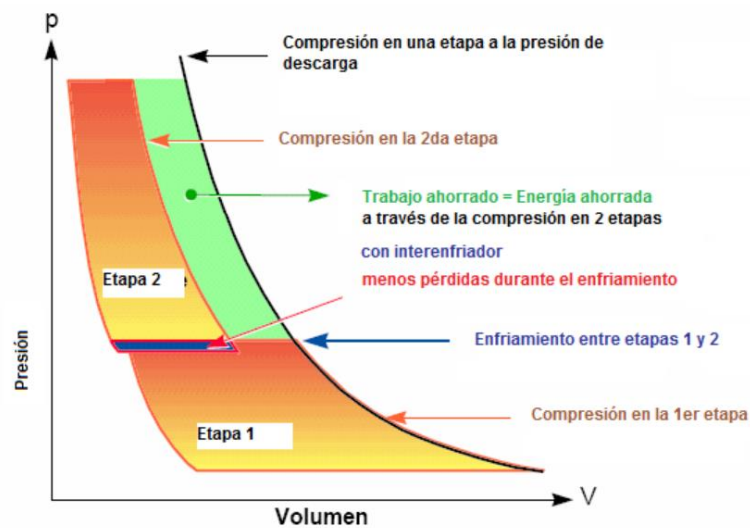
I: Compresor de baja presión: es el primer compresor en aspirar el gas. Presenta un diámetro mayor que el de la etapa de alta presión. La carrera es la misma al compartir el cigüeñal.

II: Interrefrigerador: Se refrigera el gas que sale del primer compresor antes entrar en el compresor de alta.

III: Aspira el gas a la salida del refrigerador. Aunque la temperatura sea similar a la del compresor de baja presión, su presión es mayor, por lo que su diámetro es menor.

En nuestro caso, tenemos tres compresores distintos que comprimen el hidrógeno en tres presiones (250 bar, 300 bar, 450 bar).

El diagrama P-v de un compresor doble etapa es el siguiente:



*Ilustración 24: Diagrama p-v compresión doble etapa*

*Fuente: Ancap Compresores*

Este diagrama representa el proceso de compresión desde 40 bar (presión inicial) hasta la presión final deseada. A una presión intermedia se realiza una refrigeración hasta alcanzar la temperatura de admisión para entrar en el segundo compresor.

Al considerar los procesos internamente reversibles se ahorra un trabajo que aparece en verde en el diagrama. [42]

### ***3.4.2.3 Cálculo de las presiones de almacenamiento para el sistema de llenado en cascada***

El hidrógeno se almacenará a tres presiones distintas para poder realizar en llenado en modo cascada.

Este tipo de sistema se utiliza para el llenado de cilindros de gas comprimido más pequeños. El principio de este tipo de llenado se basa en la ley de la presión de equilibrio de Dalton de presiones parciales y la ley de Boyle para gases ideales bajo la hipótesis de temperatura constante.

Cuando un gas que se encuentra en un cilindro de volumen  $V_1$  a una presión  $P_1$  y se deja fluir dentro de otro cilindro de volumen  $V_2$  y presión  $P_2$ , las presiones se igualarán a un valor que esté entre las dos presiones de ambos cilindros. De este modo, la fórmula de la presión de equilibrio final es: [33]

$$P_3 = \frac{P_1 * V_1 + P_2 * V_2}{V_1 + V_2}$$

Basándonos en nuestra forma y partiendo del volumen tanto de los cilindros de los autobuses elegidos como de los tanques de almacenamiento podemos estimar las presiones necesarias para realizar el llenado de esta manera.

Para realizar el cálculo del volumen de los tanques de hidrógeno a 350 bar de los autobuses partimos de los datos que nos proporciona la ficha técnica:

Sistema de pila de combustible	Tanques de hidrógeno - tipo 4 de composite: 5 x 3121 (máx. 37,5kg. 350 bar)
	Tipo de suministro - < 9 min (de acuerdo con SAE 32601-2 & SAE 32799 - IR)
	Potencia nominal de la pila de combustible - 60 kW (Toyota FC Stack)
	Arranque en frío - desde - 25 °C sin energía externa - opcional

*Ilustración 25: Ficha técnica autobus H2CityGold*

*Fuente: Catálogo Caetano*

El sistema de almacenamiento de autobús consiste en 5 tanques tipo 4 que como máximo son capaces de almacenar 37,5 Kg de hidrógeno a 350 bar.

Teniendo en cuenta que la densidad del hidrógeno a 350 bar es de  $21 \frac{Kg}{m^3}$  como podemos observar en la tabla 2:

Tabla 10: Densidad del hidrógeno en sus distintos estados y a distintas presiones

Fuente: Estudio de materiales aptos para almacenamiento de hidrógeno

Densidad $\rho$	ZrH <sub>2</sub> (1 bar, 700°C)	VH <sub>2</sub> (10bar, 100°C)	H <sub>2</sub> líquido (1bar, -253°C)	H <sub>2</sub> gas (20°C)	
				350 bar	700 bar
átomos H <sub>2</sub> /cm <sup>3</sup>	7·10 <sup>22</sup>	11.4·10 <sup>22</sup>	4.2·10 <sup>22</sup>	1.3·10 <sup>22</sup>	2.3·10 <sup>22</sup>
mol de H <sub>2</sub> /l	58	95	35	11	19
g/l	118	190	70	21	38

Podemos estimar el volumen de cada cilindro de la siguiente manera:

$$d = \frac{m}{v} \rightarrow v = \frac{m}{d} \rightarrow v = \frac{37,5}{21} = 0,36 \text{ m}^3$$

Los tanques elegidos para el almacenamiento han sido los tanques de 445 L de la marca QUANTUM , siendo su volumen por tanto  $v = 0,445 \text{ m}^3$ , se puede encontrar el catálogo en el anexo 3.



Ilustración 26: Tanque de almacenamiento QUANTUM

Fuente: QUANTUM Products

El sistema de llenado en cascada comienza rellenando los tanques con el tanque de almacenamiento de menor presión, cuando la presión se iguala, el repostaje de este tanque para y comienza el repostaje desde el tanque de presión media, el cual está a mayor presión que el tanque 1. Ocurre lo mismo con este tanque, deja de repostar cuando las presiones se igualan y entonces comienza el repostaje del tercer tanque, el tanque con la mayor presión. Cuando la presión de ambos tanques se iguale se detendrá el repostaje y se habrá llegado a la presión deseada.

En nuestro caso la presión deseada es 350 bar. Teniendo ambos volúmenes de los tanques tanto de almacenamiento como de los autobuses somos capaces de estimar a que presiones necesitamos almacenar el hidrógeno para que el sistema en cascada finalice con 350 bar.

Se han probado varias combinaciones de presiones y volúmenes llegando a la conclusión que las presiones de 250, 300 y 450 bares junto con los volúmenes comentados son los datos que consiguen la presión final más precisa.

Comenzamos con el repostaje del primer tanque de 250 bares, partiendo de que los tanques de los autobuses están a 1 bar. La presión final de este llenado será:

$$P_1 = \frac{1 * 0,36 + 250 * 0,445}{0,36 + 0,445} = 139,14 \text{ bar}$$

En este punto, comienza el repostaje del segundo tanque de 300 bar, donde la presión final será:

$$P_2 = \frac{139,14 * 0,36 + 300 * 0,445}{0,36 + 0,445} = 228,06 \text{ bar}$$

Comenzando entonces el tercer llenado con el tanque de mayor presión, 450 bar, siendo la presión final de los tanques del autobús de:

$$P_f = \frac{228,06 * 0,36 + 450 * 0,445}{0,36 + 0,445} = 351,33 \text{ bar}$$

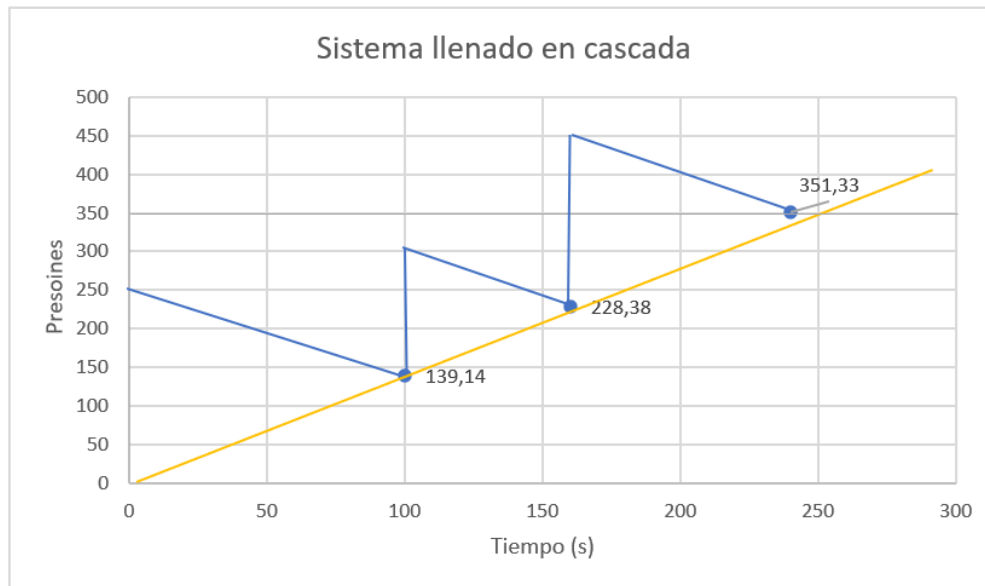


Ilustración 27: Gráfica de las presiones del tanque durante el sistema de llenado en cascada

Fuente: Elaboración propia

En esta ilustración podemos observar cómo varía la presión del tanque de los autobuses a media que se va repostando de los distintos tanques de almacenamiento.

#### 3.4.2.4 Cálculo del trabajo del compresor multietapa

Para realizar una aproximación del trabajo del compresor se va a trabajar bajo las siguientes hipótesis:

- La temperatura será la misma a la entrada de cada etapa.
- El exponente politrópico de las dos etapas será el mismo también.

Según estas hipótesis el trabajo de compresión de la primera etapa será:

$$w_1 = \frac{n}{1-n} * R * T_1 * \left( \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

Y el trabajo de la segunda etapa será:

$$w_{II} = \frac{n}{1-n} * R * T_1 * \left( \left( \frac{P_3}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

Y el trabajo total será la suma de ambos:

$$w_T = w_I + w_{II} = \frac{n}{1-n} * R * T_1 * \left( \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) + \frac{n}{1-n} * R * T_1 * \left( \left( \frac{P_3}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

Para que el trabajo sea mínimo  $\frac{dw_t}{dp_2} = 0$ , lo que resulta que los siguiente se tenga que cumplir:

$$\frac{n-1}{n} p_1^{\frac{1-n}{n}} p_2^{-\frac{1}{n}} = \frac{n-1}{n} p_3^{\frac{n-1}{n}} p_2^{\frac{1-2n}{n}} \rightarrow p_2 = (p_1 p_3)^{1/2} \rightarrow \frac{p_3}{p_2} = \frac{p_2}{p_1} = \sqrt{\frac{p_3}{p_1}} \rightarrow r_1 = r_2 = \sqrt{r}$$

De estas ecuaciones podemos deducir lo siguiente:

- El trabajo de compresión es igual para ambas etapas
- La presión a la que se realiza la interrefrigeración es una media geométrica de la presión inicial y final.

$$p_2 = \sqrt{(p_1 * p_3)}$$

Por tanto, el trabajo total será dos veces el trabajo de una de las etapas.

Trabajo de compresión de un gasto másico  $m'$  [kg/s]:

$$W_{t_i} = w_i * \text{flujo másico}$$

Calculamos primero el flujo másico de los compresores con el flujo de salida del electrolizador ( $200 \text{ Nm}^3$ ):

$$m' = 200 \text{ Nm}^3 * \frac{1000\text{L}}{1\text{m}^3} * \frac{1 \text{ mol}}{24,45\text{L}} * \frac{2 \text{ g } H_2}{1 \text{ mol } H_2} * \frac{1 \text{ Kg } H_2}{1000\text{g } H_2} = 16,36 \text{ Kg } H_2$$

$$\frac{16,36 \text{ Kg } H_2}{3600\text{s}} = 0,0045 \text{ Kg } H_2/\text{s}$$

Vamos a comprimir el hidrógeno en tres presiones distintas (250 bar, 300 bar y 450 bar) y partimos del flujo de hidrógeno que sale del electrolizador a 40 bar.

Teniendo en cuenta que un compresor tiene de media un rendimiento teórico del 70% podemos calcular los índices politrópicos de cada uno de los tres procesos de compresión.

$$\eta = \frac{\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}{\frac{n}{n-1} * \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]} = 0,7$$

- Compresor 1 (40 bar  $\rightarrow$  250 bar):

Vamos a calcular en cada compresor el trabajo de la primera etapa y se multiplicará por dos.

$$p_2 = \sqrt{p_1 * p_3} = \sqrt{40 * 250} = 100 \text{ bar}$$

$$\eta = \frac{\ln\left(\frac{100}{40}\right)}{\frac{n}{n-1} * \left[\left(\frac{100}{40}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]} = 0,7 \rightarrow n_1 = 3,8$$

$$W_{\cdot 1} = 2 * \frac{3,8}{3,8-1} * 4,1243 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg K}}\right] * 293[\text{K}] * \left[\left(\frac{100}{40}\right)^{\frac{3,8-1}{3,8}} - 1\right] * 0,0045 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}}\right] = 14,24 \text{ KW}$$

$$W_{\cdot 1} = 2 * \frac{3,8}{3,8 - 1} * 4,1243 \left[ \frac{KJ}{Kg K} \right] * 293 [K] * \left[ \left( \frac{100}{40} \right)^{\frac{3,8-1}{3,8}} - 1 \right] = 3163,61 \frac{KJ}{Kg}$$

$$3163,61 \frac{KJ}{Kg} * 0,00028 \frac{KWh}{KJ} = 0,89 \frac{KWh}{Kg}$$

- Compresor 2 (40 bar → 300 bar):

$$p_2 = \sqrt{(300 * 40)} = 109,55 \text{ bar}$$

$$\eta = \frac{\ln\left(\frac{109,55}{40}\right)}{\frac{n}{n-1} * \left[ \left(\frac{109,55}{40}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]} = 0,7 \rightarrow n_2 = 3,03$$

$$W_2 = 2 * \frac{3,03}{3,03 - 1} * 4,1243 * 293 * \left[ \left(\frac{109,55}{40}\right)^{\frac{3,03-1}{3,03}} - 1 \right] * 0,0045 = 15,65 \text{ KW}$$

$$W_2 = 2 * \frac{3,03}{3,03 - 1} * 4,1243 * 293 * \left[ \left(\frac{109,55}{40}\right)^{\frac{3,03-1}{3,03}} - 1 \right] = 3478,53 \frac{KJ}{Kg}$$

$$3478,53 \frac{KJ}{Kg} * 0,00028 \frac{KWh}{KJ} = 0,97 \frac{KWh}{Kg}$$

- Compresor 3 (40 bar → 450 bar):

$$p_2 = \sqrt{(450 * 40)} = 134,16 \text{ bar}$$

$$\eta = \frac{\ln\left(\frac{134,16}{40}\right)}{\frac{n}{n-1} * \left[ \left(\frac{134,16}{40}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]} = 0,7 \rightarrow n_3 = 2,26$$

$$W_{i3} = 2 * \frac{2.26}{2.26 - 1} * 4,1243 * 293 * \left[ \left( \frac{134,16}{40} \right)^{\frac{2.26-1}{2.26}} - 1 \right] * 0,0045 = 18,80 \text{ KW}$$

$$W_3 = 2 * \frac{2.26}{2.26 - 1} * 4,1243 * 293 * \left[ \left( \frac{134,16}{40} \right)^{\frac{2.26-1}{2.26}} - 1 \right] = 4178,31 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$4178,31 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} * 0,00028 \frac{\text{KWh}}{\text{KJ}} = 1,17 \frac{\text{KWh}}{\text{Kg}}$$

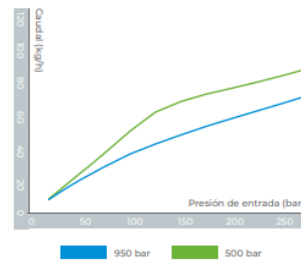
El compresor elegido para realizar los tres procesos de compresión ha sido el siguiente de la marca Hiperbaric, un compresor de doble etapa con sistema de refrigeración a la salida, podemos encontrar su catálogo en el anexo 4.

