



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE
ENERGÍA BASADO EN HIDRÓGENO Y PILAS DE
COMBUSTIBLE. USO Y APLICACIÓN EN
VEHÍCULOS TOYOTA

Autor: Joaquín Pérez Tena
Director: Jaime Navarro Ocón

Madrid

Junio 2023

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título **Análisis de un Sistema de Generación de energía basado en hidrógeno y pilas de combustible. Uso y aplicación en vehículos Toyota** en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2022/2023 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.: Joaquín Pérez Tena Fecha: 26/ 06/ 2023



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Jaime Navarro Ocón Fecha: 26/ 06/ 2023





COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA BASADO EN HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE. USO Y APLICACIÓN EN VEHÍCULOS TOYOTA

Autor: Joaquín Pérez Tena

Director: Jaime Navarro Ocón

Madrid

Julio 2022

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría ante todo dar las gracias a mi tutor del proyecto, Jaime Navarro Ocón, Director de Proyectos de Fin de Máster y Grado de la Universidad Pontificia Comillas ICAI, por guiarme en este TFG, compartir sus conocimientos y estar disponible siempre que he requerido su ayuda. Quiero también agradecer a la Universidad Pontificia de Comillas por la formación recibida durante mi periodo universitario y por la posibilidad de haber conocido a tanta gente buena entre profesores y alumnos. Finalmente quiero expresar por encima de todo mi agradecimiento a mis padres por haberme brindado la oportunidad de estudiar en esta prestigiosa Universidad y por haberme dado la tranquilidad de saber que cuento con su respaldo, motivación y apoyo para llegar a alcanzar mis objetivos.

Análisis de un sistema de generación de energía basado en hidrógeno y pilas de combustible. Uso y aplicación en vehículos Toyota

Autor: Pérez Tena, Joaquín.

Director: Navarro Ocón, Jaime.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

1- Introducción

Debido al actual problema del cambio climático, y con la ambición de reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), hoy día se están buscando fuentes de energía limpias y no contaminantes como alternativa a los combustibles fósiles. Las más usadas a nivel industrial son la energía solar, eólica..., y el hidrógeno verde. El hidrógeno verde produce una energía 100% limpia y no deja rastro de emisiones de CO. Es a su vez la alternativa más saludable con el medio ambiente de producir hidrógeno, ya que en vez de usar combustibles fósiles se forma a través de agua y electricidad generada por energías renovables como la solar o la eólica. En este TFG se analizará el papel del hidrógeno verde en el sector del transporte y más en concreto un modelo de coche concreto, el Toyota Mirai, donde todavía está en vías de implementación. El estudio incluirá un análisis económico acerca de la producción del hidrógeno y este tipo de vehículos, y un análisis ambiental en comparación con vehículos de combustibles fósiles.

2- Descripción del proyecto

El proyecto consiste en realizar un análisis económico y ambiental sobre la producción del hidrógeno verde en función del número de vehículos y sobre la producción de este tipo de turismos.

Para ello se hará un estudio sobre una estación de repostaje de hidrógeno [1], que tendrá incluida placas fotovoltaicas para producir la electricidad necesaria en la elaboración de hidrógeno. Se incluirán varios escenarios en los que variará el número de vehículos y la radiación solar recibida en las placas. Se hará hincapié en los distintos equipamientos que necesita la planta para su funcionamiento, así como las condiciones en las que operan. [2]

Se hará un análisis al vehículo Toyota Mirai y a sus componentes internas que forman parte del ciclo del hidrógeno. Esto tendrá como objetivo elaborar un análisis económico y ambiental y compararlo con vehículos con combustibles alternativos de tipo contaminante.

3- Descripción del modelo

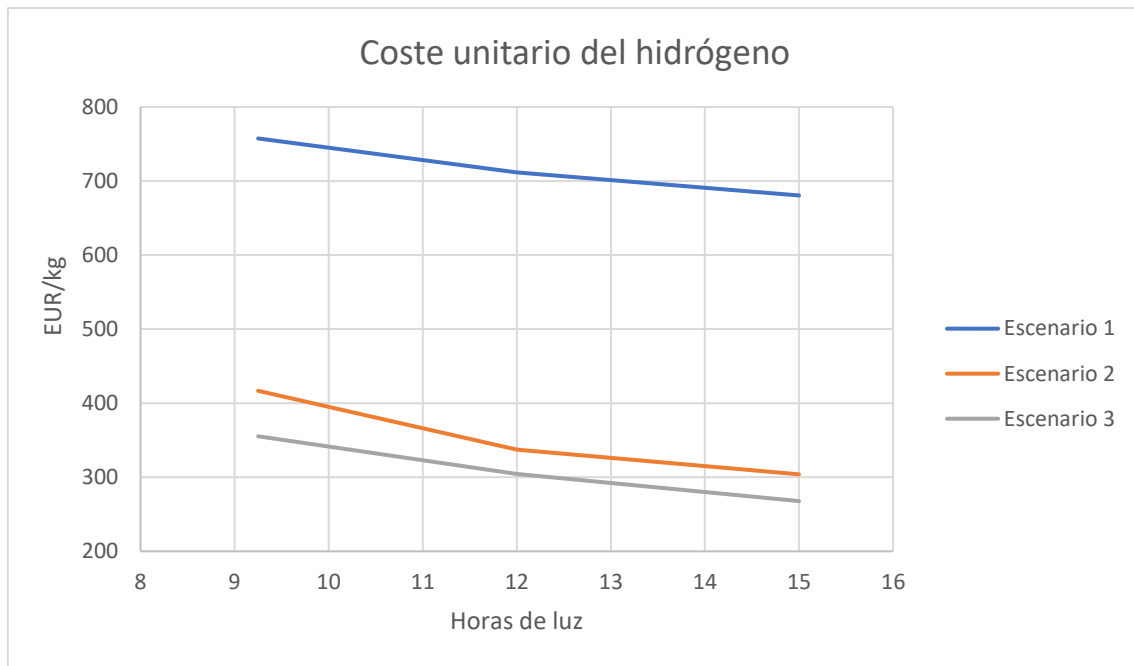
Dado que se van a realizar los cálculos en una estación de repostaje, se harán tres escenarios diferentes en cuanto a número de vehículos repostando: cinco, veinte y cuarenta vehículos diarios. El hidrógeno verde es una tecnología en desarrollo y en proceso de expansión, pero todavía tiene una baja implantación territorial y sería delirante pensar en un escenario con una gran flota de turismos en circulación, por lo menos a corto plazo, por lo que se ha sido conservador a la hora de escoger el número de vehículos para el modelo. Hay otros tres escenarios adicionales en los que cambia la radiación solar en función de la época del año, por lo que las placas producen una mayor o menos cantidad de electricidad dependiendo del caso. Las estimaciones económicas y ambientales del proyecto se pueden resumir en tres:

- Análisis económico de la producción de hidrógeno
- Análisis económico de la producción de un vehículo tipo pila de combustible
- Análisis ambiental de un vehículo tipo pila de combustible

Los dos primeros factores serán de alta importancia a la hora de estudiar una viabilidad práctica en el futuro.

4- Resultados

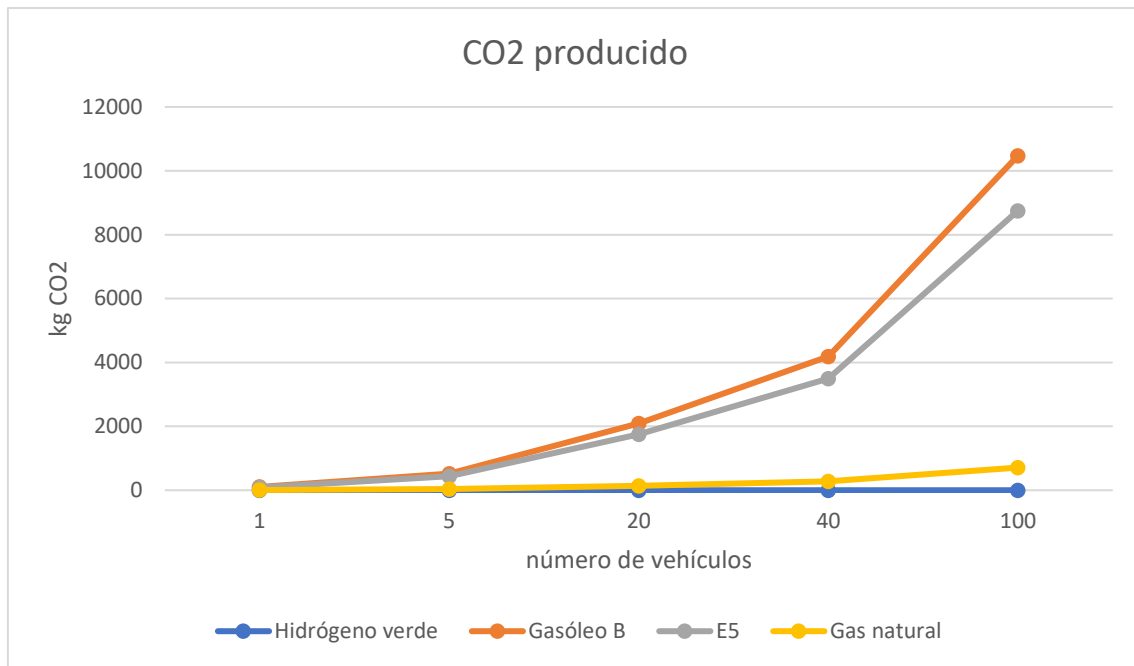
En la gráfica inferior se muestra el coste unitario de producción del hidrógeno en función del número de vehículos repostando en la estación al día. Hay que explicar que los escenarios representan casos en los que repostan cinco, veinte y cuarenta vehículos al día, respectivamente. Se ve que a medida que aumenta ese número el precio del hidrógeno disminuye de manera clara, así como las horas de radiación solar.



En la siguiente tabla se muestra el coste total calculado del equipamiento de un Toyota Mirai involucrado en el ciclo de vida del hidrógeno con sus costes totales. Se muestra a su vez el coste medio de un vehículo con motor de combustión, para hacer la comparativa. Como se ve, el precio de un vehículo eléctrico es sustancialmente más elevado que el de un vehículo convencional, debido en gran parte a la pila de combustible.

	Coste
Depósito de gas	2 210 €
Pila de combustible	30 672 €
Batería de litio	187,72 €
Motor eléctrico	1350 €
Coste equipamiento eléctrico	34 419,72 €
Coste motor combustión	10 000 €

Por último, en la gráfica inferior se muestra la comparativa ambiental de un vehículo propulsado por hidrógeno verde con otros coches de otros tipos de combustible. Como se ve, el hidrógeno verde es de emisiones cero y no emite gases contaminantes o de efecto invernadero.



5- Conclusiones

Los análisis económico y medioambiental muestran resultados diferenciados. Mientras que económicamente es evidente la enorme diferencia económica que hay entre las dos soluciones en favor de los combustibles fósiles, a nivel medioambiental el hidrógeno verde muestra una clara ventaja. Sus cero emisiones en operación hacen a esta tecnología un referente de cara al futuro. Con nuevas medidas y estimaciones el hidrógeno se puede convertir en una referencia a corto plazo. Algunas de estas serían:

- Una mayor producción industrial de vehículos de este tipo. Como se ve en el coste de producción del hidrógeno, a mayor volumen de coches mayor eficiencia económica. Esto se debe principalmente a que los costes de adquisición y mantenimiento permanecen invariables con el número de coches, por lo que quedan amortizados si se hace un gran uso de estos. Hay que tener en cuenta además de que la estimación hecha es mensual, realizado así para estudiar los diferentes escenarios de luz, y hay que pensar que la vida útil de estos aparatos va más allá.
- Una mayor investigación y desarrollo en los vehículos de pila de combustible. Hay que tener en cuenta que la flota en España de este tipo de vehículos es muy reducida, por lo que no va a haber una mayor implantación en la población hasta que haya una estabilización de los precios.

6- Referencias

- [1] Hidrogeno18, 2019. Procesos de producción de Hidrógeno. [online] Hidrogeno18.wixsite.com. Accesible en:
<<<https://hidrogeno18.wixsite.com/hidrogeno/blank-cjg9>>>
- [2] Acciona, 2020. [online]. Accesible en:
https://www.acciona.com/es/actualidad/noticias/acciona-y-enagas-lanzan-su-plantaindustrial-de-hidrogeno-verde-en-mallorca/?_adin=02021864

ANALYSIS OF A POWER GENERATION SYSTEM BASED ON HYDROGEN AND FUEL CELLS. USE AND APPLICATION IN TOYOTA VEHICLES

Author: Pérez Tena, Joaquín.

Supervisor: Navarro Ocón, Jaime.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

1- Introduction

Due to the current problem of climate change, and with the ambition to reduce carbon dioxide (CO₂) emissions, clean and non-polluting energy sources are now being sought as an alternative to fossil fuels. The most used at an industrial level are solar energy, wind ..., and green hydrogen. Green hydrogen produces 100% clean energy and leaves no trace of CO emissions. It is also the most environmentally friendly alternative to produce hydrogen, since instead of using fossil fuels it is formed through water and electricity generated by renewable energies such as solar or wind. This TFG will analyze the role of green hydrogen in the transportation sector and more specifically a specific car model, the Toyota Mirai, where it is still in the process of implementation. The study will include an economic analysis of hydrogen production and this type of vehicle, and an environmental analysis in comparison with fossil fuel vehicles.

2- Project description

The project consists of carrying out an economic and environmental analysis on the production of green hydrogen depending on the number of vehicles and on the production of this type of cars.

For this purpose, a study will be carried out on a hydrogen refueling station [1], which will include photovoltaic panels to produce the electricity necessary for the production of hydrogen. Several scenarios will be included in which the number of vehicles and the solar radiation received on the panels will vary. Emphasis will be placed on the different equipment needed for the plant to operate, as well as the conditions under which they operate. [2]

An analysis will be made to the Toyota Mirai vehicle and its internal components that are part of the hydrogen cycle. This will be aimed to elaborate an economic and environmental analysis and to compare it with vehicles with alternative polluting fuels.

3- Model description

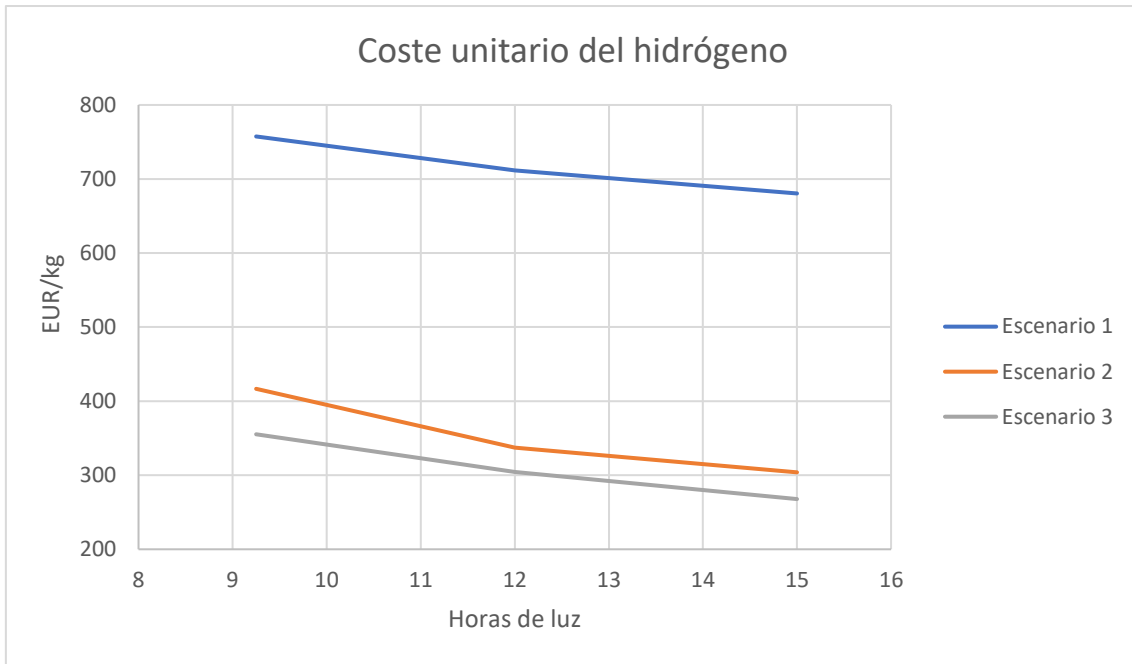
Since the calculations will be performed in a refueling station, three different scenarios will be made in terms of number of vehicles refueling: five, twenty and forty vehicles per day. Green hydrogen is a developing and expanding technology, but it still has a low territorial implantation and it would be delusional to think of a scenario with a large fleet of cars in circulation, at least in the short term, so we have been conservative in choosing the number of vehicles for the model. There are three additional scenarios in which the solar radiation changes depending on the time of the year, so the panels produce a greater or lesser amount of electricity depending on the case. The economic and environmental estimates of the project can be summarized in three:

- Economic analysis of hydrogen production
- Economic analysis of the production of a fuel cell vehicle.
- Environmental analysis of a fuel cell vehicle

The first two factors will be of high importance when studying a practical feasibility in the future.

4- Results

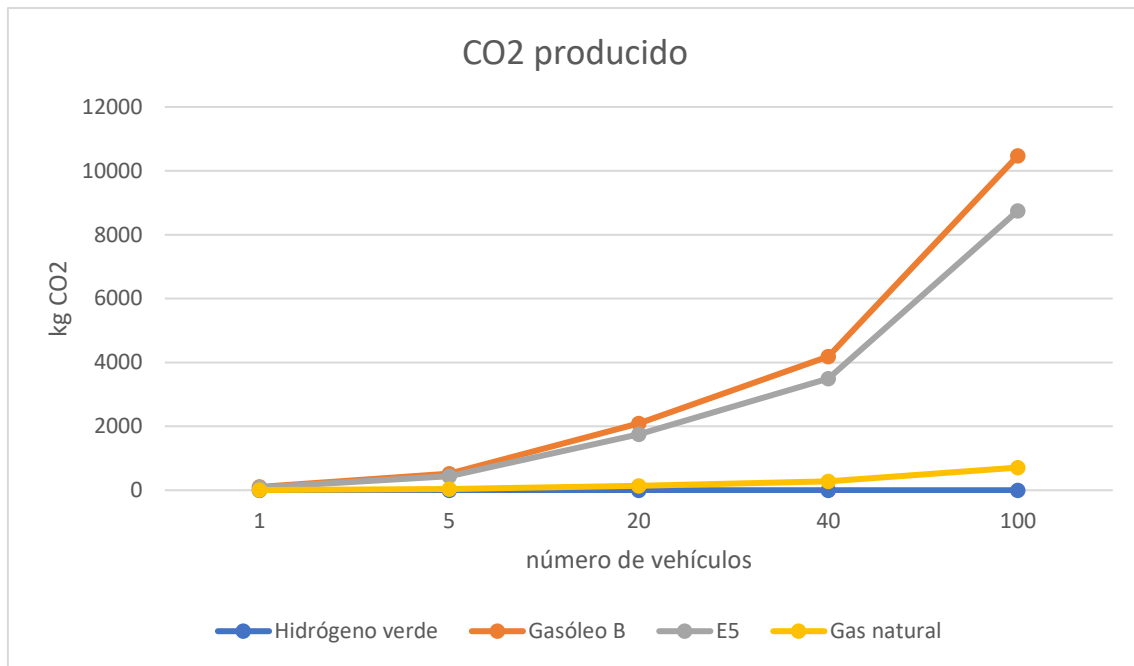
The graph below shows the unit cost of hydrogen production as a function of the number of vehicles refueling at the station per day. It should be explained that the scenarios represent cases where five, twenty and forty vehicles are refueled per day, respectively. It can be seen that as this number increases, the price of hydrogen clearly decreases, as well as the hours of solar radiation.



The following table shows the calculated total cost of equipping a Toyota Mirai involved in the hydrogen life cycle with its total costs. The average cost of a vehicle with a combustion engine is also shown for comparison. As can be seen, the price of an electric vehicle is substantially higher than that of a conventional vehicle, largely due to the fuel cell.

	Coste
Depósito de gas	2 210 €
Pila de combustible	30 672 €
Batería de litio	187,72 €
Motor eléctrico	1350 €
Coste equipamiento eléctrico	34 419,72 €
Coste motor combustión	10 000 €

Finally, the graph below shows the environmental comparison of a vehicle powered by green hydrogen with other cars powered by other types of fuel. As can be seen, green hydrogen is zero-emission and emits no pollutant or greenhouse gases.



5- Conclusions

The economic and environmental analyses show differentiated results. While economically the huge economic difference between the two solutions in favor of fossil fuels is evident, at the environmental level green hydrogen shows a clear advantage. Its zero operating emissions make this technology a benchmark for the future. With new measures and estimates, hydrogen can become a benchmark in the short term. Some of these would be:

- A greater industrial production of vehicles of this type. As can be seen in the cost of hydrogen production, the greater the volume of cars, the greater the economic efficiency. This is mainly due to the fact that the acquisition and maintenance costs remain unchanged with the number of cars, so they are amortized if a large use is made of them. It should also be borne in mind that the estimate made is monthly, done so to study the different light scenarios, and it should be thought that the useful life of these devices goes beyond that.

- Further research and development in fuel cell vehicles. It must be taken into account that the fleet of this type of vehicles in Spain is very small, so there is not going to be a greater implantation in the population until there is a stabilization of the prices.

6- References

[1] Hydrogen18, 2019. Hydrogen production processes. [online] Hidrogeno18.wixsite.com. Accessible at: << <https://hidrogeno18.wixsite.com/hidrogeno/blank-cjg> >>

[2] Acciona, 2020. [online]. Accessible at:
https://www.acciona.com/es/actualidad/noticias/acciona-y-enagas-lanzan-su-planta-industrial-de-hidrogeno-verde-en-mallorca/?_adin=02021864

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: media de anomalía de temperatura anual	20
Ilustración 2: Países por emisiones de carbono	21
Ilustración 3: consumo de energía por país	22
Ilustración 4: tipos de producción de hidrógeno	22
Ilustración 5: mapa de hidrogeneras en España	24
Ilustración 6: composición elemental del Sol.....	25
Ilustración 7: propiedades del hidrógeno	26
Ilustración 8: métodos de obtención de hidrógeno	27
Ilustración 9: métodos de obtención del hidrógeno	27
Ilustración 10: obtención del hidrógeno por gasificación	28
Ilustración 11: esquema de un electrolizador	29
Ilustración 12: esquema de un electrolizador alcalino.....	30
Ilustración 13: esquema de depósito de hidrógeno.....	32
Ilustración 14: depósito de hidrógeno líquido	33
Ilustración 15: tipos de compresores	34
Ilustración 16: funcionamiento de un compresor	35
Ilustración 17: esquema de un compresor.....	36
Ilustración 18: esquema de compresor dinámico	36
Ilustración 19: detalle de compresor.....	37
Ilustración 20: poder calorífico por vehículo.....	39
Ilustración 21: imagen de una hidrogenera	39
Ilustración 22: esquema de vehículo FCEV.....	40
Ilustración 23: esquema de depósito gas.....	41
Ilustración 24: esquema de pila de combustible.....	42
Ilustración 25: imagen de batería eléctrica	43
Ilustración 26: esquema de motor eléctrico	44
Ilustración 27: imagen de surtidor de hidrógeno.....	46
Ilustración 28: grupos compresores	49
Ilustración 29: esquema de una planta de electrolizadores.....	52
Ilustración 30: potencia de la planta fotovoltaica	54
Ilustración 31: tabla de precios del surtidor.....	55
Ilustración 32: coste de fibra de carbono	57
Ilustración 33: coste de electrolizadores.....	59
Ilustración 34: coste de panel solar	61
Ilustración 35: precio de la electricidad	62
Ilustración 36: coste unitario fibra de carbono	68
Ilustración 37: coste pila de combustible	69
Ilustración 38: coste baterías de litio	70
Ilustración 39: coste motor eléctrico.....	71
Ilustración 40: coste unitario del hidrógeno	107
Ilustración 41: coste unitario del hidrógeno	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: precio de la producción del hidrógeno	23
Tabla 2: volumen del hidrógeno según su presión	32
Tabla 3: poder calorífico de elementos	38
Tabla 4: poder calorífico por vehículo	38
Tabla 5: modelos de compresores.....	48
Tabla 6: modelos de electrolizador	52
Tabla 7: fibra de carbono endepósitos de gas	56
Tabla 8: coste de compresión del hidrógeno.....	58
Tabla 9: modelos de refrigerador	59
Tabla 10: coste de electrolizadores	60
Tabla 11: producción energética de hidrógeno.....	64
Tabla 12: producción solar eléctrica de la instalación.....	65
Tabla 13: fibra de carbono en depósitos de gas	67
Tabla 14: costes de instalación	75
Tabla 15: costes totales	76
Tabla 16: costes totales	76
Tabla 17: costes totales	77
Tabla 18: costes de instalación	78
Tabla 19: costes totales	79
Tabla 20: costes totales	80
Tabla 21: costes totales	80
Tabla 22: costes de instalación	82
Tabla 23: costes totales	83
Tabla 24: costes totales	83
Tabla 25: costes totales	84
Tabla 26: costes de instalación	86
Tabla 27: costes totales	87
Tabla 28: costes totales	88
Tabla 29: costes totales	89
Tabla 30: costes de instalación	90
Tabla 31: costes totales	91
Tabla 32: costes totales	91
Tabla 33: costes totales	92
Tabla 34: costes de instalación	93
Tabla 35: costes totales	94
Tabla 36: costes totales	95
Tabla 37: costes totales	95
Tabla 38: costes de instalación	97
Tabla 39: costes totales	98
Tabla 40: costes totales	99
Tabla 41: costes totales	100
Tabla 42: costes de instalación	101
Tabla 43: costes totales	102
Tabla 44: costes totales	102

Tabla 45: costes totales	103
Tabla 46: costes de instalación	104
Tabla 47: costes totales	105
Tabla 48: costes totales	106
Tabla 49: costes totales	106
Tabla 50: resultados económicos	107
Tabla 51: resultados económicos del hidrógeno	115

Índice

1.	Situación actual	20
1.1.	Contaminación	20
1.2.	Hidrógeno verde en la actualidad	22
2.	El hidrógeno verde	25
2.1.	El hidrógeno	25
2.1.1.	Propiedades.....	25
2.2.	Producción.....	26
2.2.1.	Electrólisis.....	28
2.3.	Almacenamiento	31
2.3.1.	Almacenamiento en gas a presión	31
2.3.2.	Almacenamiento en forma líquida	32
2.3.3.	Almacenamiento en hidruros metálicos	33
1.1.1.	Compresores de hidrógeno	34
1.2.	Aplicaciones: hidrógeno como combustible	37
1.3.	Estaciones de repostaje: hidrogeneras.....	39
2.	Toyota Mirai.....	40
2.1.	Depósito de hidrógeno.....	41
2.2.	Pila de combustible	41
2.3.	Batería	43
2.4.	Motor eléctrico.....	44
3.	Metodología	45
3.1.	Hidrogenera.....	45
3.1.1.	Adquisición de equipos	46
3.1.2.	Coste de adquisición de equipos.....	55
3.1.3.	Coste de mantenimiento	61
3.1.4.	Coste de la electricidad	62
3.1.5.	Coste unitario del hidrógeno	66
3.2.	Toyota Mirai.....	67
3.2.1.	Depósito de gas	67
3.2.2.	Pila de combustible	68
3.2.3.	Batería de litio	69
3.2.4.	Motor eléctrico.....	70
4.	Cálculos	72
4.1.	Hidrogenera.....	73

4.1.1.	Primer escenario	73
4.1.2.	Segundo escenario	85
4.1.3.	Tercer escenario	96
4.1.4.	Análisis económico	107
4.2.	Toyota Mirai.....	109
5.	Análisis ambiental	113
6.	Análisis de los resultados	115
7.	Objetivos de desarrollo sostenible (ODS).....	119
8.	Bibliografía.....	120
9.	Anexos	125

1. Situación actual

1.1. Contaminación

La contaminación de hoy en día es el principal problema que tiene la naturaleza y el medio ambiente de cara a su conservación, además de ser el principal precursor del cambio climático en nuestro planeta. La emisión de contaminantes, siendo el dióxido de carbono el principal, ha provocado un aumento de temperaturas sin precedentes en toda la geografía terrestre, generando una alteración en el ciclo vital de las especies, un aumento de la salinidad y contaminación de los mares, la disminución de superficie y volumen de los casquetes polares y la obstrucción del desarrollo de los ecosistemas. En la imagen inferior se puede ver una gráfica que muestra el aumento de la temperatura global por década, según varias fuentes.

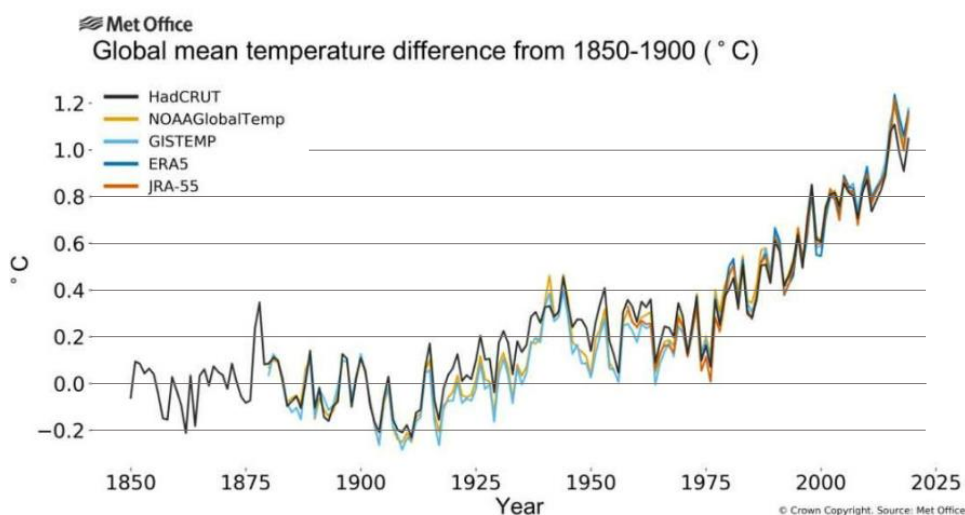


Ilustración 1: media de anomalía de temperatura anual

La temperatura media global ha subido más de 1,1 °C desde los niveles preindustriales, y sigue en crecimiento. Este anormal aumento de temperaturas de las últimas décadas, haciéndose cada vez más intenso, viene provocado por las emisiones de carbono producidas por el hombre, proviniendo principalmente de la combustión fósil del petróleo, carbón o gas natural. Las energías no renovables son las más usadas a nivel industrial a día de hoy, y el alto coste que presentan al estar todavía en desarrollo hace que los países menos desarrollados dependan de manera casi íntegra de los combustibles fósiles para mantener su economía. En el gráfico inferior aparece mostrado el volumen de dióxido de carbono emitido por país, mostrando también datos de la Unión Europea y el porcentaje del total de cada uno

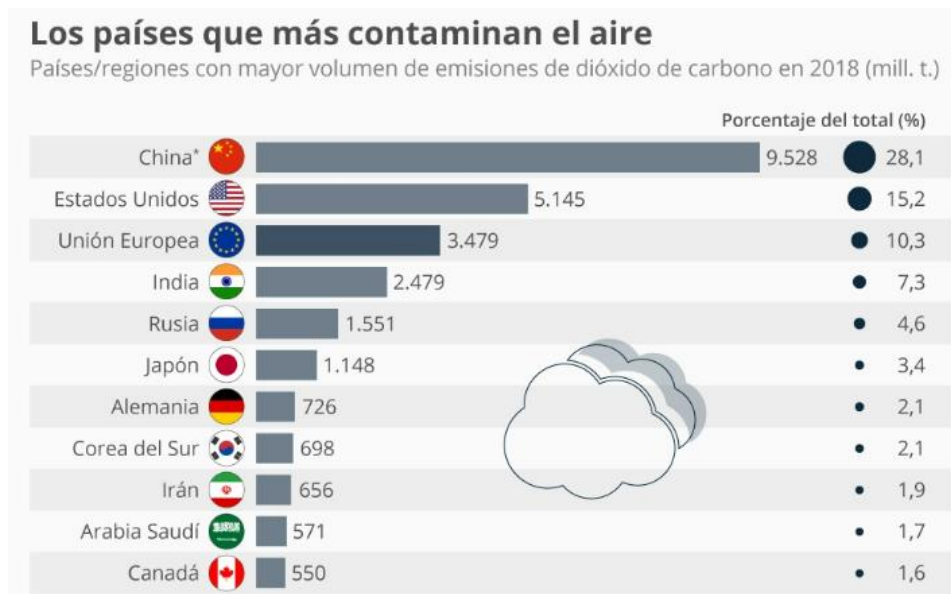


Ilustración 2: Países por emisiones de carbono

[1]

Los países más contaminantes son China, Estados Unidos y la India, al ser los más poblados. El problema con China e India es que son países en vías de desarrollo, planteando dos retos: 1) Al experimentar un crecimiento económico va a haber un mayor uso energético por habitante, 2) Con el desarrollo de la industria se van a abandonar las fuentes de trabajo tradicionales en favor de métodos más modernos. Aquí es más fácil que se vean favorecidas las fuentes no renovables, ya que la energía solar o eólica siguen siendo poco económicas para países emergentes.

Dentro de cada país, existen fuentes de generación de energía renovables y no renovables. Las primeras son fuentes inagotables, como la luz solar o el viento, mientras que las segundas son escasas, o como poco limitadas, y emiten gases de efecto invernadero, siendo el más perjudicial el CO₂, al tener una larga vida atmosférica. A día de hoy la mayoría de los países utilizan energías renovables, debido a los precios más baratos y a que la transición ecológica tarda en llegar a muchas áreas. En la imagen inferior se muestra el consumo de energías renovables en la energía primaria en diferentes geografías, indicando el porcentaje total sobre el resto de las energías consumidas. El consumo se divide a su vez en los diferentes tipos de energía renovable en uso.



Ilustración 3: consumo de energía por país

[1]

Las regiones del mundo que más energía renovable consumen en proporción son Brasil y la Unión Europea, estando a la cola India y China. De todas maneras, existe un aumento en el consumo en los últimos años en todos los países, con la bioenergía a la cabeza.

1.2. Hidrógeno verde en la actualidad

El hidrógeno es el elemento químico más abundante del universo, constituyendo un 98% de la materia total, pero en la corteza terrestre es limitado y de difícil extracción. Esto último es debido a que no aparece en su forma molecular, H_2 , en el entorno natural, si no en combinación con otros elementos, por lo que para extraerlo hay que usar energía. Como se ve en el gráfico, de elaboración propia, existen varias sustancias a partir de las cuales se puede extraer hidrógeno.

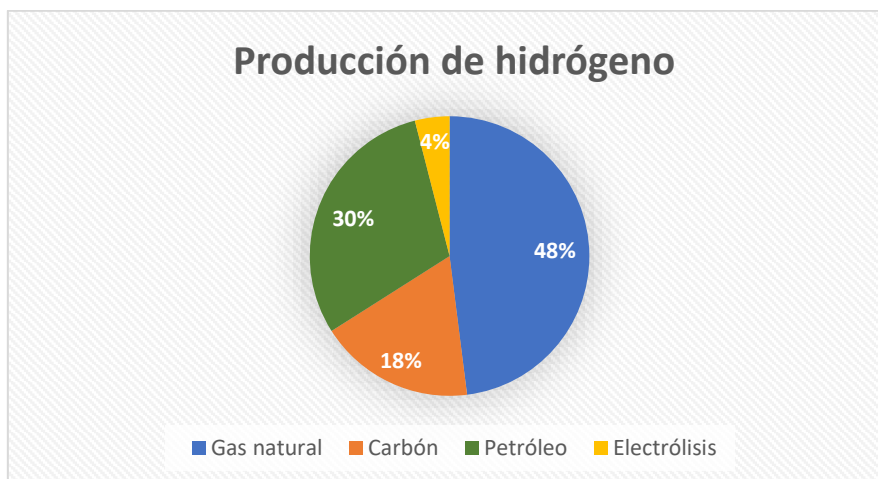


Ilustración 4: tipos de producción de hidrógeno

De todas las fuentes, la electrólisis es la única que no produce emisiones de invernadero o gases contaminantes, siendo de esta manera la única que produce hidrógeno verde. El alto coste de producción es el principal motivo del poco uso que se le da. De todas maneras, el Departamento de Energía de EEUU estima que la demanda, producción y uso del mismo crezca debido a una reducción de su coste, pasando de 6 \$/kg en 2015 a 2 \$/kg en 2025. [2] En 2018 el precio era ya de 3,5 \$/kg. En el gráfico inferior, de elaboración propia tomando como fuente la Agencia Internacional de la Energía (AEI) aparece las previsiones de los precios de hidrógeno en función de su tipo de obtención.

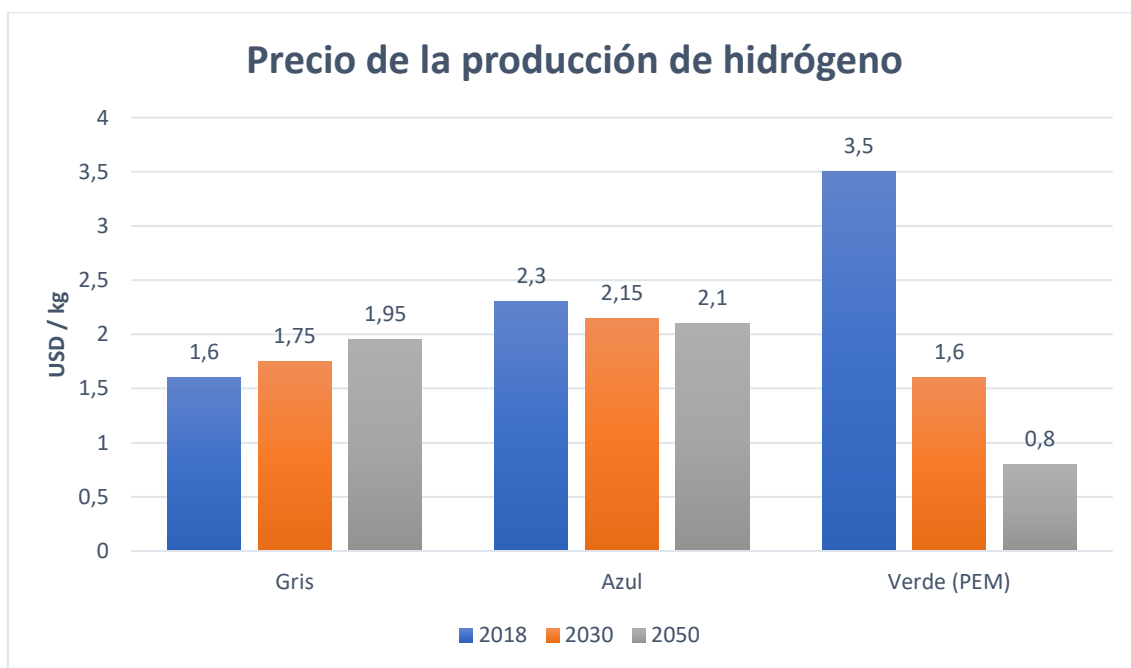


Tabla 1: precio de la producción del hidrógeno

Es necesario aclarar que el hidrógeno azul es el extraído del gas natural, menos contaminante que el hidrógeno gris, proveniente del carbón y petróleo.

A día de hoy la principal aplicación que tiene el hidrógeno es como combustible. Este mercado se encuentra actualmente en expansión y se espera que el hidrógeno sea uno de los combustibles con más uso en el futuro. El problema es que los vehículos que actualmente se nutren de hidrógeno para funcionar suponen una flota de pequeña cuota de mercado. De momento, solo son dos los coches de hidrógeno que se comercializan en nuestro país: El Toyota Mirai y el Hyundai NEXO. Teniendo en cuenta que en el año 2018 había un total de 24,07 millones de turismos en circulación en España, según datos de la DGT [3], todavía queda un largo camino para dominar el mercado automovilístico español.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la extensión y presencia de las hidrogeneras, las estaciones de repostaje de hidrógeno. A fecha de diciembre de 2022 hay un total de 20 hidrogeneras abiertas en España, siendo 8 de carácter público y 12 privadas, según datos de Gasnam. En el mapa inferior se muestran localizadas las hidrogeneras en funcionamiento hoy en día, además de las que se encuentran en construcción.



Ilustración 5: mapa de hidrogeneras en España

[4]

En un proyecto conjunto de Gasnam y Anfac hay un plan de diseño de una red mínima de hidrogeneras con una distancia máxima de 250 km entre ellas, con capacidad de repostaje de turismos, camiones y autobuses. Esta hoja de ruta contempla el desarrollo e implantación de una red de hasta 150 hidrogeneras para el año 2030. Este plan de extensión y crecimiento de estaciones de repostaje está ligado al crecimiento de vehículos de hidrógeno.

2. El hidrógeno verde

2.1. El hidrógeno

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica y a su vez el elemento más abundante del universo, constituyendo aproximadamente el 75% de la materia visible del mismo [5] en cuanto a masa, y el 90% en número de átomos. Consta de un núcleo formado por un único protón, haciéndolo de masa atómica uno. Este elemento se encuentra de manera abundante en las estrellas y en los planetas gaseosos gigantes, siendo hasta un 71.5% de la composición solar.

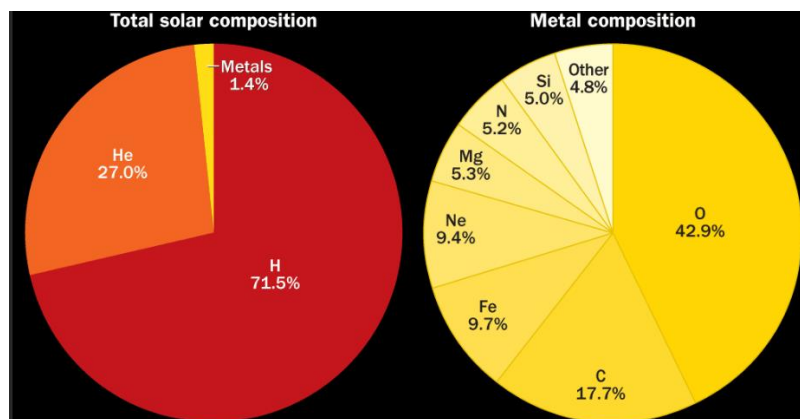


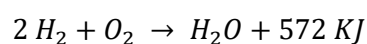
Ilustración 6: composición elemental del Sol

[6]

A diferencia de otros espacios, el hidrógeno elemental es muy escaso en la corteza terrestre (0.14% de la masa total) y se suele obtener industrialmente a partir de hidrocarburos, como el metano. Bajo condiciones normales de presión y temperatura, el hidrógeno se muestra en la naturaleza en su forma molecular, H_2 .

2.1.1. Propiedades

La masa atómica del hidrógeno es de 1.00797 g/mol y su densidad es 0.071 g/ml. En condiciones normales, es un gas incoloro, inodoro, insípido e inflamable. Su punto de ebullición es de -257.9 °C y el de fusión -259.2 °C. [7] La entalpía de combustión de hidrógeno es de 285.8 KJ/mol [8] y se quema de acuerdo con la siguiente ecuación:



Hay que tener en cuenta que la energía liberada es doble a la entalpía de combustión al tratarse de dos moléculas de hidrógeno. El nivel energético del hidrógeno o potencial de ionización en su estado fundamental es de -13.6 eV. Otras numerosas propiedades del hidrógeno aparecen en la tabla de la siguiente imagen:

Z	1
Peso atómico ($^{12}_6\text{C}$)	1'0079
Densidad (gr/ml) (tª eb)	0'0700
Volumen molar mls (tª eb)	28'6
Punto de fusión °K	13'957 °K a 54mm. (punto triple)
Punto de ebullición °K	20'39 °K
Calor vaporización kJ mol ⁻¹	0'903
Potencial ionización eV	13'54
Energía de hidratación H ⁺ cal mol ⁻¹	269
Energía de enlace H-H Kcal mol ⁻¹	104'2
Radio covalente (en H ₂)	0'3707
Electroafinidad eV	0'715
Radio iónico H ⁺ X (en LiH)	1'36
Electronegatividad (P)	2'1
Abundancia % (litosfera+hidrosfera)	1% (15'4 átomos %T)

Ilustración 7: propiedades del hidrógeno

[9]

2.2. Producción

Debido a que el hidrógeno molecular se encuentra de manera muy escasa en la corteza terrestre, su obtención resulta difícil y aparatosa, siendo necesario realizar ciertas reacciones químicas y térmicas para obtenerlo de otros compuestos que abundan en la naturaleza. Existen numerosas técnicas para ello. Llamamos hidrógeno verde al que se obtiene a partir de energías renovables, con el objetivo de que no se produzcan emisiones contaminantes en el proceso. Estos métodos no son los mayoritarios en la obtención de hidrógeno hoy en día, debido a los altos costes y la reciente incorporación al sector energético de estas tecnologías. Actualmente, la electrólisis supone únicamente el 4% de las fuentes para obtención de hidrógeno a nivel mundial, siendo las más destacadas el gas natural, el petróleo y el carbón.

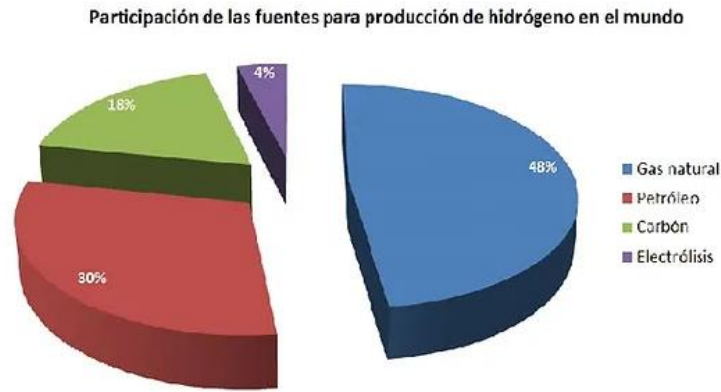


Ilustración 8: métodos de obtención de hidrógeno

[10]

En la siguiente imagen se pueden ver los distintos métodos de producción de H₂ en función del tipo de energía utilizada.

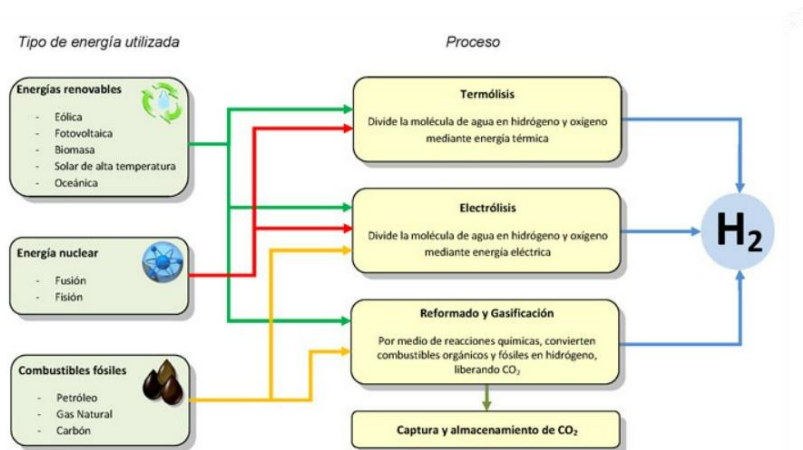
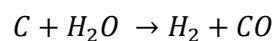


Ilustración 9: métodos de obtención del hidrógeno

[11]

La producción de hidrógeno a través de combustibles fósiles (petróleo, gas natural, carbón) se hace a través del reformado y la gasificación. El proceso de gasificación ocurre cuando el material carbonoso reacciona con vapor para producir hidrógeno, según la reacción



Con este proceso, de todas maneras, se libera monóxido de carbono a la atmósfera, siendo un método contaminante de obtención del hidrógeno. Este método funciona con productos como el carbón. Por su parte, el reformado es un proceso donde reacciona el vapor de agua con hidrocarburos en presencia de un catalizador para producir un gas de síntesis, en este caso el

hidrógeno. El hidrógeno puede ser producido a partir del metano en gas natural utilizando vapor de agua a altas temperaturas, en un proceso que se conoce como reformado de metano con vapor de agua [12].

Tanto el reformado como la gasificación son procesos que requieren posteriormente una captura y almacenamiento del CO₂ u otros contaminantes emitidos.

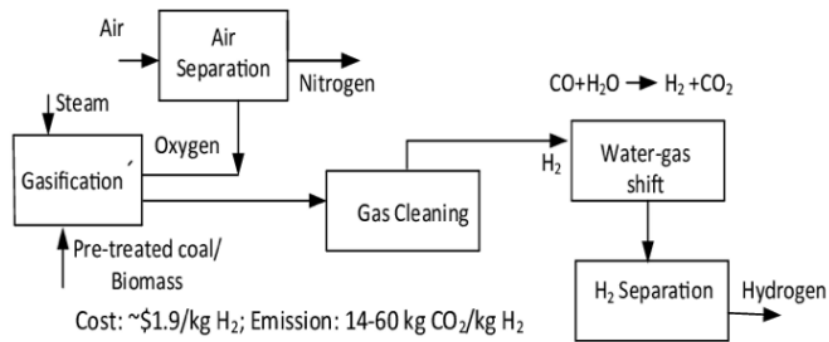
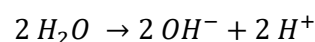


Ilustración 10: obtención del hidrógeno por gasificación

[13]

2.2.1. Electrólisis

Los métodos tradicionales de obtención de hidrógeno producen emisiones contaminantes que dañan el medio ambiente. Por ello, hay que centrarse en el desarrollo y uso de procesos limpios de producción de hidrógeno, siendo el principal de ellos la electrólisis. La electrólisis se trata de un método limpio y no contaminante de producción de hidrógeno, obteniéndose por la cual el hidrógeno verde. Hay que recordar que el hidrógeno verde es el obtenido a través de fuentes renovables de energía, siendo el mismo hidrógeno molecular que el obtenido por gasificación o reformado. La tecnología de electrólisis se basa en la ruptura de la molécula de agua en estado gaseoso para formar hidrógeno y oxígeno. Esta ruptura se produce por el uso de una corriente eléctrica suministrada por una fuente de alimentación situada entre dos electrodos. Los electrodos están sumergidos parcialmente en un electrolito, que es la sustancia donde se producen las reacciones, en este caso agua. En el cátodo, los electrones de la corriente eléctrica se juntan con el H⁺ desprendido de la molécula de agua, produciendo hidrógeno molecular H₂. En el ánodo, el OH⁻ desprendido del agua se separa: el electrón vuelve al electrodo, el oxígeno se despiden en forma gaseosa y el H suelto se junta con el H del cátodo para formar H₂. La reacción del agua es



En el ánodo se produce $2 OH^- \rightarrow O_2 + 2 H + 2 e^-$, y en el ánodo $2 H^+ + 2 H + 2 e^- \rightarrow 2 H_2$

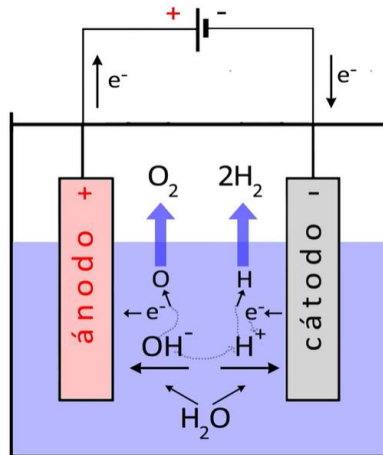


Ilustración 11: esquema de un electrolizador

[14]

De esta manera, por cada molécula de agua se obtiene hidrógeno y oxígeno. Ambos gases se almacenan a la salida de cada electrodo, aunque en el caso del oxígeno se puede expulsar sin problemas a la atmósfera, ya que es un gas no contaminante y no es el gas perseguido en la reacción. Otro aspecto importante a destacar es que la corriente eléctrica utilizada en los electrodos debe de haber sido obtenida por métodos no contaminantes, para que así el proceso total de obtención de hidrógeno sea limpio.

Este aparato formado por los electrodos, la batería que genera la corriente y el electrolito tiene el nombre de electrolizador. Las ventajas del electrolizador son numerosas; el hidrógeno producido es puro, no contamina y el gas se puede usar en el lugar e instante en el que se produce. Existen muchas formas de construir y configurar un electrolizador, destacándose cuatro tipos;

- Electrolizador alcalino.
- Electrolizador de membrana polimérica (PEM).
- Electrolizador de óxido sólido (SOEL).
- Electrolizador de membrana de intercambio aniónico (AEM).

2.2.1.1. *Electrolizador alcalino*

El electrolizador alcalino es el que usa como electrolito un medio alcalino como el que puede ser el hidróxido de potasio (K OH) disuelto en agua. Las zonas del ánodo y cátodo se separan mediante un material aislante eléctrico que permite el paso de los iones a través, pero mantiene

los gases separados entre ellos. El problema es que la pureza del hidrógeno es menor en estos casos, haciendo que se busquen otro tipo de tecnologías. Han sido el tipo de electrolizador más usado hasta ahora debido a que no requieren metales nobles, tienen un bajo coste y una tecnología plenamente desarrollada.

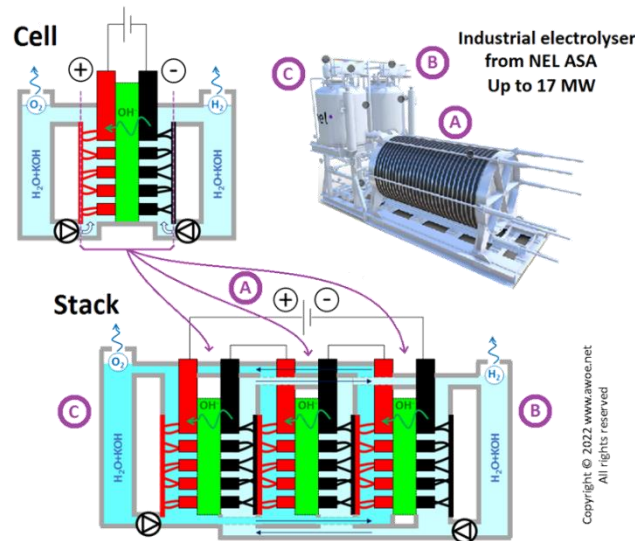


Ilustración 12: esquema de un electrolizador alcalino

[15]

2.2.1.2. *Electrolizador de membrana polimérica (PEM) y electrolizador de membrana de intercambio aniónico (AEM)*

Este electrolizador es de uso común, y muchos electrolizadores modernos son fabricados con tecnología PEM. En lugar de usar una solución acuosa, se utiliza como electrolito una membrana sólida conductora. Son los electrolizadores que a día de hoy presentan una respuesta más rápida a variaciones de potencia, lo que los hacen óptimos para ser integrados con fuentes de energías renovables. Los inconvenientes de este tipo de electrolitos son los costes de fabricación, además de que utilizan metales preciosos como catalizadores en ambas reacciones.

Por su parte el electrolizador AEM utiliza una membrana de intercambio iónico como electrolito. Esta tecnología resulta más económica que el electrolizador PEM, debido a que no usa metales preciosos como catalizadores. Su tecnología sigue en desarrollo.

2.2.1.3. *Electrolizador de óxido sólido*

Los electrolizadores de óxido sólido funcionan a una temperatura más alta (entre 500 y 850 °C) [16] y tienen el potencial de ser mucho más eficientes que los PEM y los alcalinos. El proceso

emplea un material cerámico sólido como electrolito. Los electrones del circuito externo se combinan con el agua en el cátodo para formar gas de hidrógeno e iones de carga negativa. El oxígeno atraviesa la membrana cerámica deslizando para reaccionar en el ánodo. A nivel tecnológico están menos desarrollados que los anteriores.

2.3. Almacenamiento

El almacenamiento de hidrógeno supone uno de los mayores problemas en la actualidad a la hora de tratar esa sustancia. El hidrógeno es un gas altamente inflamable y de baja densidad, lo que hace necesario extremar las medidas de seguridad en su almacenamiento. Su baja densidad implica usar una gran cantidad de energía para comprimirlo y emplear un recipiente de volumen considerable para poder almacenar la cantidad de hidrógeno deseada.

Si analizamos el almacenamiento de hidrógeno desde el sector del transporte, las dimensiones del recipiente deben responder a los criterios de volumen y peso, además de poder ofrecer la autonomía necesaria para el vehículo. Esto hace que los requisitos en este sector sean más estrictos para el depósito de combustible.

Existen numerosas formas de almacenamiento de hidrógeno que cumplan con todos estos requisitos, entre las que se encuentran:

- Gas a presión
- Forma líquida
- Hidruros metálicos
- Forma de compuesto químico (NH_3 , tolueno)
- Microesferas de vidrio

De todos estos métodos únicamente los tres primeros son usados a nivel comercial hoy en día debido a su desarrollo industrial y viabilidad económica. Los demás se encuentran en fase de desarrollo todavía.

2.3.1. Almacenamiento en gas a presión

Esta forma de almacenamiento es la más desarrollada y la que se encuentra más presente en la industria, sobre todo a nivel industrial. Esto es debido a que el hidrógeno se encuentra ya en estado gaseoso a temperatura ambiente, por lo que basta con un sistema de presurizado para almacenarlo en recipientes de alta presión. Estos depósitos de almacenamiento tienen una

presión que varía en un rango de 200 a 700 bares. Las presiones típicas de almacenamiento son de 200 bares, 350 bares (presión utilizada anteriormente en vehículos) y 700 bares, siendo esta última la usada de forma mayoritaria en vehículos de automoción hoy en día.

Presión (bar)	0,101325	200	350	700
Volumen (L)	11934	68,4	42,7	25,7

Tabla 2: volumen del hidrógeno según su presión

En los laboratorios o depósitos de almacenamiento, los gases presurizados tienden a almacenarse en recipientes de acero o aluminio, materiales de alta resistencia, pero siendo a su vez poco idóneos en vehículos debido a su peso y motivos de seguridad. El modelo de coche Toyota Mirai, vehículo a estudiar en este trabajo, posee tres depósitos de hidrógeno de capacidades 65, 52 y 25 litros, respectivamente. Tienen una capacidad de almacenaje de 5.6 kilogramos de hidrógeno a alta presión y un peso total de 100 kilogramos. El depósito consta de tres capas en su superficie: una capa interna de plástico reforzado con fibra de carbono, una intermedia de polímero y una externa de polímero reforzada con fibra de vidrio. [17] La siguiente imagen muestra un diseño explicativo de uno de estos depósitos.



Ilustración 13: esquema de depósito de hidrógeno

[18]

2.3.2. Almacenamiento en forma líquida

El almacenamiento de hidrógeno en estado líquido es otra manera de preservar el gas, que en este caso se transforma. El problema es que el hidrógeno tiene una temperatura de ebullición a presión ambiente de $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que una gran cantidad de energía es necesaria para bajar su temperatura a 20 K. Con este método se pueden almacenar volúmenes muy grandes de

hidrógeno durante un tiempo prolongado, pero este largo periodo de almacenamiento acarrea altos costes de mantenimiento y posibles fugas que se traduzcan en pérdidas. En la imagen interior se puede ver un esquema de uno de estos depósitos.

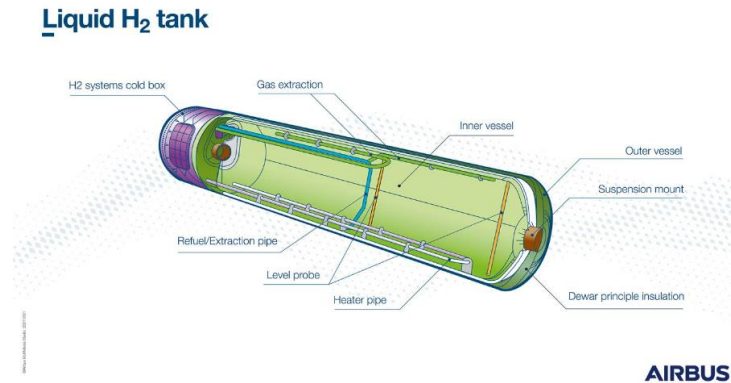


Ilustración 14: depósito de hidrógeno líquido

[19]

2.3.3. Almacenamiento en hidruros metálicos

Esta última opción es la menos utilizada de entre las mencionadas, pero a su vez se trata del método que está siendo más estudiado hoy en día. En presencia de hidrógeno, numerosos metales y aleaciones, como el magnesio, titanio o hierro, forman hidruros metálicos.

Existen varios requisitos que debe cumplir el hidruro en cuestión para llevar a cabo esta práctica, entre los que se encuentran:

- El hidruro puede ser formado y descompuesto con relativa facilidad.
- La presión de equilibrio a la temperatura de descomposición del hidruro ha de ser en todo momento compatible con los requerimientos de seguridad del sistema.
- Es necesario mantener óptimas condiciones de funcionamiento durante la mayor cantidad posible de ciclos.
- Es necesario que tenga la máxima tolerancia posible a las impurezas gaseosas encontradas en el hidrógeno, ya que estas dificultan las reacciones y a su vez disminuyen la vida útil del sistema.

Los átomos de hidrógeno se empaquetan dentro de la estructura metálica, debido a ello se pueden lograr unas mayores densidades de almacenamiento de hidrógeno que si se usase hidrógeno comprimido. Como ocurre de forma similar con los depósitos de almacenaje del hidrógeno, la densidad de estos metales hace que tengan un gran peso estos recipientes. Para

separar el hidrógeno de los hidruros es necesario calor, que puede ser aprovechado el que se desprende de la pila de combustible. De todas maneras, el hidrógeno no es extraído en el instante y lleva su tiempo. [20]

1.1.1. Compresores de hidrógeno

Se ha visto que el hidrógeno se almacena a grandes presiones, estando en el orden de 200 a 700 bares. Sin embargo, el hidrógeno molecular que se extrae del agua se encuentra a presión ambiente, siendo necesario presurizarlo para que pueda almacenarse a la presión deseada. Esta presurización que acarrea un aumento de presión y disminución de volumen es llevada a cabo por los llamados compresores de hidrógeno. Estos compresores en realidad sirven para trabajar cualquier tipo de sustancia gaseosa, ya que aplican la ley general de los gases ($P \cdot V = k \cdot T$) [21] para modificar el volumen y la presión de un gas.

Dentro del mundo de los compresores, se pueden clasificarlos en dos tipos: compresores de desplazamiento positivo y compresores dinámicos.

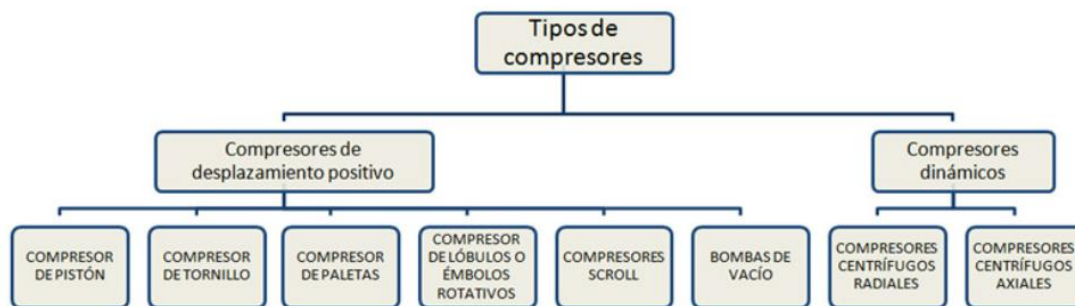


Ilustración 15: tipos de compresores

[22]

1.1.1.1. Compresores de desplazamiento positivo

El funcionamiento de estos compresores se basa en la reducción de volumen de gas en la cámara de compresión donde se encuentra confinado, donde se produce el aumento de presión deseado, momento en el cual el gas es liberado al nuevo depósito de almacenamiento. Dentro de esta categoría los más usados a nivel industrial son el compresor de pistón y el compresor de paletas.

Los compresores de pistón funcionan mediante un movimiento de aspiración y presión. Su estructura interna está formada por un cilindro hueco conectado por dos válvulas al exterior, la primera abre al depósito de aspiración del gas y la segunda es el orificio de salida del gas al

depósito de mayor presión. El movimiento del cilindro viene provocado por la rotación de un cigüeñal; este último está conectado a una biela que provoca el ascenso y descenso de la base móvil del cilindro. El ciclo móvil de este compresor consta de dos movimientos: 1) Con la válvula de aspiración abierta y el movimiento de la biela descendente, el movimiento de la base provoca un aumento de volumen en el cilindro, provocando un descenso de presión en el interior de este y la entrada del gas. 2) Cuando el cilindro ha ganado el volumen máximo, se cierra la válvula de aspiración, se abre la de salida, y se inicia el movimiento ascendente provocado por el movimiento del cigüeñal. El fluido así sale al depósito de mayor presión. La válvula de salida se cierra una vez el fluido ha sido introducido el depósito, se abre la válvula de aspiración y se repite el primer paso.

Con este movimiento cíclico se va llenando el depósito final de gas, aumentando la presión a medida que se introduce más del mismo. El cigüeñal debe tener la suficiente fuerza como para resistir el empuje de la presión del gas. Los compresores de pistón pueden ser lubricados con aceite para una mayor vida útil y un mejor funcionamiento. En la imagen inferior se muestra un esquema de las dos etapas, la aspiración y la impulsión del gas, donde se ven las válvulas abiertas o cerradas en cada caso y el movimiento del cigüeñal.

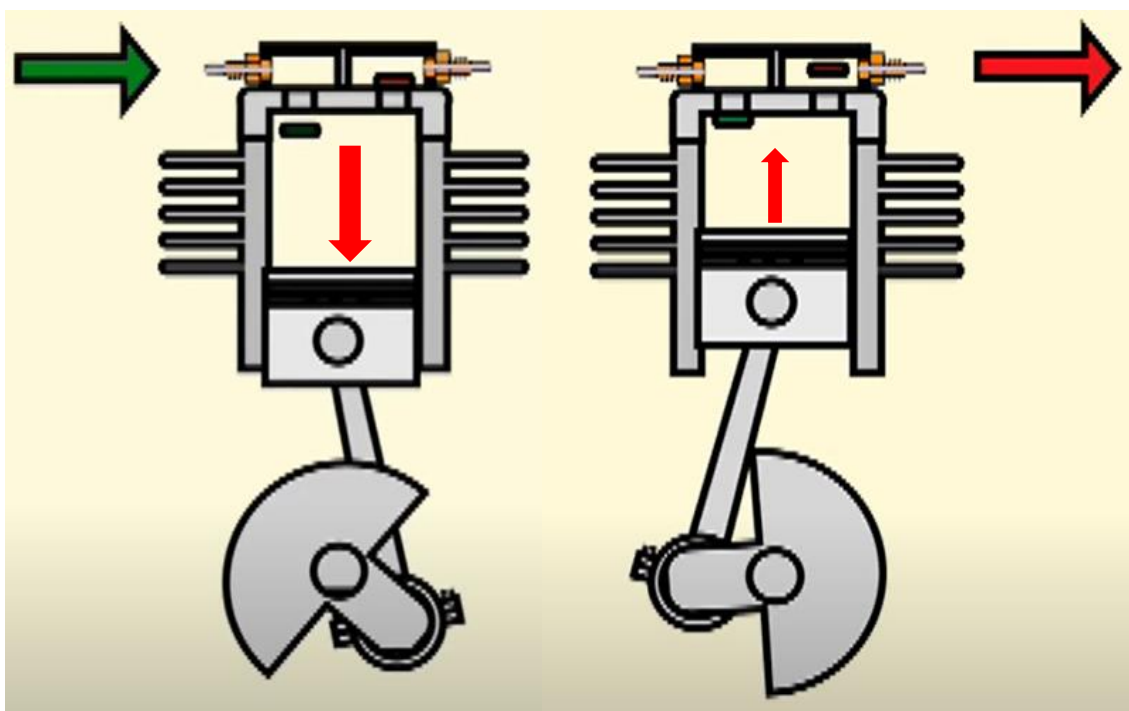


Ilustración 16: funcionamiento de un compresor

[23]

El compresor de paletas funciona con un sistema constado de un rotor de paletas flotantes en el interior de una carcasa, situado de forma excéntrica a la misma. Entre las paletas existe el espacio por el que avanza el gas, espacio que va disminuyendo su volumen a medida que las paletas se hunden en el rotor. De esta manera se comprime el gas hasta llegar a su salida. En la imagen inferior se muestra un esquema de funcionamiento de este tipo de compresor, así como una imagen del rotor con las paletas.