### Características técnicas de los Grupos Compresores

	Hiperbaric 1 KS 50	Hiperbaric 1 KS 95
Presión de admisión del H <sub>2</sub>	20-40 bar	20-200 bar
Presión de salida del H <sub>2</sub>	Hasta 500 bar	Hasta 950 bar
Número de etapas	2	2
Carrera	Simple	Simple
Reducción de la potencia	0 hasta el 100% del caudal *	0 hasta el 100% del caudal *
Caudal aproximado	26 kg/h (desde 30 hasta 500 bar)	15 kg/h (desde 30 hasta 950 bar)
Temperatura de salida	< 40°C	< 40°C
Superficie ocupada	Un contenedor Plug & Play de 20' **	
Variantes	Posibilidad de incluir un segundo compresor que duplica el caudal ***	

\* Gracias a la unidad hidráulica de la bomba axial utilizada  
 \*\* Incluye sistemas de enfriamiento, control, seguridad y ventilación  
 \*\*\* Modelos Hiperbaric 2 KS 50 (2 multiplicadores simples-500 bar) y Hiperbaric 2 KS 95 (2 multiplicadores simples-950 bar)

### Caudal y presión de entrada (1 compresor 45 kW)



Inlet pressure	Hiperbaric 1 KS 50-caudal	Hiperbaric 1 KS 95-caudal
10 bar	9,31 kg/h	5,42 kg/h
20 bar	14,62 kg/h	10,34 kg/h
30 bar	17,55 kg/h	14,46 kg/h
40 bar	33,32 kg/h	18,28 kg/h
100 bar	37,72 kg/h	37,72 kg/h
150 bar	49,16 kg/h	49,16 kg/h
200 bar	59 kg/h	59 kg/h

Ilustración 28: Ficha técnica del compresor Hiperbaric

Fuente: Hiberbaric

### 3.4.3 CÁLCULO DEL CONSUMO DEL DISPENSADOR

El dispensador elegido es el siguiente:



*Ilustración 29: Dispensador Kraus*

*Fuente: Catálogo Kraus*

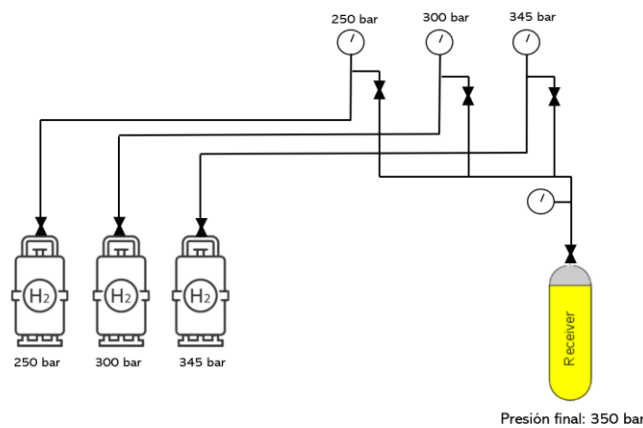
Este dispensador diseñado por la marca Kraus Hydrogen Series es capaz de repostar hidrógeno tanto a 230 bar, 250 bar como hasta 700 bar con un flujo de hasta 8000 Nm<sup>3</sup>/h.

No se ha conseguido encontrar el consumo eléctrico del dispensador. Sin embargo, según algunas investigaciones, [34] estos equipos tienen un consumo medio de 0,2 KWh/kg de H<sub>2</sub>.

Por lo tanto, el consumo del electrolizador será:

$$0,2 \frac{KWh}{Kg} * 418,72 Kg = 83,74 KWh$$

Se llenará en cascada, de modo que se parte de tres tanques a distintas presiones (250 bar, 300 bar y 450 bar), se comienza dispensando hidrógeno del tanque de menor presión, tanque 1, hasta que la presión de este tanque y el tanque del autobús se iguale a una presión media entre ambas. En este momento, se detendrá el repostaje de este tanque y se comenzará la del tanque a presión media, el tanque 2. Lo mismo ocurrirá con este tanque, se detendrá cuando las presiones se igualen y comenzará el repostaje con el tanque 3 de mayor presión. Cuando ambas presiones se hayan igualado finalizará el repostaje y los tanques de almacenamiento de los autobuses quedarán a una presión final de 350 bar.



*Ilustración 30: Esquema llenado en cascada*

*Fuente: Elaboración propia*

### 3.4.4 GASTO TOTAL ENERGÉTICO:

El gasto total energético tras haber estudiado toda la maquinaria es el siguiente:

Tabla 11: Gasto energético total Opción 1

	Consumo por Kg de $H_2$	Número de Kg de $H_2$	Consumo en KWh
<b>Electrolizador</b>	49,9 KWh/Kg	418,73 Kg	20894,63 KWh
<b>Compresor 1</b>	$0,89 \frac{KWh}{Kg}$	140 Kg	124,6 KWh
<b>Compresor 2</b>	$0,97 \frac{KWh}{Kg}$	140 Kg	135,8 KWh
<b>Compresor 3</b>	$1,17 \frac{KWh}{Kg}$	140 Kg	163,8 KWh
<b>Dispensador</b>	$0,2 \frac{KWh}{Kg}$	418,73 Kg	83,75 KWh
<b>Energía total necesaria en KWh</b>			<b>21402,58 KWh</b>

## **4. PRODUCCIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA NECESARIA**

### **4.1 TIPOS DE ENERGÍA RENOVABLE EN GRANADA**

Andalucía genera el 46,1 % de su energía eléctrica necesaria con energías renovables, tanto solar, eólica o del agua. En concreto, la provincia de Granada cuenta con una potencia eléctrica de fuentes renovables de 807,81 MW según Agencia Andaluza de la Energía a 31 de diciembre de 2021. La energía eólica supone el 50% de la potencia total renovable.

Dentro de estas energías renovables destacan las siguientes:

- La generación de energía eléctrica con biogás. Granada cuenta con tres plantas de producción de biogás, dos a partir de gas procedente de la desgasificación de vertederos y otra con lodos de depuradora. La potencia total de estas plantas es de 2.22 MW.
- Energía eólica, donde en los últimos años se ha multiplicado por más de catorce este tipo de energía renovable en Granada. La provincia cuenta con 21 parques eólicos conectados a la red, con una potencia total de 402 MW.
- Energía hidroeléctrica. Granada cuenta con 28 centrales en funcionamiento con una potencia total de 96,33 MW. Sin embargo, debido al seco clima su desarrollo no es de los más importantes.
- Energía termosolar. Granada fue la primera provincia donde se puso en marcha este tipo de energía renovable, en 2008 con una central de tipo cilindro parabólico. Actualmente la provincia cuenta con tres centrales termosolares con una potencia total de 149,7 MW.
- Energía fotovoltaica. En los últimos años se han desarrollado numerosos proyectos con este tipo de energía renovable y se encuentra tanto integrada en núcleos urbanos

en edificios como en pequeñas centrales fotovoltaicas de 2 a 10 MW, aunque actualmente también centrales de 10 a 200 MW. Su potencia actual es de 156,67 MW.

En el siguiente cuadro podemos observar un resumen del porcentaje de energía renovable de la ciudad de Granada en comparación con Andalucía. [35]

*Tabla 12: Datos generales potencia eléctrica renovable Granada y Andalucía (MW)*

*Fuente: Informe de infraestructuras energéticas en Granada*

Tecnología	Granada	Andalucía	% Provincia
Biogás Generación Eléctrica (*)	2,22	33,45	6,64%
Biomasa Generación Eléctrica	0	273,98	0,00%
Eólica (*)	402,21	3.515,47	11,44%
Fotovoltaica (*)	157,35	3.466,02	4,54%
Hidroeléctrica	96,33	650,0	14,82%
Termosolar	149,7	997,4	15,01%
Otras tecnologías renovables	0	4,5	0,00%
<b>TOTAL</b>	<b>807,81</b>	<b>8.940,82</b>	<b>9,04%</b>

(\*) Conectada a red + aislada

Fuente: Agencia Andaluza de la Energía

## 4.2 ESTUDIO DE LA PLANTA FOTOVOLTAICA

En este apartado se estudiará el diseño básico de una planta fotovoltaica para la producción de la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de la hidrogenera. Actualmente en Granada existen varias plantas fotovoltaicas conectadas a la red.

Entre las plantas más importantes se encuentran las siguientes.

### 4.3 PLANTA FOTOVOLTAICA LAS GABIAS

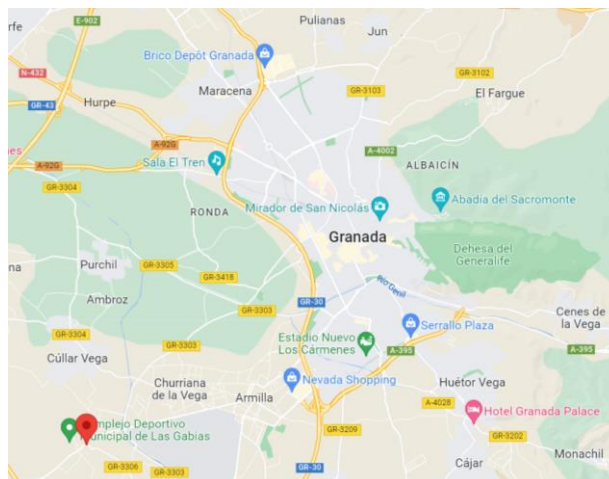
La planta fotovoltaica Las Gabias de 3MWp está diseñada con la finalidad de alimentar a la red de alta tensión (20 KV).



*Ilustración 31: Planta fotovoltaica Las Gabias*

*Fuente: TSK*

Se encuentra situada en el polígono 6 parcelas 115, 118 y parcialmente 119, en Paraje Botoro, a tan solo 25 minutos del centro de Granada.



*Ilustración 32: Localización de la planta Las Gabias*

*Fuente: Google Maps*

La instalación está diseñada sobre una estructura fija inclinada 30° al sur en disposición este-oeste. Cuenta con una potencia nominal de 2500 KW, con 8820 módulos de Sicilio Policristalino, de la marca Trina Solar mod. TALLMAX- TSM-340 PD14 y con una potencia de pico instalada de 2998,8 KWs.

La ficha técnica de la planta solar establece energía generada 4820 *MWh* por año. Aproximadamente 13,2 *MWh* por día.

Por desgracia, una planta de estas dimensiones no es capaz de abastecer toda la energía eléctrica necesaria para el diseño de la hidrogenera. [36]

#### **4.4 PLANTA FOTOVOLTAICA GUADIX**

La planta fotovoltaica de Guadix es una instalación diseñada por Anasol con una potencia fotovoltaica de 7,26 MWp con 26400 módulos Canadian Solar C6SK. Esta planta es capaz de abastecer a 4.265 viviendas al día.



*Ilustración 33: Planta Fotovoltaica Guadix*

*Fuente: Anasol*

Se encuentra situada un poco más lejos de Granada, en la siguiente ubicación.



*Ilustración 34: Ubicación planta fotovoltaica Guadix*

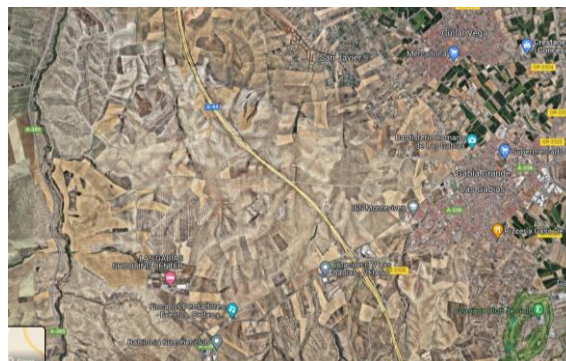
*Fuente: Google Maps*

Cuenta con una potencia de pico de  $P_p = 7260 \text{ KW}_p$  y aproximadamente 12000 MWh por año y 34,4 MWh al día. [37]

Una planta de estas dimensiones si sería capaz de abastecer eléctricamente a la hidrogenera.

#### **4.4.1 ESTUDIO Y CÁLCULOS DE LA PLANTA FOTOVOLTAICA**

Para el diseño de la planta fotovoltaica se elegirá la ubicación de Las Gabias, un terreno llano con numerosas parcelas donde se podría instalar una planta fotovoltaica de grandes dimensiones.



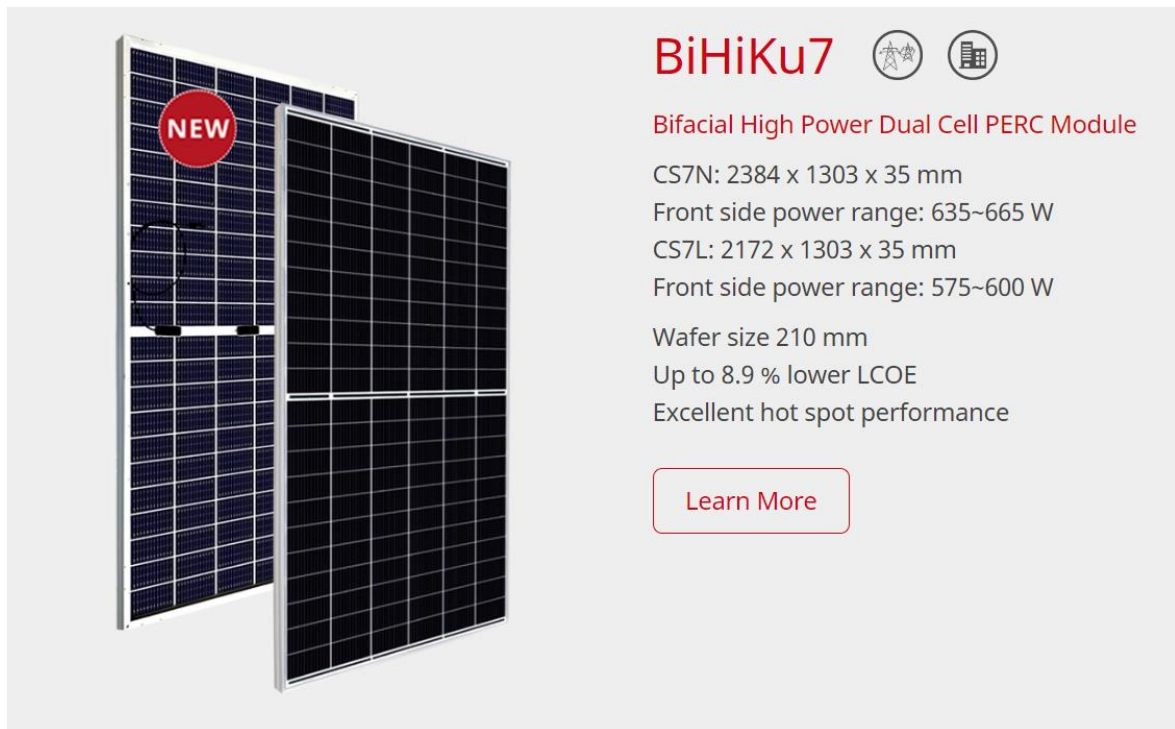
*Ilustración 35: Zona de las Gabias*

*Fuente: Google Maps*

Además, esta zona es muy cercana a la ciudad de Granada por lo que transportar la energía sería más sencillo.

Para el estudio de la planta, se necesitará elegir tanto unos módulos fotovoltaicos como un inversor que transforme la corriente continua que reciban los paneles en corriente alterna.

Se han elegido los módulos fotovoltaicos de la marca Canadian Solar modelo BiHiKu 7 CS7N con una potencia de entre 635 y 665W.



*Ilustración 36: Módulos Canadian Solar*

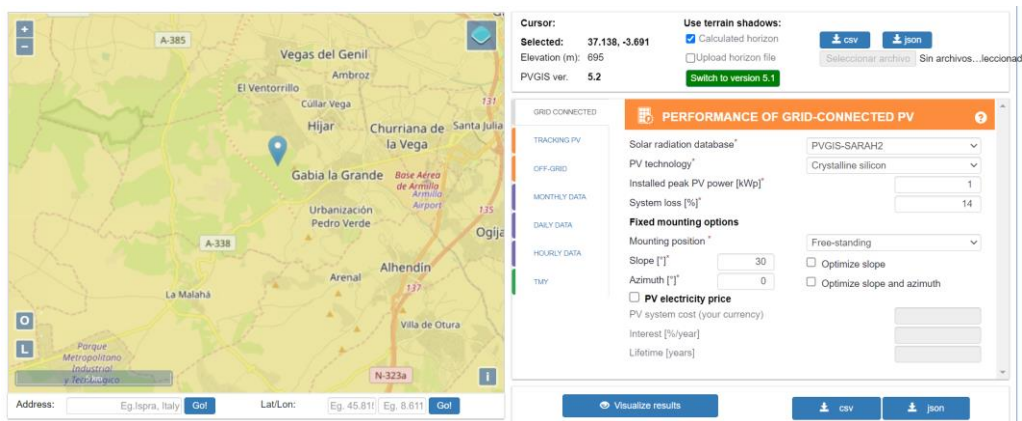
*Fuente: Canadian Solar*

Estimamos que necesitaremos aproximadamente 7000 KWp por lo que el número de módulo necesarios serán:

$$\frac{7000 \text{ KWp}}{0,650 \text{ KW}} = 10.770 \text{ módulos}$$

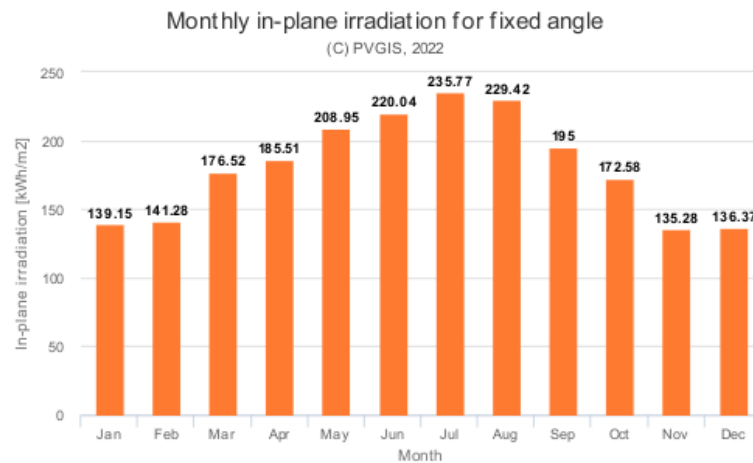
Para poder realizar la estimación de la energía eléctrica producida vamos a obtener los datos de la página photovoltaic geographical information system (PVGIS):

Se ha seleccionado la localización de Las Gabias con un ángulo de inclinación de las placas de 30°.



*Ilustración 37: Página PVGIS*

Los resultados obtenidos han sido los siguientes:



*Ilustración 38: Datos irradiación solar en la ubicación Las Gabias*

*Fuente: PVGIS*

Partiremos de estos datos para estimar la producción eléctrica, que la calcularemos con la siguiente fórmula:

$$E_p = \frac{G(\alpha, \beta) * P_p * PR}{G_{CEM}}$$

Donde:

- $G(\alpha, \beta)$ : Valor medio mensual de la irradiación sobre el plano generador en  $\frac{KWh}{m^2 \text{ día}}$

- $P_p$ : Potencia del generador fotovoltaico

-PR: rendimiento energético de la instalación, suele estar entre 0,75 y 0,9

- $G_{CEM}$ : 1 KW/m<sup>2</sup>

Los cálculos a partir de los datos y la fórmula son los siguientes:

*Tabla 13: Cálculos de la energía producida por la planta FV*

Radiación Global	PVGIS	Gdm	Energía media diaria	Energía media diaria	Energía total
	kWh/m <sup>2</sup>	KWh/ m <sup>2</sup> día	KWh/día	MWh/día	MWh/mes
1 (Enero)	139,15	4,49	25138,57	25,14	779,30
2 (Febrero)	141,28	5,05	28258,02	28,26	791,22
3 (Marzo)	176,52	5,69	31889,76	31,89	988,58
4 (Abril)	185,51	6,18	34631,01	34,63	1038,93
5 (Mayo)	208,95	6,74	37748,50	37,75	1170,20
6 (Junio)	220,04	7,33	41077,07	41,08	1232,31
7 (Julio)	235,77	7,61	42593,75	42,59	1320,41
8 (Agosto)	229,42	7,40	41446,57	41,45	1284,84
9 (Septiembre)	195	6,50	36402,60	36,40	1092,08
10 (Octubre)	172,58	5,57	31177,97	31,18	966,52
11 (Noviembre)	135,28	4,51	25254,07	25,25	757,62
12 (Diciembre)	136,37	4,40	24636,34	24,64	763,73

Con una energía media diaria de 33,35 MWh al día y 12185 MWh al año. Por lo tanto, una planta con estas dimensiones sería perfectamente capaz de producir la energía necesaria para el funcionamiento completo de la producción, almacenamiento y dispensación del hidrógeno.

## **5. SEGURIDAD Y PRESUPUESTO DE LA HIDROGENERA**

### **5.1 NORMATIVA**

Actualmente se está tramitando una modificación del Real Decreto 919/2006, por el que se aprueba el Reglamento técnico de distribución y utilización de combustibles gaseosos y sus instrucciones técnicas complementarias. El propósito de modificarlo es para ampliar el ámbito de aplicación también al hidrógeno en fase gaseosa. Asimismo, la Instrucción Complementaria ITC-ICG 05 sobre estaciones de servicio para vehículos de gas también se está modificando para incluir el hidrógeno en fase gas como carburante.

En el Real Decreto 639/2016 a 9 de diciembre, se recogen las medidas necesarias y especificaciones técnicas para la implantación de una hidrogenera. Encontramos las siguientes normativas:

- Norma ISO/TS 20100 relativa al suministro de hidrógeno gaseoso
- Norma ISO 14687-2 relativa al grado de pureza que debe cumplir el hidrógeno
- Norma EN ISO 17268 relativa a los dispositivos de conexión para el suministro de hidrógeno gaseoso a vehículos de motor

Por otro lado, la Comisión Europea también publicó una serie de nuevas normativas derivadas de la directiva de combustibles alternativos (UE) 2019/1745 el 13 de agosto de 2019 con nuevas normas técnicas:

- Norma EN 17127 relativa a puntos de recarga de hidrógeno al aire libre, en sustitución de la ISO/TS 20100, y que se complementarían con la ISO/TS 19880-1 sobre estaciones de servicio de hidrógeno gaseoso

- Norma EN 17124 relativa a especificación de producto y aseguramiento de la calidad, en sustitución de la ISO 14687-2

Estas normas pasaron a tener aplicación el 12 de noviembre de 2021. [38]

## 5.2 PRESUPUESTO

El diseño e instalación de una hidrogenera tiene un elevado coste. En este presupuesto no se tendrá en cuenta los costes de la instalación ni de la mano de la obra, simplemente se hará una breve estimación del coste de la maquinaria y de la instalación de la planta fotovoltaica.

Máquina	Marca	Coste por unidad	Coste
<b>Electrolizador</b>	The Plug EX425D	2.000.000	2.000.000€
<b>Compresor x3</b>	Hiperbaric 1 KS50	300.000 €	900.000 €
<b>Tanques almacenamiento</b>	QUANTUM	5.000€	45.000€
<b>Dispensador</b>	Kraus	110.500 €	110.500 €
<b>Planta Fotovoltaica</b>	Estimación propia	3.000.000 €	3.000.000 €
<b>TOTAL:</b>			<b>6.055.500 €</b>

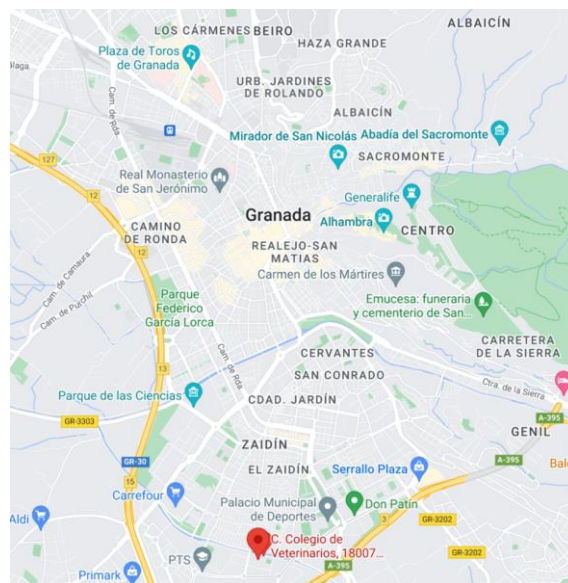
Los precios de tanto la maquinaria y la planta han sido estimados de otros catálogos y proyectos de dimensiones parecidas. En total el proyecto requiere una inversión inicial de alrededor de 6.055.500 €.

Cada autobús tiene un precio aproximado de 800.000 €. Por lo que el proyecto total tendrá un presupuesto de 50.855.500 €.

### 5.3 ESTABLECIMIENTO DEL DISPENSADOR

Para facilitar el repostaje de los autobuses se ha decidido que el dispensador se sitúe en la cochera donde duermen los autobuses tras su jornada diaria.

En este caso, por ejemplo, se ha elegido la cochera de Transportes Rober, situada en Avenida Dilar, al sur de la ciudad.



*Ilustración 39: Ubicación donde se repostarán los autobuses*

*Fuente: Google Maps*

Los autobuses se repostarán cuando descansen por las noches y estarán preparados para poder realizar los recorridos necesarios al día siguiente sin la necesidad de repostar a lo largo del día en ningún momento.

## **6. CONCLUSIONES**

### **6.1 CONCLUSIONES**

Podemos llegar a la conclusión de que a pesar de la gran inversión inicial que necesita el proyecto, merece la pena su instalación tanto en la ciudad de Granada como en otras muchas.

Es un proyecto que a largo plazo trae numerosos beneficios, el más importante de ellos, la reducción de gases nocivos liberados a la atmósfera, y, por tanto, mejora de la contaminación en aquella zona donde se instale el proyecto.

Con este proyecto se motiva al desarrollo del uso del hidrógeno como combustible, es decir, se motiva al crecimiento de producción de coches de pilas de hidrógeno, tanto de uso público como uso privado. Por otro lado, se motiva también a la construcción de nuevas infraestructuras como hidrogeneras que hagan posible crear una red de hidrógeno en España.

El hidrógeno tiene mucho futuro por delante y mucho potencial en su uso como combustible. Existen ya muchos proyectos que se van a llevar adelante en los próximos años donde se apuesta por el hidrógeno como el combustible del futuro.

Si esto fuese así, y en unos años llegásemos a crear una red de hidrógeno por toda la ciudad de España. La producción y el consumo de los coches de hidrógeno crecería y seríamos capaces de mejorar de reducir los coches de combustión. La consecuencia de esto sería crear un país con las zonas urbanas mucho más limpias y con un nivel mucho menor de contaminación, mejorando el medio ambiente y la salud de las personas.

## 6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se mostrarán y analizarán los resultados finales.

Comenzamos con el estudio de los autobuses donde tras estudiar su consumo diario se llegó al número de kilogramos necesarios para su funcionamiento diario.

Número de kilogramos diarios de hidrógeno	418,73 kg
---	-----------

Es un número elevado de kilogramos, pero en total estaríamos abasteciendo a un total de 56 autobuses diariamente.

A partir de este dato, se comenzó a estudiar los procesos y las máquinas necesarias para la producción del hidrógeno. Pasando por varias etapas, hace falta producir el hidrógeno, comprimirlo y refrigerarlo para poder almacenarlo a altas presiones, y, por último, dispensarlo a los autobuses. Después del estudio del consumo de cada maquinaria y elección de las mismas se llega a los siguientes resultados, donde se muestra el modelo elegido para cada maquinaria y su consumo en KWh:

	Consumo por Kg de $H_2$	Número de Kg de $H_2$	Consumo en KWh
<b>Electrolizador</b>	49,9 KWh/Kg	418,73 Kg	20894,63 KWh
<b>Compresor 1 (40 → 250)</b>	$0,89 \frac{KWh}{Kg}$	140 Kg	124,6 KWh
<b>Compresor 2 (40 → 300)</b>	$0,97 \frac{KWh}{Kg}$	140 Kg	135,8 KWh
<b>Compresor 3 (40 → 450)</b>	$1,17 \frac{KWh}{Kg}$	140 Kg	163,8 KWh
<b>Dispensador</b>	$0,2 \frac{KWh}{Kg}$	418,73 Kg	83,75 KWh
<b>Energía total diaria necesaria en KWh</b>			21402,58 KWh

Observamos que en total, diariamente necesitaríamos alrededor de 21500KWh para poder abastecer eléctricamente a toda la maquinaria para el correcto funcionamiento de la hidrogenera. Es una cantidad elevada de energía que intentaremos obtener de una misma planta de energía renovable. En este caso, se ha elegido la energía fotovoltaica, por lo que ha diseñado brevemente las características básicas que debe tener la planta fotovoltaica para poder generar esta cantidad de energía.

La planta se ha decidido instalar en la zona de Las Gabias, una zona con amplias parcelas a tan solo 25 minutos en coche. Tras haber elegido la ubicación, se han elegido los módulos solares, en este caso el modelo BiHiKu7, con una potencia por módulo de media 650 W. Con una potencia de pico esperada de 7000 KWp, se han calculado los módulos necesarios, llegando al resultado de:

Número de módulos necesarios	10.770 módulos
------------------------------	----------------

A partir de este dato y junto con el estudio de la irradiación solar mensual que recibe esta zona se ha calculado la energía eléctrica producida mensualmente, llegando al siguiente resultado.