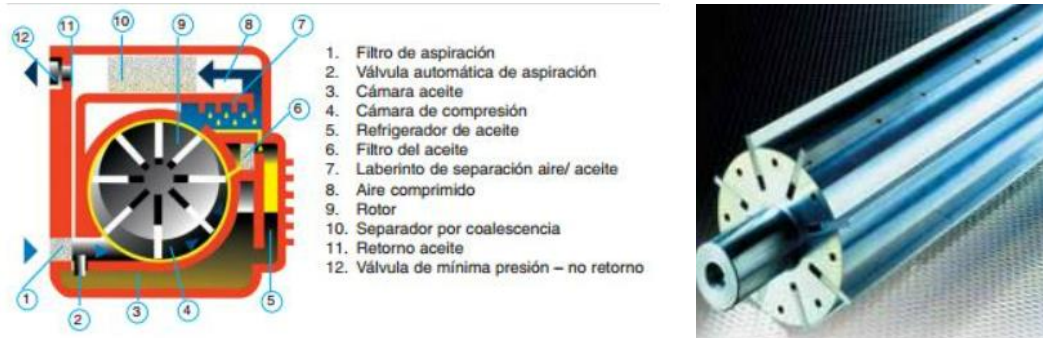


Ilustración 17: esquema de un compresor

[22]

1.1.1.2. Compresores dinámicos

Los compresores dinámicos, o compresores centrífugos, pueden ser divididos en dos: radiales o axiales. En los compresores radiales, el aire entra en la zona central del rotor que, girando a gran velocidad, lanza el gas sobre el difusor y es dirigido hacia el cuerpo de impulsión. En la imagen inferior aparece mostrada la sección de un compresor centrífugo de levitación neumática del BOGE, con cada parte señalada, siendo 1 el conducto de aspiración, 2 el rotor y 3 el difusor desde donde se impulsa el gas.

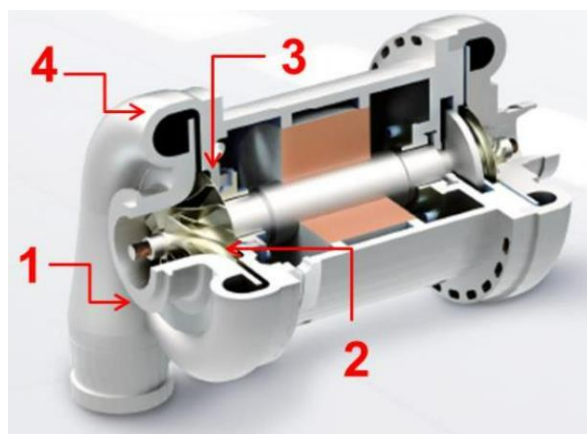


Ilustración 18: esquema de compresor dinámico

[22]

Un compresor puede a su vez tener dos o más etapas. En cada una está instalada un equipo de refrigeración para reducir la temperatura del gas una vez presurizado.

Los compresores axiales, por su parte, son de menor uso en la industria. La diferencia con los radiales es que el gas circula de manera paralela al eje. El compresor está formado por varios discos llamados rotores. Cada rotor tiene instalado otro disco, el estator, donde el gas acelerado sufre un aumento de presión antes de pasar al siguiente rotor. En algunos compresores se recurre a la instalación de álabes guía, que dan dirección al gas para que entre con el ángulo en el rotor que le dé mayor velocidad. En la foto inferior se puede ver un compresor axial de MAN.

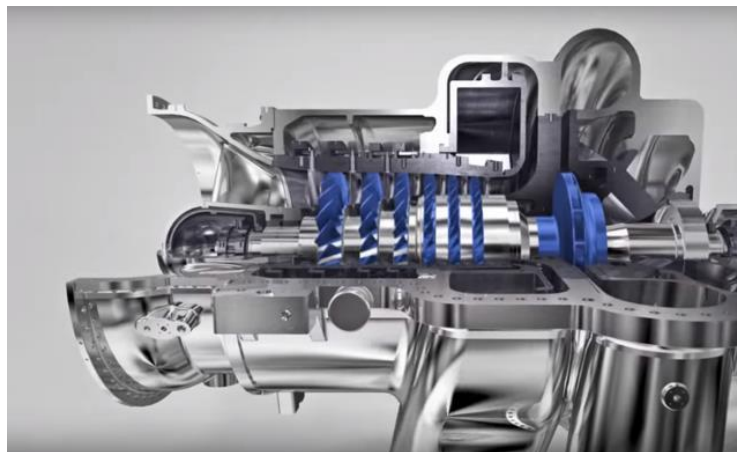


Ilustración 19: detalle de compresor

[22]

1.2. Aplicaciones: hidrógeno como combustible

El hidrógeno se ha utilizado con cierto nivel de seguridad los últimos años en numerosos campos de aplicación, tales como la alimentación, metal, vidrio y química. A día de hoy, la industria global del hidrógeno está a un buen nivel de desarrollo industrial y existe una producción superior a las 50 millones de toneladas de hidrógeno al año. [24]

En el sector energético, el hidrógeno puede ser utilizado como combustible en los vehículos de automoción, generando electricidad mediante las pilas de combustible, donde al combinarse con el oxígeno liberan corriente eléctrica que recarga la batería. Una de las ventajas del hidrógeno es que libera una cantidad de energía por unidad de masa muy superior a otras sustancias, triplicando la del gas natural o la gasolina, y además lo hace emitiendo vapor de agua en el proceso, por lo que tiene un impacto ambiental nulo. La siguiente tabla muestra el Poder Calorífico Interno (PCI) del hidrógeno comparado con otras sustancias.

Combustible	Poder Calorífico (KJ/g)	Poder calorífico (Kcal/g)
Hidrógeno	141,9	33,9
Gas natural	54	13
Gasolina	47	11,3
Diésel	45	10,7
Carbón	27	7,8

Tabla 3: poder calorífico de elementos

Sin embargo, cabe recordar que el hidrógeno tiene una densidad muy pequeña comparada con el resto de los combustibles, ya que se encuentra en estado gaseoso. Esto hace que a la hora de almacenarlo en un depósito apto para un vehículo móvil la cantidad de masa sea menor. El caso del Toyota Mirai la capacidad de almacenamiento es de 5,6 kilogramos de hidrógeno. En la siguiente tabla se compara el Poder Calorífico Interno (PCI) total de este vehículo en comparación con otros coches de circulación de la marca Toyota:

Vehículo	Combustible	Poder Calorífico (MJ)	Poder calorífico (Mcal)
Toyota Mirai	Hidrógeno	794,64	189,84
Toyota Yaris	Gasolina	1150,56	276,624
Land Cruiser	Diésel	3327,75	791,265

Tabla 4: poder calorífico por vehículo

Como se ve, los vehículos que poseen un combustible diferente poseen más poder calorífico al tener una densidad mayor, haciendo que la masa total sea superior que en un vehículo de hidrógeno. En el gráfico inferior se ha establecido una comparativa entre el poder calorífico de tres vehículos diferentes, cada uno con su propio material de combustible. El primero es el Toyota Mirai, hidrógeno, y los dos restantes son el modelo Toyota Yaris, gasolina, y el Toyota Land Cruiser, este último siendo de tipo diésel.

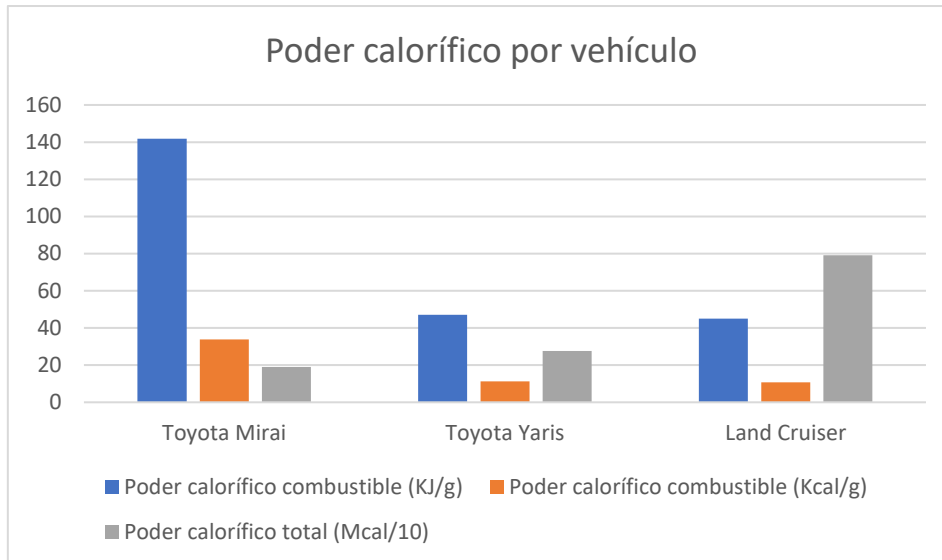


Ilustración 20: poder calorífico por vehículo

1.3. Estaciones de repostaje: hidrogeneras

Una estación de hidrógeno, o hidrogenera, es una estación de servicio para repostar hidrógeno en vehículos que lo utilicen como combustible. A diferencia de otros tipos como la gasolina o el diésel, el hidrógeno es suministrado por kilogramos y no por litros a partir de un surtidor de hidrógeno. El sistema de funcionamiento es muy similar al de una estación de repostaje convencional, donde se rellena gasolina o diésel, pero con algunos matices. El hidrógeno es suministrado y almacenado a alta presión, además de ser un gas extremadamente volátil e inflamable. La conexión entre el surtidor y el vehículo debe ser estanca para evitar fugas.



Ilustración 21: imagen de una hidrogenera

[25]

3. Toyota Mirai

En la actualidad, dentro de la Unión Europea, el 66.7% del transporte de carretera usa combustible diésel, seguido de un 24.55% que hace uso de la gasolina [26]. Esto que hace que la proporción de vehículos eléctricos no llegue al 10% hoy en día. Dentro de los vehículos eléctricos, los de consumo de hidrógeno apenas representan un pequeño porcentaje del total, habiendo dos modelos en la actualidad (Toyota Mirai y Hyundai Nexa) con apenas 1000 vehículos vendidos en Europa en 2021.

El Toyota Mirai es actualmente el modelo de coche de hidrógeno que cuenta con mayor arraigo en España. Su funcionamiento se basa en un proceso químico en el que se genera electricidad a través de la unión del hidrógeno almacenado con el oxígeno del exterior. La electricidad entonces alimenta el motor eléctrico y carga la batería.

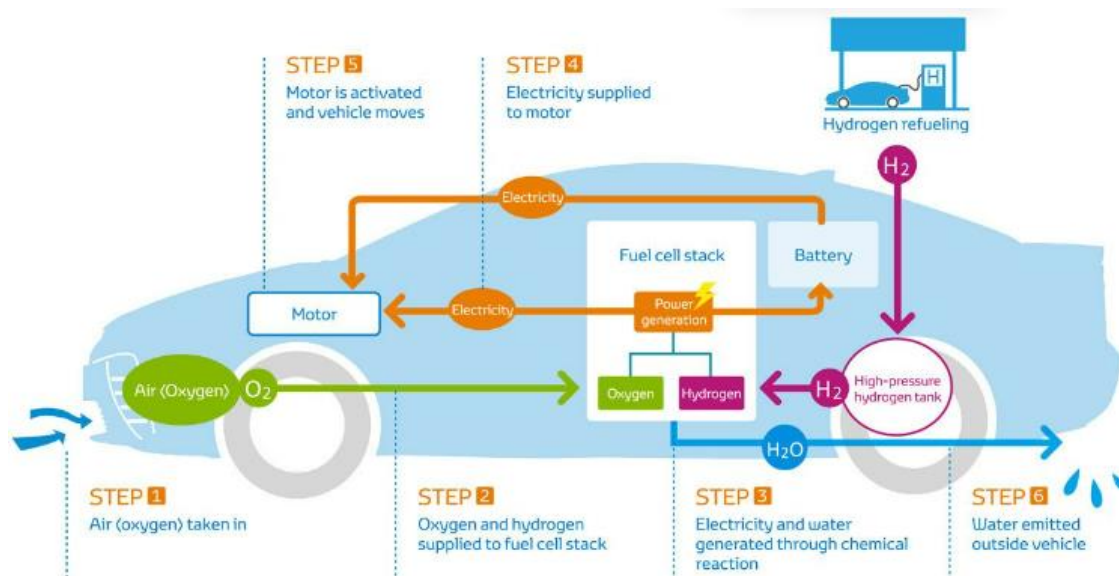


Ilustración 22: esquema de vehículo FCEV

[27]

A continuación, se va a realizar una descripción y análisis de cada una de las componentes del vehículo, con el objetivo de comprender su funcionamiento. Las componentes a analizar son el depósito de hidrógeno, la pila de combustible, la batería y el motor eléctrico.

3.1. Depósito de hidrógeno

El depósito de hidrógeno tiene un diseño preparado para almacenar gases a una presión de 700 bares, aunque en la práctica puede aguantar hasta el doble. El recipiente está formado por tres capas hechas de materiales compuestos. La primera es una capa interna hecha de un polímero plástico a base de nylon reforzado mediante fibras de carbono en distintas direcciones para evitar la difusión del hidrógeno. Le sigue una capa interna hecha de resina epoxy que otorga rigidez y consistencia a la estructura. En la parte más externa cuenta con un recubrimiento de fibra de vidrio a fin de proteger la superficie externa. La ventaja de este depósito es que al eliminar todo componente metálico se vuelve mucho más ligero, pero la cantidad de fibra de carbono necesaria hace que sea más caro. El Mirai cuenta con tres depósitos de hidrógeno cilíndricos que tienen capacidad para 65, 52 y 25 litros, respectivamente. Almacenan un total de 5,6 kg de hidrógeno a alta presión y tienen un peso de 100 kg.

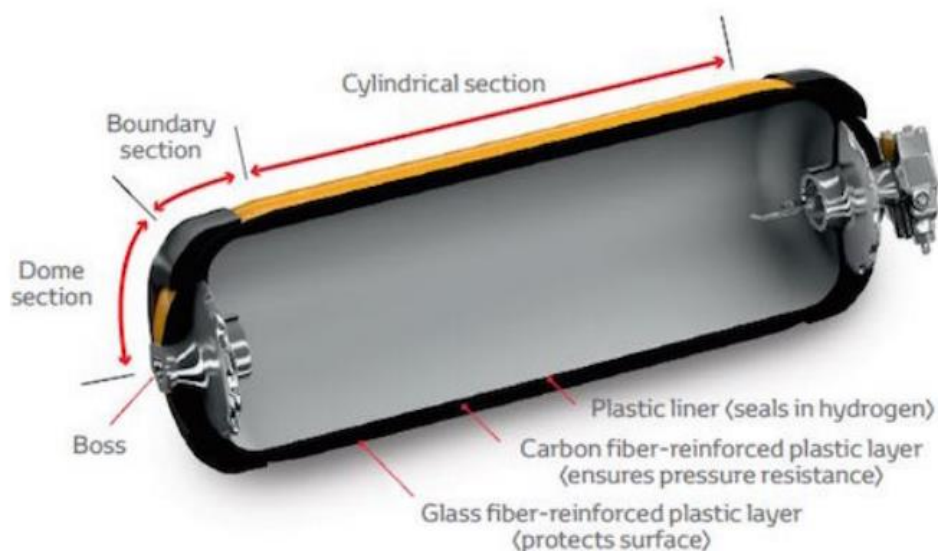


Ilustración 23: esquema de depósito gas

[28]

3.2. Pila de combustible

La pila de combustible es un dispositivo electroquímico en el cual un flujo de combustible y un oxidante, en este caso el oxígeno del aire, se juntan en una reacción química controlada que produce material desechable y corriente eléctrica, siendo esta última suministrada a un circuito externo. Es importante tener en cuenta que la pila de combustible genera energía eléctrica, no la almacena, ya que la suministra a la batería. La pila de combustible tiene el mismo esquema

que el de un electrolizador, o sea, dos electrodos conectados entre sí y un electrolito, pero la reacción producida es la contraria. A través del oxígeno y el hidrógeno se consigue electricidad, y se hace mediante su fusión, no separación.

Su funcionamiento es el descrito. Se suministra el hidrógeno, el combustible, al ánodo, donde se produce su oxidación. Esta oxidación se produce cuando el hidrógeno penetra en el ánodo y reacciona con un catalizador que acelera la reacción. El hidrógeno se disocia en electrones y en iones positivos H^+ . Por el otro lado, el aire de la atmósfera entra en el vehículo a través del canal de ventilación y el oxígeno entra en contacto con el cátodo. Entre los dos electrodos existe una membrana de una doble función. Por un lado, separa el suministro de los dos electrodos para evitar que los gases se junten y además cumple la función de electrolito al permitir el flujo de los iones positivos del ánodo al cátodo en el sentido correcto. Los electrones generados en el ánodo circulan a través de un circuito externo que une el ánodo con el cátodo, generando electricidad. Esta corriente eléctrica (continua) posteriormente se utiliza para activar los motores. Por último, los iones de hidrógeno y electrones se juntan con el oxígeno en el cátodo para formar vapor de agua, expulsado a la atmósfera.

En el Toyota Mirai la pila en cuestión es de electrolito de polímero, también llamadas pilas PEM (Proton Exchange Membrane). Las pilas de combustible tipo PEM son adecuadas para aplicaciones que requieran una respuesta de funcionamiento rápida, como el caso de los vehículos. El principal desafío consiste en aumentar la eficiencia de la misma, situada en torno al 40-60%. Su temperatura de funcionamiento se sitúa alrededor de los 80-95 °C, no pudiendo exceder de 100 debido a que el electrolito se mantiene hidratado para favorecer la conducción de los protones.

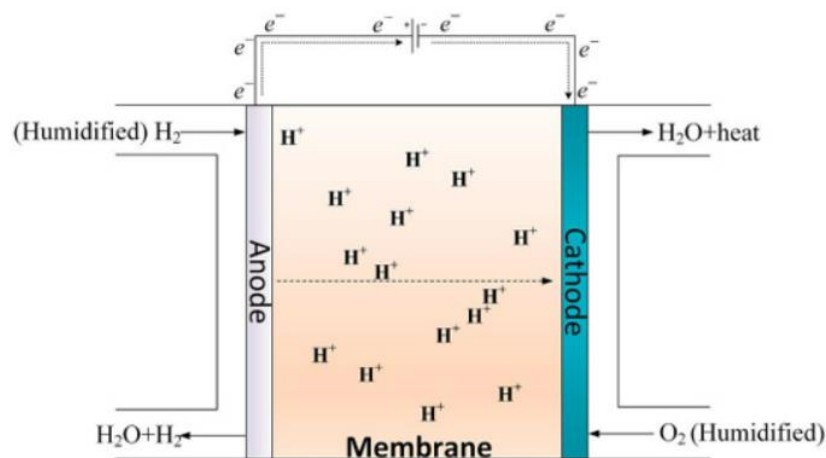


Ilustración 24: esquema de pila de combustible

3.3. Batería

La batería del vehículo es de tipo iones de litio. La ventaja que han adquirido este tipo de baterías se debe a las ventajas que ofrece. Posee una elevada densidad energética, por lo que es capaz de almacenar mucha energía en una modesta cantidad de volumen. A esto hay que sumarle su elevada eficiencia energética, resultante en un mayor rendimiento y aprovechamiento de la energía. Poseen a su vez una mayor vida útil al no tener un efecto memoria.

Las baterías de ion-litio están formadas por celdas individuales colocadas en serie que contienen un ánodo, un cátodo y un electrolito. Durante la carga, se aplica una corriente eléctrica al ánodo de la batería, lo que provoca la liberación de electrones del litio en el ánodo. Estos electrones viajan a través de un circuito externo, generando corriente eléctrica utilizable. Mientras tanto, los iones de litio positivos (cationes de litio) se mueven a través del electrolito hacia el cátodo. Durante la descarga, la batería suministra energía eléctrica al circuito externo. Los electrones fluyen desde el ánodo al cátodo a través del circuito, mientras que los iones de litio se mueven desde el cátodo hacia el ánodo a través del electrolito. Una vez que los iones de litio alcanzan el ánodo, se incorporan en su estructura, lo que resulta en una acumulación de energía. Esta reacción produce una corriente eléctrica continua hasta que los iones de litio en el ánodo se agotan, disminuyendo la capacidad de la batería.

La batería utilizada en el vehículo consta de 84 celdas, posee una capacidad de 1,24 kWh y un voltaje nominal de 310,8 V. Se refrigera a través de aire. [30]



Ilustración 25: imagen de batería eléctrica

[31]

3.4. Motor eléctrico

El motor eléctrico del coche es lo que se denomina Hydrogen Fuel Cell Electric, siendo de tipo síncrono de imán permanente. Es impulsado por la electricidad generada en la pila de combustible y suministrada por la batería. Tiene una potencia máxima de 134 KW/rpm y un par máximo de 300 Nm/rpm.

Un motor síncrono de imán permanente (PM) es un tipo de motor eléctrico en el que el rotor contiene imanes permanentes en lugar de devanados de campo. Su funcionamiento se basa en la interacción entre los campos magnéticos del rotor y el estator. El estator del motor síncrono de imán permanente tiene bobinas enrolladas que crean un campo magnético giratorio cuando se les suministra corriente eléctrica. Este campo magnético giratorio se conoce como campo magnético del estator. Por otro lado, el rotor del motor contiene imanes permanentes que generan su propio campo magnético fijo. Estos imanes están dispuestos de manera que su polaridad alterna en el rotor para crear un campo magnético giratorio. Este campo magnético giratorio del rotor intenta alinearse con el campo magnético giratorio del estator.

Cuando se aplica una corriente al estator, se crea un campo magnético giratorio en el estator que interactúa con el campo magnético giratorio del rotor. Esta interacción hace que el rotor intente alinearse con el campo magnético del estator. A medida que el rotor gira, los imanes permanentes del rotor mantienen su posición relativa al estator, creando un movimiento sincrónico. La velocidad del motor síncrono de imán permanente está determinada por la frecuencia de la corriente suministrada al estator y el número de polos magnéticos en el rotor. Para mantener la sincronización, la frecuencia de la corriente suministrada al estator debe coincidir con la velocidad de rotación del rotor.



Ilustración 26: esquema de motor eléctrico

4. Metodología

Para el estudio del caso se tendrán en cuenta varios escenarios en los que variarán el número de vehículos y las horas de luz al día. En la actualidad el número total de vehículos Toyota con motor de pila de combustible es muy reducido, por lo que se plantearán escenarios adicionales en los que exista un incremento de este tipo de vehículos. Se hará una estimación en escenarios con cinco, veinticinco y cincuenta vehículos repostando en la hidrogenera cada día.

Aparte de este escenario, se tendrá en cuenta el número de horas con sol al día. Esto se debe a que la electricidad usada en el electrolizador para la producción de hidrógeno varía en función de la luz solar captada, al obtenerse de placas fotovoltaicas situadas en la hidrogenera. A menos tiempo diurno, menos electricidad producida. Se harán estimaciones con tres días diferentes: los días con más y menos luz del año, siendo el 21 de diciembre y 21 de junio respectivamente, y el solsticio de primavera, habiendo las mismas horas de día y de noche en el mismo.

Los escenarios con más horas de sol y coches en circulación serán, previsiblemente, los más rentables, ya que la estación de repostaje producirá una mayor cantidad de hidrógeno con el mismo equipamiento que en los otros supuestos, haciendo que sea más rentable la producción del mismo.

En cuanto al Toyota Mirai, para el estudio económico se hará un análisis de las partes que obran en el funcionamiento del vehículo: el depósito de hidrógeno, la pila de combustible y el motor eléctrico. Se realizará una estimación económica del coste de cada componente para compararlo con un vehículo de combustión normal, viendo así su rentabilidad.

4.1. Hidrogenera

Aquí se evaluará el coste total de los equipos que participan en el funcionamiento de la hidrogenera: el electrolizador, el compresor, el depósito de hidrógeno, el refrigerador y el surtidor de gas. También se tendrá en cuenta el coste de instalación de las placas fotovoltaicas. Junto a esto, habrá que añadir un coste adicional por la energía usada por cada aparato, proveniente de la electricidad suministrada por la red eléctrica. El excedente de la electricidad producida por las placas fotovoltaicas que no sea usada en la producción de hidrógeno se aprovechará en el resto de equipamiento, ahorrando así precios.

4.1.1. Adquisición de equipos

4.1.1.1. Surtidor

Empezando por el surtidor, es fácil calcular el caudal necesario para llenar un depósito de combustible. Teniendo en cuenta que el Toyota Mirai es capaz de almacenar un total de 5.6 kilogramos de hidrógeno en sus depósitos y que un tiempo de repostaje razonable es de dos minutos, se tiene que:

$$\dot{m}_{surt} = \frac{5.6 \text{ kg}}{120 \text{ seg}} = 0,04667 \text{ kg/seg} = 2,8 \text{ kg/min}$$

De esta manera el surtidor necesario debe tener un caudal másico mínimo de 2,8 kg/min. Para ello, se ha elegido el surtidor E30 H2 de la empresa CETIL especializada en dispensadores de combustible. Dicho surtidor está diseñado para el uso al aire libre a temperatura ambiente en un rango de -20°C a 50°C, y además tiene un caudal máximo de 3.6 kg/min a una presión de 700 bares, por lo que cumple de manera apropiada con los requerimientos del vehículo.



Ilustración 27: imagen de surtidor de hidrógeno

4.1.1.2. Depósito de gas

Ahora se va a analizar el depósito de gas. La característica a valorar en este caso es el volumen de almacenamiento de gas que debe contener, ya que debe almacenar el suficiente hidrógeno para llenar los tanques del vehículo. Como se ha dicho anteriormente, el Toyota Mirai es capaz de almacenar un máximo de 5.6 kg de H₂, estando a una presión de 700 bares. Para saber el volumen que ocupa esa cantidad de gas hay que hacer uso de la Ley de los gases ideales, pudiendo ser descrita con la ecuación

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Siendo P la presión del gas comprimido, V el volumen que ocupa, n los moles de gas, R la constante ideal de los gases ideales y T la temperatura de almacenamiento. Si se toma la temperatura ambiente como 20 grados centígrados, sustituyendo se obtiene

$$V (m^3) = n \cdot \frac{R \cdot T}{P} = \frac{5600 g}{2 \frac{g}{mol}} \frac{0,08257 \frac{L \cdot bar}{K \cdot mol} \cdot 293K}{700 bar} = 96,77 L = 0,09677 m^3$$

Dicho volumen será el necesario para almacenar la cantidad de hidrógeno que cabe en un vehículo (5,6 kg) a una presión de 700 bar. Multiplicando ese valor por el número de vehículos que reposten en la hidrogenera tendremos la capacidad necesaria del depósito para almacenar gas.

$$V_{dep}(m^3) = 0,09677 \frac{m^3}{vehículo} \cdot n \text{ vehiculos}$$

Siendo n el número total de vehículos que reposten en la estación al día. El depósito que se tendrá que adquirir dependerá del número de coches que reposten cada día, debido a que la cantidad de hidrógeno a almacenar variará en función de la cantidad.

4.1.1.3. Compresor

El siguiente paso es el compresor de gas. El compresor debe ser capaz de incrementar la presión del hidrógeno de presión ambiente a la presión utilizada en el vehículo, siendo esta de 700 bar.

El parámetro importante a tener en cuenta es el caudal del compresor. Esto se debe a que debe comprimir hidrógeno a una velocidad suficiente como para suministrar hidrógeno en el tiempo deseado. Este caudal se calcula de un modo similar con el que se estimó el flujo del surtidor, suponiendo que hay que comprimir 5.6 kg de hidrógeno por vehículo al día.

$$\dot{m}_{comp} = \frac{5,6 \text{ kg}}{1 \text{ vehículo}} \cdot \frac{n \text{ vehículos}}{\text{día}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{H \text{ horas}}$$

Donde H simboliza el número de horas al día que el electrolizador esté produciendo hidrógeno, coincidiendo con las horas de luz. El compresor que se utilice dependerá de la demanda. Si es mayor el número de vehículos que pasan por la estación, mayor caudal deberá tener para abastecer la flota. En la siguiente tabla se han escogido una lista de compresores de la empresa Hiperbaric de doble etapa y carrera simple, compañía especializada en equipamiento de alta presión, que cumplen con las condiciones para todos los escenarios.

Modelo	Presión de salida máxima (bar)	Flujo (kg/h)	Consumo energético (kWh/kg H ₂)	Potencia total (kW)
1KS95	950	10	4,6	75
2KS95	950	20	4,6	120
1KS50 Pro	950	32	2,4	110

Tabla 5: modelos de compresores

El flujo mostrado es el presente bajo una presión de entrada de 30 bares.

Hiperbaric
HIGH PRESSURE TECHNOLOGIES

Grupos compresores Plug & Play: seguros, eficientes y fiables

Gama de grupos compresores adaptables a:

- Cualquier nivel de producción y demanda
- Diferentes presiones de aspiración y descarga: **desde 20 bar hasta 500 o 950 bar**

Componentes del grupo compresor



🔌 **Cilindro multiplicador**

🔌 Circuito de venteo

🔌 Sistema hidráulico

🔌 Instrumentación y panel de control

🔌 Sistema de refrigeración

🔌 Circuito neumático

Cilindro multiplicador en dos etapas



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

Número de etapas	2
Carrera	Simple
Reducción de la potencia	0 hasta 100% del caudal *
Temperatura de salida	<40°C
Superficie ocupada	Un contenedor Plug & Play 20' **
Variantes	Configurable para disponer uno o dos multiplicadores (que duplica el caudal)

* Gracias a la unidad hidráulica de la bomba axial utilizada ** Incluye sistemas de enfriamiento, control, seguridad y ventilación

Ilustración 28: grupos compresores

4.1.1.4. Refrigerador

Ya se han estudiado los equipos posibles para el surtidor, el depósito de almacenamiento y el compresor de gas, queda por ver el refrigerador y el electrolizador, además de las placas fotovoltaicas. Para escoger un refrigerador a la altura de las circunstancias se tiene que analizar la temperatura a la que va a estar almacenada el hidrógeno gas presurizado, la cual se regulará para mantenerla a presión ambiente. Para calcular la temperatura del gas a 700 bares de presión hay que hacer uso de la Ley de gases ideales:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$$

Si suponemos que la ecuación sigue una curva politrópica de parámetro $n=1.25$, valor que resulta razonable para un gas diatómico como lo es el H_2 , tenemos entonces

$$P_1 \cdot V_1^{1.25} = P_2 \cdot V_2^{1.25}$$

Utilizando la ecuación general de los gases ideales despejamos

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{P}$$

$$P_1 \cdot \left(\frac{n \cdot R \cdot T_1}{P_1} \right)^{1.25} = P_2 \cdot \left(\frac{n \cdot R \cdot T_2}{P_2} \right)^{1.25} \rightarrow P_1 \cdot \left(\frac{T_1}{P_1} \right)^{1.25} = P_2 \cdot \left(\frac{T_2}{P_2} \right)^{1.25}$$

$$T_2 = \sqrt[1.25]{P_1 \cdot \left(\frac{T_1}{P_1} \right)^{1.25} \cdot \frac{P_2^{1.25}}{P_2}}$$

Sabiendo que la temperatura ambiente es de 20 °C, la presión del gas a la salida del electrolizador es de 30 bar y la presión del gas presurizado es de 700 bares despejamos T₂.

$$T_2 = \sqrt[1.25]{30 \text{ bar} \cdot \left(\frac{293 \text{ K}}{30 \text{ bar}} \right)^{1.25} \cdot \frac{(700 \text{ bar})^{1.25}}{700 \text{ bar}}} = 550,13 \text{ K}$$

Siendo esa la temperatura a la que el hidrógeno estará almacenado se puede calcular la potencia necesaria del refrigerador para regular la temperatura del mismo. La cantidad de calor para calentar o enfriar un material desde una temperatura inicial T₁ a una temperatura T₂, usando la fórmula de la potencia calorífica, es

$$\dot{Q} \text{ (kW)} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

Siendo \dot{m} el flujo del gas y c_p el calor específico del hidrógeno molecular. El calor específico del hidrógeno a temperatura 550 K es de 14,53 KJ/kg·K. El flujo del gas es igual a la cantidad de hidrógeno producido para abastecer una flota de n coches en un periodo de tiempo igual a H horas en las que el electrolizador esté en marcha. Sustituyendo se obtiene:

$$\dot{Q} \text{ (kW)} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) =$$

$$5,6 \text{ kg} \cdot \frac{n}{H \text{ horas}} \cdot \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ seg}} \cdot 14,53 \frac{\text{KJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (550,13 - 293 \text{ K}) = 5,812 \cdot \frac{n}{H} \text{ KW}$$

El valor final es la potencia necesaria del refrigerador para mantener el hidrógeno a una temperatura constante. Para este caso se han escogido los modelos KIT-ADC12HE5C-S y KIT-ADC16HE5C-S de la marca Panasonic, con una capacidad frigorífica de 10 y 12,2 kW, respectivamente.