*Tabla 14: Tabla de resultados de la energía calculada*

Radiación Global	PVGIS	Gdm	Energía media diaria	Energía media diaria	Energía total
	<i>kWh/m2</i>	<i>KWh/ m2 día</i>	<i>KWh/día</i>	<i>MWh/día</i>	<i>MWh/mes</i>
1 (Enero)	139,15	4,49	25138,57	25,14	779,30
2 (Febrero)	141,28	5,05	28258,02	28,26	791,22
3 (Marzo)	176,52	5,69	31889,76	31,89	988,58
4 (Abril)	185,51	6,18	34631,01	34,63	1038,93
5 (Mayo)	208,95	6,74	37748,50	37,75	1170,20
6 (Junio)	220,04	7,33	41077,07	41,08	1232,31
7 (Julio)	235,77	7,61	42593,75	42,59	1320,41
8 (Agosto)	229,42	7,40	41446,57	41,45	1284,84
9 (Septiembre)	195	6,50	36402,60	36,40	1092,08
10 (Octubre)	172,58	5,57	31177,97	31,18	966,52
11 (Noviembre)	135,28	4,51	25254,07	25,25	757,62
12 (Diciembre)	136,37	4,40	24636,34	24,64	763,73

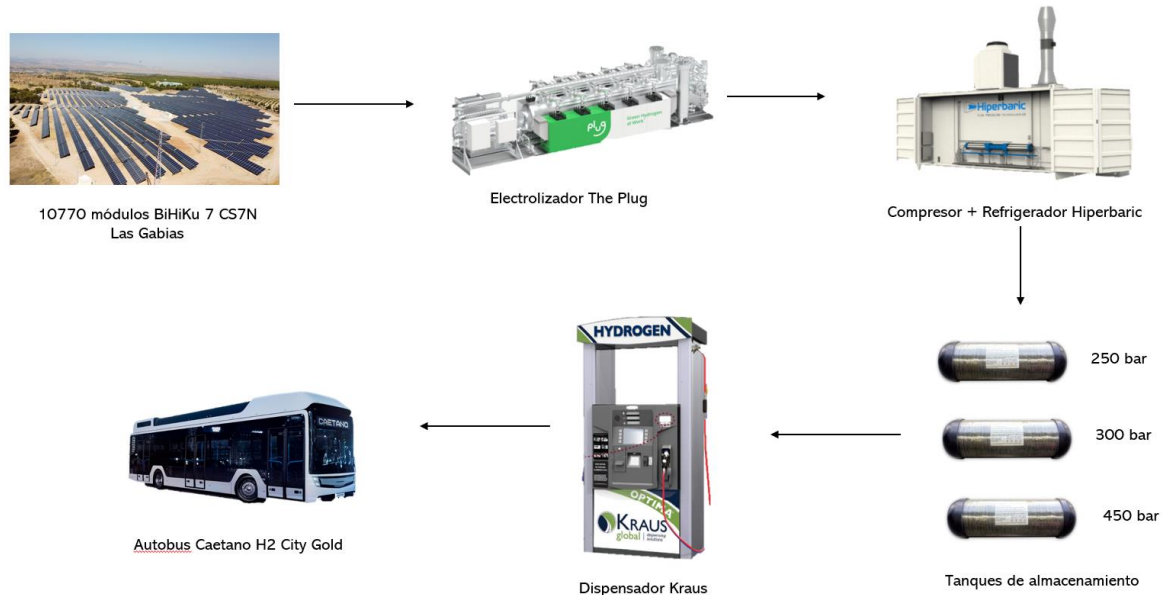
Con las siguientes conclusiones:

<b>Energía media por día</b>	<b>33,35 MWh/día</b>
------------------------------	----------------------

<b>Energía total por año</b>	<b>12185,74 MWh/año</b>
------------------------------	-------------------------

Donde la energía media por día es 33,35 MWh, por lo tanto, esta planta de estas dimensiones es suficiente para poder abastecer eléctricamente a la hidrogenera.

En conclusión, el esquema final de la hidrogenera diseñada es el siguiente:



*Ilustración 40: Esquema final de la hidrogenera*

Con un consumo diario total de 21402 KWh.

### 6.3 FUTUROS ESTUDIOS

En este proyecto se estudian numerosas fases hasta el diseño de la hidrogenera. Para futuros proyectos se recomienda estudiar los siguientes aspectos:

- Número de los autobuses, rutas recorridas y kilómetros totales al día.
- Tipo de autobús de pila de hidrógeno, donde se debe tener en cuenta su consumo por Km y la presión de sus tanques.
- Forma de producir el hidrógeno. Puede ser a través de procesos limpios o contaminantes.
- Consumo por cada Kg de hidrógeno del electrolizador.
- Consumo por cada Kg de hidrógeno del compresor y refrigerador.
- Presiones de almacenamiento y presiones a las que se realiza el dispensado.
- Consumo del dispensador.
- Método de repostaje: directo o en cascada.

- Ubicación del dispensador.
- Origen de la energía eléctrica necesaria: renovable o no renovable.

A parte de estos factores, para futuros estudios recomendaría realizar también:

- Estudio del transporte del hidrógeno.
- Cumplimiento de las normativas ISO y SAE.
- Estudiar las medidas de seguridad.
- Financiación del proyecto.
- Plazos de instalación, operación y mantenimiento.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Miguel Ángel Ceballos, P. S. (2021). *La contaminación por ozono en el Estado español durante 2021 Resumen*. Ecologistas Espinosa. Obtenido de <https://www.ecologistasenaccion.org/184184/por-segundo-ano-consecutivo-en-2021-la-contaminacion-por-ozono-cae-un-37/>
- [2] Medialdea, S. (22 de 02 de 2021). Así es el primer autobús de hidrógeno, con cero emisiones y sin ruido. *ABC*.
- [3] Villanueva, J. C. (05 de 11 de 2021). La contaminación en Granada, un problema que no solo está en la capital. *Granada Digital*.
- [4] Rico, M. R. (22 de 01 de 2014). La UE se fija como objetivo para 2030 reducir un 40% las emisiones de CO2. *La Marea*.
- [5] Fernández, S. (07 de 06 de 2019). Coches eléctricos y energías renovables: hacia la electrificación y la reducción de emisiones. *Híbridos y Eléctricos*.
- [6] De dónde proviene la electricidad de los coches eléctricos. (2018, septiembre 21). Autocasión. <https://www.autocasion.com/actualidad/reportajes/de-donde-proviene-la-electricidad-de-los-coches-electricos>
- [7] EFEverde, R. (2021, junio 4). Las emisiones de CO2 del transporte por carretera se redujeron más de un 20%. EFEverde. <https://efeverde.com/emisiones-co2-transporte-por-carretera-se-redujeron-mas-de-un-20/>
- [8] *Infografía: Los medios de transporte más usados en España*. (s. f.). Statista Infografías. Recuperado 12 de julio de 2022, de <https://es.statista.com/grafico/21521/frecuencia-de-uso-de-medios-de-transporte-en-espana/>

- [9] Objetivos y metas de desarrollo sostenible—Desarrollo Sostenible. (s. f.), de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- [10] José Ignacio Linares Hurtado, B. Y. (2007). *El hidrógeno y la energía*. Madrid: Asocioación Nacional de Ingenieros ICAI, Universidad Pontificia de Comillas.
- [11] Hidrógeno y transporte. (s. f.). Hidrógeno y transporte. de <https://cienciaypresencia.blogspot.com/2015/03/hidrogeno-y-transporte.html>
- [12] *Hydrogen Production: Natural Gas Reforming*. (s. f.). Energy.Gov., de <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>
- [13] *El hidrógeno: Metodologías de producción*. (s. f.). de [https://fgcsic.es/lychnos/es\\_es/articulos/hidrogeno\\_metodologias\\_de\\_produccion](https://fgcsic.es/lychnos/es_es/articulos/hidrogeno_metodologias_de_produccion)
- [14] *Hydrogen Production: Biomass Gasification*. (s. f.). Energy.Gov, de <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-biomass-gasification>
- [15] Rico, P. D. S. (2019, julio 16). Producción de Hidrógeno. *ARIEMA*. <https://www.ariema.com/produccion-de-h2>
- [16] *Procesos de producción de hidrógeno*. (s. f.). hidrogeno, de <https://hidrogeno18.wixsite.com/hidrogeno/blank-cjg9>
- [17] *Ciclos Termoquímicos: Una alternativa para la producción sostenible de Hidrógeno - Energía y Sostenibilidad*. (2010, mayo 14). <https://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2010/05/14/130862>
- [18] *Electrólisis del agua | Química general*. (s. f.), de <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/432-electrolisis-del-agua.html>

- [19] Santiago, O. (2016, enero 14). *¿Cómo funciona una pila de combustible de hidrógeno?* Apilados. <https://apilados.com/blog/como-funciona-una-pila-de-combustible-de-hidrogeno/>
- [20] Lamana, L. C. (2008). *Catalizadores para pilas de combustible de electrolito polimérico* [Http://purl.org/dc/dcmitype/Text, Universidad de Zaragoza]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=205724>
- [21] Asensio, J. A., Peña, J., Pérez-Coll, D., Ruiz-Morales, J. C., Marrero-López, D., Núñez, P., & Gómez-Romero, P. (2011). Pilas de combustible de Membrana polimérica. *Afinidad*, 68(554).
- [22] *Aplicaciones estacionarias de las pilas de combustible*. (s. f.), de [http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/pilas\\_2/pilas\\_2.html](http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/pilas_2/pilas_2.html)
- [23] Benito, J. L. de. (2022, marzo 18). *Asia es el líder mundial en infraestructura de repostaje de hidrógeno*. Hidrogeno verde. <https://hidrogeno-verde.es/asia-lider-mundial-en-infraestructura-de-repostaje-de-hidrogeno/>
- [24] *SPAIN H2—WWW.GLPAUTOGAS.INFO*. (s. f.). Google My Maps. de <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=16YwXITxewORzRuKxopkqEYAkJQfMwXCA>
- [25] CdS. (2022, febrero 21). *Abre en Barcelona la primera hidrogenera verde de uso público en España*. Cadena de Suministro. <https://www.cadenadesuministro.es/noticias/abre-en-barcelona-la-primer-hidrogenera-verde-de-uso-publico-en-espana/>
- [26] *La primera hidrogenera verde y autosuficiente de España se pondrá en marcha a finales de año y será pública*. (s. f.). de <https://www.motorpasion.com/futuro->

movimiento/primer-hidrogena-verde-autosuficiente-espana-se-pondra-marcha-a-finales-ano-sera-servicio-publico

[27] Cancela, C. (2021, febrero 3). *Inaugurada en Madrid la primera hidrogena pública de España*. *elconfidencial.com*.

[https://www.elconfidencial.com/motor/2021-02-03/hidrogena\\_2933219/](https://www.elconfidencial.com/motor/2021-02-03/hidrogena_2933219/)

[28] CORPORATIVA, I. (s. f.). *Barcelona recibe el primer bus de hidrógeno de Caetano que repostará próximamente en la planta de H2 verde de Iberdrola*. Iberdrola, de

<https://www.iberdrola.com/sala-comunicacion/noticias/detalle/barcelona-recibe-primer-bus-hidrogeno>

[29] Press, E. (2022, enero 26). *Alsa estrena en Madrid el primer autobús de hidrógeno de España en una línea urbana*. Europa Press.

<https://www.europapress.es/economia/noticia-alsa-estrena-madrid-primer-autobus-hidrogeno-espana-linea-urbana-20220126111229.html>

[30] La hidrogena de Ajusa presta servicio al primer autobús de hidrógeno que reposta en España. (2019, noviembre 20). *APPICE*. <https://appice.es/la-hidrogena-de-ajusa-presta-servicio-al-primer-autobus-de-hidrogeno-que-reposta-en-espana/>

[31] CORPORATIVA, I. (s. f.). *Barcelona recibe el primer bus de hidrógeno de Caetano que repostará próximamente en la planta de H2 verde de Iberdrola*. Iberdrola, de

<https://www.iberdrola.com/sala-comunicacion/noticias/detalle/barcelona-recibe-primer-bus-hidrogeno>

[32] Armijo, J. I. V. (s. f.). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DEMOSTRATIVA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE LA ELECTRÓLISIS DEL AGUA*. 59.

- [33] hmong.wiki. (s. f.). *Sistema de llenado en cascada ContenidoyPrincipio de funcionamiento*. de [https://hmong.es/wiki/Cascade\\_filling\\_system](https://hmong.es/wiki/Cascade_filling_system)
- [34] Liu, C. (2017). *System integration of wind-powered hydrogen refueling station- From national level to a case study*. TUDelft.
- [35] Agencia Andaluza de la Energía. (2021). *Informe de Infraestructuras energéticas Provincia Granada*. Junta de Andalucía.  
[http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/miea/miea/static/pdf/Informe\\_Provincial\\_granada.pdf](http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/miea/miea/static/pdf/Informe_Provincial_granada.pdf)
- [36] Delgado Renovables. (2018). *Planta FV Las Gabias Suntrap de 3MWP*. PRYSOL.  
[https://www.juntadeandalucia.es/sites/default/files/2020-10/181126%20\\_PTO.BASICO.%20\\_PTA.LAS%20GABIAS%20mtdo%2C%20Fdo%20%28V1%29.pdf](https://www.juntadeandalucia.es/sites/default/files/2020-10/181126%20_PTO.BASICO.%20_PTA.LAS%20GABIAS%20mtdo%2C%20Fdo%20%28V1%29.pdf)
- [37] Marketing. (2020, septiembre 29). Guadix estrena una planta fotovoltaica para abastecer a 4.265 mil viviendas. *Ansol*. <https://ansol.com/guadix-estrena-una-planta-fotovoltaica-con-mas-de-cinco-millones-de-inversion>
- [38] *Informe sobre la Reglamentación actual y necesidades de desarrollo Legislativo (noviembre-2019)*. (s. f.). 15.
- [39] Santiago, O. (2016, mayo 1). *3 métodos para el almacenamiento de hidrógeno*. Apilados. <https://apilados.com/blog/3-metodos-almacenamiento-hidrogeno/>
- [40] *Caetanobus*. (2015, diciembre 22). Caetanobus. <https://caetanobus.pt/es/>
- [41] Thovar Puebla, J. (2018). Producción y suministro de hidrógeno a partir de energías renovables.
- [42] Apuntes termodinámica María del Mar Cledera
-

[43] Capítulo 13. Compresores alternativos

Ilustración 3: La demanda de energía eléctrica de España aumenta un 1% en enero | Red Eléctrica de España. Disponible en: <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2021/02/la-demanda-de-energia-electrica-de-espana-aumenta-un-uno-por-ciento-en-enero>

Ilustración 4: Hidrógeno y transporte. (s. f.). Hidrógeno y transporte. de <https://cienciaypresencia.blogspot.com/2015/03/hidrogeno-y-transporte.html>

Ilustración 5: Mackenzie, W. (2019, octubre 25). *The future for green hydrogen*. <https://www.woodmac.com/news/editorial/the-future-for-green-hydrogen/>

Ilustración 6: Santiago, O. (2016, octubre 16). *Tipos de pilas de combustible y su clasificación*. Apilados. <https://apilados.com/blog/tipos-de-pilas-de-combustible-su-clasificacion/>

Ilustración 7: Azkarate, I. (2010). *Almacenamiento de Hidrógeno*.

Ilustración 8: Santiago, O. (2016, mayo 1). *3 métodos para el almacenamiento de hidrógeno*. Apilados. <https://apilados.com/blog/3-metodos-almacenamiento-hidrogeno/>

Ilustración 9: *SPAIN H2—WWW.GLPAUTOGAS.INFO*. (s. f.). Google My Maps. de <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=16YwXITxewORzRuKxopkqEYAkJQfMwXCA>

Ilustración 10: GASNAM. (2021). *Despliegue de la red mínima de hidrogeneras y del mercado de vehículos de hidrógeno en España*. ANFAC La movilidad del futuro. [https://gasnam.es/wp-content/uploads/2021/11/PLAN-DESPLIEGUE-DE-RED-MINIMA-DE-HIDROGENERAS\\_-ANFAC\\_GASNAM.pdf](https://gasnam.es/wp-content/uploads/2021/11/PLAN-DESPLIEGUE-DE-RED-MINIMA-DE-HIDROGENERAS_-ANFAC_GASNAM.pdf)

Ilustración 11: *La hidrogenera de Ajusa presta servicio al primer autobús de hidrógeno que reposta en España—Actualidad—Híbridos y Eléctricos | Coches eléctricos, híbridos enchufables.* (s. f.). de

<https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/hidrogenera-ajusa-presta-servicio-primer-autobus-hidrogeno-reposta-espana/20191105182637031266.html>

Ilustración 12: CdS. (2022, febrero 21). *Abre en Barcelona la primera hidrogenera verde de uso público en España.* Cadena de Suministro.

<https://www.cadenadesuministro.es/noticias/abre-en-barcelona-la-primer-hidrogenera-verde-de-uso-publico-en-espana/>

Ilustración 13, 14, 15 : *Caetanobus.* (2015, diciembre 22). Caetanobus.

<https://caetanobus.pt/es/>

Ilustración 16,17,18 : *Centro de Gestión Integral de Movilidad del Ayuntamiento de Granada.* (s. f.), de <http://www.movilidadgranada.com/>

Ilustración 19: Caballero Mayoral, A., Rabadán Macías, F., & Cenedese, F. (2021).

*Hygreen. Proyecto de producción de hidrógeno verde mediante tecnología solar fotovoltaica.* Gobierno de España, Escuela de organización industrial.

Ilustración 20: *Electrolyzer hydrogen—Clean Generation from Water—Plug.* (s. f.). Plug Power, de <https://www.plugpower.com/hydrogen/electrolyzer-hydrogen/>

Ilustración 21, 22, 24: *Compresores.* (s. f.). llamados ancap.

Ilustración 23: Mataix, C. (1982). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas.* Ediciones del castillo S.A.

Ilustración 24: *Caetanobus.* (2015, diciembre 22). Caetanobus. <https://caetanobus.pt/es/>

Ilustración 25: *Hydrogen – Natural Gas & Hydrogen tanks & cylinders, fuel systems and virtual pipeline trailers.* (s. f.). de <https://www.qtw.com/product/hydrogen/>

Ilustración 28: *Líderes en tecnologías de altas presiones—Hiperbaric.* (s. f.), de <https://www.hiperbaric.com/es/>

Ilustración 31: *TSK: Soluciones para un mundo sostenible.* (s. f.). TSK., de <https://www.grupotsk.com/>

Ilustración 33: *Ansasol.* (s. f.). Ansasol., de <https://ansasol.com/>

Ilustración 36: *Canadian Solar – Global.* (s. f) , de <https://www.canadiansolar.com/>

Ilustración 37,38 : *JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)—European Commission.* (s. f.). Recuperado 17 de julio de 2022, de [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/)

Tabla 5: Linares Hurtado, J. I., Moratilla Soria, B. Y., Instituto Católico de Artes e Industrias, Asociación Nacional de Ingenieros, & Universidad Pontificia de Comillas. (2007). *El hidrogeno y la energía: Análisis de situación y prospectiva de nuevas tecnologías energéticas.* Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI : Universidad Pontificia Comillas.

Tabla 10 : Merlino, A. M. R. (s. f.). *ESTUDIO DE MATERIALES APTOS PARA ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO.* 235.

Tabla 12: Agencia Andaluza de la Energía. (2021). *Informe de Infraestructuras energéticas Provincia Granada.* Junta de Andalucía.  
[http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/miea/miea/static/pdf/Informe\\_Provincial\\_granada.pdf](http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/miea/miea/static/pdf/Informe_Provincial_granada.pdf)



# 8. ANEXOS

## 8.1 ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I: Catálogo autobuses Caetano

Anexo II: Ficha técnica electrolizador The Plug

Anexo III: Ficha técnica tanques de almacenamiento

Anexo IV: Ficha técnica compresor Hiperbaric

Anexo V: Ficha técnica dispensador Kraus

Anexo VI: Datos PVGIS zona Las Gabias

Anexo VII : Ficha técnica módulos solares

**ANEXO I:**  
**Catálogo Autobuses**  
**Caetano**

# H<sub>2</sub>.City Gold

el autobús de hidrógeno para su ciudad



CAETANO

With your city, with your vision

A photograph of a modern city skyline, likely Singapore, featuring several tall skyscrapers and a road with a blue-painted lane in the foreground. The sky is blue with some clouds. The text is overlaid on the left side of the image.

## SOÑEMOS CON EL FUTURO

**Queremos mejorar el transporte urbano y garantizar un futuro mejor para la población de las ciudades.**

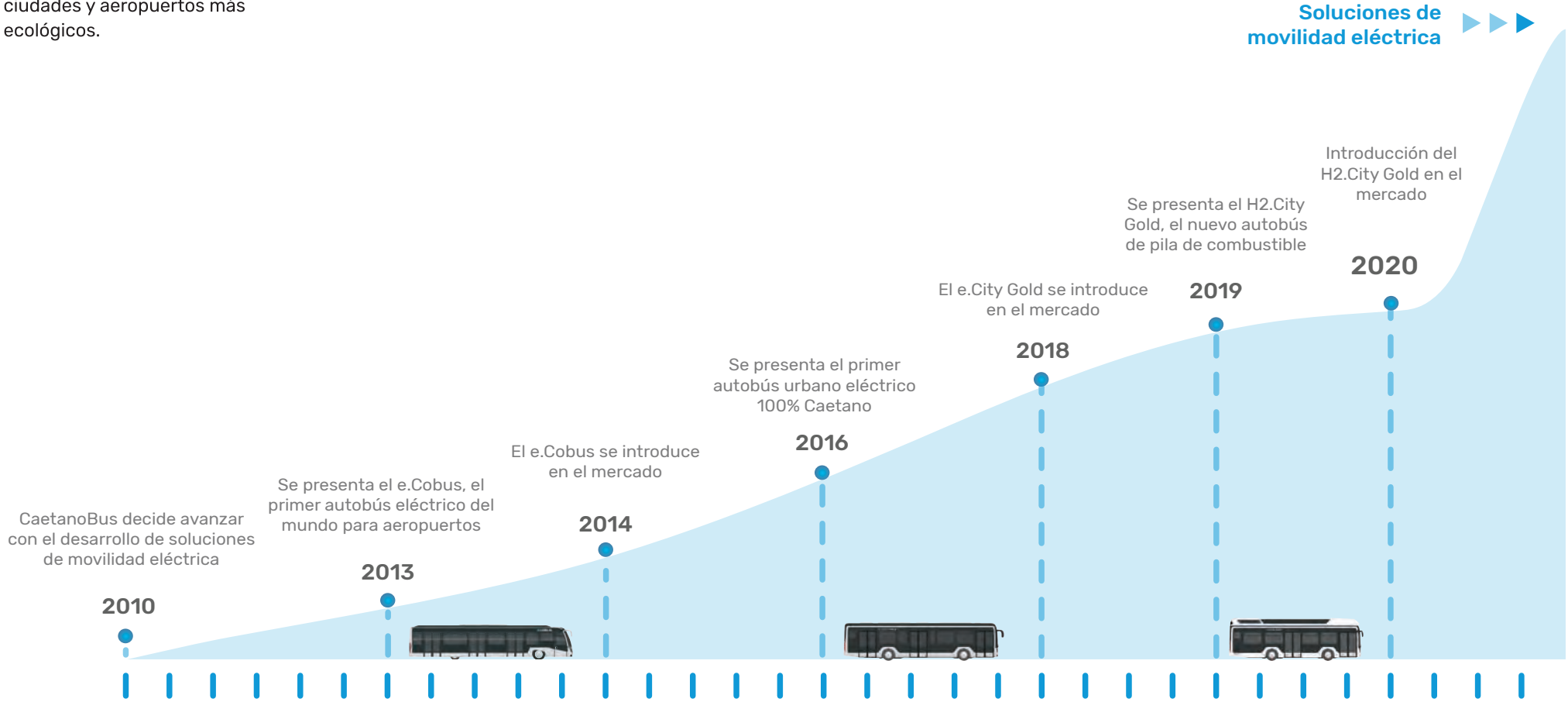
Las redes urbanas exigen medios de transporte más ecológicos, seguros y económicamente sostenibles. Trabajamos constantemente para armonizar nuestro crecimiento con la sostenibilidad urbana y construir el futuro de las ciudades con nuestros socios. Esta es nuestra contribución a un futuro diseñado con soluciones de movilidad sin carbono en todo el mundo.

# CON SOLUCIONES DE MOVILIDAD SOSTENIBLES

Dimos los primeros pasos en el desarrollo de soluciones de movilidad eléctrica hace más de 40 años. Nuestros conocimientos adquiridos nos permiten tener hoy una oferta consolidada de soluciones integradas para ciudades y aeropuertos más ecológicos.

Con más de 70 años de existencia, unimos a diario nuestra experiencia con nuestra pasión, en el desarrollo de soluciones innovadoras y más sostenibles.

**Seguiremos soñando y creando el futuro en el queremos vivir.**



# H2.CITY GOLD

## El autobús Caetano con pilas de combustible de hidrógeno.

El Caetano H2.City Gold es el nuevo autobús eléctrico Caetano impulsado por hidrógeno. Esta es una solución innovadora, que potencia los beneficios económicos y medioambientales del hidrógeno avanzando hacia una sociedad sin carbono. De este modo, damos un paso importante en el desarrollo de soluciones de movilidad para el transporte colectivo de pasajeros con cero emisiones.

El H2.City Gold se destaca por su modularidad, autonomía y alta capacidad, seguridad y simplicidad de uso. Disponible en las versiones LHD y RHD, con 2 o 3 puertas, se adapta fácilmente a cualquier entorno urbano.

Este nuevo autobús refuerza nuestra apuesta por el desarrollo de soluciones de transporte ecológicas, y complementa la oferta de autobuses eléctricos Caetano. El H2.City Gold ofrece una mayor flexibilidad en el funcionamiento, dado que no existe la necesidad de parar para la carga en el caso de viajes más largos. Además, posee un mejor rendimiento a la hora de eliminar las emisiones gaseosas nocivas, en comparación con los autobuses diésel o incluso con los autobuses híbridos.

## AUTONOMÍA DE HASTA 400 KM FÁCIL UTILIZACIÓN GRAN CAPACIDAD



motor eléctrico  
Siemens



carrocería  
de aluminio



sistema regenerativo  
de frenado



pila de combustible  
Toyota





# LA TECNOLOGÍA DE NUESTRO CHASIS

El sistema modular del chasis Caetano permite al H2.City Gold tener diferentes configuraciones, optimizando la versatilidad de sus especificaciones.



Modularidad de piso bajo o entrada baja



2 o 3 puertas



LHD o RHD



## Detección y extinción de incendios

Sistema que detecta y apaga un incendio en los compartimentos del motor y de las baterías.



## Sistema de control antideslizante (ASR)

Controla el sistema de tracción para evitar que las ruedas patinen cuando la carretera está resbaladiza, o por exceso de aceleración del vehículo.



## Control electrónico de estabilidad (ESC)

Una tecnología que mejora la estabilidad del vehículo mediante la detección y reducción de la pérdida de tracción.



## Hill holder

Ayuda en el arranque en rampas, manteniendo el vehículo parado durante algunos segundos, incluso sin pisar el pedal de freno.

## Sistema de frenado antibloqueo (ABS)

Garantiza un frenado estable en todas las superficies para impedir la pérdida de control del vehículo.



## Sistema de frenado electrónico (EBS)

Lee la información de todos los sensores de frenado y activa el ABS o el ASR cuando es necesario.



## Suspensión neumática controlada electrónicamente (ECAS)

Asegura una mayor estabilidad y distribución del peso, ofrece más seguridad y reduce el tiempo y los costes de funcionamiento, ya que facilita la entrada y salida de pasajeros.

10,7m o 12m

## Complementos de seguridad:

- Detector de fatiga del conductor (DFW)
- Alerta de salida involuntaria de carril (LDW)
- Sensor de ángulo muerto
- Advertencia de colisión (FXW y PCW)
- Sistema de control de la presión de los neumáticos (TPMS)
- Control electrónico de estabilidad (ESC)
- Control de la distancia de seguridad (HMW)
- Indicador de límite de velocidad (SLI)
- Alerta sonora de marcha atrás (white sound)
- Sistema inteligente de velocidad (ISA)
- Señal acústica de pedal
- Cámara en la zona de los pedales
- Indicador luminoso de utilización del pedal
- Sistemas de supervisión por cámaras para la sustitución de espejos con visión nocturna (CMS)
- Alcohólimetro con inmovilizador del vehículo
- CCTV
- Sensor de aparcamiento



### Siempre conectado

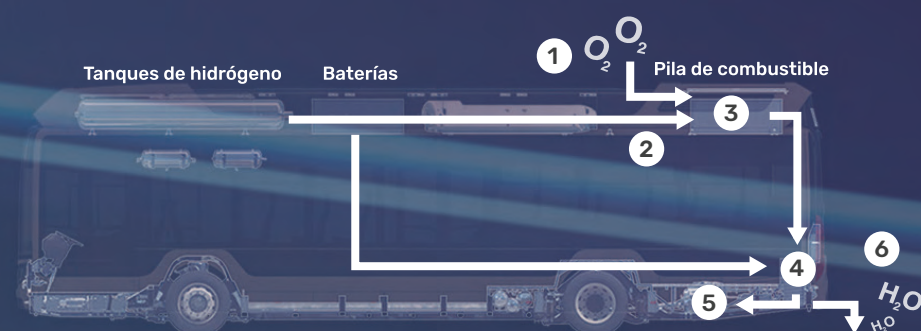
Un funcionamiento eficiente se apoya en datos que asumen decisiones acertadas para una planificación adecuada. El H2.City Gold posee un sistema de envío de información detallada en tiempo real a una plataforma propia. Esto permite recibir alertas de desvíos de la planificación, obtener estadísticas del rendimiento del vehículo, previsiones de autonomía, ver detalles del consumo de energía y mucho más. De este modo, está siempre disponible una visión completa del funcionamiento para que esta sea lo más eficaz posible.



### Seguridad por encima de todo

Cumplimos con los diferentes requisitos de seguridad para que tanto el conductor como los pasajeros puedan viajar seguros. Además de los sistemas de seguridad estándar, los vehículos pueden equiparse con una amplia gama de opciones, en función de las exigencias de cada uno de nuestros clientes.

El H2.City Gold está también dotado de sensores de detección de hidrógeno y sensores de colisión que, en caso de fuga o accidente, cortan la salida del flujo de hidrógeno de los tanques.



- 1 Se absorbe el oxígeno
- 2 Se suministra oxígeno e hidrógeno a la pila de combustible
- 3 La electricidad y el agua se generan por reacción química
- 4 La electricidad se suministra al motor y sistemas auxiliares.
- 5 El motor se activa y el vehículo se mueve
- 6 Se bombea agua

**60 kW**

Pila de combustible  
Toyota

**180 kW**

Motor Siemens

\* estimado

**29-44 kWh**

Baterías LTO

**9 minutos \***

Suministro rápido



### Confort y accesibilidad para todos

El H2.City Gold ofrece un alto nivel de confort y accesibilidad a sus pasajeros. Las baterías, los tanques de hidrógeno y la pila de combustible ubicados en el techo optimizan el espacio interior, haciéndolo más amplio. De esta forma el H2.City Gold permite que se puedan elegir diferentes distribuciones en su interior, ofreciendo una gran capacidad. Al mismo tiempo, se puede elegir la ubicación de la rampa de acceso en cualquiera de las puertas, delantera y central, que refuerza la inclusividad de todos los pasajeros.

### Es un placer conducirlo

El asiento del conductor ha sido diseñado de conformidad con las normas de ergonomía más recientes (VDV 234 e ISO 16121), pensando en quien lo utiliza todos los días, para optimizar el confort y reducir el cansancio. El tablero de instrumentos ajustable simplifica el uso de todos los mandos y la información personalizable se adapta a las necesidades de utilización. El asiento permite un fácil acceso a los pedales, que garantiza una experiencia de conducción cómoda, ágil y suave.



### Fácil e intuitivo

El H2.City Gold es definitivamente un vehículo ecológico, diseñado para ofrecer una experiencia agradable desde el primer momento.

Las semejanzas con un vehículo convencional permiten una adaptación fácil, por lo que conducir el H2.City Gold es una experiencia placentera. Los equipos de mantenimiento también tienen simplificado su trabajo, ya que las piezas principales están ubicadas de forma estratégica para garantizar su fácil acceso. Puesto que el hidrógeno es una partícula bastante ligera y no visible, es importante crear herramientas de asistencia para los equipos

de mantenimiento. De este modo, a través de la utilización de una cinta que cambia de color al entrar en contacto con las partículas de hidrógeno, se puede llevar a cabo fácilmente un control visual de una posible fuga, reduciendo así los tiempos de inspección y mantenimiento.