4.1.1.5. *Electrolizador*

Para el estudio del electrolizador hay que analizar la producción de hidrógeno necesaria para abastecer la flota de vehículos. La capacidad de producción que deberá tener éste se calcula dividiendo la cantidad de H₂ producida entre el tiempo que esté en funcionamiento.

$$\dot{m}_{elec} = \frac{5,6 \text{ kg}}{1 \text{ vehiculo}} \cdot \frac{n \text{ vehiculos}}{\text{día}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{H \text{ horas}} \text{ kg/h}$$

El cálculo del caudal en normo metros cúbicos se hace en condiciones normales de presión y temperatura.

$$V \text{ (m}^3\text{)} = n \cdot \frac{R \cdot T}{P} = \frac{5600 \cdot n \text{ g}}{2 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot \frac{0,08257 \frac{\text{L} \cdot \text{bar}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \cdot 293 \text{ K}}{1,013 \text{ bar}}$$

A la hora de escoger un equipo se ha elegido la marca NelHydrogen, por ser una empresa que ofrece una serie de electrolizadores de tipo PEM capaces de cumplir los requisitos y producir el hidrógeno necesario. En la tabla inferior se muestran los modelos existentes son sus principales características.

Modelo	Capacidad de producción (kg/24h)	Pureza del hidrógeno (%)	Consumo de potencia (KWh/Nm ³)	Presión H ₂ (bar)
M2000	4,247	99,999	4,5	30
M3000	6,371	99,999	4,5	30
M4000	8,495	99,999	4,5	30
M5000	10,618	99,999	4,5	30

Tabla 6: modelos de electrolizador

El consumo de potencia está calculado a una presión de 30 bares. Para saber el consumo de la máquina basta con multiplicar por el caudal al que esté trabajando.

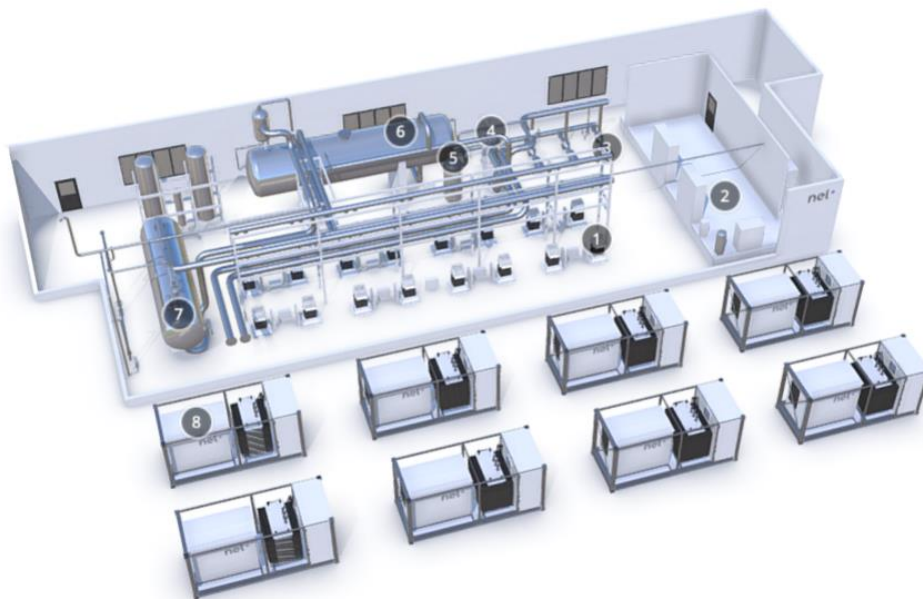


Ilustración 29: esquema de una planta de electrolizadores

4.1.1.6. Planta fotovoltaica

Para calcular la energía total producida por una planta fotovoltaica se puede hacer uso de la herramienta PVGIS – 5 habilitada por la Comisión Europea. En una hidrogenera se puede suponer que existe un espacio de 200 m² sobre el que se puede construir una instalación de placas fotovoltaicas. Se han escogido las placas solares del modelo JAM54D30 de la marca JA Solar, ya que poseen una buena potencia y dimensiones apropiadas para este caso, teniendo una máxima potencia individual de 400 – 425 KW y unas dimensiones de 1134x1722x30 mm. Con esos datos, la potencia total instalada será:

$$\text{número paneles} = \frac{200 \text{ m}^2}{1,134\text{m} \cdot 1,722\text{m}} = 102,42$$

$$P(kW) = 102 \cdot 425 = 43,35 \text{ kW}$$

Si se mide desde una estación fotovoltaica localizada en Madrid, con los paneles dispuestos horizontalmente sobre la superficie, se obtienen los datos mostrados en la imagen inferior para lo potencia total de la instalación, calculados con la radiación solar medida en 2020.

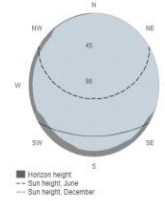
Performance of tracking PV

PVGIS-5 estimates of solar electricity generation

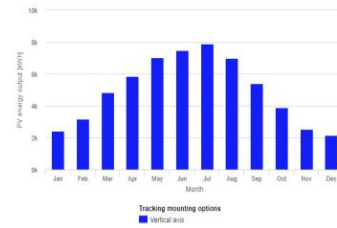
Provided inputs:		Simulation outputs	
Latitude/Longitude:	40.396,-3.755	VA*	0
Horizon:	Calculated	Slope angle [°]:	0
Database used:	PVGIS-SARAH2	Yearly PV energy production [kWh]:	59591.22
PV technology:	Crystalline silicon	Yearly in-plane irradiation [kWh/m ²]:	1789.59
PV installed:	43.35 kWp	Year-to-year variability [kWh]:	1328.4
System loss:	14 %	Changes in output due to:	
		Angle of incidence [%]:	-3.85
		Spectral effects [%]:	0.41
		Temp. and low irradiance [%]:	-7.68
		Total loss [%]:	-23.19

* VA: Vertical axis

Outline of horizon at chosen location:



Monthly energy output from tracking PV system:



Month	E_m	H (kWh/m ²)	SD_m
January	2415.9	69.9	309.0
February	3183.4	90.9	321.8
March	4841.7	138.7	452.8
April	5834.0	170.4	357.0
May	7018.4	209.8	575.0
June	7469.5	229.4	292.0
July	7883.1	246.4	215.4
August	6969.7	217.3	181.1
September	5382.0	163.6	157.9
October	3901.0	115.7	290.3
November	2526.3	73.8	268.5
December	2166.3	63.7	143.6

E_m: Average monthly electricity production from the defined system [kWh]
 H_m: Average monthly sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system [kWh/m²]
 SD_m: Standard deviation of the monthly electricity production due to year-to-year variation [kWh]

Monthly in-plane irradiation for tracking PV system:



Ilustración 30: potencia de la planta fotovoltaica

La potencia total producida por los paneles en cada mes es de 2166,3 KWh, 4841,7 KWh y 7469,5 KWh, de los meses de diciembre, marzo y junio respectivamente. Si se supone que en todos los días la radiación es la misma la potencia diaria es de 69.88 KWh, 156.18 KWh y 248.98 KWh.

4.1.2. Coste de adquisición de equipos

En este apartado se va a analizar el coste total del equipamiento necesario para el funcionamiento de la hidrogenera. Para ello se tendrá en cuenta las características de cada equipo (potencia nominal, energía producida, etc) y se establecerá un coste dependiente de la producción de hidrógeno necesaria.

4.1.2.1. Surtidor de hidrógeno

El surtidor escogido es el E30 H2 de la empresa CETIL, con un caudal máximo de 3,6 kg H₂/min. Para calcular su precio se utiliza el coste CAPEX de la tabla inferior, sacada del artículo *Hydrogen refueling station cost model applied to five real case studies for fuel cell buses*, de la web de conferencias del 76º Congreso Nacional Italiano.

Table 3. Summary of technical and economic parameters for the compression, storage, dispensing and balance of plant sections of the HRS ^{31, 15,38, [14,18,36]}.

	Compressor	Storage	Dispenser	Balance of Plant
Technical parameters				
Sizing criteria	Q _{max} production (Nm ³ /h) Q _{avg} delivery (Nm ³ /h)	Days of nominal capacity (kg)	Nominal capacity (kg/day)	5% P _{inst} (onsite) ≥20 kW _e (delivery)
Energy consumption	Eq. 2 + 20% cooling	-	-	24/24h; η _c =0.97%
Economic parameters				
CAPEX	15,000 x ^{-0.4} f _{boost} * €/kW _e	350-1000 €/kgH ₂ **	f _{disp} *** 350 €/ (kg/day)	200 €/kW _e
OPEX	Energy	Eq. 2 x c _{el}	-	P _{aux} x c _{el}
	O&M	4% _{CAPEX} /year	2% _{CAPEX} /year	2% _{CAPEX} /year

* compressor boost coefficient; f_{boost} ≥ 1

** calibrated based on nominal pressure, stored capacity and management valves units

*** depending on dispenser type & pressure; 1 < f_{disp} < 1.5

El precio del surtidor viene dado por la fórmula de la tabla $C_{surt} = f_{disp} \cdot 350 \text{ €/kg/día}$, siendo f_{disp} una variable entre 1 y 1,5. Teniendo que el surtidor suministra hidrógeno a una presión de 700 bares y que tiene dos entradas de presión, se le da un valor igual a $f_{disp} = 1,5$. Con esto se tiene que el coste total del surtidor, incluido amortización, será:

$$C_{surt}(\text{€}) = 1,5 \cdot 350 \text{ €/kg/día} \cdot 5,6 \text{ kg/vehículo} \cdot n \text{ vehículo/día}$$

4.1.2.2. Depósito de gas

La mayor parte del costo del depósito de gas viene de la fibra de carbono empleada en su construcción, material de numerosas propiedades pero de precio elevado. Para hallar una buena estimación del dinero a gastar en su adquisición es necesario evaluar la cantidad de FC (fibra de carbono) presente. Para ello, se usará la tabla inferior de sistemas de almacenamiento de alta presión, donde se muestra la cantidad de FC en cada depósito, así como los kilogramos de H₂ que es capaz de almacenar cada modelo. La información siguiente ha sido obtenida del Departamento de Energía del Gobierno de EEUU, concretamente del artículo *Hydrogen Storage Cost Analysis*, donde se analiza el coste de almacenamiento del hidrógeno.

Table 1. Summary of System Capacities and Carbon Fiber Requirements for MDV and HDV Storage Systems

Location	Number of Tanks	Interior Tank Length (inches)	Interior Tank Diameter (inches)	Usable H ₂ (kg H ₂ /tank)			Composite Mass (kg carbon fiber/tank)		
				350-bar cH ₂	500-bar CcH ₂	700-bar cH ₂	350-bar cH ₂	500-bar CcH ₂	700-bar cH ₂
BTC	2-4	80	16	5.7	17.4	9.7	61.0	93.8	152.0
	2-4	80	21	9.6	29.6	16.3	107.2	152.8	257.5
RM	4	80	16	5.7	17.4	9.7	61.0	93.8	152.0
	4	96	16	6.9	21.1	11.7	73.6	113.3	182.8
	4	97	12	4.0	12.1	6.7	50.1	68.0	108.5
FM	1-2	60	21	7.0	21.4	11.9	79.3	112.7	190.9
	1-2	80	21	9.6	29.6	16.3	107.2	152.8	257.5
	1-2	120	21	14.9	45.8	25.3	163.0	232.9	390.8
	1-2	60	26	10.3	31.8	17.5	120.4	165.7	288.2
	1-2	80	26	14.4	44.1	24.4	161.8	224.9	386.7
	1-2	90	26	16.4	50.4	27.8	182.5	254.6	436.0
	1-2	120	26	22.4	68.9	38.1	244.7	343.4	583.8

350-bar Type 3 compressed (350-bar cH₂), 500-bar cryo-compressed (500-bar CcH₂), and 700-bar Type 4 compressed (700-bar cH₂) hydrogen storage systems are considered. Storage system dimensions are taken from A-1 electric

Tabla 7: fibra de carbono en depósitos de gas

Para saber el precio de la fibra de carbono empleada en la construcción de los tanques se consulta el mismo artículo donde se muestra el precio unitario del material. Los datos se muestran en la gráfica inferior.

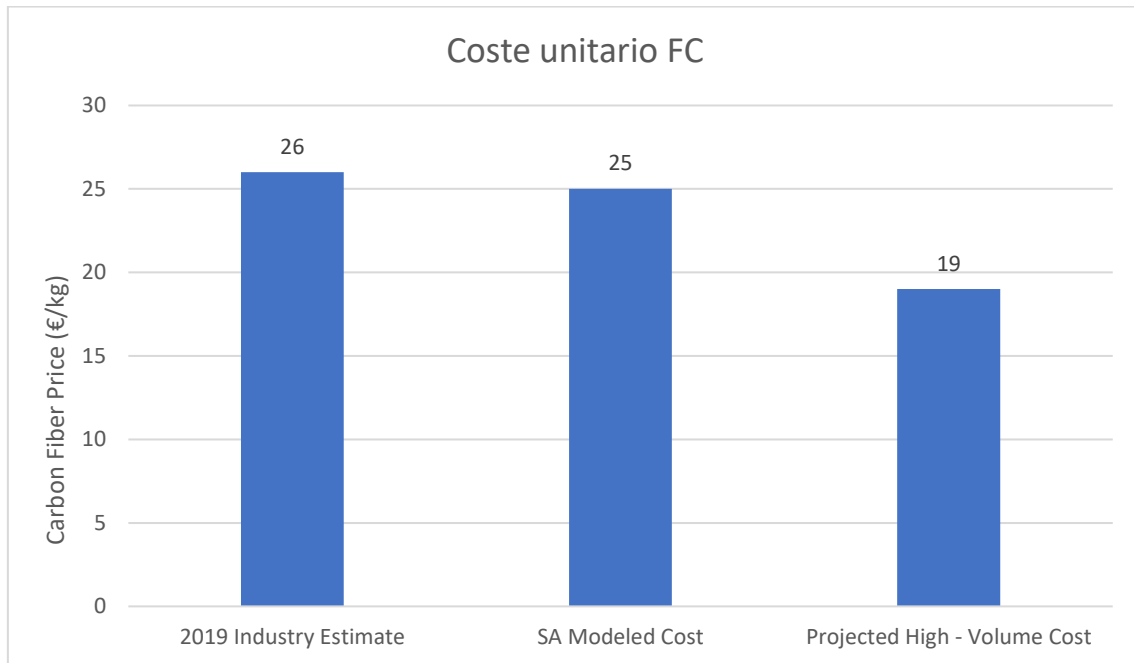


Ilustración 32: coste de fibra de carbono

El coste de la fibra de carbono hoy en día es de 26 €/kg, cifra que como se ve se pretende que baje en los próximos años. El coste puede parecer elevado hoy en día teniendo en cuenta la cantidad de material que necesitan estos depósitos, y se espera que se reduzca en los próximos años. Para calcular el coste del depósito de gas se escogerá un recipiente en función de los kilogramos de hidrógeno demandados y con la cantidad de fibra de carbono que contenga el mismo se podrá estimar su precio.

4.1.2.3. Compresor

Para calcular el coste del compresor de hidrógeno las características a tener en cuenta son la potencia nominal del mismo y la presión a la que sale el gas. Un método comúnmente usado a nivel comercial es el cálculo del TIC (Total installed cost). El TIC es el coste del compresor en sí (uninstalled cost (UC)) y el trabajo para instalarlo o installation factor (IF). El IF depende del tipo de compresor con el que se trabaje.

$$TIC = UC \cdot IF$$

Los valores de estas variables están mostrados en la tabla inferior.

Compressor Type	Value / Conversion factor	Notes
High flow rate – Moderate compression ratio	Pipeline compressor: UC [2019 C\$] = 3,083.3 * kW ^{SF} , where Scale Factor (SF) = 0.8335; IF = 2.0	Source: HDSAM kW = kW motor power Converted to 2019 C\$ by escalating cost using CEPCI (2007 = 525.4, 2013=567.30, 2019 = 619.2) followed by the C\$/US\$ exchange rate. 0.75 US\$/C\$ (2019 average)
Small flow rate – High compression ratio	Terminal storage or Refueling station main: <ul style="list-style-type: none"> For 350 bars refueling UC [2019 C\$] = 63,684.6 * kW^{SF}, where SF = 0.4603; IF = 1.3 For 700 bars refueling UC [2019 C\$] = 62,909.9 * kW^{SF}, where SF = 0.6038; IF = 1.3 Terminal loading or refueling station booster compressors: UC [2019 C\$] = 8,731.88 * kW; IF = 1.3	Source: HDSAM kW = kW motor power Converted to 2019 C\$ by escalating cost using CEPCI (2007 = 525.4, 2013=567.30, 2019 = 619.2) followed by the C\$/US\$ exchange rate. 0.75 US\$/C\$ (2019 average)

Tabla 8: coste de compresión del hidrógeno

[35]

Teniendo en cuenta que el compresor usado en este caso comprime el hidrógeno a 700 bares, el cálculo del coste será:

$$UC (C\$) = 62909,9 * KW^{SF}$$

$$SF = 0,4603 ; IF = 1,3$$

$$TIC(C\$) = 1,3 \cdot 62909,9 * KW^{0,4603}$$

Donde KW es la potencia del motor. Pasándolo a euros queda:

$$TIC(€) = 0,6976 \cdot 1,3 \cdot 62909,9 * KW^{0,4603}$$

Teniendo la potencia de los compresores que se tengan que utilizar, se podrá calcular el precio de adquisición. Será importante elegir primero el material en función de la demanda de hidrógeno y luego calcular el precio del equipamiento escogido.

4.1.2.4. Refrigerador

Para estimar el precio del refrigerador, se va a utilizar el precio de mercado de otros refrigeradores en función de su potencia. En la tabla inferior se muestra una lista de ellos.

Refrigerador	Potencia (kW)	Precio de venta al público (PVP)
42AM – 302COM9LE	13,9	1 077
42AM – 353COM9LR	17,2	1 259
42AM – 403COM9LR	23,2	1 693
42AM – 453COM9LR	32,8	1 823

Tabla 9: modelos de refrigerador

Si se hace una recta de regresión lineal, en la que el precio aparezca en función de la potencia, quedaría tal que

$$PVP(€) = 40,042 \cdot P(kW) + 591,08$$

Donde P es la potencia en kilovatios del mismo.

4.1.2.5. Electrolizador

El coste actual de los electrolizadores tipo PEM ronda los 1000 €/KW, aunque algunos proveedores ofrecen precios de hasta 700 €/KW. La desventaja que tienen es que los electrolizadores alcalinos son la mitad de caros que los de tipo PEM, si bien es cierto que los de pequeña potencia (<100 KW) son competitivos con los de tipo alcalino. Usando los datos del informe *Development of water electrolysis in the European Union* [36] se han obtenido los costes de los electrolizadores en función de su potencia.

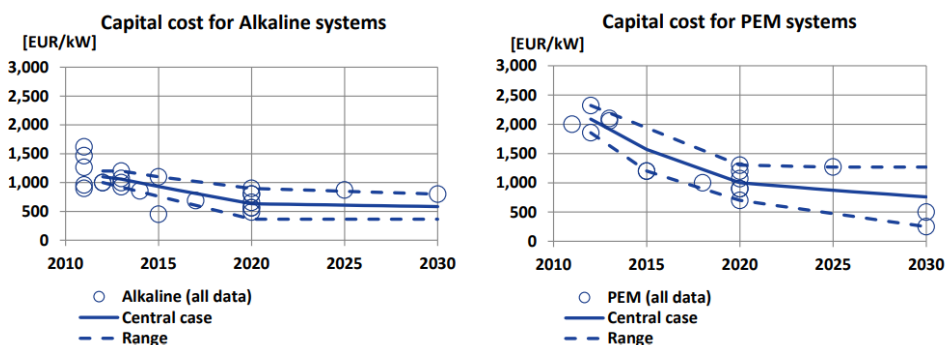


Ilustración 33: coste de electrolizadores

Dichos datos aparecen resumidos en la tabla inferior, de elaboración propia.

Coste del sistema		2015	2020	2025	2030	
EUR / KW	Alcalino	Media	930	630	610	580
		Rango	760 - 1100	370 - 900	370 - 850	370 - 800
	PEM	Media	1570	1000	870	760
		Rango	1200 - 1940	700 - 1300	480 - 1270	250 - 1270

Tabla 10: coste de electrolizadores

Con estos datos se puede estimar el precio de un electrolizador como un valor proporcional a su potencia.

$$C_{elec}(\text{€}) = 1000 \text{ €/KW} \cdot P_{elec}$$

Siendo P_{elec} la potencia consumida en KW por el electrolizador. La potencia consumida es igual al caudal del electrolizador multiplicado por el gasto energético por unidad de volumen, quedando:

$$C_{elec}(\text{€}) = 1000 \text{ €/KW} \cdot Q_{elec} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \cdot P_{elec} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right)$$

A la hora de escoger electrolizador se determinará el caudal para producir el hidrógeno necesario y se hará uso de uno de los mostrados en la Tabla X. En función de su potencia unitaria se podrá realizar una estimación de su coste.

4.1.2.6. Planta fotovoltaica

El coste de las placas fotovoltaicas se puede averiguar fácilmente mirando su precio de mercado. El coste del modelo Deep Blue 3.0 405W de la empresa JA Solar, que será el utilizado, tiene un precio unitario de 142.85 € [37].

Panel Solar 405W Deep Blue 3.0 JA Solar Mono



142,85€ SIN IVA 118,06 €

★★★★★ 145 Opiniones

Descuento 8% (155,50 € sin descuento)

Envío: **Gratuito** en compras superiores a 150€, inferiores 7,5€

Entrega: **Recíbelo el lunes 12 de junio**

Fabricante: Ja Solar | Cod. Artículo: 1002317

Cantidad:

Financiación: [Calcular cuota](#)

AÑADIR AL CARRITO **COMPRAR**

Ilustración 34: coste de panel solar

Sabiendo que se tiene un espacio de 200 m² para edificar se calcula el número de paneles a instalar y su precio total.

$$N^{\circ} \text{ placas} = \frac{200 \text{ m}^2}{1,722 \text{ m} \cdot 1,134 \text{ m}} = 102$$

$$C_{fotov} = 102 \cdot 142,85 \text{ €} = 14570,7 \text{ €}$$

El resultado calculado sería el coste total de la instalación fotovoltaica.

4.1.3. Coste de mantenimiento

El coste de mantenimiento se estima en un cinco por ciento del coste total de la adquisición de los equipos.

$$C_{mant}(\text{€}) = (C_{surt} + C_{comp} + C_{dep} + C_{ref} + C_{elec} + C_{fot}) \cdot 1,05$$

Este será el coste anual empleado en el mantenimiento de los equipos de la planta de hidrógeno. Si se quiere calcular los costes de un mes se hace la equivalencia.

$$C_{mant}(\text{€}) = (C_{surt} + C_{comp} + C_{dep} + C_{ref} + C_{elec} + C_{fot}) \cdot 1,05 \cdot \frac{1}{12}$$

4.1.4. Coste de la electricidad

En este apartado se evaluará la energía requerida por los equipos eléctricos y el coste de esta. La energía producida por las placas fotovoltaicas reducirá el coste final, ya que al ser aprovechada en el funcionamiento de la hidrogenera se usará menos electricidad de la red.

El precio de la electricidad en el mercado mayorista es variable, estando sujeto a la oferta de la luz o el precio de recursos como el gas y el petróleo en los mercados internacionales. Consultando el precio medio de los últimos meses en España se podrá hacer una media.

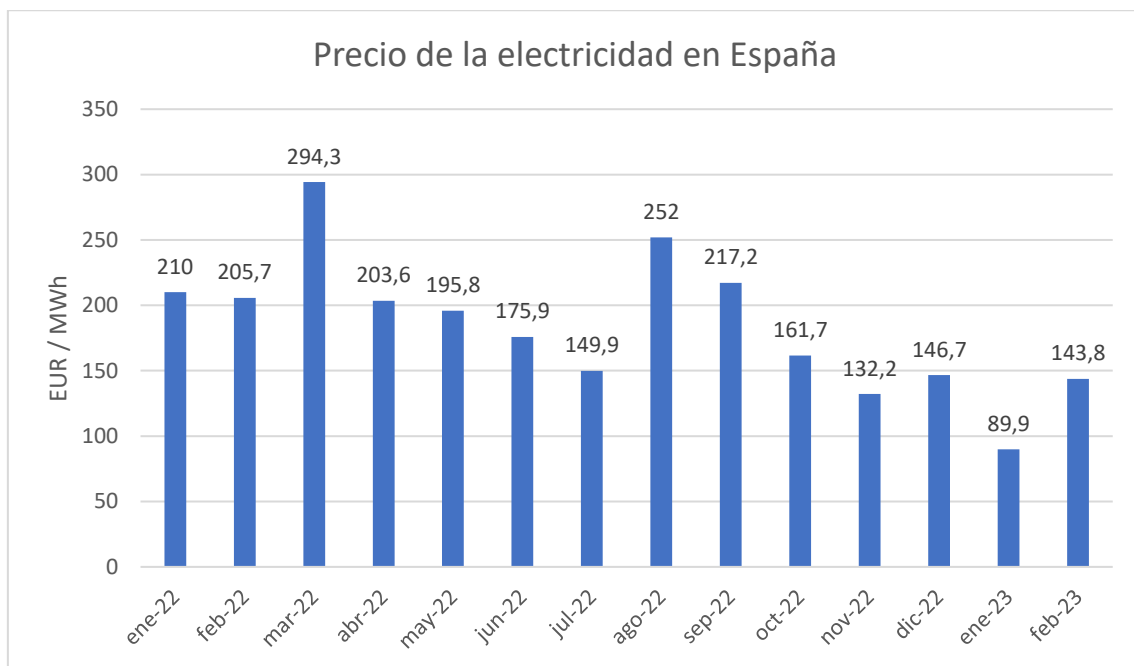


Ilustración 35: precio de la electricidad

[38]

En los últimos meses ha habido un descenso en los precios debido entre otros factores a la bajada de la inflación. La media mensual empezando en enero de 2022 es de 184,19 €/MWh.

La energía usada en la producción del hidrógeno se distribuye en los diferentes equipos de la hidrogenera. Los equipamientos que utilizan energía eléctrica para entrar en funcionamiento son el surtidor, el compresor, el refrigerador y el electrolizador. El depósito de gas tiene un funcionamiento pasivo y las placas fotovoltaicas producen energía en vez de consumirla, por lo que no usan electricidad de la red. Empezando por el surtidor, se estima que el consumo medio es de 0,3 kWh/kg H₂. Con eso se tiene:

$$E_{surt}(kWh) = 0,3 kWh/kg H_2 \cdot 5,6 kg H_2 \cdot n$$

Siendo esa la energía consumida al día por el surtidor de hidrógeno

En el caso del compresor se sabe el consumo energético por kilogramo de hidrógeno producido, que varía en función de cada modelo.

$$E_{comp}(kWh) = kWh/kg H_2 \cdot 5,6 kg H_2 \cdot n$$

Para el caso del refrigerador, se sabe la potencia que debe tener para mantener a temperatura constante el hidrógeno necesario para repostar n vehículos durante el tiempo de producción de hidrógeno.

$$\dot{Q} (kW) = 5,812 \cdot \frac{n}{H} KW$$

Si se multiplica por las horas que esté en funcionamiento se obtendrá la cantidad de potencia necesaria para refrigerar el hidrógeno durante una hora.

$$E_{ref}(kWh) = 5,812 \cdot n kWh$$

Ahora se analiza la energía consumida por el electrolizador. El consumo de potencia es medido en este caso en kilovatios hora por m^3 , y para todos los modelos analizados el consumo es idéntico. De la misma manera que antes se calcula su consumo eléctrico.

$$E_{elec}(kWh) = 4,5 kWh/m^3 H_2 \cdot \dot{Q}_{elec} \cdot n$$

El volumen de hidrógeno producido en H horas es:

$$V (m^3) = n \cdot \frac{R \cdot T}{P} = \frac{5600 \cdot n \cdot g}{2 \frac{g}{mol}} \cdot \frac{0,08257 \frac{L \cdot bar}{K \cdot mol} \cdot 293K}{1,013 bar}$$

Además de la potencia consumida para su funcionamiento, el electrolizador necesitará energía para producir el hidrógeno. Con la tabla de abajo se sabe la cantidad de electricidad necesaria por un electrolizador para producir un kilogramo de hidrógeno, siendo esta 54,6 kWh.

Energy Efficiency Calculations			Distributed	Basis for Assumptions
			Current	
	H ₂ Outlet Pressure	psi	450	Industry feedback
Stack Electrical Usage				
	Cell voltage	volts/cell	1,75	Based on literature and industry input (assuming 1.5A/cm ² current density).
	Voltage Efficiency	% LHV	70,3%	Equation: 1.23/cell voltage
	Dryer Loss	% of gross H ₂	3%	The 3% Dryer loss comes from industry input ("3-4%").
	Permeation Loss	% of gross H ₂	0,7%	Based on back diffusion model (1.85x10 ⁻⁷ cm ² /s back diffusion coefficient): Industry input is 0.7% at 450psi, model says 0.5% at 450psi for a 3µm thick membrane.
	Total Stack Energy Usage per mass net H₂	kWh_{elec}/kg_{net}H₂	49,23	Based on 33.33 kWh/kg H ₂
BOP Loads				
	Power Inverter Efficiency	%	94%	Based on industry input.
	Inverter Electrical Load	kWh _{elec} /kg _{net} H ₂	2,95	
	Dryer Thermal Load	kWh _{thermal} /kg _{net} H ₂	0,34	Based on Hysys Simulation.
	Dryer Efficiency	kWh _{elec} /kWh _{thermal}	3,67	Based on industry input for the ratio of net electrical energy for the chiller.
	Dryer Electrical Load	kWh _{elec} /kg _{net} H ₂	1,25	
	Misc Electrical Load	kWh _{elec} /kg _{net} H ₂	1,2	Based on industry input for current.
	Total BOP Electrical Load	kWh_{elec}/kg_{net}H₂	5,40	
Summary				
	Stack Electrical Usage	kWh _{elec} /kg _{net} H ₂	49,23	
	BOP Electrical Usage	kWh _{elec} /kg _{net} H ₂	5,40	
	Total System Electrical Usage per mass net H₂	kWh_{elec}/kg_{net}H₂	54,6	

Tabla 11: producción energética de hidrógeno

[39]

Por lo tanto, la energía necesaria para producir el hidrógeno demandado será

$$E_{H_2} = 54,6 \text{ kWh/kg } H_2 \cdot 5,6 \text{ kg } H_2 \cdot n \text{ kWh}$$

Por último, hay que calcular la energía necesaria para el correcto funcionamiento de la planta fotovoltaica. La potencia producida por la instalación se saca utilizando la herramienta PVIGS de la Comisión Europea, donde se obtiene la producción media de cada mes.

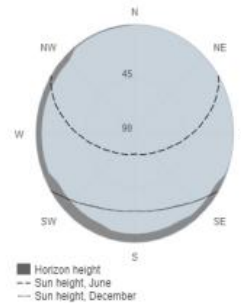
Performance of tracking PV

PVGIS-5 estimates of solar electricity generation

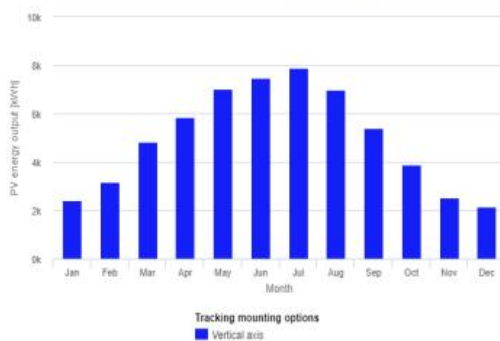
Provided inputs:		Simulation outputs	
Latitude/Longitude:	40.396,-3.755	VA*	0
Horizon:	Calculated	Slope angle [°]:	0
Database used:	PVGIS-SARAH2	Yearly PV energy production [kWh]:	59591.22
PV technology:	Crystalline silicon	Yearly in-plane irradiation [kWh/m ²]:	1789.59
PV installed:	43.35 kWp	Year-to-year variability [kWh]:	1328.4
System loss:	14 %	Changes in output due to:	
		Angle of incidence [%]:	-3.65
		Spectral effects [%]:	0.41
		Temp. and low irradiance [%]:	-7.68
		Total loss [%]:	-23.19

* VA: Vertical axis

Outline of horizon at chosen location:



Monthly energy output from tracking PV system:



Month	E_m	H(i)_m	SD_m
January	2415.9	69.9	309.0
February	3183.4	90.9	321.8
March	4841.7	138.7	452.8
April	5834.0	170.4	357.0
May	7018.4	209.8	575.0
June	7469.5	229.4	292.0
July	7883.1	246.4	215.4
August	6969.7	217.3	181.1
September	5382.0	163.6	157.9
October	3901.0	115.7	290.3
November	2526.3	73.8	268.5
December	2166.3	63.7	143.6

E_m: Average monthly electricity production from the defined system [kWh].
H_m: Average monthly sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system [kWh/m²].
SD_m: Standard deviation of the monthly electricity production due to year-to-year variation [kWh].