### Ecológico en todos los aspectos

La fabricación del H2.City Gold se realiza con materiales ecológicos y reciclables. Buscamos constantemente la posibilidad de utilizar nuevos materiales y técnicas que permitan que nuestros autobuses sean cada vez más sostenibles.



### El silencio también se hace oír

En los centros urbanos la mayoría de las veces el ruido es ensordecedor. Este ruido no es solo incómodo, sino que también trae consigo problemas para la salud. Crear zonas urbanas más tranquilas es también un objetivo común en el horizonte de las ciudades del futuro.

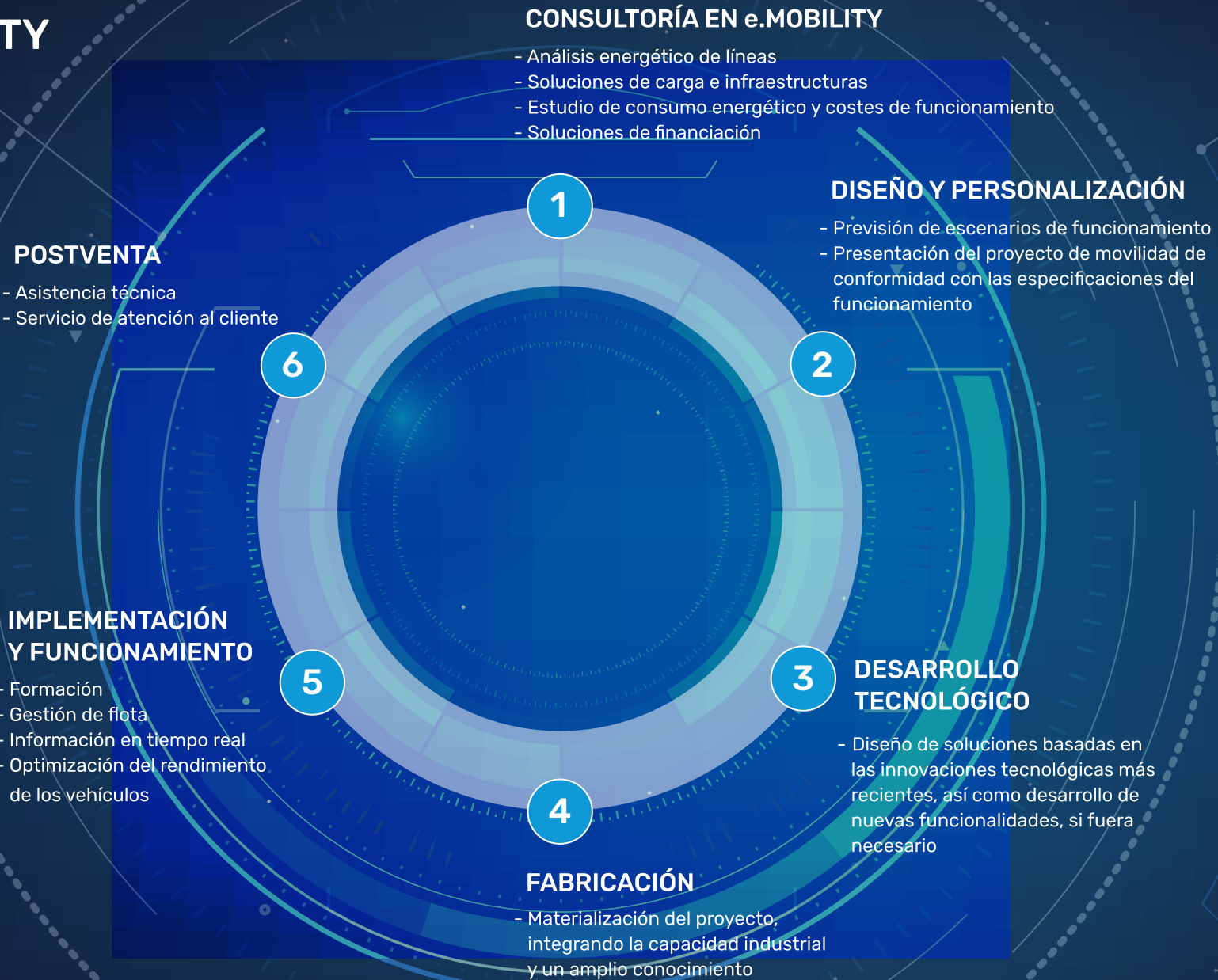
El H2.City Gold, con niveles de ruido reducido, contribuye de esta forma para lograr ciudades más agradables.

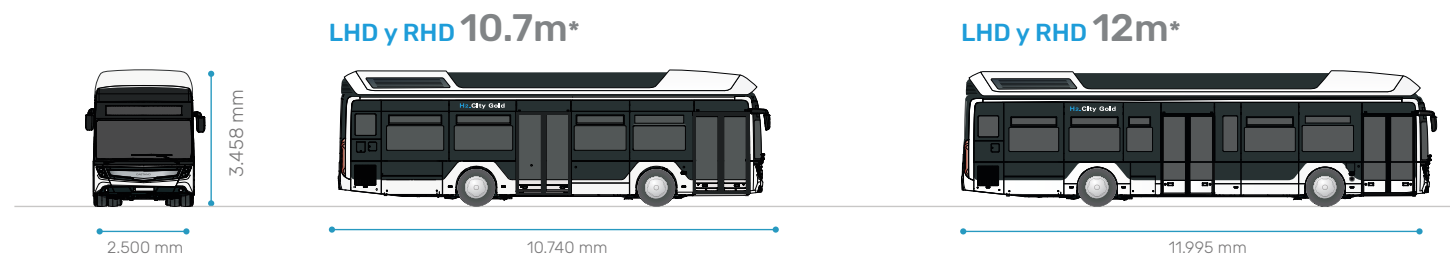
## Ciudades más tranquilas y silenciosas.

# SOLUCIONES e.MOBILITY

## Socio en la definición del producto y del modelo de servicio

CaetanoBus es un proveedor de soluciones de movilidad integrales. Apoyamos cada operación desde el principio hasta el final, diseñamos soluciones adaptadas a cada cliente según sus necesidades, y ofrecemos una amplia variedad de servicios que permiten crear, gestionar y optimizar soluciones de transporte ecológicas.





<b>Grupo propulsor</b>	Motor - 180 kW - Siemens (síncrono de imanes permanentes) Transmisión - directa al eje (sin caja de cambios)	
<b>Baterías</b>	LTO (óxido de litio-titanato)	
<b>Sistema de pila de combustible</b>	Tanques de hidrógeno - tipo 4 de composite: 5 x 3121 (máx. 37,5kg: 350 bar)	
	Tipo de suministro - < 9 min (de acuerdo con SAE 32601-2 & SAE 32799 - IR)	
	Potencia nominal de la pila de combustible - 60 kW (Toyota FC Stack)	
	Arranque en frío - desde - 25 °C sin energía externa - opcional	
<b>Autonomía estimada</b>	Hasta 400 km	
<b>Consumo estimado</b>	Desde 6 kg/100 km	
<b>Sistema de frenado</b>	Sistema de frenado electroneumático (WABCO EBS 3), ABS con sistema de frenado regenerativo (ASR) Sistema electrónico de estabilidad (ESC) - opcional	
<b>Chasis</b>	Chasis de piso bajo de acero de alta resistencia	
<b>Ejes</b>	Eje delantero - Suspensión independiente ZF RL 82 EC	
	Eje trasero - Eje motor tipo pórtico rebajado para autobuses de piso bajo	
<b>Suspensión</b>	ECAS 2 - Suspensión neumática controlada electrónicamente	
	Sistema de inclinación (kneeling)	
	Accionamiento manual y automático de subida y bajada de la carrocería	
<b>Carrocería</b>	Carrocería de aluminio con sistema CO-BOLT	
<b>Capacidad</b>	Hasta 64 pasajeros	Hasta 87 pasajeros
<b>Puertas</b>	2 o 3 puertas	

\* El fabricante se reserva el derecho de modificar las especificaciones del vehículo.



CaetanoBus



---

## IMAGINE SU CIUDAD CON NOSOTROS.

En CaetanoBus, desarrollamos soluciones innovadoras y más sostenibles, para transformar ciudades y mejorar la calidad de vida en las mismas.

**¡CONTÁCTENOS!**

### SEDE CENTRAL CAETANOBUS

Av. Vasco da Gama, 1410  
4430-247 – Vila Nova de Gaia  
PORTUGAL  
GPS: 41°06'52.78"N 8°35'31.62"W

Tel.: +351 22 786 70 00  
Fax: +351 22 786 71 71

Correo electrónico: [caetanobus@caetanobus.pt](mailto:caetanobus@caetanobus.pt)

[www.caetanobus.pt](http://www.caetanobus.pt)

Elaborado para:



**ANEXO II:**

**Ficha técnica**

**electrolizador The**

**Plug**



Green Hydrogen at Work

# The Plug EX-425D

Best-in-class PEM electrolysis based on nearly 50 years of experience



# Plug is the only company able to deliver on the entire hydrogen ecosystem.

Our portfolio includes products that produce, store, transport, dispense, and convert hydrogen to carbon-free electricity. Plug's turnkey, plug-and-play electrolyzers utilize proton exchange membrane (PEM) technology with decades of field experience and a track record of high performance and reliability.

**Plug's electrolyzers are the safest, most efficient, and deliver the lowest total cost of ownership on the market today.**

PEM electrolyzers generate hydrogen from water using electricity and a special membrane. No caustic chemical solutions required.

The Plug Gigafactory has the highest capacity in the industry (1GW), utilizing lean principals and cutting-edge technology.

## EX-425D System Specifications

The Plug EX-425D provides up to 425 kg/day of high-quality on-site hydrogen.

### Instant Load Following

Hydrogen production rate adjusts as electric capacity is available, making this a perfect product for use with grid or renewable energy resources.

### Compact

Containerized solution is easy to site near point of use.

### Modular and Scalable

Pair multiple units for high demand and availability.

Corporate Headquarters  
968 Albany Shaker Rd,  
Latham, NY 12110  
518.782.4004

### Input

Stack Power Consumption	Up to 1MW
Voltage & Frequency	480VAC, 60HZ (USA) 400VAC, 50HZ (EU)
Water Consumption	13 liters per kg of H2 produced

### Output (Hydrogen Gas)

Volume	200 Nm <sup>3</sup> / hour
Mass	425 kg / day
Purity	Up to 99.999%
Pressure	40 barg / 580 psig (w/o compressor)

### Operational

Start Up Time	30 sec warm / < 5 min cold
Average Stack Efficiency	49.9 kWh / kg
Load Following	Instantaneous

### Physical / Environment

Installed Footprint	29.3m <sup>2</sup> / 320 ft <sup>2</sup>
Ambient Temperature	-20°C to +40°C (wider temperature range optional)

### Other

Compliance / Certifications	ISO 22734, NFPA 2, CE
-----------------------------	-----------------------

**ANEXO III:**  
**Ficha técnica**  
**tanques de**  
**almacenamiento**

Description		26L	34L	38L	40L	51L	58L	76L	76L	118L	120L	129L	160L	332L	445L	650L	594L	791L	900L	936L	936L <sup>5</sup>	994L <sup>5</sup>	
<b>Size</b>	<b>Units</b>	<b>282x762</b>	<b>274x835</b>	<b>356x726</b>	<b>278x934</b>	<b>400x743</b>	<b>446x699</b>	<b>497x715</b>	<b>497x715</b>	<b>446x699</b>	<b>335x2170</b>	<b>394x1640</b>	<b>406x1625</b>	<b>23.5x80</b>	<b>26x75</b>	<b>26x100</b>	<b>28x75</b>	<b>30.5x85</b>	<b>1009x1359</b>	<b>30.5x97.5</b>	<b>30.5x102</b>	<b>30.5x107</b>	
<b>Typical Use</b>	-	Passenger Car	Passenger Car	Passenger Car	Passenger Car	Passenger Car	Passenger Car	Passenger Car	Passenger Car	Passenger Car	Passenger Car	Passenger Car	Truck & Bus	Truck	Truck & Transportable	Truck & Transportable	Truck & Transportable	Truck & Transportable	Aerospace	Truck & Transportable	Transportable	Transportable	
<b>Part Number Family</b>	-	109649	109176	108184	110500	109602	113426	113052	120410	113435	113733	110463	108851	120596	117408-H	116474-H	118216-H	118605-H	108956	118292-H	117629-H	117418-H	
<b>Composite Tank</b>	-	Type 4	Type 4	Type 4	Type 4	Type 4	Type 4	Type 4	Type 4	Type 4	Type 4	Type 4	Type 4	Type 4	Type 4	Type 4	Type 4	Type 4	Type 4	Type 4	Type 4	Type 4	
<b>Component Material</b>	-	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	Aluminum	Aluminum	Aluminum	Aluminum	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	
<b>Service Gas</b>	-	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	
<b>Mounting Method</b>	-	Strap	Strap	Strap	Strap	Strap	Strap	Strap	Strap	Strap	Strap & Collar	Strap	Strap	Strap & Collar	Strap & Collar	Strap & Collar	Strap & Collar	Strap & Collar	Strap & Collar	Strap & Collar	Strap & Collar	Strap & Collar	
<b>Adapter Thread</b>	-	2-12 UN-2B	2-12 UN-2B	2-12 UN-2B	2-12 UN-2B	1-1/2-12 UN-2B	1-5/8-12 UN Nonstandard Pitch	1-5/8-12 UN Nonstandard Pitch	1-1/2-12 UN-2B	1-5/8-12 UN Nonstandard Pitch	1-1/2-12 UN-2B	2-12 UN-2B	2-12 UN-2B	M45 X 2	SAE-20	SAE-20	SAE-20	SAE-20	SAE-20	3/8 VCO Tube Male & Female	SAE-20	SAE-20 & SAE-8	SAE-20 & SAE-8
<b>Valve Interface Seal</b>	-	SAE	SAE	SAE	SAE	SAE	SAE (Dual)	SAE (Dual)	SAE (Dual)	SAE (Dual)	SAE	SAE	SAE	SAE (Dual)	SAE (Dual)	SAE (Dual)	SAE (Dual)	SAE (Dual)	SAE (Dual)	N/A	SAE (Dual)	SAE (Dual)	SAE (Dual)
<b>Approved Tank Valves</b>	-	Customer Valve KGV70S See Note 3	GFI TV-175 See Note 3	Not Available OTAV See Note 3	GFI TV-175 See Note 3	Customer Valve KGV70S See Note 3	Customer Valve See Note 3	Customer Valve See Note 3	OMB 870.88.934 See Note 3	Customer Valve See Note 3	Dynetek BV-700-04-0 See Note 3	Not Available Manual Valve See Note 3	Not Available Manual Valve See Note 3	OMB 875.88.080 875-88.080B 875.88.080C See Note 3	See Note 3	See Note 3	See Note 3	See Note 3	See Note 3	See Note 3	See Note 3	See Note 3	See Note 3
<b>Design Life</b>	<b>years</b>	15	15	20	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	20	20	20	20	1,820 Cycles	20	15	15	
<b>Code/Standard Compliance Europe / Asia</b>		<b>EHP Rev. 12b</b>	<b>EHP</b>	<b>EHP Rev. 12b</b>	<b>EHP</b>	<b>Reiji Kijun</b>	<b>TBD</b>	<b>EC79<sup>6</sup></b>	<b>EC79<sup>6</sup></b>	<b>TBD</b>	<b>EC79</b>	<b>TBD</b>	<b>Reiji Kijun</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	
<b>Tank Capacity (Water Volume)</b>	<b>Liter</b>	26	34	38	39	51	58	76	76	118	120	129	164	332	445	644	594	810	901	936	936	994	
<b>Diameter, Max. @ 125% SP</b>	<b>mm</b>	289	302	362	302	424	452	504	504	597	340	427	424	606	690	690	745	783	1,022	828	782	782	
<b>Length, Max. @ 125% SP</b>	<b>mm</b>	769	842	733	941	753	705	842	721	800	2,182	1,651	1,641	2,039	1,899	2,561	2,042	2,306	1,371	2,607	2,607	2,753	
<b>Tank Weight (without valve)</b>	<b>kg</b>	24	16	35	18	43	41	51	51	73	80	92	49	241	141	178	153	211	41	239	229	245	
<b>Service Pressure @ 15°C</b>	<b>MPa</b>	70	35	70	35	70	70	70	70	70	70	70	35	70	35	35	35	35	8.3	35	35	35	
<b>Tank + Gas Weight @ 35/70 MPa</b>	<b>kg</b>	25	17	37	19	45	43	54	54	78	85	97	53	254	152	193	167	230	47	261	251	269	
<b>H<sub>2</sub> Mass @ 35/70 MPa<sup>1</sup></b>	<b>kg</b>	1.0	0.8	1.5	0.9	2.1	2.3	3.1	3.1	4.7	4.8	5.2	3.9	13.4	10.7	15.5	14.3	19.5	6.0	22.5	22.5	23.9	
<b>H<sub>2</sub> Volume @ 35/70 MPa<sup>1</sup></b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>	12.3	9.6	17.9	11.0	24.1	28.0	35.9	35.9	56.9	56.7	60.9	46.2	156.7	125.5	181.6	167.5	228.4	71.5	263.9	263.9	280.2	
<b>Usable Gas Mass @ 2-35/70 MPa<sup>1</sup></b>	<b>kg</b>	1.0	0.8	1.5	0.9	2.0	2.2	2.9	2.9	4.6	4.6	5.0	3.7	12.8	10.0	14.4	13.3	18.1	4.5	20.9	20.9	22.2	
<b>Container Temperature</b>	<b>°C</b>	-40 to +82	-40 to +82	-40 to +82	-40 to +82	-40 to +82	-40 to +82	-40 to +82	-40 to +82	-40 to +82	-40 to +82	-40 to +82	-40 to +82	-40 to +82	-40 to +82	-40 to +82	-40 to +82	-40 to +82	-40 to +82	0 to +82	-40 to +82	-40 to +82	
<b>Settled Gas Temperature</b>	<b>°C</b>	-40 to +57	-40 to +57	-40 to +57	-40 to +57	-40 to +57	-40 to +57	-40 to +57	-40 to +57	-40 to +57	-40 to +57	-40 to +57	-40 to +57	-40 to +57	-40 to +57	-40 to +57	-40 to +57	-40 to +57	-40 to +57	0 to +57	-40 to +57	-40 to +57	
<b>Code/Standard Compliance North America</b>		<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>TBD</b>	<b>DOT SP</b>	<b>DOT SP</b>	
<b>Tank Capacity (Water Volume)</b>	<b>Gallons</b>	6.9	9.0	10.0	10.3	13.5	15.3	20.1	20.1	31.2	31.7	34.1	43.3	87.7	117.6	170.1	156.9	214.0	238.0	247.3	247.3	262.6	
<b>Diameter, Max. @ 125% SP</b>	<b>Inches</b>	11.4	11.9	14.2	11.9	16.7	17.8	19.8	19.8	23.5	13.4	16.8	16.7	23.9	27.2	27.2	29.3	30.8	40.3	32.6	30.8	30.8	
<b>Length, Max. @ 125% SP</b>	<b>Inches</b>	30.3	33.1	28.9	37.0	29.7	27.8	28.4	28.4	31.5	85.9	65.0	64.6	80.3	74.8	100.8	80.4	90.8	54.0	102.6	102.6	108.4	
<b>Tank Weight (without valve)</b>	<b>lbs</b>	53	35	77	40	95	90	112	112	161	176	202	108	530	310	392	337	464	91	526	504	539	
<b>Service Pressure @ 70°F</b>	<b>psi</b>	10,153	5,076	10,153	5,076	10,153	10,153	10,153	10,153	10,153	10,153	10,153	5,076	10,153	5,076	5,076	5,076	5,076	1,200	5,076	5,076	5,076	
<b>Tank + Gas Weight @ 5,076/10,153 psi</b>	<b>lbs</b>	55	37	80	42	99	95	119	119	171	186	214	116	559	333	425	367	506	104	574	552	591	
<b>H<sub>2</sub> Mass @ 5,076/10,153 psi<sup>4</sup></b>	<b>lbs</b>	2.3	1.8	3.3	2.0	4.4	5.1	6.6	6.6	10.3	10.5	11.3	8.5	29.0	23.1	33.4	30.9	42.1	12.9	48.6	48.6	51.6	
<b>H<sub>2</sub> Volume @ 5,076/10,153 psi<sup>4</sup></b>	<b>SCF</b>	436	340	637	390	856	973	1,275	1,275	1,979	2,013	2,164	1,638	5,569	4,445	6,433	5,933	8,091	2,474	9,349	9,349	9,929	
<b>Usable Gas Mass @ 290-5,076/10,153 psi<sup>4</sup></b>	<b>lbs</b>	2.2	1.6	3.2	1.9	4.3	4.9	6.4	6.4	9.9	10.0	10.8	7.9	27.8	21.5	31.1	28.7	39.2	9.6	45.3	45.3	48.1	
<b>Gasoline Gallon Equiv. (NIST)<sup>2</sup></b>	<b>GGE</b>	1.0	0.8	1.5	0.9	2.1	2.3	3.1	3.1	4.8	4.8	5.2	3.9	13.4	10.7	15.5	14.3	19.4	5.9	22.5	22.5	23.9	
<b>Diesel Gallon Equiv. (NIST)<sup>2</sup></b>	<b>DGE</b>	0.9	0.7	1.3	0.8	1.8	2.1	2.7	2.7	4.2	4.2	4.6	3.5	11.7	9.4	13.6	12.5	17.1	5.2	19.7	19.7	20.9	
<b>Container Temperature</b>	<b>°F</b>	-40 to +185	-40 to +185	-40 to +185	-40 to +185	-40 to +185	-40 to +185	-40 to +185	-40 to +185	-40 to +185	-40 to +185	-40 to +185	-40 to +185	-40 to +185	-40 to +185	-40 to +185	-40 to +185	-40 to +185	-40 to +185	32 to +185	-40 to +185	-40 to +185	
<b>Settled Gas Temperature</b>	<b>°F</b>	-40 to +135	-40 to +135	-40 to +135	-40 to +135	-40 to +135	-40 to +135	-40 to +135	-40 to +135	-40 to +135	-40 to +135	-40 to +135	-40 to +135	-40 to +135	-40 to +135	-40 to +135	-40 to +135	-40 to +135	-40 to +135	32 to +135	-40 to +135	-40 to +135	

1 - H<sub>2</sub> Mass calculated based on hydrogen density at 15°C  
 2 - Gasoline and Diesel equivalence determined @ 35 MPa (5,076 psi) and 70°F: (GGE = 1.019\*H<sub>2</sub> kg, DGE = .877\*GGE)  
 3 - Contact Quantum for a list of approved valves and part numbers  
 4 - H<sub>2</sub> Mass calculated based on hydrogen density at 70°F  
 5 - No foam domes required per DOT SP  
 6 - Testing complete, certificate has not been applied for

<https://epact.energy.gov/fuel-conversion-factors>

[https://www.energy.ca.gov/almanac/transportation\\_data/gge.html](https://www.energy.ca.gov/almanac/transportation_data/gge.html)

**ANEXO IV:**  
**Ficha técnica**  
**compresor**  
**Hiberbaric**

# TECNOLOGÍA DE COMPRESIÓN DE HIDRÓGENO A ALTAS PRESIONES



Soluciones completas y avanzadas de  
**Compresión de Hidrógeno hasta 1.000 bar**

**GRUPOS COMPRESORES DE H<sub>2</sub> A ALTA PRESIÓN  
PARA MOVILIDAD SOSTENIBLE Y DESCARBONIZADA**

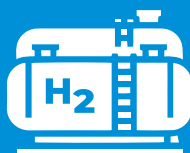
Hiperbaric es el líder mundial en tecnología de altas presiones, centrado en el desarrollo, fabricación y comercialización de grupos compresores de H<sub>2</sub> de hasta 500 y 1.000 bar.

El hidrógeno se tiene que comprimir a muy altas presiones mediante innovadoras tecnologías para poder hacer su uso extensible a diferentes ámbitos.

## Aplicaciones de la compresión de hidrógeno



Estaciones de recarga  
(movilidad sostenible)

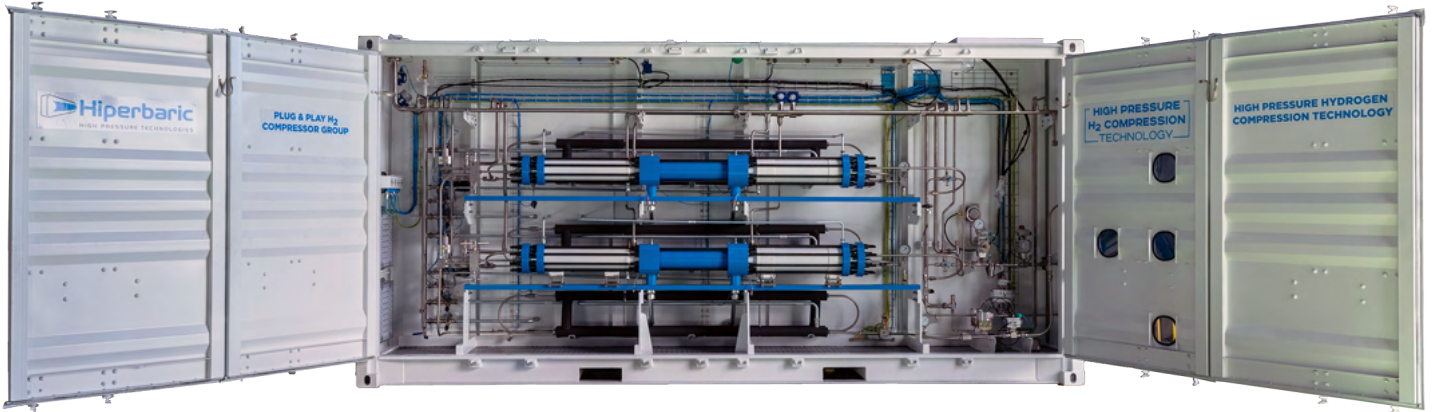


Soluciones de  
almacenamiento



I + D + i en  
nuevas aplicaciones

# Grupos compresores Plug&Play: seguros, eficientes y fiables



Gama de grupos compresores adaptables a cualquier nivel de producción y demanda, y a diferentes presiones de aspiración y descarga: desde 20 bar hasta 500 o 950 bar

## Componentes del Grupo Compresor



El componente más importante del grupo compresor es el multiplicador o multiplicadores de alta presión, con distintas secciones para llevar a cabo la compresión.



Ciclo de compresión en dos etapas con refrigeración entre las mismas.



Refrigeración eficiente al producirse la extracción de calor cerca del foco.



Máxima pureza del H<sub>2</sub> por la ausencia de aceite en los pistones.

## Características técnicas de los Grupos Compresores

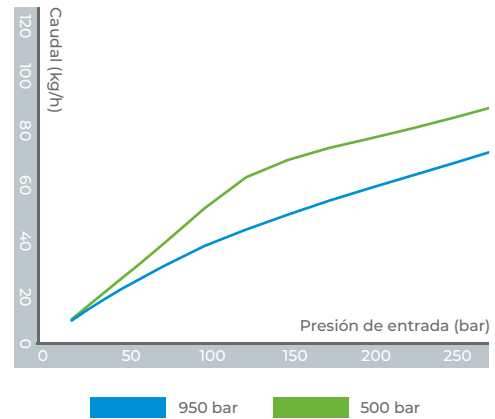
	Hiperbaric 1 KS 50	Hiperbaric 1 KS 95
Presión de admisión del H <sub>2</sub>	<b>20-40 bar</b>	<b>20-200 bar</b>
Presión de salida del H <sub>2</sub>	<b>Hasta 500 bar</b>	<b>Hasta 950 bar</b>
Número de etapas	<b>2</b>	<b>2</b>
Carrera	<b>Simple</b>	<b>Simple</b>
Reducción de la potencia	<b>0 hasta el 100% del caudal *</b>	<b>0 hasta el 100% del caudal *</b>
Caudal aproximado	<b>26 kg/h (desde 30 hasta 500 bar)</b>	<b>15 kg/h (desde 30 hasta 950 bar)</b>
Temperatura de salida	<b>&lt; 40°C</b>	<b>&lt; 40°C</b>
Superficie ocupada	<b>Un contenedor Plug &amp; PLay de 20' **</b>	
Variantes	<b>Posibilidad de incluir un segundo compresor que duplica el caudal ***</b>	

\* Gracias a la unidad hidráulica de la bomba axial utilizada

\*\* Incluye sistemas de enfriamiento, control, seguridad y ventilación







\*\*\* Modelos Hiperbaric 2 KS 50 (2 multiplicadores simples-500 bar) y Hiperbaric 2 KS 95 (2 multiplicadores simples-950 bar)

### Caudal y presión de entrada (1 compresor 45 kW)



Inlet pressure	Hiperbaric 1 KS 50-caudal	Hiperbaric 1 KS 95-caudal
10 bar	<b>9,31 kg/h</b>	<b>5,42 kg/h</b>
20 bar	<b>14,62 kg/h</b>	<b>10,34 kg/h</b>
30 bar	<b>17,55 kg/h</b>	<b>14,46 kg/h</b>
40 bar	<b>33,32 kg/h</b>	<b>18,28 kg/h</b>
100 bar		<b>37,72 kg/h</b>
150 bar		<b>49,16 kg/h</b>
200 bar		<b>59 kg/h</b>

## Ventajas y beneficios

-  El concepto "Oil Free" garantiza una alta pureza del hidrógeno.
-  Mejor enfriamiento por las innovadoras camisas del multiplicador.
-  Tecnología avanzada de pistón alternativo
-  Mayor eficiencia en la compresión requiriendo menos energía.
-  Diseño modular y escalable que puede incluir uno o dos multiplicadores en función del caudal de hidrógeno deseado.
-  Seguro y fiable, gracias al sistema de venteo que monitoriza, evacua y detiene el compresor ante cualquier posible detección de gas.

## Hidrógeno para la movilidad del futuro

En las hidrogeneras, el H<sub>2</sub> en forma de gas comprimido a alta presión se suministra a los vehículos de manera rápida, limpia y segura.



## H<sub>2</sub> renovable, seguro compacto y eficiente

El almacenamiento de H<sub>2</sub> se postula como uno de los principales factores clave para impulsar la Economía del Hidrógeno.

## I+D+i para la transición energética

Compresión de H<sub>2</sub> para el desarrollo de nuevas tecnologías, procesos y soluciones en toda la cadena de valor del hidrógeno renovable.



### EXPERIENCIA DEL LÍDER MUNDIAL EN TECNOLOGÍAS DE ALTAS PRESIONES

Hiperbaric es una compañía global referente en el desarrollo de tecnologías para el procesado por altas presiones (HPP) y el prensado isostático en caliente (HIP) para diferentes sectores y aplicaciones.

Tiene más de 1.000 compresores de agua hasta 6.000 bar para la aplicación HPP instalados en más de 50 países. Ahora, es un actor clave en la Economía del Hidrógeno con soluciones de compresión de H<sub>2</sub>.

SERVICIO POSTVENTA **24** 

- Servicio completo de instalación y puesta en marcha, mantenimiento planificado y suministro de piezas de repuesto.
- Técnicos de campo altamente cualificados para ofrecer una asistencia de confianza dónde y cuándo sea necesario.
- Diagnóstico y monitorización remota para predecir posibles fallos antes de que surja la avería.