Monthly in-plane irradiation for tracking PV system:



Tabla 12: producción solar eléctrica de la instalación

Teniendo en cuenta que la potencia producida es mensual, habría que dividir para obtener la diaria. En el caso de que no se pueda producir a través de la instalación fotovoltaica la energía necesaria para obtener el hidrógeno demandado se obtendrá la electricidad necesaria de la red.

El coste total de la electricidad se calcula multiplicando la energía consumida en los equipos por el precio de esta. La energía producida por las placas se puede restar al total para ahorrar costes.

$$C_{elect}(\text{€}) = (E_{elec} + E_{surt} + E_{comp} + E_{ref} + E_{H_2} - E_{fot}) \cdot 184,19 \text{ €/kWh}$$

4.1.5. Coste unitario del hidrógeno

En esta sección se procederá a calcular el coste total de la instalación, sumando la adquisición de equipos, la electricidad usada y el mantenimiento, en función de la cantidad de hidrógeno producida. Como se puede suponer, a mayor cantidad de hidrógeno producida más rentable saldrá este, ya que existen unos costes fijos de la instalación que son independientes de la producción de gas. Si hay un flujo pobre de hidrógeno los equipos instalados no se verán amortizados; el dinero gastado en la electricidad usada sí se verá compensado ya que va pareja a la formación de hidrógeno. Con este análisis en mano es razonable deducir que habrá una mejor inversión con más vehículos en circulación.

Respecto a las horas de funcionamiento de la hidrogenera, determinada por las horas de luz solar, cuanto más tiempo esté la estación en funcionamiento más costosa resultará. El escenario ideal será el que abarque la mayor cantidad de vehículos en el menor tiempo posible.

Para realizar los cálculos con una proyección mensual se multiplicará el número de coches al día por treinta. El coste unitario del hidrógeno será

$$C_{H_2}^{unit} (\text{€}) = \frac{C_{elec} + C_{inst} + C_m}{(n \cdot 30) \text{ veh\acute{u}culo} \cdot 5,6 \text{ kg } H_2 / \text{veh\acute{u}culo}}$$

4.2. Toyota Mirai

En cuanto al Toyota, se procederá a realizar un estudio individual de cada componente del vehículo que forma parte de la cadena de uso del hidrógeno verde. Estos son el depósito de gas, la pila de combustible, la batería de litio y el motor eléctrico. Este estudio servirá más adelante para fijar los precios adecuadamente, ya que cada pieza tiene sus características y funciones que influyen en el coste.

4.2.1. Depósito de gas

El Toyota Mirai cuenta con tres depósitos de hidrógeno; almacenan un total de 5,6 kg de hidrógeno a alta presión y tienen un peso de 100 kg. Para estimar el precio de los mismos, se puede emplear la misma metodología usada con el depósito de la hidrogenera: sabiendo la cantidad de fibra de carbono que contiene un depósito se puede calcular el precio de la misma, siendo esta el componente más caro del depósito.

Table 1. Summary of System Capacities and Carbon Fiber Requirements for MDV and HDV Storage Systems

Location	Number of Tanks	Interior Tank Length (inches)	Interior Tank Diameter (inches)	Usable H ₂ (kg H ₂ /tank)			Composite Mass (kg carbon fiber/tank)		
				350-bar cH ₂	500-bar CcH ₂	700-bar cH ₂	350-bar cH ₂	500-bar CcH ₂	700-bar cH ₂
BTC	2-4	80	16	5.7	17.4	9.7	61.0	93.8	152.0
	2-4	80	21	9.6	29.6	16.3	107.2	152.8	257.5
RM	4	80	16	5.7	17.4	9.7	61.0	93.8	152.0
	4	96	16	6.9	21.1	11.7	73.6	113.3	182.8
	4	97	12	4.0	12.1	6.7	50.1	68.0	108.5
FM	1-2	60	21	7.0	21.4	11.9	79.3	112.7	190.9
	1-2	80	21	9.6	29.6	16.3	107.2	152.8	257.5
	1-2	120	21	14.9	45.8	25.3	163.0	232.9	390.8
	1-2	60	26	10.3	31.8	17.5	120.4	165.7	288.2
	1-2	80	26	14.4	44.1	24.4	161.8	224.9	386.7
	1-2	90	26	16.4	50.4	27.8	182.5	254.6	436.0
	1-2	120	26	22.4	68.9	38.1	244.7	343.4	583.8

350-bar Type 3 compressed (350-bar cH₂), 500-bar cryo-compressed (500-bar CcH₂), and 700-bar Type 4 compressed (700-bar cH₂) hydrogen storage systems are considered. Storage system dimensions are taken from A-1 electric

Tabla 13: fibra de carbono en depósitos de gas

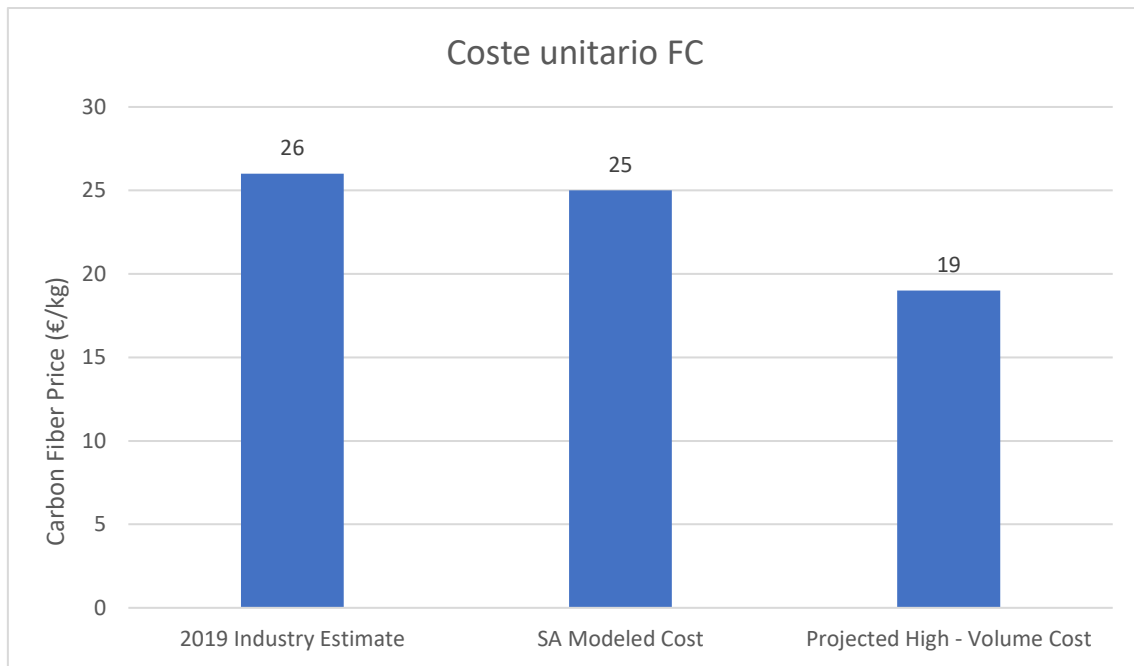


Ilustración 36: coste unitario fibra de carbono

4.2.2. Pila de combustible

La principal característica que valorar en las pilas de combustible es la eficiencia energética de las mismas, que se mide en kilovatios por litro de combustible. La eficiencia energética es la cantidad de energía generada por la pila por volumen de hidrógeno consumido. A mayor eficiencia, más rentabilidad tendrá. Es por ello que la potencia de la misma sea el principal factor a tener en cuenta en los costes de producción. Los costes de producción principalmente se dividen en dos: costes de manufacturación y costes materiales. Los primeros tienen en cuenta el ensamblaje de los componentes de la pila, mientras que los costes materiales se refieren a los materiales usados para la construcción. Para saber la relación entre el coste de producción y la potencia de la pila de combustible se ha consultado el artículo *Current status of automotive fuel cells for sustainable transport*, [40] de la Conferencia de sistemas de ingeniería de potencia y energía. En la gráfica inferior se muestra la relación entre ambos parámetros.

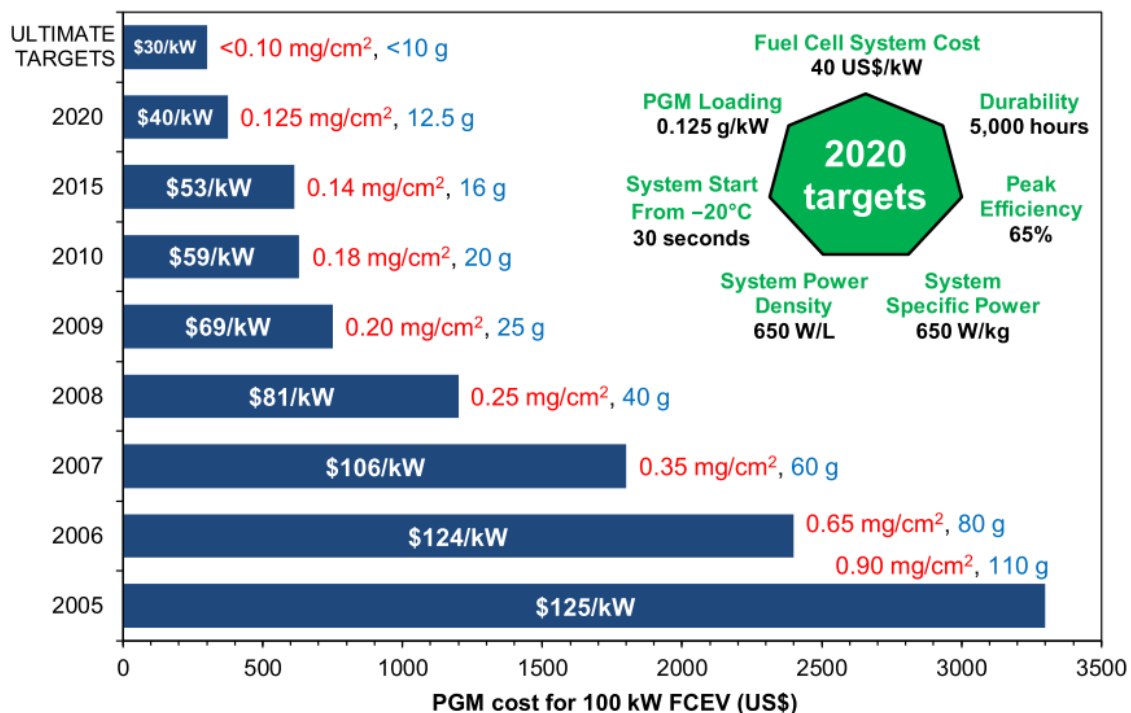


Ilustración 37: coste pila de combustible

Para saber la potencia de la pila de combustible basta multiplicar la eficiencia energética por el volumen de hidrógeno en el vehículo.

4.2.3. Batería de litio

La batería es la encargada de almacenar la energía generada por la pila de combustible y la recuperada de la deceleración, así como de reforzar la potencia de la pila de combustible durante la aceleración en casos de alta demanda. En el nuevo Mirai es de iones de litio, lo que permite una mayor densidad energética, un ahorro de peso y espacio, y una mayor potencia. Tiene 84 celdas, una capacidad de 1,24 kWh y un voltaje nominal de 310,8 V. El sistema de refrigeración funciona con aire. Al igual que la pila de combustible, el coste lo marca la potencia de la batería. Según el estudio anual de Bloomberg sobre el precio de las baterías de iones de litio, el coste de las mismas se ha ido reduciendo en los últimos años hasta situarse en 151 \$/kW. Sin embargo, debido al crecimiento de la inflación este precio ha aumentado por primera vez en los últimos años, ya que el aumento en los precios de cada componente ha encarecido el producto. El precio de las baterías y su evolución se muestran en la gráfica inferior de elaboración propia, con los datos sacados de Bloomberg. [41] El precio se muestra por cada celda de la batería.

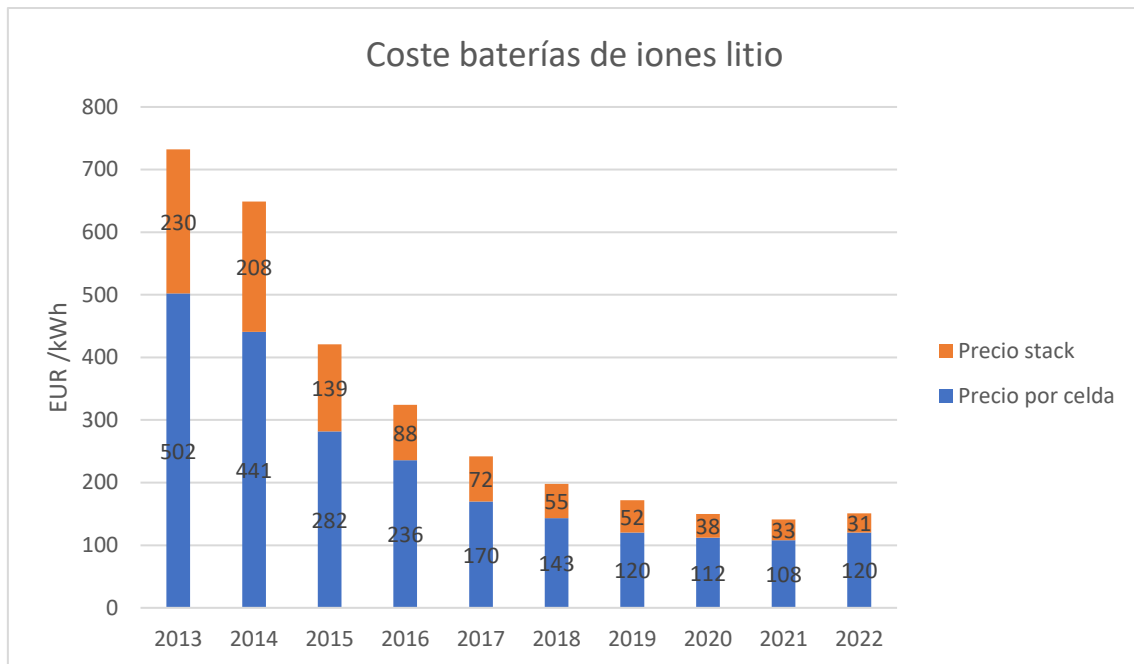


Ilustración 38: coste baterías de litio

4.2.4. Motor eléctrico

Para estimar el coste de un motor síncrono de imán permanente se ha consultado el artículo *Production cost modeling for permanent magnet synchronous machines for electric vehicles* [42], en el que se estudia el impacto de estos motores en el mercado. En la figura inferior se muestra una gráfica del coste de producción en función del par máximo.

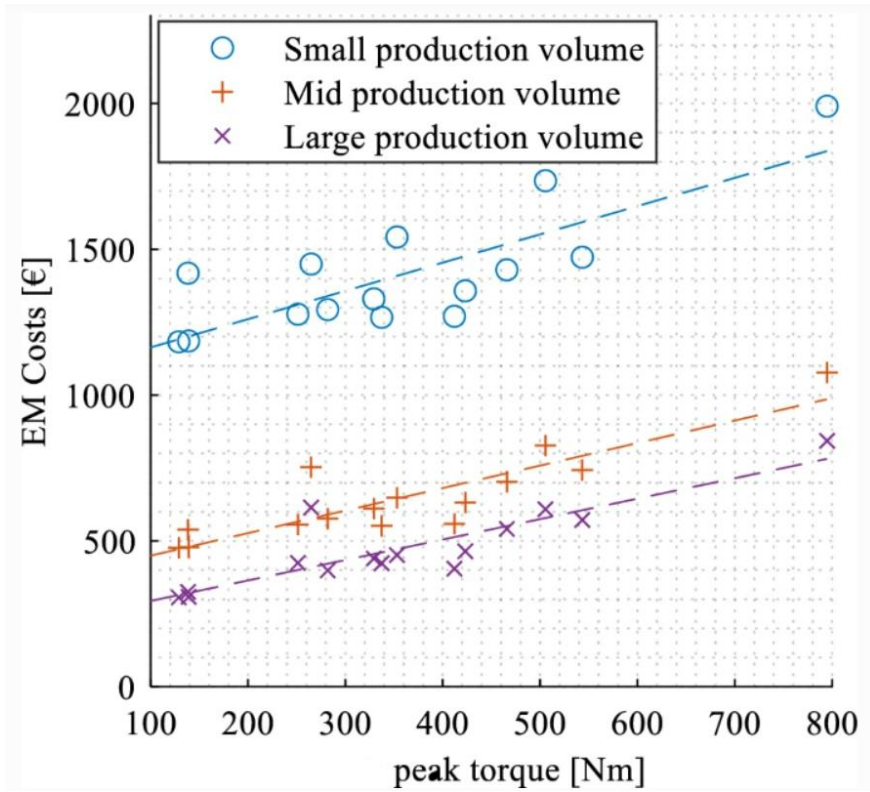


Ilustración 39: coste motor eléctrico

Sabiendo el par máximo que tiene el motor del Mirai se puede calcular su coste.

5. Cálculos

En este apartado se realizarán los cálculos del estudio económico para la estación de hidrógeno en cada escenario propuesto y los cálculos económicos del Toyota Mirai y sus componentes. En el caso de la hidrogenera se plantearán tres escenarios diferentes en el que variará el número de vehículos y otros tres en los que habrá diferentes horas de luz solar. Al ser vehículos Toyota la cantidad de combustible a repostar será de 5,6 kilogramos de H₂ por vehículo, al ser esta su capacidad real.

El primer escenario se hará suponiendo que en la hidrogenera repostan al día un total de cinco vehículos, en el segundo se estimará una media de veinte y en el tercero cuarenta. Hay que tener en cuenta que hoy en día los vehículos de pila de combustible siguen en fase de desarrollo y apertura comercial, por lo que no es realista suponer una flota de gran volumen de coches en circulación de este tipo.

Dentro de cada escenario, se han establecido otros tres casos en los que la producción eléctrica de las placas solares varía. Esto se ha debido a que la radiación solar varía en función de la época del año, provocando una mayor o menor eficiencia en los paneles. Los días escogidos son el 21 de diciembre, 21 de marzo y 21 de junio, que coinciden con el solsticio de invierno, equinoccio de primavera y equinoccio de verano, respectivamente. El número de horas diarias de luz directa por día es 9.25, 12 y 15 horas. Se calculará la inversión total y unitaria de cada caso.

La estimación económica se hará con una proyección mensual, suponiendo que cada día tendrá de media las horas de luz y vehículos repostando estimados en cada caso.

5.1. Hidrogenera

5.1.1. Primer escenario

En este caso se trabajan con cinco coches al día, haciendo que $n = 5$. Dentro de este supuesto hay a su vez tres casos de días diferentes. Se analizará por separado cada uno.

Duración solar baja

En este caso hay 9,25 horas de luz solar. El coste del surtidor se calcula tal que:

$$C_{surt}(\text{€}) = 1,5 \cdot 350 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot 5,6 \frac{\text{kg}}{\text{vehículo}} \cdot 5 \frac{\text{vehículo}}{\text{día}} = 14700 \text{ €}$$

En el depósito de gas se debe almacenar $V_{dep} = 5 \cdot 5,6 = 28 \text{ kg } H_2$. Consultando la tabla X se sabe que a una presión de 700 bares un depósito de esa capacidad tiene 436 kilogramos de fibra de carbono. Sabiendo que el precio de la FC es de 26 €/kg, se calcula el precio del depósito:

$$C_{dep}(\text{€}) = 26 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot 436 \text{ kg} = 11336 \text{ €}$$

El siguiente paso es el compresor. La fórmula para calcular su precio, usando el método del TIC, es

$$TIC(\text{€}) = 0,6976 \cdot 1,3 \cdot 62909,9 * KW^{0,4603}$$

Donde KW es la potencia nominal del mismo, en kilovatios. Sabiendo que el flujo de H_2 es de $Q = 28/9,25 = 3,03 \text{ kg } H_2/h$, se usará un compresor modelo 1KS95, de potencia 75 kW.

$$C_{comp}(\text{€}) = 0,6976 \cdot 1,3 \cdot 62909,9 * 75^{0,4603} = 416 249,1 \text{ €}$$

El coste del refrigerador viene dado por su potencia.

$$P = 5,812 \cdot \frac{n}{H} \text{ KW} = 5,812 \cdot \frac{5}{9,25} = 3,142 \text{ kW}$$

Para esa potencia requerida se escogerá un refrigerador KIT-ADC12HE5C-S, de potencia 10 kW. Su precio es:

$$PVP(€) = 40,042 \cdot P(kW) + 591,08 = 991,5 €$$

El coste del electrolizador se calcula en función de su caudal y gasto energético. El caudal necesario es $Q = 24 \cdot 28 / 9,25 = 72,65 \text{ kg H}_2 / 24h$. Para generar hidrógeno con el caudal necesario hará falta un total de siete ejemplares del modelo M5000, cada uno con un consumo de potencia de $4,5 \text{ kWh} / \text{Nm}^3$.

$$V (\text{Nm}^3) = n \cdot \frac{R \cdot T}{P} = \frac{5600 \text{ g} \cdot 5}{2 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot \frac{0,08257 \frac{\text{L} \cdot \text{bar}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \cdot 293\text{K}}{1,013 \text{ bar}} \cdot 0,001 = 336,1 \text{ Nm}^3$$

$$\dot{Q}_{elec} = \frac{336,1}{9,25 \text{ horas}} \text{ Nm}^3 / h = 36,3347 \text{ Nm}^3 / h$$

$$C_{elec} (€) = 1000 € / kW \cdot 36,3347 \text{ Nm}^3 / h \cdot 4,5 \text{ kWh} / \text{Nm}^3 = 163 506,52 €$$

Queda la planta fotovoltaica. Su precio ya venía marcado por el precio de mercado y sumaba un total de $C_{fotov} = 102 \cdot 142,85 € = 14 570,7 €$.

Así pues, el coste total de instalación de la hidrogenera queda:

	Precio
Surtidor de gas	14 700 €
Depósito de gas	11 336 €
Compresor	416 249,1 €
Refrigerador	991,5 €
Electrolizador	163 506,52 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €

Coste de instalación	620 362,32 €
----------------------	--------------

Tabla 14: costes de instalación

Ahora se analiza el coste de la electricidad usada por cada equipo. Para ello se calcula el consumo eléctrico de los equipamientos más la energía necesaria en la producción de hidrógeno. Se calculan los datos para todo un mes.

$$E_{surt}(kWh) = 0,3 \text{ kWh/kg } H_2 \cdot 5,6 \text{ kg } H_2 \cdot 5 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 252 \text{ kWh}$$

$$E_{comp}(kWh) = 4,6 \text{ kWh/kg } H_2 \cdot 5,6 \text{ kg } H_2 \cdot 5 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 3 864 \text{ kWh}$$

$$E_{ref}(kWh) = 5,812 \cdot 5 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 871,8 \text{ kWh}$$

$$E_{elec}(kWh) = 4,5 \text{ kWh/Nm}^3 H_2 \cdot 36,3347 \text{ Nm}^3/h \cdot 5 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 24 525,92 \text{ kWh}$$

$$E_{H_2}(kWh) = 54,6 \text{ kWh/kg } H_2 \cdot 5,6 \text{ kg } H_2 \cdot 5 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 45 864 \text{ kWh}$$

$$E_{fot}(kWh) = 2166,3 \text{ kWh}$$

El coste de la electricidad será la energía usada multiplicada por su precio.

$$C_{elect}(\text{€}) = (E_{elec} + E_{surt} + E_{comp} + E_{ref} + E_{H_2} - E_{fot}) \cdot 184,19 \text{ €/kWh}$$

$$= (24 525,92 + 252 + 3 864 + 45 864 - 2166,3) \cdot 0,18419 \text{ €/kWh} = 13 324,23 \text{ €}$$

	Precio
Surtidor de gas	14 700 €
Depósito de gas	11 336 €
Compresor	416 249,1 €
Refrigerador	991,5 €
Electrolizador	163 506,52 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €

Coste de instalación	620 362,32 €
Coste electricidad	13 324,23 €
Coste total	633 686,55 €

Tabla 15: costes totales

Ahora se analiza el coste de mantenimiento. El dinero empleado será el 5% del precio de adquisición de los productos.

$$C_{mant}(\text{€}) = (C_{surt} + C_{comp} + C_{dep} + C_{ref} + C_{elec} + C_{fot}) \cdot 0,05 \cdot \frac{1}{12}$$

$$= (14\,700 + 11\,336 + 416\,249,1 + 163\,506,52 + 14\,570,7) \cdot 0,05 \cdot \frac{1}{12} = 2\,584,84 \text{ €}$$

	Precio
Surtidor de gas	14 700 €
Depósito de gas	11 336 €
Compresor	416 249,1 €
Refrigerador	991,5 €
Electrolizador	163 506,52 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	620 362,32 €
Coste electricidad	13 324,23 €
Coste de mantenimiento	2 584,84 €
Coste total	636 271,4 €

Tabla 16: costes totales

Por último, queda analizar el coste unitario del hidrógeno. Esto se hace dividiendo el coste total entre la cantidad de hidrógeno producida.

$$C_{H_2}^{unit}(\text{€}) = \frac{C_{elec} + C_{inst} + C_m}{(5 \cdot 30)vehículo \cdot 5,6 \text{ kg } H_2 / vehículo} = 757,47 \text{ €} / \text{kg } H_2$$

	Precio
Surtidor de gas	14 700 €
Depósito de gas	11 336 €
Compresor	416 249,1 €

Refrigerador	991,5 €
Electrolizador	163 506,52 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	620 362,32 €
Coste electricidad	13 324,23 €
Coste de mantenimiento	2 584,84 €
Coste total	636 271,4 €
Coste unitario	757,47 €/kg

Tabla 17: costes totales

Duración solar media

En este caso el número de horas al sol diarias es 12. El coste del surtidor, el depósito y la planta fotovoltaica permanecen invariables.

$$C_{surt}(\text{€}) = 1,5 \cdot 350 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot 5,6 \frac{\text{kg}}{\text{vehículo}} \cdot 5 \frac{\text{vehículo}}{\text{día}} = 14700 \text{ €}$$

$$C_{dep}(\text{€}) = 26 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot 436 \text{ kg} = 11336 \text{ €}$$

$$C_{fotov} = 102 \cdot 142,85 \text{ €} = 14570,7 \text{ €}$$

El coste del refrigerador viene dado por su potencia.

$$P = 5,812 \cdot \frac{n}{H} \text{ KW} = 5,812 \cdot \frac{5}{12} = 2,42 \text{ kW}$$

Para esa potencia requerida se escogerá un refrigerador KIT-ADC12HE5C-S, de potencia 10 kW.

Su precio es:

$$PVP(\text{€}) = 40,042 \cdot P(\text{kW}) + 591,08 = 991,5 \text{ €}$$

El caudal del compresor y electrolizador cambian, ya que ahora hay más horas de funcionamiento. El nuevo caudal es $Q = 28/12 = 2,33 \text{ kg H}_2/h = 56 \text{ kg H}_2/24h$. Para satisfacer la demanda de caudal se escogerá el compresor modelo 1KS95 y un stack de seis electrolizadores tipo M5000. El coste de cada uno viene dado por:

$$C_{comp}(\text{€}) = 0,6976 \cdot 1,3 \cdot 62909,9 \cdot 75^{0,4603} = 416249,1 \text{ €}$$

$$\dot{Q}_{elec} = \frac{336,1}{12 \text{ horas}} \text{ Nm}^3/h = 28 \text{ Nm}^3/h$$

$$C_{elec}(\text{€}) = 1000 \text{ €/KW} \cdot 28 \text{ Nm}^3/h \cdot 4,5 \text{ kWh/Nm}^3 = 126 000 \text{ €}$$

Así pues, el coste total de instalación de la hidrogenera queda:

	Precio
Surtidor de gas	14 700 €
Depósito de gas	11 336 €
Compresor	416 249,1 €
Refrigerador	991,5 €
Electrolizador	126 000 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	582 855,8 €

Tabla 18: costes de instalación

El nuevo coste eléctrico se calcula de nuevo.

$$E_{surt}(\text{kWh}) = 0,3 \text{ kWh/kg H}_2 \cdot 5,6 \text{ kg H}_2 \cdot 5 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 252 \text{ kWh}$$

$$E_{comp}(\text{kWh}) = 4,6 \text{ kWh/kg H}_2 \cdot 5,6 \text{ kg H}_2 \cdot 5 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 3 864 \text{ kWh}$$

$$E_{ref}(\text{kWh}) = 5,812 \cdot 5 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 871,8 \text{ kWh}$$

$$E_{elec}(\text{kWh}) = 4,5 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ H}_2 \cdot 28 \text{ Nm}^3/h \cdot 5 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 18 900 \text{ kWh}$$

$$E_{H_2}(kWh) = 54,6 \text{ kWh/kg } H_2 \cdot 5,6 \text{ kg } H_2 \cdot 5 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 45\,864 \text{ kWh}$$

$$E_{fot}(kWh) = 2166,3 \text{ kWh}$$

$$C_{elect}(\text{€}) = (E_{elec} + E_{surt} + E_{comp} + E_{ref} + E_{H_2} - E_{fot}) \cdot 184,19 \text{ €/MWh}$$

$$= (18\,900 + 252 + 3\,864 + 45\,864 - 2166,3) \cdot 0,18419 \text{ €/kWh} = 12\,287,99 \text{ €}$$

	Precio
Surtidor de gas	14 700 €
Depósito de gas	11 336 €
Compresor	416 249,1 €
Refrigerador	991,5 €
Electrolizador	126 000 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	582 855,8 €
Coste electricidad	12 287,99 €
Coste total	595 143,79 €

Tabla 19: costes totales

Ahora se calcula el coste de mantenimiento.

$$C_{mant}(\text{€}) = (C_{surt} + C_{comp} + C_{dep} + C_{ref} + C_{elec} + C_{fot}) \cdot 0,05 \cdot \frac{1}{12}$$

$$= (14\,700 + 11\,336 + 416\,249,1 + 163\,506,52 + 14\,570,7) \cdot 0,05 \cdot \frac{1}{12} = 2\,584,84 \text{ €}$$

	Precio
Surtidor de gas	14 700 €
Depósito de gas	11 336 €
Compresor	416 249,1 €
Refrigerador	991,5 €
Electrolizador	126 000 €

Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	582 855,8 €
Coste electricidad	12 287,99 €
Coste de mantenimiento	2 584,84 €
Coste total	597 728,63 €

Tabla 20: costes totales

El coste unitario se calcula con la producción de hidrógeno.

$$C_{H_2}^{unit} (\text{€}) = \frac{C_{elec} + C_{inst} + C_m}{(5 \cdot 30) \text{vehículo} \cdot 5,6 \text{ kg } H_2 / \text{vehículo}} = 711,58 \text{ €} / \text{kg } H_2$$

En contra de lo supuesto, el coste normalizado es más barato que con menos horas de luz. Seguramente se deba a que habiendo menos caudal la maquinaria requerida tiene menos limitaciones, haciéndose más barata.