HIPERBARIC, S.A.  
Condado de Treviño, 6  
Pol. Ind. Villalonguejar  
09001 Burgos | ESPAÑA  
+34 947 473 874

[www.hiperbaric.com](http://www.hiperbaric.com)

HIPERBARIC USA  
CORPORATION  
2250 NW 84th Ave #101  
Miami, FL 33122, EE.UU.  
+1 305 639 9770

**ANEXO V:**

**Ficha técnica**

**dispensador Kraus**

# Kraus Hydrogen Dispenser

Hydrogen is emerging as a fuel of the future. Kraus Global hydrogen dispensers are an attractive, high quality solution to your unique hydrogen dispensing needs. These dispensers feature the latest innovations in safety and operation, and have been designed to provide the familiar look and functionality of standard gasoline dispensers to ensure a positive customer experience. Kraus offers a variety of dispenser configurations and options, including single or dual hoses, cabinet styles, various metering options, and internal sequencing, to ensure your every need is met. Kraus dispensers are designed for a full range of applications including high speed bus refueling, public filling stations, and fleet refueling operations.



### FEATURES

- Single/dual hose configurations
- Single line, two line, or three line systems
- Fleet and Retailseries cabinets
- Kraus MICON™ 500H electronic computer register, specifically designed for hydrogen fueling applications
- High pressure solenoid valves or ball valves for control
- Field programming via hand-held infrared Info Pac unit
- Coriolis based mass flow meters
- Electronically controlled internal sequencing
- Kraus HFS pressure and temperature compensated refueling
- Safety breakaway included on each hose
- Ability to interface with most POS and card reader systems
- International currency options available
- Captive vent recovery system

### OPTIONS

<b>CABINET STYLES</b>	Fleet and Retail
<b>NUMBER OF HOSES</b>	One or two
<b>INLET LINES</b>	Single line inlet for buffer fill or remote Two line inlet for 2-bank sequencing or buffer/direct-fill combo Three line inlet for internal sequencing
<b>FLOW RATES</b>	3,500 SCFM 5,000 SCFM
<b>FILL PRESSURE</b>	3,600 psig (230 Bar) 5,000 psig (350 Bar) 10,000 psig (700 Bar)

### SPECIFICATIONS

- Fill pressures: 3,600/5,000/10,000 psig at 70°F (250/350/700 barg at 20°C)
- Operating temperature: -40°C to +50°C
- Flow rates up to 5,000 SCFM (8,000 Nm<sup>3</sup>/Hr)
- Accuracy: +/- 1%
- Electrical supply: 120/240 VAC, 50/60Hz

#### North America & Worldwide:

- NEC Class I Division I/II Group B hazardous locations
- NFPA 2 compliant as applicable to hydrogen

#### Europe

- IEC Zone 1 Group IIB hazardous locations



# **ANEXO VI:**

## **Datos PVGIS**

# Performance of grid-connected PV

PVGIS-5 estimates of solar electricity generation:

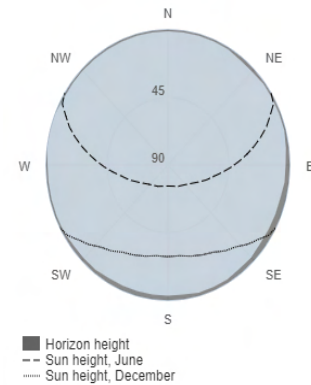
## Provided inputs:

Latitude/Longitude: 37.138,-3.691  
 Horizon: Calculated  
 Database used: PVGIS-SARAH2  
 PV technology: Crystalline silicon  
 PV installed: 1 kWp  
 System loss: 14 %

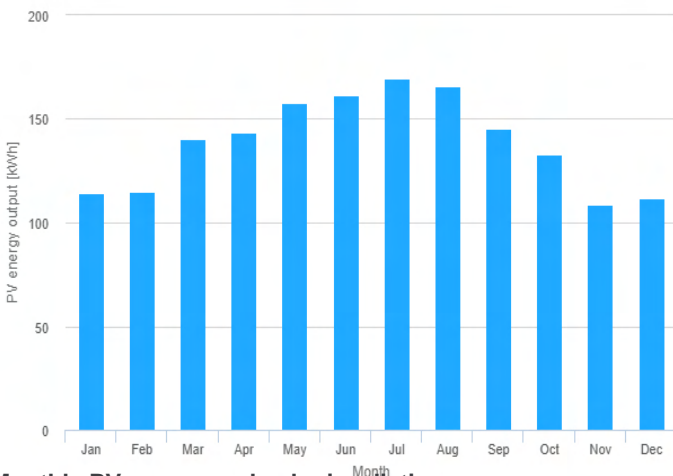
## Simulation outputs

Slope angle: 30 °  
 Azimuth angle: 0 °  
 Yearly PV energy production: 1666.71 kWh  
 Yearly in-plane irradiation: 2175.85 kWh/m<sup>2</sup>  
 Year-to-year variability: 54.82 kWh  
 Changes in output due to:  
 Angle of incidence: -2.6 %  
 Spectral effects: 0.63 %  
 Temperature and low irradiance: -9.13 %  
 Total loss: -23.4 %

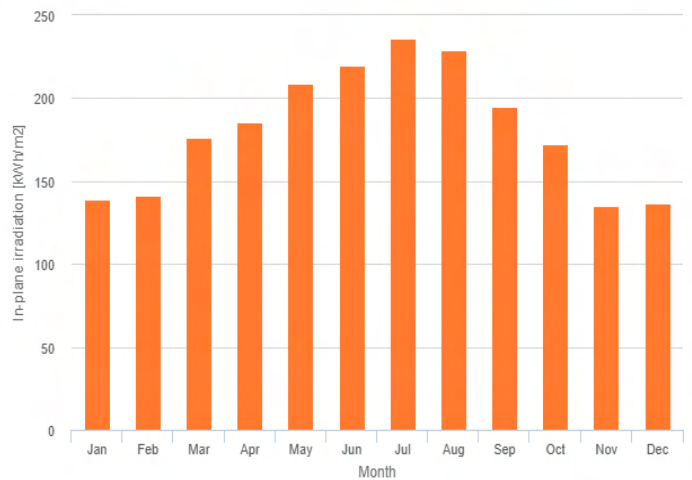
## Outline of horizon at chosen location:



## Monthly energy output from fix-angle PV system:



## Monthly in-plane irradiation for fixed-angle:



## Monthly PV energy and solar irradiation

Month	E <sub>m</sub>	H(i) <sub>m</sub>	SD <sub>m</sub>
January	114.3	139.2	19.2
February	114.6	141.3	19.6
March	140.5	176.5	18.2
April	143.5	185.5	12.7
May	157.5	208.9	11.9
June	161.5	220.0	4.8
July	169.3	235.8	4.0
August	165.9	229.4	4.4
September	145.6	195.0	9.0
October	133.1	172.6	11.2
November	108.9	135.3	14.6
December	111.9	136.4	11.5

E<sub>m</sub>: Average monthly electricity production from the defined system [kWh].

H(i)<sub>m</sub>: Average monthly sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system [kWh/m<sup>2</sup>].

SD<sub>m</sub>: Standard deviation of the monthly electricity production due to year-to-year variation [kWh].

**ANEXO VII:**  
**Ficha técnica**  
**módulos solares**

# TALLMAX MODULE

## TSM-PD14

**72 CÉLULAS**  
MÓDULO MULTICRISTALINO

**320-340W**  
RANGO DE POTENCIA

**17,5%**  
MÁXIMA EFICIENCIA

**0/+5W**  
TOLERANCIA POSITIVA  
DE POTENCIA

Pays Fundada en 1997, Trina Solar es un proveedor líder de soluciones fotovoltaicas. Creemos que la cooperación con nuestros socios es crítica para alcanzar el éxito. Trina Solar distribuye hoy sus productos a más de 60 países del mundo. Trina Solar es capaz de suministrar un servicio excepcional a cada cliente en cada mercado, y la innovación y fiabilidad de sus productos viene respaldadas por ser Trina Solar una compañía sólida y estable. Estamos comprometidos en construir colaboraciones estratégicas y mutuamente beneficiosas con instaladores, distribuidores y desarrolladores de proyectos de todo el mundo.

### Productos detallados y certificados de sistema

IEC61215/IEC61730/UL1703/IEC61701/IEC62716  
 ISO 9001: Sistema de gestión de calidad  
 ISO 14001: Sistema de gestión medioambiental  
 ISO14064: Verificación de gases efecto invernadero  
 OHSAS 18001: Sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional



### Ideal para grandes proyectos

- Mayor superficie con más potencia que disminuye el tiempo de instalación y los costes del BOS
- Optimizado para instalaciones con seguidor



### Uno de los módulos con mayor confianza de la industria

- Rendimiento probado en campo
- Solidez financiera de Trina Solar confirmada por bancos e inversores



### Altamente fiable gracias a su riguroso control de calidad

- Todos los módulos han de pasar una inspección de electroluminescencia
- Más de 30 tests en fábrica (UV, TC, HF, y muchos más)
- Los tests en fábrica van más allá de los requisitos de certificación
- Resistente a la degradación inducida por potenciales eléctricos
- Certificado UL 1000 V / IEC 1000 V

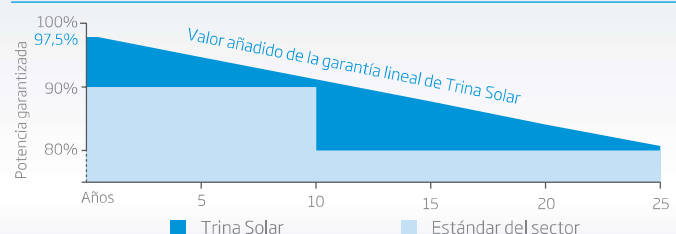


### Certificado para condiciones medioambientales extremas

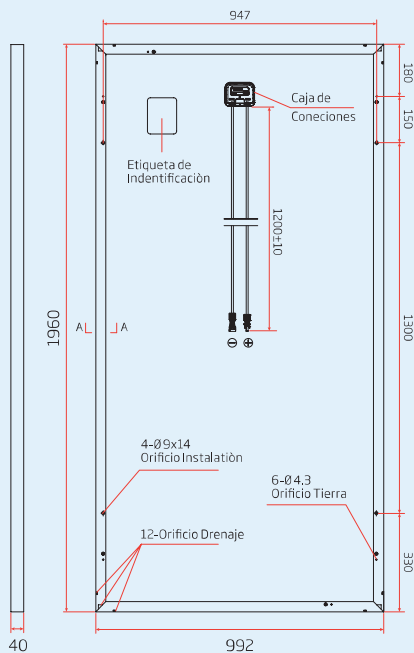
- Cargas de viento de 130 km/h (2400 Pa)
- Cargas de nieve de 900 kg por módulo (5400 Pa)
- Piedra de granizo de de 35 mm a 97 km/h
- Resistencia al amoníaco
- Resistencia a la niebla salina
- Resistencia a la abrasión por arena y polvo

### GARANTÍA DE POTENCIA LINEAL

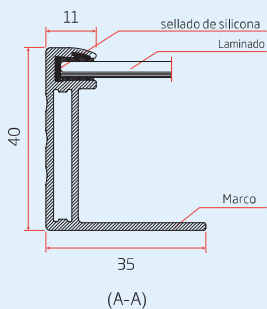
10 años garantía de producto · 25 años garantía de potencia lineal



## DIMENSIONES DEL MÓDULO FV TSM-PD14 (Unidad: mm)

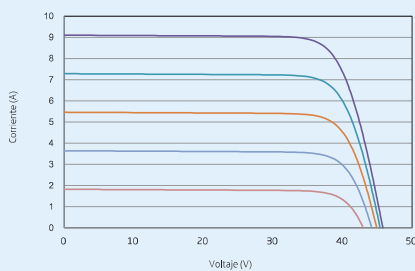


Vista trasera

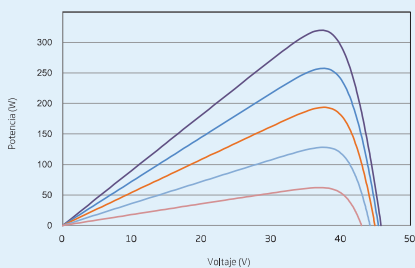


(A-A)

## CURVAS I-V DEL MÓDULO FV (320W)



## CURVAS P-V DEL MÓDULO FV (320W)



DATOS ELÉCTRICOS EN CONDICIONES STC	TSM-320 PD14	TSM-325 PD14	TSM-330 PD14	TSM-335 PD14	TSM-340 PD14
Potencia nominal-P <sub>máx</sub> (Wp)*	320	325	330	335	340
Tolerancia de potencia nominal (W)	0/+5	0/+5	0/+5	0/+5	0/+5
Tensión en el punto P <sub>máx</sub> -V <sub>MP</sub> (V)	37,1	37,2	37,4	37,6	37,8
Corriente en el punto P <sub>máx</sub> -I <sub>MPP</sub> (A)	8,63	8,73	8,83	8,91	8,99
Tensión en circuito abierto-V <sub>OC</sub> (V)	45,5	45,6	45,8	46,0	46,2
Corriente de cortocircuito-I <sub>SC</sub> (A)	9,15	9,19	9,28	9,35	9,42
Eficiencia del módulo η <sub>m</sub> (%)	16,5	16,7	17,0	17,2	17,5

STC: Irradiancia 1000W/m<sup>2</sup>, temperatura de célula 25°C, masa de aire AM1.5  
\*Tolerancia en la medida: ±3%

DATOS ELÉCTRICOS EN CONDICIONES TONC	TSM-320 PD14	TSM-325 PD14	TSM-330 PD14	TSM-335 PD14	TSM-340 PD14
Potencia máx.-P <sub>MAX</sub> (Wp)	237	241	245	249	252
Tensión en el punto P <sub>máx</sub> -V <sub>MPP</sub> (V)	34,3	34,4	34,6	34,8	35,0
Corriente en el punto P <sub>máx</sub> -I <sub>MPP</sub> (A)	6,92	7,00	7,08	7,14	7,21
Tensión en circuito abierto-V <sub>OC</sub> (V)	42,1	42,2	42,4	42,6	42,8
Corriente de cortocircuito-I <sub>SC</sub> (A)	7,39	7,42	7,49	7,55	7,60

NOCT: Irradiance at 800 W/m<sup>2</sup>, Ambient Temperature 20 °C, Wind Speed 1 m/s.

## DATOS MECÁNICOS

Células solares	Multicristalinas 156,75 × 156,75 mm
Distribución de las células	72 células (6 x 12)
Dimensiones del módulo	1960 × 992 × 40 mm
Peso	22,5 kg
Vidrio	3,2 mm, alta transparencia, recubrimiento AR y vidrio solar templado
Capa trasera	Blanca
Marco	Aleación de Aluminio anodizado
Caja de conexiones	IP 67 or IP 68 rated
Cables	Resistente a los rayos UV, sección de cables 4,0 mm <sup>2</sup> , 1200 mm
Conector	Países de la UE: 28 MC4 / UTX / TS4, Países no miembros de la UE: 28 QC4 / TS4

## LÍMITES DE TEMPERATURA

Temperatura de Operación Nominal de la Célula (TONC)	44°C (±2K)
Coefficiente de temperatura de P <sub>MAX</sub>	-0,41%/K
Coefficiente de temperatura de V <sub>OC</sub>	-0,32%/K
Coefficiente de temperatura de I <sub>SC</sub>	0,05%/K

## LÍMITES OPERATIVOS

Temperatura de operación	-40 a +85°C
Tensión máxima del sistema	1000V DC (IEC) 1000V DC (UL)
Capacidad máxima del fusible*	15 A
Carga de nieve	5400 Pa
Carga de viento	2400 Pa

\*NO conectar fusibles en la caja de conexiones con dos o más strings en conexión paralela

## GARANTÍA

10 años de garantía de fabricación

25 años de garantía de potencia lineal

(Consulte la garantía de producto para más información)

## CONFIGURACIÓN DE EMBALAJE

Módulos por caja: 27 uds.

Módulos por contenedor de 40': 648 uds.