	Precio
Surtidor de gas	14 700 €
Depósito de gas	11 336 €
Compresor	416 249,1 €
Refrigerador	991,5 €
Electrolizador	126 000 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	582 855,8 €
Coste electricidad	12 287,99 €
Coste de mantenimiento	2 584,84 €
Coste total	597 728,63 €
Coste unitario	711,58 €/kg

Tabla 21: costes totales

Duración solar alta

En este caso el número de horas al sol diarias es 15. El coste del surtidor, el depósito y la planta fotovoltaica permanecen invariables.

$$C_{surt}(\text{€}) = 1,5 \cdot 350 \frac{\text{€}}{\frac{\text{kg}}{\text{día}}} \cdot 5,6 \frac{\text{kg}}{\text{vehículo}} \cdot 5 \frac{\text{vehículo}}{\text{día}} = 14700 \text{ €}$$

$$C_{dep}(\text{€}) = 26 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot 436 \text{ kg} = 11336 \text{ €}$$

$$C_{fotov} = 102 \cdot 142,85 \text{ €} = 14570,7 \text{ €}$$

El coste del refrigerador viene dado por su potencia.

$$P = 5,812 \cdot \frac{n}{H} \text{ KW} = 5,812 \cdot \frac{5}{15} = 1,937 \text{ kW}$$

Para esa potencia requerida se escogerá un refrigerador KIT-ADC12HE5C-S, de potencia 10 kW. Su precio es:

$$PVP(\text{€}) = 40,042 \cdot P(\text{kW}) + 591,08 = 991,5 \text{ €}$$

El caudal del compresor y electrolizador cambian, ya que ahora hay más horas de funcionamiento. El nuevo caudal es $Q = 28/15 = 1,867 \text{ kg H}_2/\text{h} = 44,8 \text{ kg H}_2/24\text{h}$. Para satisfacer la demanda de caudal se escogerá el compresor modelo 1KS95 y un stack de cinco electrolizadores tipo M4000. El coste de cada uno viene dado por:

$$C_{comp}(\text{€}) = 0,6976 \cdot 1,3 \cdot 62909,9 * 75^{0,4603} = 416249,1 \text{ €}$$

$$\dot{Q}_{elec} = \frac{336,1}{15 \text{ horas}} \text{ Nm}^3/\text{h} = 22,41 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$C_{elec}(\text{€}) = 1000 \frac{\text{€}}{\text{KW}} \cdot 22,41 \text{ Nm}^3/\text{h} \cdot 4,5 \text{ kWh}/\text{Nm}^3 = 100 \text{ 830 €}$$

Así pues, el coste total de instalación de la hidrogenera queda:

	Precio
Surtidor de gas	14 700 €
Depósito de gas	11 336 €
Compresor	416 249,1 €
Refrigerador	991,5 €
Electrolizador	100 830 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	557 685,8 €

Tabla 22: costes de instalación

El nuevo coste eléctrico se calcula de nuevo.

$$E_{surt}(kWh) = 0,3 kWh/kg H_2 \cdot 5,6 kg H_2 \cdot 5 \cdot 30 \frac{días}{mes} = 252 kWh$$

$$E_{comp}(kWh) = 4,6 kWh/kg H_2 \cdot 5,6 kg H_2 \cdot 5 \cdot 30 \frac{días}{mes} = 3 864 kWh$$

$$E_{ref}(kWh) = 5,812 \cdot 5 \cdot 30 \frac{días}{mes} = 871,8 kWh$$

$$E_{elec}(kWh) = 4,5 kWh/Nm^3 H_2 \cdot 22,41 Nm^3/h \cdot 5 \cdot 30 \frac{días}{mes} = 15 126,75 kWh$$

$$E_{H_2}(kWh) = 54,6 kWh/kg H_2 \cdot 5,6 kg H_2 \cdot 5 \cdot 30 \frac{días}{mes} = 45 864 kWh$$

$$E_{fot}(kWh) = 2166,3 kWh$$

$$C_{elect}(€) = (E_{elec} + E_{surt} + E_{comp} + E_{ref} + E_{H_2} - E_{fot}) \cdot 184,19 €/MWh$$

$$= (15 126,75 + 252 + 3 864 + 45 864 - 2166,3) \cdot 0,18419 €/kWh = 11 593 €$$

	Precio
Surtidor de gas	14 700 €
Depósito de gas	11 336 €
Compresor	416 249,1 €
Refrigerador	991,5 €

Electrolizador	100 830 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	557 685,8 €
Coste electricidad	11 593 €
Coste total	569 278,8 €

Tabla 23: costes totales

Ahora se calcula el coste de mantenimiento.

$$C_{mant}(\text{€}) = (C_{surt} + C_{comp} + C_{dep} + C_{ref} + C_{elec} + C_{fot}) \cdot 0,05 \cdot \frac{1}{12}$$

$$= (14\,700 + 416\,249,1 + 11\,336 + 100\,830 + 14\,570,7) \cdot 0,05 \cdot \frac{1}{12} = 2\,323,69 \text{ €}$$

	Precio
Surtidor de gas	14 700 €
Depósito de gas	11 336 €
Compresor	416 249,1 €
Refrigerador	991,5 €
Electrolizador	100 830 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	557 685,8 €
Coste electricidad	11 593 €
Coste de mantenimiento	2 323,69 €
Coste total	571 602,49 €

Tabla 24: costes totales

El coste unitario se calcula con la producción de hidrógeno.

$$C_{H_2}^{unit}(\text{€}) = \frac{C_{elec} + C_{inst} + C_m}{(5 \cdot 30)vehículo \cdot 5,6 \text{ kg } H_2 / vehículo} = 680,48 \text{ €} / \text{kg } H_2$$

	Precio
Surtidor de gas	14 700 €
Depósito de gas	11 336 €

Compresor	416 249,1 €
Refrigerador	991,5 €
Electrolizador	100 830 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	557 685,8 €
Coste electricidad	11 593 €
Coste de mantenimiento	2 323,69 €
Coste total	571 602,49 €
Coste unitario	680,48 €/kg

Tabla 25: costes totales

5.1.2. Segundo escenario

En este caso se trabajan con veinte coches al día, haciendo que $n = 20$.

Duración solar baja

En este caso hay 9,25 horas de luz solar. El coste del surtidor se calcula tal que:

$$C_{surt}(\text{€}) = 1,5 \cdot 350 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot 5,6 \frac{\text{kg}}{\text{vehículo}} \cdot 20 \frac{\text{vehículo}}{\text{día}} = 58\,800 \text{ €}$$

En el depósito de gas se debe almacenar $V_{dep} = 20 \cdot 5,6 = 112 \text{ kg } H_2$. Consultando la tabla X se sabe que a una presión de 700 bares se necesitan tres depósitos de 38,1 kg de capacidad, conteniendo cada uno 583,8 kilogramos de fibra de carbono. Sabiendo que el precio de la FC es de 26 €/kg, se calcula el precio del depósito:

$$C_{dep}(\text{€}) = 3 \cdot 26 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot 583,8 \text{ kg} = 45\,536,4 \text{ €}$$

El siguiente paso es el compresor. La fórmula para calcular su precio, usando el método del TIC, es

$$TIC(\text{€}) = 0,6976 \cdot 1,3 \cdot 62909,9 * KW^{0,4603}$$

Donde KW es la potencia nominal del mismo, en kilovatios. Sabiendo que el flujo de H_2 es de $Q = 112/9,25 = 12,11 \text{ kg } H_2/h$, se usará un compresor modelo 2KS95, de potencia 120 kW.

$$C_{comp}(\text{€}) = 0,6976 \cdot 1,3 \cdot 62909,9 * 120^{0,4603} = 516\,792,2 \text{ €}$$

El coste del refrigerador viene dado por su potencia.

$$P = 5,812 \cdot \frac{n}{H} \text{ KW} = 5,812 \cdot \frac{20}{9,25} = 12,55 \text{ kW}$$

Para esa potencia requerida se escogerá un refrigerador KIT-ADC12HE5C-S, de potencia 12,2 kW. Su precio es:

$$PVP(\text{€}) = 40,042 \cdot P(\text{kW}) + 591,08 = 1\,079,59 \text{ €}$$

El coste del electrolizador se calcula en función de su caudal y gasto energético. El caudal necesario es $Q = 24 \cdot 112/9,25 = 290,59 \text{ kg H}_2/24\text{h}$. Para generar hidrógeno con el caudal necesario hará falta un total de veintisiete ejemplares del modelo M5000, cada uno con un consumo de potencia de $4,5 \text{ kWh}/\text{Nm}_3$.

$$V (\text{Nm}^3) = n \cdot \frac{R \cdot T}{P} = \frac{5600 \text{ g} \cdot 20}{2 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot \frac{0,08257 \frac{\text{L} \cdot \text{bar}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \cdot 293\text{K}}{1,013 \text{ bar}} \cdot 0,001 = 1\,337,4 \text{ Nm}^3$$

$$\dot{Q}_{elec} = \frac{1\,337,4}{9,25 \text{ horas}} \text{ Nm}^3/\text{h} = 144,59 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$C_{elec}(\text{€}) = 1000 \text{ €/KW} \cdot 144,59 \text{ Nm}^3/\text{h} \cdot 4,5 \text{ kWh}/\text{Nm}^3 = 650\,637,77 \text{ €}$$

Queda la planta fotovoltaica. Su precio ya venía marcado por el precio de mercado y sumaba un total de $C_{fotov} = 102 \cdot 142,85 \text{ €} = 14\,570,7 \text{ €}$.

Así pues, el coste total de instalación de la hidrogenera queda:

	Precio
Surtidor de gas	58 800 €
Depósito de gas	45 536,4 €
Compresor	516 792,2 €
Refrigerador	1 079,59 €
Electrolizador	650 637,77 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	1 286 337,14 €

Tabla 26: costes de instalación

Ahora se analiza el coste de la electricidad usada por cada equipo. Para ello se calcula el consumo eléctrico de los equipamientos más la energía necesaria en la producción de hidrógeno. Se calculan los datos para todo un mes.

$$E_{surt}(kWh) = 0,3 \text{ kWh/kg } H_2 \cdot 5,6 \text{ kg } H_2 \cdot 20 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 1\,008 \text{ kWh}$$

$$E_{comp}(kWh) = 4,6 \text{ kWh/kg } H_2 \cdot 5,6 \text{ kg } H_2 \cdot 20 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 15\,456 \text{ kWh}$$

$$E_{ref}(kWh) = 5,812 \cdot 20 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 3\,487,2 \text{ kWh}$$

$$E_{elec}(kWh) = 4,5 \text{ kWh/Nm}^3 H_2 \cdot 144,59 \text{ Nm}^3/h \cdot 20 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 390\,393,46 \text{ kWh}$$

$$E_{H_2}(kWh) = 54,6 \text{ kWh/kg } H_2 \cdot 5,6 \text{ kg } H_2 \cdot 20 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 183\,456 \text{ kWh}$$

$$E_{fot}(kWh) = 2166,3 \text{ kWh}$$

El coste de la electricidad será la energía usada multiplicada por su precio.

$$C_{elect}(\text{€}) = (E_{elec} + E_{surt} + E_{comp} + E_{ref} + E_{H_2} - E_{fot}) \cdot 184,19 \text{ €/kWh}$$

$$= (390\,393,46 + 1\,008 + 15\,456 + 183\,456 - 2166,3) \cdot 0,18419 \text{ €/kWh} = 108\,330,74 \text{ €}$$

	Precio
Surtidor de gas	58 800 €
Depósito de gas	45 536,4 €
Compresor	516 792,2 €
Refrigerador	1 079,59 €
Electrolizador	650 637,77 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	1 286 337,14 €
Coste electricidad	108 330,74 €
Coste total	1 349 131,4 €

Tabla 27: costes totales

Ahora se analiza el coste de mantenimiento. El dinero empleado será el 5% del precio de adquisición de los productos.

$$C_{mant}(\text{€}) = (C_{surt} + C_{comp} + C_{dep} + C_{ref} + C_{elec} + C_{fot}) \cdot 0,05 \cdot \frac{1}{12}$$

$$= (58\,800 + 516\,792,2 + 45\,536,4 + 650\,637,77 + 14\,570,7) \cdot 0,05 \cdot \frac{1}{12} = 5\,359,74 \text{ €}$$

	Precio
Surtidor de gas	58 800 €
Depósito de gas	45 536,4 €
Compresor	516 792,2 €
Refrigerador	1 079,59 €
Electrolizador	650 637,77 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	1 286 337,14 €
Coste electricidad	108 330,74 €
Coste de mantenimiento	5 359,74 €
Coste total	1 400 027,62 €

Tabla 28: costes totales

Por último, queda analizar el coste unitario del hidrógeno. Esto se hace dividiendo el coste total entre la cantidad de hidrógeno producida.

$$C_{H_2}^{unit}(\text{€}) = \frac{C_{elec} + C_{inst} + C_m}{(20 \cdot 30)vehículo \cdot 5,6 \text{ kg } H_2 / vehículo} = 416,67 \text{ €/kg } H_2$$

	Precio
Surtidor de gas	58 800 €
Depósito de gas	45 536,4 €
Compresor	516 792,2 €
Refrigerador	1 079,59 €
Electrolizador	650 637,77 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	1 286 337,14 €

Coste electricidad	108 330,74 €
Coste de mantenimiento	5 359,74 €
Coste total	1 400 027,62 €
Coste unitario	416,67 €/kg

Tabla 29: costes totales

Duración solar media

En este caso el número de horas al sol diarias es 12. El coste del surtidor, el depósito y la planta fotovoltaica permanecen invariables.

$$C_{surt}(\text{€}) = 1,5 \cdot 350 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot 5,6 \frac{\text{kg}}{\text{vehículo}} \cdot 20 \frac{\text{vehículo}}{\text{día}} = 58 800 \text{ €}$$

$$C_{dep}(\text{€}) = 3 \cdot 26 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot 583,8 \text{ kg} = 45 536,4 \text{ €}$$

$$C_{fotov} = 102 \cdot 142,85 \text{ €} = 14 570,7 \text{ €}$$

El coste del refrigerador viene dado por su potencia.

$$P = 5,812 \cdot \frac{n}{H} \text{ KW} = 5,812 \cdot \frac{20}{12} = 9,69 \text{ kW}$$

Para esa potencia requerida se escogerá un refrigerador KIT-ADC12HE5C-S, de potencia 10 kW.

Su precio es:

$$PVP(\text{€}) = 40,042 \cdot P(\text{kW}) + 591,08 = 991,5 \text{ €}$$

El caudal del compresor y electrolizador cambian, ya que ahora hay más horas de funcionamiento. El nuevo caudal es $Q = 112/12 = 9,33 \text{ kg H}_2/\text{h} = 224 \text{ kg H}_2/24\text{h}$. Para satisfacer la demanda de caudal se escogerá el compresor modelo 1KS95 y un stack de veintiún electrolizadores tipo M5000. El coste de cada uno viene dado por:

$$C_{comp}(\text{€}) = 0,6976 \cdot 1,3 \cdot 62909,9 \cdot 75^{0,4603} = 416 249,1 \text{ €}$$

$$\dot{Q}_{elec} = \frac{1337,42}{12 \text{ horas}} \text{ Nm}^3/\text{h} = 111,45 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$C_{elec}(\text{€}) = 1000 \text{ €/KW} \cdot 111,45 \text{ Nm}^3/\text{h} \cdot 4,5 \text{ kWh}/\text{Nm}^3 = 501 533,28 \text{ €}$$

Así pues, el coste total de instalación de la hidrogenera queda:

	Precio
Surtidor de gas	58 800 €
Depósito de gas	45 536,4 €
Compresor	416 249,1 €
Refrigerador	991,5 €
Electrolizador	501 533,28 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	1 036 689,48 €

Tabla 30: costes de instalación

El nuevo coste eléctrico se calcula de nuevo.

$$E_{surt}(\text{kWh}) = 0,3 \text{ kWh}/\text{kg H}_2 \cdot 5,6 \text{ kg H}_2 \cdot 20 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 1 008 \text{ kWh}$$

$$E_{comp}(\text{kWh}) = 4,6 \text{ kWh}/\text{kg H}_2 \cdot 5,6 \text{ kg H}_2 \cdot 20 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 15 456 \text{ kWh}$$

$$E_{ref}(\text{kWh}) = 5,812 \cdot 20 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 3 487,2 \text{ kWh}$$

$$E_{elec}(\text{kWh}) = 4,5 \text{ kWh}/\text{Nm}^3 \text{ H}_2 \cdot 111,45 \text{ Nm}^3/\text{h} \cdot 20 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 300 915 \text{ kWh}$$

$$E_{H_2}(\text{kWh}) = 54,6 \text{ kWh}/\text{kg H}_2 \cdot 5,6 \text{ kg H}_2 \cdot 20 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 183 465 \text{ kWh}$$

$$E_{fot}(\text{kWh}) = 2166,3 \text{ kWh}$$

$$C_{elect}(\text{€}) = (E_{elec} + E_{surt} + E_{comp} + E_{ref} + E_{H_2} - E_{fot}) \cdot 184,19 \text{ €/MWh}$$

$$= (300 915 + 1 008 + 15 456 + 183 465 - 2166,3) \cdot 0,18419 \text{ €/kWh} = 91 849,79 \text{ €}$$

	Precio
Surtidor de gas	58 800 €
Depósito de gas	45 536,4 €
Compresor	416 249,1 €
Refrigerador	991,5 €
Electrolizador	501 533,28 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	1 036 689,48 €
Coste electricidad	91 849,79 €
Coste total	1 128 539,27 €

Tabla 31: costes totales

Ahora se calcula el coste de mantenimiento.

$$C_{mant}(\text{€}) = (C_{surt} + C_{comp} + C_{dep} + C_{ref} + C_{elec} + C_{fot}) \cdot 0,05 \cdot \frac{1}{12}$$

$$= (58\,800 + 416\,249,1 + 45\,536,4 + 501\,533,28 + 14\,570,7) \cdot 0,05 \cdot \frac{1}{12} = 4\,319,54 \text{ €}$$

	Precio
Surtidor de gas	58 800 €
Depósito de gas	45 536,4 €
Compresor	416 249,1 €
Refrigerador	991,5 €
Electrolizador	501 533,28 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	1 036 689,48 €
Coste electricidad	91 849,79 €
Coste de mantenimiento	4 319,54 €
Coste total	1 132 858,81 €

Tabla 32: costes totales

El coste unitario se calcula con la producción de hidrógeno.

$$C_{H_2}^{unit} (\text{€}) = \frac{C_{elec} + C_{inst} + C_m}{(20 \cdot 30) \text{vehículo} \cdot 5,6 \frac{\text{kg } H_2}{\text{vehículo}}} = 337,16 \text{ €/kg } H_2$$

En contra de lo supuesto, el coste normalizado es más barato que con menos horas de luz. Seguramente se deba a que habiendo menos caudal la maquinaria requerida tiene menos limitaciones, haciéndose más barata.

	Precio
Surtidor de gas	58 800 €
Depósito de gas	45 536,4 €
Compresor	416 249,1 €
Refrigerador	991,5 €
Electrolizador	501 533,28 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	1 036 689,48 €
Coste electricidad	91 849,79 €
Coste de mantenimiento	4 319,54 €
Coste total	1 132 858,81 €
Coste unitario	337,16 €/kg

Tabla 33: costes totales

Duración solar alta

En este caso el número de horas al sol diarias es 15. El coste del surtidor, el depósito y la planta fotovoltaica permanecen invariables.

$$C_{surt} (\text{€}) = 1,5 \cdot 350 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot 5,6 \frac{\text{kg}}{\text{vehículo}} \cdot 20 \frac{\text{vehículo}}{\text{día}} = 58 800 \text{ €}$$

$$C_{dep} (\text{€}) = 3 \cdot 26 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot 583,8 \text{ kg} = 45 536,4 \text{ €}$$

$$C_{fotov} = 102 \cdot 142,85 \text{ €} = 14 570,7 \text{ €}$$

El coste del refrigerador viene dado por su potencia.

$$P = 5,812 \cdot \frac{n}{H} \text{ KW} = 5,812 \cdot \frac{20}{15} = 7,75 \text{ kW}$$

Para esa potencia requerida se escogerá un refrigerador KIT-ADC12HE5C-S, de potencia 10 kW.

Su precio es:

$$PVP(\text{€}) = 40,042 \cdot P(\text{kW}) + 591,08 = 991,5 \text{ €}$$

El caudal del compresor y electrolizador cambian, ya que ahora hay más horas de funcionamiento. El nuevo caudal es $Q = 112/15 = 7,467 \text{ kg H}_2/h = 179,2 \text{ kg H}_2/24h$. Para satisfacer la demanda de caudal se escogerá el compresor modelo 1KS95 y un stack de dieciséis electrolizadores tipo M5000. El coste de cada uno viene dado por:

$$C_{comp}(\text{€}) = 0,6976 \cdot 1,3 \cdot 62909,9 \cdot 75^{0,4603} = 416\,249,1 \text{ €}$$

$$\dot{Q}_{elec} = \frac{1337,42}{15 \text{ horas}} \text{ Nm}^3/h = 89,16 \text{ Nm}^3/h$$

$$C_{elec}(\text{€}) = 1000 \text{ €/KW} \cdot 89,16 \text{ Nm}^3/h \cdot 4,5 \text{ kWh/Nm}^3 = 401\,226 \text{ €}$$

Así pues, el coste total de instalación de la hidrogenera queda:

	Precio
Surtidor de gas	58 800 €
Depósito de gas	45 536,4 €
Compresor	416 249,1 €
Refrigerador	991,5 €
Electrolizador	401 226 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	936 382,2 €

Tabla 34: costes de instalación

El nuevo coste eléctrico se calcula de nuevo.

$$E_{surt}(\text{kWh}) = 0,3 \text{ kWh/kg H}_2 \cdot 5,6 \text{ kg H}_2 \cdot 20 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 1\,008 \text{ kWh}$$

$$E_{comp}(kWh) = 4,6 kWh/kg H_2 \cdot 5,6 kg H_2 \cdot 20 \cdot 30 \frac{días}{mes} = 15 456 kWh$$

$$E_{ref}(kWh) = 5,812 \cdot 20 \cdot 30 \frac{días}{mes} = 3 487,2 kWh$$

$$E_{elec}(kWh) = 4,5 kWh/Nm^3 H_2 \cdot 89,16 Nm^3/h \cdot 20 \cdot 30 \frac{días}{mes} = 240 732 kWh$$

$$E_{H_2}(kWh) = 54,6 kWh/kg H_2 \cdot 5,6 kg H_2 \cdot 20 \cdot 30 \frac{días}{mes} = 183 465 kWh$$

$$E_{fot}(kWh) = 2166,3 kWh$$

$$C_{elect}(€) = (E_{elec} + E_{surt} + E_{comp} + E_{ref} + E_{H_2} - E_{fot}) \cdot 184,19 \text{ €/MWh}$$

$$= (240 732 + 1 008 + 15 456 + 183 465 - 2166,3) \cdot 0,18419 \text{ €/kWh} = 80 764,68 €$$

	Precio
Surtidor de gas	58 800 €
Depósito de gas	45 536,4 €
Compresor	416 249,1 €
Refrigerador	991,5 €
Electrolizador	401 226 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	936 382,2 €
Coste electricidad	80 764,68 €
Coste total	1 017 146,88 €

Tabla 35: costes totales

Ahora se calcula el coste de mantenimiento.

$$C_{mant}(€) = (C_{surt} + C_{comp} + C_{dep} + C_{ref} + C_{elec} + C_{fot}) \cdot 0,05 \cdot \frac{1}{12}$$

$$= (58 800 + 416 249,1 + 45 536,4 + 401 226 + 14 570,7) \cdot 0,05 \cdot \frac{1}{12} = 3 901,59 €$$

	Precio
Surtidor de gas	58 800 €
Depósito de gas	45 536,4 €
Compresor	416 249,1 €
Refrigerador	991,5 €
Electrolizador	401 226 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	936 382,2 €
Coste electricidad	80 764,68 €
Coste de mantenimiento	3 901,59 €
Coste total	1 021 048,47 €

Tabla 36: costes totales

El coste unitario se calcula con la producción de hidrógeno.

$$C_{H_2}^{unit} (\text{€}) = \frac{C_{elec} + C_{inst} + C_m}{(20 \cdot 30) \text{vehículo} \cdot 5,6 \text{ kg } H_2 / \text{vehículo}} = 303,88 \text{ €} / \text{kg } H_2$$

	Precio
Surtidor de gas	58 800 €
Depósito de gas	45 536,4 €
Compresor	416 249,1 €
Refrigerador	991,5 €
Electrolizador	501 533,28 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	1 036 689,48 €
Coste electricidad	91 849,79 €
Coste de mantenimiento	4 319,54 €
Coste total	1 132 858,81 €
Coste unitario	303,88 € / kg

Tabla 37: costes totales

5.1.3. Tercer escenario

En este caso se trabajan con cuarenta coches al día, haciendo que $n = 40$.

Duración solar baja

En este caso hay 9,25 horas de luz solar. El coste del surtidor se calcula tal que:

$$C_{surt}(\text{€}) = 1,5 \cdot 350 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot 5,6 \frac{\text{kg}}{\text{vehículo}} \cdot 40 \frac{\text{vehículo}}{\text{día}} = 117\,600 \text{ €}$$

En el depósito de gas se debe almacenar $V_{dep} = 40 \cdot 5,6 = 224 \text{ kg } H_2$. Consultando la tabla X se sabe que a una presión de 700 bares se necesitan seis depósitos de 38,1 kg de capacidad, conteniendo cada uno 583,8 kilogramos de fibra de carbono. Sabiendo que el precio de la FC es de 26 €/kg, se calcula el precio del depósito:

$$C_{dep}(\text{€}) = 6 \cdot 26 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot 583,8 \text{ kg} = 91\,072,8 \text{ €}$$

El siguiente paso es el compresor. La fórmula para calcular su precio, usando el método del TIC, es

$$TIC(\text{€}) = 0,6976 \cdot 1,3 \cdot 62909,9 * KW^{0,4603}$$

Donde KW es la potencia nominal del mismo, en kilovatios. Sabiendo que el flujo de H_2 es de $Q = 224/9,25 = 24,22 \text{ kg } H_2/h$, se usará un compresor modelo 1KS95 Pro, de potencia 110 kW.

$$C_{comp}(\text{€}) = 0,6976 \cdot 1,3 \cdot 62909,9 * 110^{0,4603} = 496\,503 \text{ €}$$

El coste del refrigerador viene dado por su potencia.

$$P = 5,812 \cdot \frac{n}{H} \text{ KW} = 5,812 \cdot \frac{40}{9,25} = 25,13 \text{ kW}$$

Para esa potencia requerida se escogerán tres refrigeradores KIT-ADC12HE5C-S, de potencia 10 kW cada uno. Su precio es:

$$PVP(€) = 3 \cdot (40,042 \cdot P(kW) + 591,08) = 2974,5 €$$

El coste del electrolizador se calcula en función de su caudal y gasto energético. El caudal necesario es $Q = 24 \cdot 224 / 9,25 = 581,19 \text{ kg H}_2 / 24h$. Para generar hidrógeno con el caudal necesario hará falta un total de cincuenta y cinco ejemplares del modelo M5000, cada uno con un consumo de potencia de $4,5 \text{ kWh} / \text{Nm}_3$.

$$V (\text{Nm}^3) = n \cdot \frac{R \cdot T}{P} = \frac{5600 \text{ g} \cdot 40}{2 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot \frac{0,08257 \frac{\text{L} \cdot \text{bar}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \cdot 293\text{K}}{1,013 \text{ bar}} \cdot 0,001 = 2\,674,8 \text{ Nm}^3$$

$$\dot{Q}_{elec} = \frac{2\,674,8}{9,25 \text{ horas}} \text{ Nm}^3 / h = 289,17 \text{ Nm}^3 / h$$

$$C_{elec}(€) = 1000 \text{ €/KW} \cdot 289,17 \text{ Nm}^3 / h \cdot 4,5 \text{ kWh} / \text{Nm}^3 = 1\,301\,275,53 €$$

Queda la planta fotovoltaica. Su precio ya venía marcado por el precio de mercado y sumaba un total de $C_{fotov} = 102 \cdot 142,85 € = 14570,7 €$.

Así pues, el coste total de instalación de la hidrogenera queda:

	Precio
Surtidor de gas	117 600 €
Depósito de gas	91 072,8 €
Compresor	496 503 €
Refrigerador	2974,5 €
Electrolizador	1 301 275,53 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	2 021 022,03 €

Tabla 38: costes de instalación

Ahora se analiza el coste de la electricidad usada por cada equipo. Para ello se calcula el consumo eléctrico de los equipamientos más la energía necesaria en la producción de hidrógeno. Se calculan los datos para todo un mes.

$$E_{surt}(kWh) = 0,3 \text{ kWh/kg } H_2 \cdot 5,6 \text{ kg } H_2 \cdot 40 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 2\,016 \text{ kWh}$$

$$E_{comp}(kWh) = 2,4 \text{ kWh/kg } H_2 \cdot 5,6 \text{ kg } H_2 \cdot 40 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 16\,128 \text{ kWh}$$

$$E_{ref}(kWh) = 5,812 \cdot 40 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 6\,974,4 \text{ kWh}$$

$$E_{elec}(kWh) = 4,5 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ } H_2 \cdot 289,17 \text{ Nm}^3/\text{h} \cdot 40 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 1\,561\,518 \text{ kWh}$$

$$E_{H_2}(kWh) = 54,6 \text{ kWh/kg } H_2 \cdot 5,6 \text{ kg } H_2 \cdot 40 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 366\,912 \text{ kWh}$$

$$E_{fot}(kWh) = 2166,3 \text{ kWh}$$

El coste de la electricidad será la energía usada multiplicada por su precio.

$$C_{elect}(\text{€}) = (E_{elec} + E_{surt} + E_{comp} + E_{ref} + E_{H_2} - E_{fot}) \cdot 184,19 \text{ €/kWh}$$

$$= (1\,561\,518 + 2\,016 + 16\,128 + 366\,912 - 2166,3) \cdot 0,18419 \text{ €/kWh} = 358\,140,45 \text{ €}$$

	Precio
Surtidor de gas	117 600 €
Depósito de gas	91 072,8 €
Compresor	496 503 €
Refrigerador	2974,5 €
Electrolizador	1 301 275,53 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	2 021 022,03 €
Coste electricidad	358 140,45 €
Coste total	2 379 162,48 €

Tabla 39: costes totales

Ahora se analiza el coste de mantenimiento. El dinero empleado será el 5% del precio de adquisición de los productos.

$$C_{mant}(\text{€}) = (C_{surt} + C_{comp} + C_{dep} + C_{ref} + C_{elec} + C_{fot}) \cdot 0,05 \cdot \frac{1}{12}$$

$$= (117\,600 + 496\,503 + 91\,072,8 + 1\,301\,275,53 + 14\,570,7) \cdot 0,05 \cdot \frac{1}{12} = 8\,420,93 \text{ €}$$

	Precio
Surtidor de gas	117 600 €
Depósito de gas	91 072,8 €
Compresor	496 503 €
Refrigerador	2974,5 €
Electrolizador	1 301 275,53 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	2 021 022,03 €
Coste electricidad	358 140,45 €
Coste de mantenimiento	8 420,93 €
Coste total	2 387 583,41 €

Tabla 40: costes totales

Por último, queda analizar el coste unitario del hidrógeno. Esto se hace dividiendo el coste total entre la cantidad de hidrógeno producida.

$$C_{H_2}^{unit}(\text{€}) = \frac{C_{elec} + C_{inst} + C_m}{(40 \cdot 30)vehículo \cdot 5,6 \text{ kg } H_2 / vehículo} = 354,29 \text{ €/kg } H_2$$

	Precio
Surtidor de gas	117 600 €
Depósito de gas	91 072,8 €
Compresor	496 503 €
Refrigerador	2974,5 €
Electrolizador	1 301 275,53 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	2 021 022,03 €

Coste electricidad	360 863,52 €
Coste de mantenimiento	8 420,93 €
Coste total	2 390 306,47 €
Coste unitario	355,29 €/kg

Tabla 41: costes totales

Duración solar media

En este caso el número de horas al sol diarias es 12. El coste del surtidor, el depósito y la planta fotovoltaica permanecen invariables.

$$C_{surt}(\text{€}) = 1,5 \cdot 350 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot 5,6 \frac{\text{kg}}{\text{vehículo}} \cdot 40 \frac{\text{vehículo}}{\text{día}} = 117 600 \text{ €}$$

$$C_{dep}(\text{€}) = 3 \cdot 26 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot 583,8 \text{ kg} = 91 072,8 \text{ €}$$

$$C_{fotov} = 102 \cdot 142,85 \text{ €} = 14 570,7 \text{ €}$$

El coste del refrigerador viene dado por su potencia.

$$P = 5,812 \cdot \frac{n}{H} \text{ kW} = 5,812 \cdot \frac{40}{12} = 19,37 \text{ kW}$$

Para esa potencia requerida se escogerán dos refrigeradores KIT-ADC12HE5C-S, de potencia 10 kW cada uno. Su precio es:

$$PVP(\text{€}) = 2 \cdot (40,042 \cdot P(\text{kW}) + 591,08) = 1 983 \text{ €}$$

El caudal del compresor y electrolizador cambian, ya que ahora hay más horas de funcionamiento. El nuevo caudal es $Q = 224/12 = 18,67 \text{ kg H}_2/\text{h} = 448 \text{ kg H}_2/24\text{h}$. Para satisfacer la demanda de caudal se escogerá el compresor modelo 2KS95 y un stack de treinta y cuatro electrolizadores tipo M5000. El coste de cada uno viene dado por:

$$C_{comp}(\text{€}) = 0,6976 \cdot 1,3 \cdot 62909,9 * 120^{0,4603} = 516 792,2 \text{ €}$$

$$\dot{Q}_{elec} = \frac{2\,674,8}{12 \text{ horas}} \text{ Nm}^3/\text{h} = 222,9 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$C_{elec}(\text{€}) = 1000 \text{ €/KW} \cdot 222,9 \text{ Nm}^3/\text{h} \cdot 4,5 \text{ kWh/Nm}^3 = 1\,003\,050 \text{ €}$$

Así pues, el coste total de instalación de la hidrogenera queda:

	Precio
Surtidor de gas	117 600 €
Depósito de gas	91 072,8 €
Compresor	516 792,2 €
Refrigerador	1 983 €
Electrolizador	1 003 050 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	1 743 085,7 €

Tabla 42: costes de instalación

El nuevo coste eléctrico se calcula de nuevo.

$$E_{surt}(\text{kWh}) = 0,3 \text{ kWh/kg H}_2 \cdot 5,6 \text{ kg H}_2 \cdot 40 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 2\,016 \text{ kWh}$$

$$E_{comp}(\text{kWh}) = 4,6 \text{ kWh/kg H}_2 \cdot 5,6 \text{ kg H}_2 \cdot 40 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 30\,912 \text{ kWh}$$

$$E_{ref}(\text{kWh}) = 5,812 \cdot 40 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 6\,974,4 \text{ kWh}$$

$$E_{elec}(\text{kWh}) = 4,5 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ H}_2 \cdot 222,9 \text{ Nm}^3/\text{h} \cdot 40 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 1\,203\,660 \text{ kWh}$$

$$E_{H_2}(\text{kWh}) = 54,6 \text{ kWh/kg H}_2 \cdot 5,6 \text{ kg H}_2 \cdot 40 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 366\,912 \text{ kWh}$$

$$E_{fot}(\text{kWh}) = 2166,3 \text{ kWh}$$

$$C_{elect}(\text{€}) = (E_{elec} + E_{surt} + E_{comp} + E_{ref} + E_{H_2} - E_{fot}) \cdot 184,19 \text{ €/MWh}$$

$$= (1\,203\,660 + 2\,016 + 30\,912 + 366\,912 - 2166,3) \cdot 0,18419 \text{ €/kWh} = 294\,949,65 \text{ €}$$

	Precio
Surtidor de gas	117 600 €
Depósito de gas	91 072,8 €
Compresor	516 792,2 €
Refrigerador	1 983 €
Electrolizador	1 003 050 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	1 743 085,7 €
Coste electricidad	294 949,65 €
Coste total	2 038 053,35 €

Tabla 43: costes totales

Ahora se calcula el coste de mantenimiento.

$$C_{mant}(\text{€}) = (C_{surt} + C_{comp} + C_{dep} + C_{ref} + C_{elec} + C_{fot}) \cdot 0,05 \cdot \frac{1}{12}$$

$$= (117\,600 + 516\,792,2 + 91\,072,8 + 1\,003\,050 + 14\,570,7) \cdot 0,05 \cdot \frac{1}{12} = 7\,262,86 \text{ €}$$

	Precio
Surtidor de gas	117 600 €
Depósito de gas	91 072,8 €
Compresor	516 792,2 €
Refrigerador	1 983 €
Electrolizador	1 003 050 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	1 743 085,7 €
Coste electricidad	294 949,65 €
Coste de mantenimiento	7 262,86 €
Coste total	2 045 298,21 €

Tabla 44: costes totales

El coste unitario se calcula con la producción de hidrógeno.

$$C_{H_2}^{unit} (\text{€}) = \frac{C_{elec} + C_{inst} + C_m}{(40 \cdot 30) \text{vehículo} \cdot 5,6 \frac{\text{kg } H_2}{\text{vehículo}}} = 304,36 \text{ €}/\text{kg } H_2$$

	Precio
Surtidor de gas	58 800 €
Depósito de gas	45 536,4 €
Compresor	416 249,1 €
Refrigerador	1 983 €
Electrolizador	501 533,28 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	1 036 689,48 €
Coste electricidad	91 849,79 €
Coste de mantenimiento	4 319,54 €
Coste total	1 132 858,81 €
Coste unitario	304,36 €/kg

Tabla 45: costes totales

Duración solar alta

En este caso el número de horas al sol diarias es 15. El coste del surtidor, el depósito y la planta fotovoltaica permanecen invariables.

$$C_{surt} (\text{€}) = 1,5 \cdot 350 \frac{\text{€}}{\frac{\text{kg}}{\text{día}}} \cdot 5,6 \frac{\text{kg}}{\text{vehículo}} \cdot 40 \frac{\text{vehículo}}{\text{día}} = 117 600 \text{ €}$$

$$C_{dep} (\text{€}) = 3 \cdot 26 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot 583,8 \text{ kg} = 91 072,8 \text{ €}$$

$$C_{fotov} = 102 \cdot 142,85 \text{ €} = 14 570,7 \text{ €}$$

El coste del refrigerador viene dado por su potencia.

$$P = 5,812 \cdot \frac{n}{H} \text{ KW} = 5,812 \cdot \frac{40}{15} = 15,5 \text{ kW}$$

Para esa potencia requerida se escogerán tres refrigeradores KIT-ADC12HE5C-S, de potencia 10 kW cada uno. Su precio es:

$$PVP(€) = 2 \cdot (40,042 \cdot P(kW) + 591,08) = 1983 \text{ €}$$

El caudal del compresor y electrolizador cambian, ya que ahora hay más horas de funcionamiento. El nuevo caudal es $Q = \frac{224}{15} = 14,93 \text{ kg H}_2/\text{h} = 358,4 \text{ kg H}_2/24\text{h}$. Para satisfacer la demanda de caudal se escogerá el compresor modelo 2KS95 y un stack de treinta y cuatro electrolizadores tipo M5000. El coste de cada uno viene dado por:

$$C_{comp}(€) = 0,6976 \cdot 1,3 \cdot 62909,9 \cdot 120^{0,4603} = 516\,792,2 \text{ €}$$

$$\dot{Q}_{elec} = \frac{2\,674,8}{15 \text{ horas}} \text{ Nm}^3/\text{h} = 178,32 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$C_{elec}(€) = 1000 \text{ €/KW} \cdot 178,32 \text{ Nm}^3/\text{h} \cdot 4,5 \text{ kWh/Nm}^3 = 802\,440 \text{ €}$$

Así pues, el coste total de instalación de la hidrogenera queda:

	Precio
Surtidor de gas	117 600 €
Depósito de gas	91 072,8 €
Compresor	516 792,2 €
Refrigerador	1983 €
Electrolizador	802 440 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	1 542 475,7 €

Tabla 46: costes de instalación

El nuevo coste eléctrico se calcula de nuevo.

$$E_{surt}(kWh) = 0,3 \text{ kWh/kg H}_2 \cdot 5,6 \text{ kg H}_2 \cdot 40 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 2\,016 \text{ kWh}$$

$$E_{comp}(kWh) = 4,6 \text{ kWh/kg H}_2 \cdot 5,6 \text{ kg H}_2 \cdot 40 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 30\,912 \text{ kWh}$$

$$E_{ref}(kWh) = 5,812 \cdot 40 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 6\,974,4 \text{ kWh}$$

$$E_{elec}(kWh) = 4,5 \frac{kWh}{Nm^3 H_2} \cdot 178,32 \frac{Nm^3}{h} \cdot 40 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 962\,928 \text{ kWh}$$

$$E_{H_2}(kWh) = 54,6 \frac{kWh}{kg H_2} \cdot 5,6 \text{ kg } H_2 \cdot 40 \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} = 366\,912 \text{ kWh}$$

$$E_{fot}(kWh) = 2166,3 \text{ kWh}$$

$$C_{elect}(\text{€}) = (E_{elec} + E_{surt} + E_{comp} + E_{ref} + E_{H_2} - E_{fot}) \cdot 184,19 \text{ €/MWh}$$

$$= (962\,928 + 2\,016 + 30\,912 + 366\,912 - 2166,3) \cdot 0,18419 \text{ €/kWh} = 250\,609,23 \text{ €}$$

	Precio
Surtidor de gas	117 600 €
Depósito de gas	91 072,8 €
Compresor	516 792,2 €
Refrigerador	1983 €
Electrolizador	802 440 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	1 542 475,7 €
Coste electricidad	250 609,23 €
Coste total	1 793 084,93 €

Tabla 47: costes totales

Ahora se calcula el coste de mantenimiento.

$$C_{mant}(\text{€}) = (C_{surt} + C_{comp} + C_{dep} + C_{ref} + C_{elec} + C_{fot}) \cdot 0,05 \cdot \frac{1}{12}$$

$$= (117\,600 + 516\,792,2 + 91\,072,8 + 802\,440 + 14\,570,7) \cdot 0,05 \cdot \frac{1}{12} = 6\,426,98 \text{ €}$$

	Precio
Surtidor de gas	117 600 €
Depósito de gas	91 072,8 €
Compresor	516 792,2 €
Refrigerador	1983 €
Electrolizador	802 440 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	1 542 475,7 €
Coste electricidad	250 609,23 €
Coste de mantenimiento	6 426,98 €
Coste total	1 799 511,91 €

Tabla 48: costes totales

El coste unitario se calcula con la producción de hidrógeno.

$$C_{H_2}^{unit} (\text{€}) = \frac{C_{elec} + C_{inst} + C_m}{(40 \cdot 30) \text{vehículo} \cdot 5,6 \text{ kg } H_2 / \text{vehículo}} = 267,78 \text{ €} / \text{kg } H_2$$

	Precio
Surtidor de gas	117 600 €
Depósito de gas	91 072,8 €
Compresor	516 792,2 €
Refrigerador	1983 €
Electrolizador	802 440 €
Planta fotovoltaica	14 570,7 €
Coste de instalación	1 542 475,7 €
Coste electricidad	250 609,23 €
Coste de mantenimiento	6 426,98 €
Coste total	1 799 511,91 €
Coste unitario	267,78 € / kg

Tabla 49: costes totales

5.1.4. Análisis económico

En la siguiente tabla se muestran los costes del hidrógeno para todos los resultados, juntando todos los escenarios.

Escenario 1: cinco vehículos		Escenario 2: veinte vehículos		Escenario 3: cuarenta vehículos	
	Coste unitario		Coste unitario		Coste unitario
Radiación baja	757,47 €/kg	Radiación baja	416,67 €/kg	Radiación baja	355,29 €/kg
Radiación media	711,58 €/kg	Radiación media	337,16 €/kg	Radiación media	304,36 €/kg
Radiación alta	680,48 €/kg	Radiación alta	303,88 €/kg	Radiación alta	267,78 €/kg

Tabla 50: resultados económicos

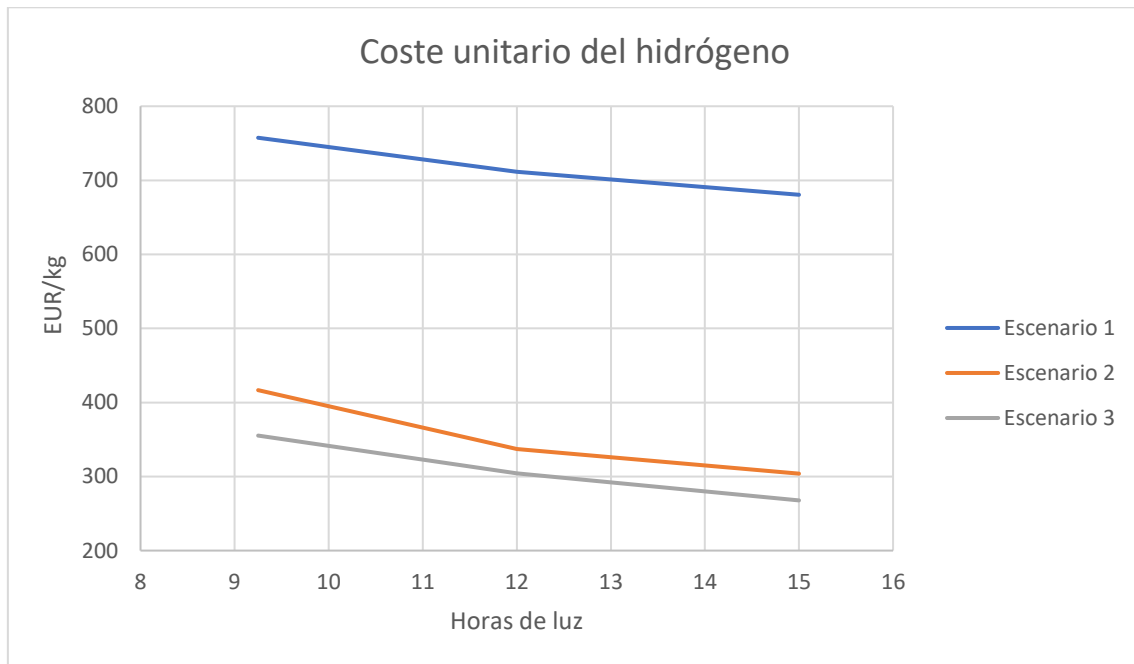


Ilustración 40: coste unitario del hidrógeno

Como se ve, el precio del hidrógeno disminuye gradualmente al haber más vehículos repostando, lo que hace que se aproveche mejor la inversión realizada. Aunque el valor puede considerarse muy alto, esto es una estimación mensual, se debe de tener en cuenta que una estación de repostaje tiene una vida útil más amplia. Los cálculos se han hecho de esta manera para mostrar la rentabilidad de la hidrogenera en función de cada mes, al variar la radiación solar recibida. Se aprecia claramente que a mayor tiempo de funcionamiento de la misma más rentable sale la

producción de hidrógeno. Esto se debe a que los requerimientos de los equipos son menos estrictos al bajar el caudal de producción, resultando ser más baratos.

5.2. Toyota Mirai

En este apartado se va a realizar el coste económico de cada componente del Toyota Mirai que forme parte del ciclo vital del hidrógeno. No se trata de evaluar un precio del vehículo, si no de analizar económicamente la parte eléctrica del mismo, determinando de esta manera la rentabilidad de este tipo de coches. El primer equipamiento que se va a estudiar es el depósito de gas. El Toyota Mirai es capaz de almacenar hasta 5,6 kg de hidrógeno presurizado a 700 bares. Usando la tabla inferior se estima que la cantidad de fibra de carbono presente en estos depósitos es de 85 kilogramos en total.

Table 1. Summary of System Capacities and Carbon Fiber Requirements for MDV and HDV Storage Systems

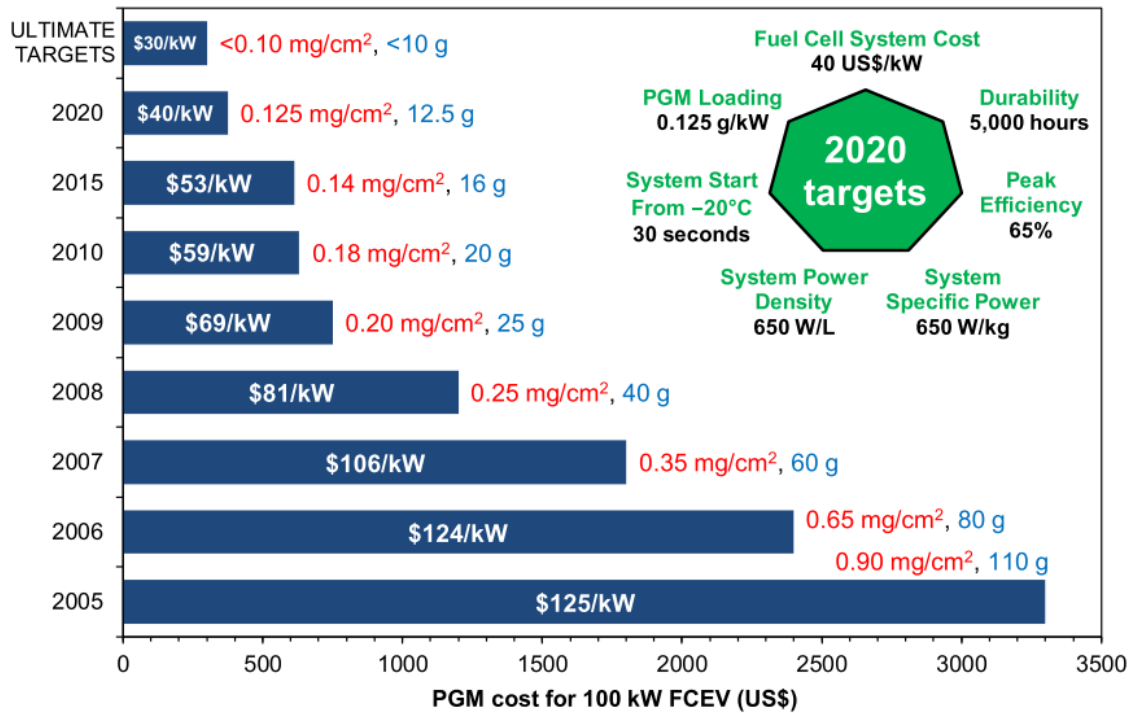
Location	Number of Tanks	Interior Tank Length (inches)	Interior Tank Diameter (inches)	Usable H ₂ (kg H ₂ /tank)			Composite Mass (kg carbon fiber/tank)		
				350-bar cH ₂	500-bar CcH ₂	700-bar cH ₂	350-bar cH ₂	500-bar CcH ₂	700-bar cH ₂
BTC	2-4	80	16	5.7	17.4	9.7	61.0	93.8	152.0
	2-4	80	21	9.6	29.6	16.3	107.2	152.8	257.5
RM	4	80	16	5.7	17.4	9.7	61.0	93.8	152.0
	4	96	16	6.9	21.1	11.7	73.6	113.3	182.8
	4	97	12	4.0	12.1	6.7	50.1	68.0	108.5
FM	1-2	60	21	7.0	21.4	11.9	79.3	112.7	190.9
	1-2	80	21	9.6	29.6	16.3	107.2	152.8	257.5
	1-2	120	21	14.9	45.8	25.3	163.0	232.9	390.8
	1-2	60	26	10.3	31.8	17.5	120.4	165.7	288.2
	1-2	80	26	14.4	44.1	24.4	161.8	224.9	386.7
	1-2	90	26	16.4	50.4	27.8	182.5	254.6	436.0
	1-2	120	26	22.4	68.9	38.1	244.7	343.4	583.8

350-bar Type 3 compressed (350-bar cH₂), 500-bar cryo-compressed (500-bar CcH₂), and 700-bar Type 4 compressed (700-bar cH₂) hydrogen storage systems are considered. Storage system dimensions are taken from A-1 electric

Ilustración 41: fibra de carbono en depósitos

Sabiendo que el coste de la fibra de carbono ronda los 26 euros por kilogramo, el precio del depósito sería de $C_{dep} = 85 \text{ kg} \cdot 26 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = 2\,210 \text{ €}$.

En cuanto a la pila de combustible, el parámetro a tener en cuenta es la eficiencia energética de la misma. El coste de estos aparatos va relacionado con la potencia que tienen, ya que una pila de combustible con mayor rentabilidad eléctrica saldrá más cara. El gráfico inferior, mencionado anteriormente, muestra los costes de producción en función de la potencia de la pila.

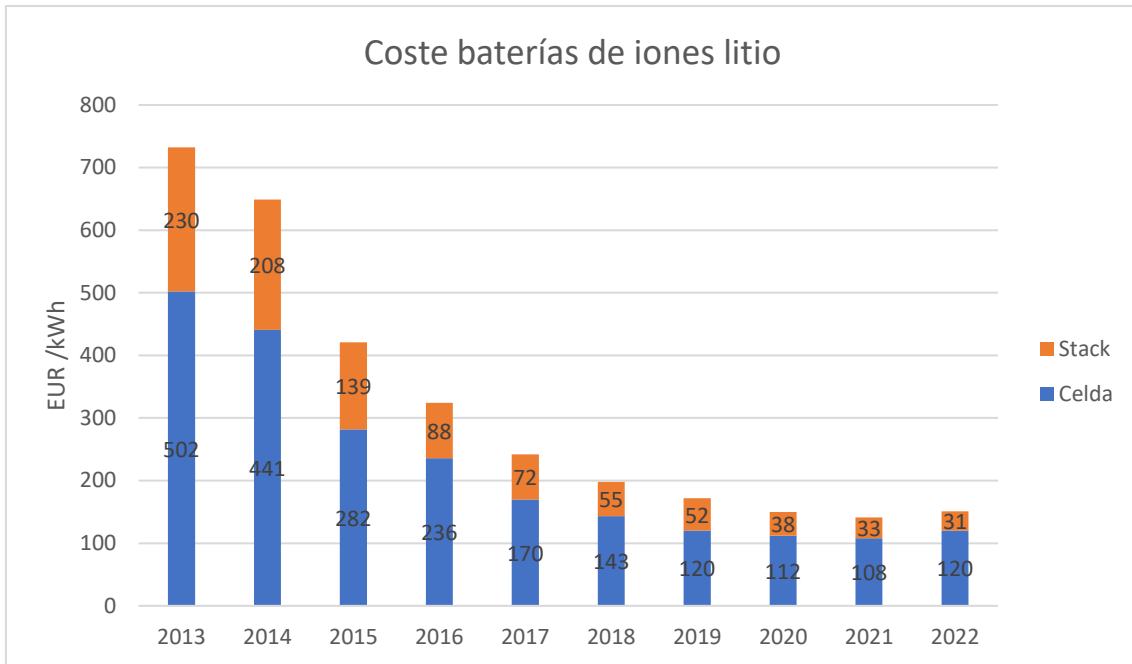


Sabiendo que la pila de combustible tiene una eficiencia de 5,4 kW/L, y que los depósitos del vehículo pueden almacenar hasta 142 litros de hidrógeno, el coste de la pila sería

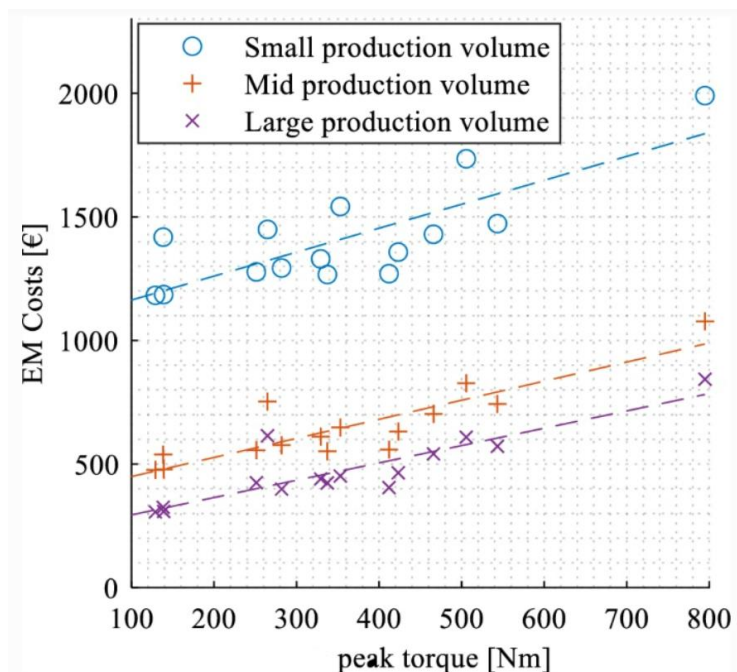
$$C_{pila} = 142 \text{ L} \cdot 5,4 \text{ kW/L} \cdot 40 \text{ €/kW} = 30\,672 \text{ €}$$

Lo siguiente a analizar es la batería. La batería del Toyota Mirai es de iones de litio, con 84 celdas, una capacidad de 4 Ah y un voltaje nominal de 310,8 V. Esto hace que tenga una capacidad de $4 \text{ Ah} \cdot 310,8 \text{ V} = 1,243 \text{ kWh}$. El gráfico inferior muestra el coste de las baterías en función de su capacidad, según datos de Bloomberg. Haciendo el cálculo sale el coste de la batería:

$$C_{bat} = 1,243 \text{ kWh} \cdot 151 \text{ €/kWh} = 187,72 \text{ €}$$



Lo último que queda por analizar es el motor eléctrico. El Toyota Miria posee un motor eléctrico de tipo síncrono imán permanente, con un par máximo de 300 Nm. Usando el gráfico de la Ilustración 39, que muestra el precio de este tipo de motores en función de su par, se puede estimar el precio del motor. Debido a que el Toyota Mirai es un modelo de coche en desarrollo y que se encuentra en una fase de expansión comercial se va a estimar que tiene un volumen de producción media. Con eso, el precio de un motor eléctrico quedaría en unos 1 350 €.



Juntando todos los componentes del vehículo, el precio final queda:

	Coste
Depósito de gas	2 210 €
Pila de combustible	30 672 €
Batería de litio	187,72 €
Motor eléctrico	1350 €
Coste equipamiento eléctrico	34 419,72 €
Coste motor combustión	10 000 €

Tabla 51: coste equipamiento eléctrico Toyota

El coste del motor de un vehículo de combustión ronda los diez mil euros aproximadamente, por lo que hay un precio del 349% respecto a un motor de gasolina o diesel.

6. Análisis ambiental

En este apartado se estudiará la cantidad de CO₂ producida en un vehículo con motor de combustión a la hora de usar el combustible. Con esto se pretende ilustrar la rentabilidad y ahorro que supone usar un vehículo eléctrico. Para calcular ese valor, se ha obtenido el valor de los kilogramos de CO₂ producidos por cada litro de combustible utilizado.

Combustible (Unidades FE)	Factores de emisión (FE)														
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
Gasolina (kgCO ₂ /l) ⁽¹⁾	2,295	2,295	2,295	2,295	2,205	2,201	2,205	2,205	2,205	2,196	2,180	2,157	-	-	
Gasóleo A (kgCO ₂ /l) ⁽¹⁾	2,653	2,653	2,653	2,653	2,493	2,467	2,544	2,544	2,544	2,539	2,520	2,493	-	-	
Gasóleo B (kgCO ₂ /l)	2,708	2,708	2,708	2,708	2,708	2,708	2,708	2,708	2,708	2,708	2,708	2,708	2,708	2,686	
Gasóleo C (kgCO ₂ /l)	2,868	2,868	2,868	2,868	2,868	2,868	2,868	2,868	2,868	2,868	2,868	2,868	2,868	2,868	
E5 (kgCO ₂ /l) ⁽²⁾	2,180	2,180	2,180	2,180	2,180	2,180	2,180	2,180	2,180	2,180	2,180	2,180	2,180	2,244	
E10 (kgCO ₂ /l) ⁽²⁾	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065	2,065	2,125	
E85 (kgCO ₂ /l) ⁽²⁾	0,344	0,344	0,344	0,344	0,344	0,344	0,344	0,344	0,344	0,344	0,344	0,344	0,344	0,354	
E100 (kgCO ₂ /l) ⁽²⁾	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
B7 (kgCO ₂ /l) ⁽²⁾	2,467	2,467	2,467	2,467	2,467	2,467	2,467	2,467	2,467	2,467	2,467	2,467	2,467	2,456	
B10 (kgCO ₂ /l) ⁽²⁾	2,387	2,387	2,387	2,387	2,387	2,387	2,387	2,387	2,387	2,387	2,387	2,387	2,387	2,377	
B20 (kgCO ₂ /l) ⁽²⁾	2,122	2,122	2,122	2,122	2,122	2,122	2,122	2,122	2,122	2,122	2,122	2,122	2,122	2,113	
B30 (kgCO ₂ /l) ⁽²⁾	1,857	1,857	1,857	1,857	1,857	1,857	1,857	1,857	1,857	1,857	1,857	1,857	1,857	1,849	
B100 (kgCO ₂ /l) ⁽²⁾	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
XTL (kgCO ₂ /l)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Gas natural (kgCO ₂ /kWh) ⁽³⁾	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,183	0,183	0,182	0,182	
LNG (kgCO ₂ /kg)	2,736	2,736	2,713	2,736	2,743	2,723	2,713	2,713	2,697	2,705	2,704	2,710	2,697	2,721	
CNG (kgCO ₂ /kg)	2,736	2,736	2,713	2,736	2,743	2,723	2,713	2,713	2,697	2,705	2,704	2,710	2,697	2,721	
LPG (kgCO ₂ /l) ⁽⁴⁾	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671	1,628	
H2 (kgCO ₂ /kg)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Gas butano (kgCO ₂ /kg)	2,964	2,964	2,964	2,964	2,964	2,964	2,964	2,964	2,964	2,964	2,964	2,964	2,964	2,964	
Gas propano (kgCO ₂ /kg)	2,938	2,938	2,938	2,938	2,938	2,938	2,938	2,938	2,938	2,938	2,938	2,938	2,938	2,938	
Fuelóleo (kgCO ₂ /kg)	3,127	3,127	3,127	3,127	3,127	3,127	3,127	3,127	3,127	3,127	3,127	3,127	3,127	3,127	
Carbón nacional (kgCO ₂ /kg)	2,297	2,297	2,297	2,299	2,299	2,299	2,299	2,299	2,299	2,006	2,227	2,227	1,914	2,718	
Carbón de importación (kgCO ₂ /kg)	2,527	2,527	2,527	2,579	2,579	2,579	2,579	2,579	2,579	2,430	2,444	2,444	2,429	2,469	
Coque de petróleo (kgCO ₂ /kg)	3,169	3,169	3,169	3,169	3,169	3,169	3,169	3,169	3,169	3,169	3,169	3,169	3,169	3,169	

⁽¹⁾ A partir del año 2019 los combustibles gasolina y gasóleo de automoción pasan a denominarse por las letras E y B respectivamente añadiendo la proporción de biocombustible que contienen (RD 639/2016).
⁽²⁾ A partir del año 2020 se emplean los valores específicos para gasolina y gasóleo considerados en el apartado de Transporte por Carretera del Inventario Nacional de Emisiones 1990-2019 en lugar de los valores genéricos del anexo 7 del mismo Inventario. Este cambio se debe a que hasta la edición 1990-2018 de dicho inventario, no se habían publicado los resultados de emisiones de CO₂ producidas por el consumo de estos carburantes en función de sus especificaciones.
⁽³⁾ El factor de emisión del gas natural se expresa en PCS empleando un factor de conversión para el paso de PCS a PCI de 0,901 (Inventario Nacional de Emisiones de España).
⁽⁴⁾ A partir del año 2020 se modifica el valor del factor de emisión del LPG en base a su fórmula estequiométrica indicada en Inventario Nacional de Emisiones en el apartado Transporte por Carretera (35% propano C3H8 – 65% butano C4H10) y las densidades especificadas en el Real Decreto 81/2005, de 31 de enero, para el butano y el propano.

Ilustración 42: factores de emisión por combustible

Para hacer una comparativa equivalente con el Toyota Mirai, se supondrá una autonomía de 650 kilómetros para el coche. Se supone además un consumo de 6 L/100km de combustible. Con estos datos el CO₂ producido se calcularía de la siguiente manera:

$$kg\ CO_2 = FE \cdot 6\ L/100\ km \cdot 650\ km$$

En la gráfica inferior de elaboración propia se muestra la comparativa de dióxido de carbono producido por tipo de vehículo.

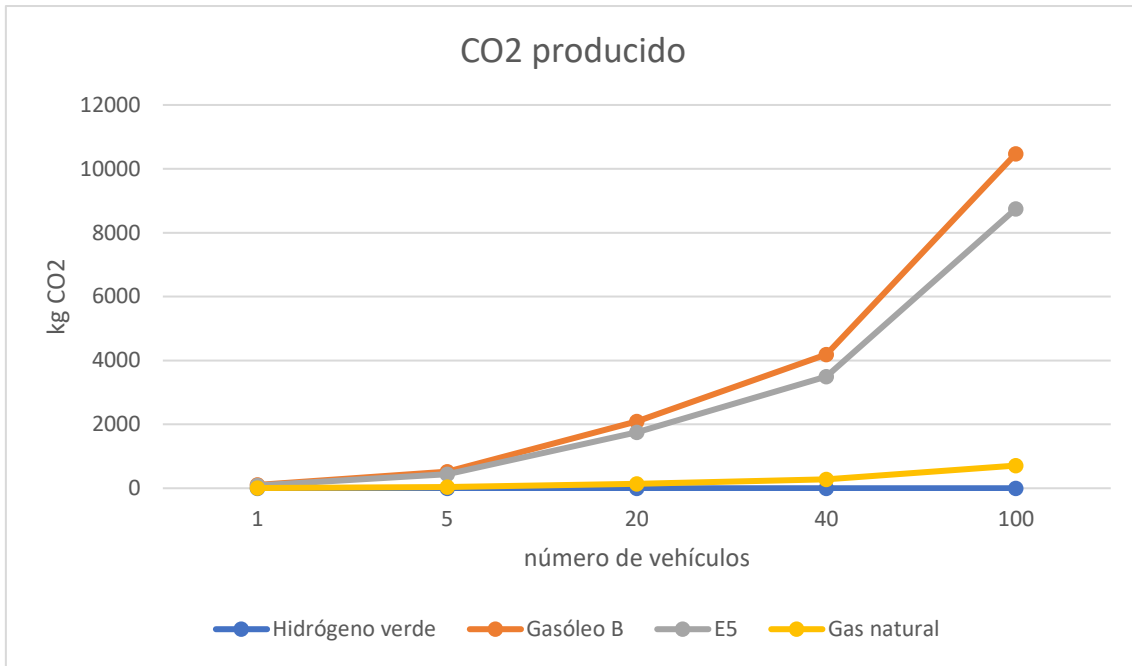


Ilustración 43: CO2 producido por combustible

Como se ve, el hidrógeno verde no produce emisiones contaminantes de ningún tipo al tener un factor de emisión cero, lo cual es algo ya conocido. De los demás combustibles destaca el pequeño valor contaminante del gas natural en comparación con el resto de los fluidos.

7. Análisis de los resultados

En la siguiente tabla se muestran los costes del hidrógeno para todos los resultados, juntando todos los escenarios.

Escenario 1: cinco vehículos		Escenario 2: veinte vehículos		Escenario 3: cuarenta vehículos	
	Coste unitario		Coste unitario		Coste unitario
Radiación baja	757,47 €/kg	Radiación baja	416,67 €/kg	Radiación baja	355,29 €/kg
Radiación media	711,58 €/kg	Radiación media	337,16 €/kg	Radiación media	304,36 €/kg
Radiación alta	680,48 €/kg	Radiación alta	303,88 €/kg	Radiación alta	267,78 €/kg

Tabla 52: resultados económicos del hidrógeno

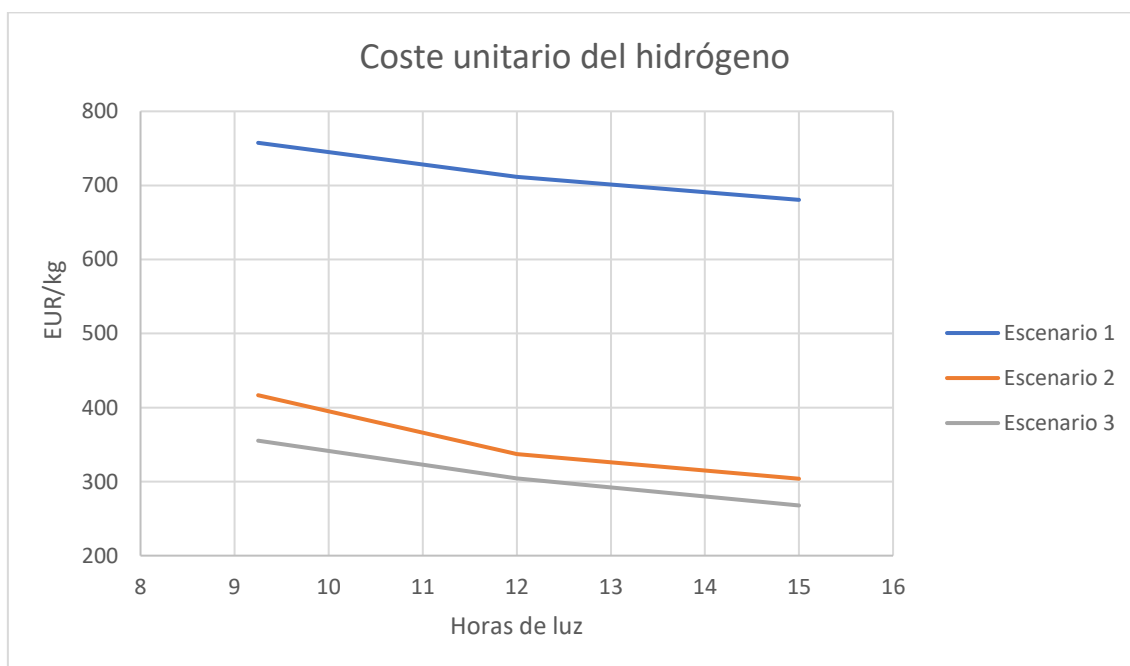


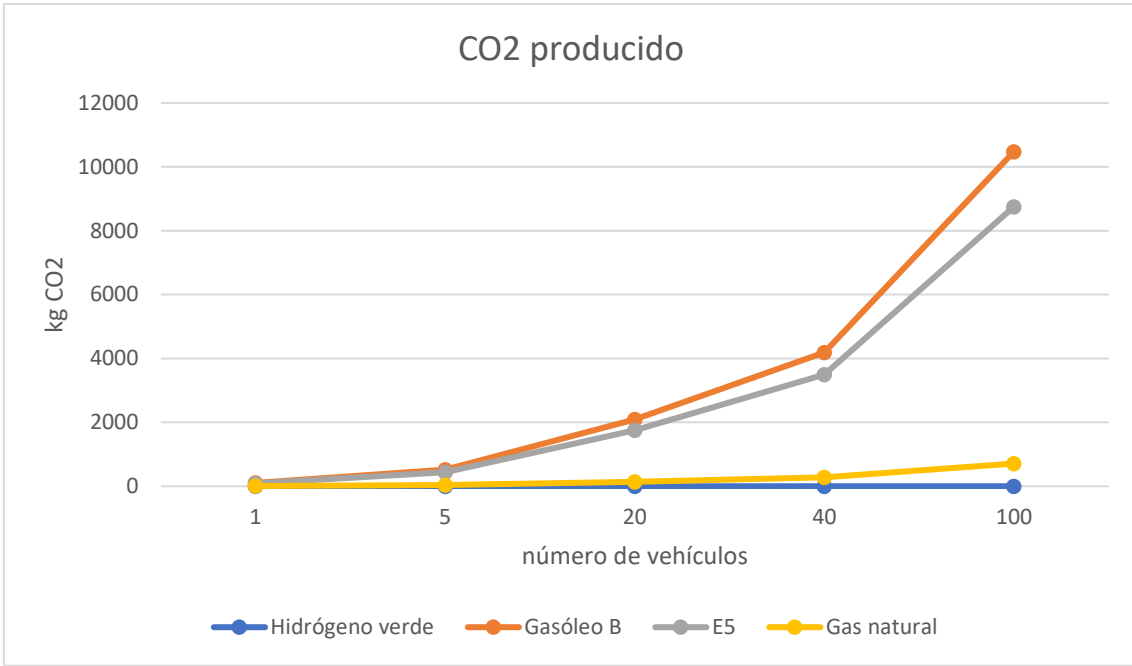
Ilustración 44: coste unitario del hidrógeno

En el análisis de sensibilidad, como se ve, el precio del hidrógeno disminuye gradualmente al haber más vehículos repostando, lo que hace que se aproveche mejor la inversión realizada. Aunque el valor puede considerarse muy alto, esto es una estimación mensual, se debe de tener en cuenta que una estación de repostaje tiene una vida útil más amplia. Los cálculos se han hecho de esta manera para mostrar la rentabilidad de la hidrogenera en función de cada mes, al variar la radiación solar recibida. Se aprecia claramente que a mayor tiempo de funcionamiento de la misma más rentable sale la producción de hidrógeno. Esto se debe a que los requerimientos

de los equipos son menos estrictos al bajar el caudal de producción, resultando ser más baratos. Para conseguir una mayor eficiencia económica debería de haber un número mayor de vehículos con pila de combustible en circulación, ya que se ve bien que aumenta la rentabilidad. Otra opción sería producir hidrógeno en exceso y almacenarlo para su posterior uso, de manera que no hubiese criterios muy estrictos en la elección del material. Respecto al análisis económico del Toyota Mirai, el coste de todos los equipamientos eléctricos del vehículo asciende a un valor total superior a los treinta mil euros, como aparece reflejado en la tabla de abajo.

	Coste
Depósito de gas	2 210 €
Pila de combustible	30 672 €
Batería de litio	187,72 €
Motor eléctrico	1350 €
Coste equipamiento eléctrico	34 419,72 €
Coste motor combustión	10 000 €

En cuanto al análisis ambiental, el hidrógeno verde es claramente más limpio que cualquier otro tipo de combustible. Al ser un gas que desecha vapor de agua en su combustión no emite gases contaminantes o de efecto invernadero.



8. Conclusiones

Los análisis económico y medioambiental muestran resultados diferenciados. Mientras que económicamente es evidente la enorme diferencia económica que hay entre las dos soluciones en favor de los combustibles fósiles, a nivel medioambiental el hidrógeno verde muestra una clara ventaja. Sus cero emisiones en operación hacen a esta tecnología un referente de cara al futuro. Con nuevas medidas y estimaciones el hidrógeno se puede convertir en una referencia a corto plazo. Algunas de estas serían:

- Una mayor producción industrial de vehículos de este tipo. Como se ve en el coste de producción del hidrógeno, a mayor volumen de coches mayor eficiencia económica. Esto se debe principalmente a que los costes de adquisición y mantenimiento permanecen invariables con el número de coches, por lo que quedan amortizados si se hace un gran uso de estos. Hay que tener en cuenta además de que la estimación hecha es mensual, realizado así para estudiar los diferentes escenarios de luz, y hay que pensar que la vida útil de estos aparatos va más allá.
- Una mayor investigación y desarrollo en los vehículos de pila de combustible. Hay que tener en cuenta que la flota en España de este tipo de vehículos es muy reducida, por lo que no va a haber una mayor implantación en la población hasta que haya una estabilización de los precios.

Es importante destacar de que a pesar de que no se saque un beneficio económico el motivo principal por el que se emplea este tipo de combustible es por sus cero emisiones de carbono, haciendo que no contamine en absoluto. La lucha contra el cambio climático y la preservación de la biodiversidad de nuestro planeta son un reto que debemos cumplir ya que sus efectos afectan a toda la población.

9. Objetivos de desarrollo sostenible (ODS)

De entre los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) este proyecto hace referencia los siguientes objetivos:

- Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante

La energía generada por pilas de combustible es una de las que menor impacto tiene en el medio ambiente, ya que no llevan implícitos procesos de combustión. Hay que resaltar que un vehículo de este tipo sustituye a otro de tipo diésel o gasolina, lo que evita la propagación a la atmosfera de gases contaminantes debidos a la combustión del carbón y el petróleo.

- Objetivo 13: Acción por el clima

El hidrógeno verde es una energía 100% limpia, la cual no produce emisiones de CO₂ sino vapor de agua, y por tanto no tiene efectos en el clima. El hidrógeno parece ser el mejor posicionado para sustituir los combustibles fósiles en el futuro, causantes de las emisiones de CO₂, y de los problemas medioambientales y del cambio climático.

- Objetivo 15: Vida de ecosistemas terrestres

La extracción de petróleo y gas natural no contribuye de a la deforestación del planeta, pues en muchos países exportadores de petróleo los yacimientos petrolíferos se encuentran en los bosques, siendo necesario talar los árboles. Esto lleva consigo la destrucción de numerosos ecosistemas y funciones ecológicas, poniendo en peligro la supervivencia de las especies que habitan dichos hábitats. La existencia de una fuente de generación de energía alternativa nos permite prescindir del petróleo o gas natural en gran medida, lo que elimina la producción y construcción de dichos campos petrolíferos.

10. Bibliografía

- [Agencia Internacional de la Energía (AEI), «Consumo de energía primaria,» 2018.
1
]
- [J. Casey, «Power Technology,» [En línea]. Available:
2 [https://web.archive.org/web/20210518082201/https://www.power-](https://web.archive.org/web/20210518082201/https://www.power-technology.com/features/will-china-do-for-hydrogen-what-it-did-for-solar-power/)
] [technology.com/features/will-china-do-for-hydrogen-what-it-did-for-solar-power/](https://web.archive.org/web/20210518082201/https://www.power-technology.com/features/will-china-do-for-hydrogen-what-it-did-for-solar-power/). [Último
acceso: 133 abril 2023].
- [20 minutos, «Motor y movilidad,» [En línea]. Available:
3 <https://www.20minutos.es/noticia/3736221/0/coches-vehiculos-circulan-espana-2018/>.
] [Último acceso: 13 abril 2023].
- [Gasnam, «Planificación de la red ibérica de hidrogeneras,» [En línea]. Available:
4 <https://gasnam.es/terrestre/mapa-de-hidrogeneras/>. [Último acceso: 15 abril 2023].
]
- [S. Jiménez, «Instituto de Productos Naturales y Agrobiología,» 30 diciembre 2019. [En
5 línea]. Available: [https://www.ipna.csic.es/blog/el-origen-de-los-primeros-elementos-](https://www.ipna.csic.es/blog/el-origen-de-los-primeros-elementos-quimicos#:~:text=Tras%2013.800%20millones%20de%20a%C3%B1os%2C%20el%20universo%20se,2%25%20en%20masa%20de%20todos%20los%20dem%C3%A1s%20elementos..)
] [quimicos#:~:text=Tras%2013.800%20millones%20de%20a%C3%B1os%2C%20el%20universo%20se,2%25%20en%20masa%20de%20todos%20los%20dem%C3%A1s%20elementos..](https://www.ipna.csic.es/blog/el-origen-de-los-primeros-elementos-quimicos#:~:text=Tras%2013.800%20millones%20de%20a%C3%B1os%2C%20el%20universo%20se,2%25%20en%20masa%20de%20todos%20los%20dem%C3%A1s%20elementos..)
] [Último acceso: 27 marzo 2023].
- [«El Sol: Su composición,» [En línea]. Available:
6 <https://materiaoscurag2.blogspot.com/p/composicion-quimica-del-sol-hidrogeno.html>.
] [Último acceso: 27 marzo 2023].
- [N. G. España, «Propiedades del hidrógeno (H),» 16 septiembre 2022. [En línea]. Available:
7 https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-hidrogeno-h_18653. [Último
] acceso: 27 marzo 2023].
- [National Academy of Sciences, «The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs,» National
8 Academies Press, 2004.
]
- [«Química inorgánica,» [En línea]. Available:
9 <https://www.fullquimica.com/2011/09/elemento-quimico-hidrogeno.html>. [Último acceso:
] 2023 marzo 27].
- [D. P. Á. Chero, «Centro de Ingeniería y Tecnología,» [En línea]. Available:
1 <https://hidrogeno18.wixsite.com/hidrogeno/blank-cjg9>. [Último acceso: 27 marzo 2023].
0
]
- [«Centro Nacional del Hidrógeno,» [En línea]. Available: [https://www.cnh2.es/el-](https://www.cnh2.es/el-1-hidrogeno/#tab-id-1)
1 [1 hidrogeno/#tab-id-1](https://www.cnh2.es/el-1-hidrogeno/#tab-id-1). [Último acceso: abril 4 2023].

1
]

[«Es hidrógeno,» [En línea]. Available: <https://eshidrogeno.com/reformado/>. [Último acceso: 1 abril 4 2023].

2
]

[M. Matzen, «Technoeconomics and Sustainability of Renewable Methanol and Ammonia Productions Using Wind Power-based Hydrogen,» *Journal of Advanced Chemical Engineering*, 2015.

]

[Cienciabit: Science and Technology, «Decomposition of Water into Hydrogen and Oxygen by electrolysis.,» [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=wIAU0zReIRY>. [Último acceso: abril 4 2023].

]

[V. Knop, «A World Of Energy,» [En línea]. Available: <http://www.awoe.net/Water-Electrolysis-Alkaline-Technology.html>. [Último acceso: abril 4 2023].

5
]

[Iberdrola, «Iberdrola. Sostenibilidad: Electrolizador,» [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/electrolizador>. [Último acceso: 4 abril 2023].

6
]

[Toyota, «Componentes de un coche de hidrógeno,» [En línea]. Available: <https://www.toyota.es/world-of-toyota/articles-news-events/componentes-coche-hidrogeno-toyota>. [Último acceso: 5 abril 2023].

]

[Energy, [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=2cGEAprWpNE>. [Último acceso: 2023 abril 5].

8
]

[Aviación digital, «Los depósitos de hidrógeno líquido: un reto para el ZEDC de Airbus en España,» [En línea]. Available: <https://aviaciondigital.com/airbus-espana-deposito-hidrogeno-liquido/>. [Último acceso: 2023 abril 5].

]

[Apilados, «Métodos para el almacenamiento de hidrógeno,» [En línea]. Available: <https://apilados.com/blog/3-metodos-almacenamiento-hidrogeno/#:~:text=Debido%20a%20la%20baja%20densidad%20del%20hidr%C3%B3geno%20su,almacenar%20hidr%C3%B3geno%20es%20en%20dep%C3%B3sitos%20a%20alta%20presi%C3%B3n..> [Último acceso: 5 abril 2023].

[L. Raff, Principles of Physical Chemistry, New Jersey: Prentice-Hall, 20202.

2

1

]

[Mundo compresor, «Los diferentes tipos de compresores,» [En línea]. Available:

2 <https://www.mundocompresor.com/articulos-tecnicos/diferentes-tipos-compresores>.

2 [Último acceso: 8 abril 2023].

]

[Chava Tarin, «Cómo funciona un compresor básico,» [En línea]. Available:

2 <https://www.youtube.com/watch?v=QYtKOucA2cU>. [Último acceso: 8 abril 2023].

3

]

[Centro Nacional del Hidrógeno, «El hidrógeno,» [En línea]. Available:

2 <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/#tab-id-1>. [Último acceso: 5 abril 2023].

4

]

[Fuel Cell store, «Hydrogen education,» [En línea]. Available:

2 <https://www.fuelcellstore.com/hydrogen-education>. [Último acceso: 15 abril 2023].

5

]

[Parlamento Europeo, «Emisiones de CO2 de los coches: hechos y cifras (infografía),» [En
2 línea]. Available:

6 [https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-](https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia#:~:text=En%202019%20la%20mayor%C3%ADa%20del%20transporte%20por%20carretera,los%20nuevos%20veh%C3%ADculos%20de%20pasajeros%2)

]

infografia#:~:text=En%202019%20la%20mayor%C3%ADa%20del%20transporte%20por%20carretera,los%20nuevos%20veh%C3%ADculos%20de%20pasajeros%2

2. [Último acceso: 17

mayo 2023].

[L. Carlos, «Auto10,» [En línea]. Available: [https://www.auto10.com/pruebas/prueba-](https://www.auto10.com/pruebas/prueba-toyota-mirai-te-explicamos-como-va-el-coche-de-hidrogeno/18101)

2 [toyota-mirai-te-explicamos-como-va-el-coche-de-hidrogeno/18101](https://www.auto10.com/pruebas/prueba-toyota-mirai-te-explicamos-como-va-el-coche-de-hidrogeno/18101). [Último acceso: 17

7

]

[Apilados, «Métodos para el almacenamiento de hidrógeno,» [En línea]. Available:

2 <https://apilados.com/blog/3-metodos-almacenamiento-hidrogeno/>. [Último acceso: 2023

8

]

[TECPA, «La pila de combustible,» [En línea]. Available: [https://www.tecpa.es/pila-](https://www.tecpa.es/pila-combustible/#:~:text=Su%20electrolito%20est%C3%A1%20constituido%20por%20una%20membrana%20de,agua%20se%20convierte%20en%20un%20excelente%20conductor%20por)

2 [combustible/#:~:text=Su%20electrolito%20est%C3%A1%20constituido%20por%20una%20membrana%20de,agua%20se%20convierte%20en%20un%20excelente%20conductor%20por](https://www.tecpa.es/pila-combustible/#:~:text=Su%20electrolito%20est%C3%A1%20constituido%20por%20una%20membrana%20de,agua%20se%20convierte%20en%20un%20excelente%20conductor%20por)

9

]

ot%C3%B3nico.. [Último acceso: 17 mayo 2023].

- [Toyota Motors España, «¿Qué componentes tiene un coche de hidrógeno?,» [En línea].
3 Available: [https://www.toyota.es/world-of-toyota/articles-news-events/componentes-](https://www.toyota.es/world-of-toyota/articles-news-events/componentes-coche-hidrogeno-toyota)
0 [coche-hidrogeno-toyota](https://www.toyota.es/world-of-toyota/articles-news-events/componentes-coche-hidrogeno-toyota). [Último acceso: 17 mayo 2023].
]
- [Organización Radiofónica de Oaxaca, «Baterías de litio darían nueva vida a los autos
3 eléctricos,» [En línea]. Available: [https://www.ororadio.com.mx/2019/12/baterias-de-litio-](https://www.ororadio.com.mx/2019/12/baterias-de-litio-darian-nueva-vida-a-los-autos-electricos/)
1 [darian-nueva-vida-a-los-autos-electricos/](https://www.ororadio.com.mx/2019/12/baterias-de-litio-darian-nueva-vida-a-los-autos-electricos/). [Último acceso: 17 mayo 2023].
]
- [CETIL, «Surtidor de hidrógeno E30 H2,» [En línea]. Available: [https://www.cetil.com/es/e30-](https://www.cetil.com/es/e30-h2-a)
3 [h2-a](https://www.cetil.com/es/e30-h2-a). [Último acceso: 23 mayo 2023].
2
]
- [R. Caponi, A. Monforti Ferrario, L. Del Zotto y E. Bocci, «Hydrogen refueling station cost
3 model applied to five real case studies for fuel cell buses,» E3S Web of Conferences, Rome,
3 2021.
]
- [C. Jousins, «Hydrogen Storage Cost Analysis,» *Department of Energy*, 2019.
3
4
]
- [M. Y. C. a. M. C. a. L. D. Khan, «The Techno-Economics of Hydrogen Compression,»
3 *Transition Accelerator Technical Briefs*, vol. 1, nº 1, pp. 1-36, 2021.
5
]
- [L. Bertuccioli, A. Chan, D. Hart y F. Lehner, «Development of water electrolysis in the
3 European Union,» 2014.
6
]
- [AutoSolar, «Panel Solar 405W Deep Blue 3.0 JA Solar Mono,» [En línea]. Available:
3 [https://autosolar.es/paneles-de-conexion-a-red/panel-solar-405w-deep-blue-30-ja-solar-](https://autosolar.es/paneles-de-conexion-a-red/panel-solar-405w-deep-blue-30-ja-solar-mono#)
7 [mono#](https://autosolar.es/paneles-de-conexion-a-red/panel-solar-405w-deep-blue-30-ja-solar-mono#). [Último acceso: 7 junio 2023].
]
- [R. Fernández, «Precio medio final anual de la electricidad en España de 2010 a 2022,»
3 Statista, [En línea]. Available: [https://es.statista.com/estadisticas/993787/precio-medio-](https://es.statista.com/estadisticas/993787/precio-medio-final-de-la-electricidad-en-espana/#:~:text=Precio%20medio%20final%20anual%20de%20la%20electricidad%20en,de%202010%20a%202022%20%28en%20euros%20por%20megavatio-hora%29)
8 [final-de-la-electricidad-en-](https://es.statista.com/estadisticas/993787/precio-medio-final-de-la-electricidad-en-espana/#:~:text=Precio%20medio%20final%20anual%20de%20la%20electricidad%20en,de%202010%20a%202022%20%28en%20euros%20por%20megavatio-hora%29)
] [espana/#:~:text=Precio%20medio%20final%20anual%20de%20la%20electricidad%20en,de%202010%20a%202022%20%28en%20euros%20por%20megavatio-hora%29](https://es.statista.com/estadisticas/993787/precio-medio-final-de-la-electricidad-en-espana/#:~:text=Precio%20medio%20final%20anual%20de%20la%20electricidad%20en,de%202010%20a%202022%20%28en%20euros%20por%20megavatio-hora%29). [Último
acceso: 8 junio 2023].
- [G. Saur, «H2A: Hydrogen Analysis Production Case Studies,» *National Renewable Energy
3 Laboratory (NREL)*, 2013.

9

]

[H. H. M. K. A. Kampker, «Fuel cell system production cost modeling and analysis,» de 2022
4 9th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPSE 2022),
0 Kyoto, 2022.

]

[BloombergNEF, «Lithium-ion Battery Pack Prices Rise for First Time to an Average of
4 \$151/kWh,» [En línea]. Available: [https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-](https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-rise-for-first-time-to-an-average-of-151-kwh/)
1 prices-rise-for-first-time-to-an-average-of-151-kwh/. [Último acceso: junio 2023].

]

[J. N. N. & E. L. Hensen, «Production cost modeling for permanent magnet synchronous
4 machines for electric vehicles,» *Automot. Engine Technol*, 2023.

2

]

[«FuelCellWorks,» [En línea]. Available: [https://fuelcellworks.com/news/toyota-motor-](https://fuelcellworks.com/news/toyota-motor-corp-increase-production-capacity-for-fuel-cell-vehicles-tenfold/#:~:text=As%20part%20of%20its%20roll%20out%20of%20the,which%20is%2010%20times%20the%20current%20production%20capacity..)
4 corp-increase-production-capacity-for-fuel-cell-vehicles-
3 tenfold/#:~:text=As%20part%20of%20its%20roll%20out%20of%20the,which%20is%2010%
] 20times%20the%20current%20production%20capacity.. [Último acceso: 2023].

[Ministerio de Industria, Energía y Turismo, «Eficiencia energética,» [En línea]. Available:
4 [https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otr](https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros%20documentos/Factores_emision_CO2.pdf)
4 os%20documentos/Factores_emision_CO2.pdf. [Último acceso: 2023].

]

11. Anexos

Anexo I

E30 H2 Surtidor de hidrógeno

Características generales

Tipos de suministro

Turismos

H35

■ 35 MPa

◆ hasta 3,6 kg/min (60 g/s)

Protocolo de llenado SAE J2601

H70

■ 70 MPa

◆ hasta 3,6 kg/min (60 g/s)

Protocolo de llenado SAE J2601

Vehículos comerciales e industriales

H35 HF

■ 35 MPa

◆◆ hasta 7,2 kg/min (120 g/s)

Protocolo de llenado SAE J2601-2

H70 HF

■ 70 MPa

◆◆ hasta 7,2 kg/min (120 g/s)

Protocolo aprobado por fabricante de vehículo

- Diseñado para uso al aire libre
- Comunicación con vehículo por infrarrojos SAE J2799
- H2 gaseoso comprimido:
 - TS (temperatura min/max): -40 °C/+55°C
 - PS (presión max): 48,1 MPa (H35); 96,2 MPa (H70)
- Temperatura ambiente: -20 °C/+50 °C
- Alimentación eléctrica: 230 VAC/110 VAC, 50 Hz/60 Hz, 300 W
- Conforme a la Directiva de Infraestructura de Combustibles Alternativos y a la norma EN 17127

Configuración estándar

- Medidor másico Coriolis de alta precisión Emerson/Rheonik, OIML R139 (2018)
- Calculador electrónico Cetil EAS2, OIML R139 (2018):
 - Protocolo Modbus para control desde PLC de planta
 - Protocolo externo EAS1 o IFSF-LON (opcional) para dispositivo de autoservicio o autorización
 - Pantalla de alta calidad con indicación de masa (kg), precio unitario (€/kg) e importe total (€)
 - Almacenamiento de los últimos 150 suministros y 250 errores
- Chasis y soportes interiores de acero inoxidable 304:
 - Chasis con imprimación y pintura poliéster al horno
 - Columna de componentes a presión (zona ATEX) con detector de H2
 - Columna en zona segura para la electrónica
 - Barrera doble IP67 entre ambas columnas
- Conjunto manguera repostaje:
 - H35/H35 HF: dispositivo de rotura en línea, manguera 3m, boquedel H35, modelo según caudal
 - H70/H70 HF: dispositivo de rotura fijo, manguera 3m, boquedel H70, modelo según caudal
 - Purgado automático de boquedel
- Máxima seguridad:
 - Válvulas de seguridad de presión, PSV, en línea de entrada y salida, para protección de componentes de surtidor y vehículo
 - Sistema de control de suministro con válvulas neumáticas de regulación de presión, llenado y venteo de manguera
 - Transmisores de presión y temperatura de producto y de temperatura ambiente para control del llenado y gestión de fallos
 - Manómetros instalados antes y después de la válvula de regulación de presión
 - Pulsadores de inicio/paro y emergencia; opción de configuración del pulsador de inicio como hombre muerto
 - Sensor de inclinación para detección de impacto
 - Control automático de fugas
 - Filtro de 5 µm
 - Válvula de purga manual
 - Vaciado de manguera al finalizar el suministro para incrementar la seguridad y facilitar el uso

Certificados internacionales



Certificado PED emitido por SGS
Previsto para 4º trimestre 2022



Certificado OIML emitido por NMI
R139/2018-A-NL1-22-07



Expediente técnico ATEX
CDT1901ATEX202201

Opciones

- Control de hasta 3 bancos de presión con válvulas externas o internas (dentro del surtidor)
- Manguera de 5m con recogida automática
- Transmisor de presión y temperatura SIL 2 para sistema externo de gestión de seguridad
- Preenfriado de H2 con intercambiador interno; comunicación para integración con sistema de enfriado
- Servicio Modbus Plus: información ampliada de datos de repostaje
- Smart Dispenser: PC industrial para captura y análisis de datos de repostaje y emisión de informes
- Pantalla de guía de usuario integrada

Configuraciones y dimensiones

E30 H2 A ni T SX

n número de sistemas de medida; rango: 1-2

l número total de entradas de presión; rango: 1-3

Para cada sistema de medida existente en el surtidor:

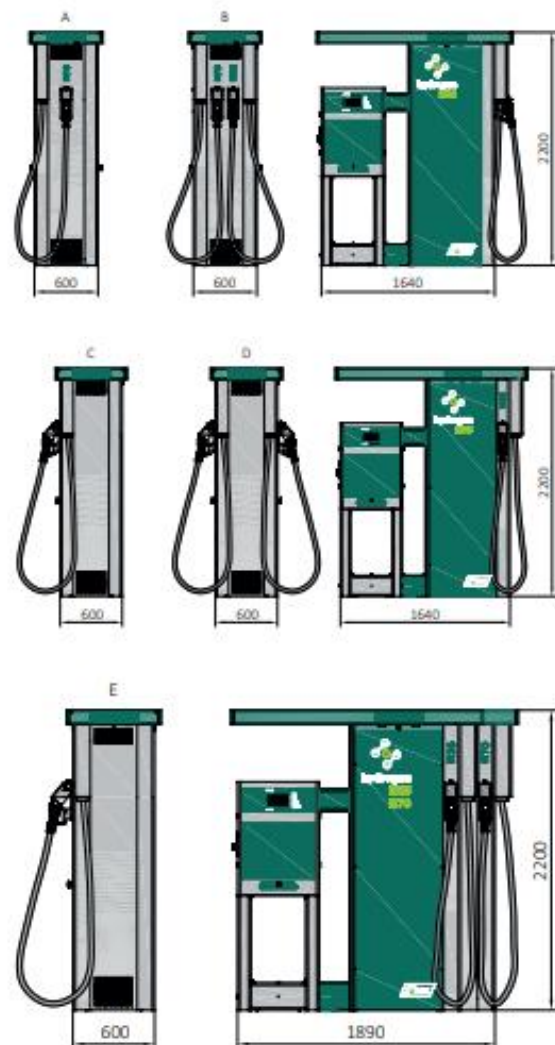
T opción de llenado: H35, H35HF, H70, H70HF (pueden coexistir dos de las opciones en el mismo sistema de medida, cuando dos mangueras comparten un mismo medidor)

S número de etapas de presión; rango: 1-3 (válvulas controladas por el surtidor, sean estas internas o externas)

X únicamente si hay un intercambiador de calor integrado

Ejemplo: **E30 H2 A 22 H35 1X H70 1X**

Configuración	Sistemas de medida	Mangueras	Lados
A	1	1	2
B	1-2	2	2
C	1	1	1
D	2	2	2
E	1	2	1



Certificados de tipo nacionales

 **FRANCIA**
Previsto para 2T 2023

 **ALEMANIA**
DE-22-M-PTB-0051

 **PAÍSES BAJOS**
T9010

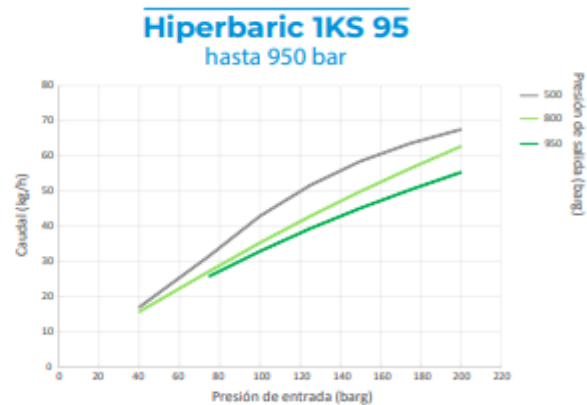
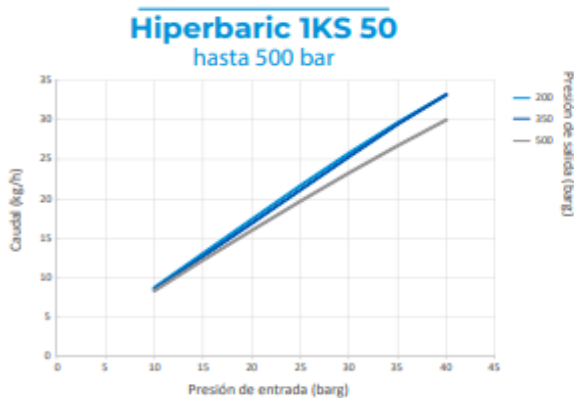
Anexo II



Características técnicas de los grupos compresores

Hiperbaric KS 50					
Modelo	Max. presión de salida (barg)	Caudal de hidrógeno (kg / h)	Caudal de hidrógeno (kg / día)	Consumo energético (kWh / kg de H ₂)	Potencia total instalada (hasta...kW)
1KS50	500	24	565	1,3	75
2KS50		32	772	1,3	105
1KS50 Pro		47	130	1,4	120
2KS50 Pro		64	1544	1,4	180

Hiperbaric KS 95					
Modelo	Max. presión de salida (barg)	Caudal de hidrógeno (kg / h)	Caudal de hidrógeno (kg / día)	Consumo energético (kWh / kg de H ₂)	Potencia total instalada (hasta...kW)
1KS95	950	10	236	4,6	75
2KS95		20	471	4,6	120
1KS50 Pro - 1KS95		32	756	2,4	110



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.

Anexo III



Aquarea High Performance All in One Compact generación H monofásica. Calefacción y refrigeración - R410A

Eficiencia energética: A+++ en calefacción a 35 °C y A en ACS / Bomba de agua con velocidad variable clase "A" / Depósito de ACS de acero inoxidable con panel de aislamiento U-Vacua™.

Flexibilidad: Tamaño 598 x 600 mm / Filtro de agua magnético incorporado.

Confort: Rango de funcionamiento hasta -20 °C.

Control: Funciones adicionales con PCB opcional (control de 2 zonas, control bivalente, contacto con la red inteligente y más).

Conectividad: Aquarea Smart y Service Cloud opcionales e integración en proyectos BMS.

		Monofásica	
Kit		KIT-ADC12HE5C-S	KIT-ADC16HE5C-S
Capacidad calorífica / COP (A +7 °C, A 35 °C)	kW / COP	12,00/4,74	16,00/4,28
Capacidad calorífica / COP (A +7 °C, A 55 °C)	kW / COP	-/-	-/-
Capacidad calorífica / COP (A +2 °C, A 35 °C)	kW / COP	11,40/3,44	13,00/3,28
Capacidad calorífica / COP (A +2 °C, A 55 °C)	kW / COP	-/-	-/-
Capacidad calorífica / COP (A -7 °C, A 35 °C)	kW / COP	-/-	-/-
Capacidad calorífica / COP (A -7 °C, A 55 °C)	kW / COP	-/-	-/-
Capacidad frigorífica / EER (A 35 °C, A 7 °C)	kW / EER	10,00/2,81	12,20/2,54
Capacidad frigorífica / EER (A 35 °C, A 18 °C)	kW / EER	-/-	-/-
Calefacción en clima templado (A 35 °C / A 55 °C)	Eficiencia energética estacional	190 / 134	190 / 130
	SCOP	4,82/3,42	4,82/3,33
Calefacción en clima cálido (A 35 °C / A 55 °C)	Eficiencia energética estacional	245 / 159	245 / 149
	SCOP	6,21/4,05	6,20/4,30
Calefacción en clima frío (A 35 °C / A 55 °C)	Eficiencia energética estacional	168 / 121	168 / 121
	SCOP	4,29/3,10	4,28/3,10
Unidad interior		WH-ADC1216H6ESC	WH-ADC1216H6ESC
Presión sonora	Calor / Frío	33/33	33/33
Dimensiones	Al x An x Pr	1640 x 598 x 600	1640 x 598 x 600
Peso neto		101	101
Conector de tubería de agua		R 1½	R 1½
Bomba clase A	Velocidades	Velocidad variable	Velocidad variable
	Consumo [min. / máx.]	-/-	-/-
Caudal de agua de calefacción (ΔT=5 K, 35 °C)	L/min	34,60	45,90
Capacidad de la resistencia integrada	kW	6,00	6,00
Fusible recomendado (REBT) ¹⁾	A	-	-
Sección mínima del cable para alimentación conjunta (REBT) ²⁾	mm²	-	-
Volumen de agua	L	185	185
Temperatura máxima del ACS	°C	65	65
Material interior del depósito		Acero inoxidable	Acero inoxidable
Perfil de carga ACS según EN16147		-	-
Eficiencia ERP del depósito ACS en clima templado / cálido / frío ³⁾	A+ a F	-/-/-	-/-/-
ERP del depósito ACS en clima templado η / COPdHW	ηwh / COPdHW	92/2,30	88/2,20
ERP del depósito ACS en clima cálido η / COPdHW	ηwh / COPdHW	107/2,67	104/2,59
ERP del depósito ACS en clima frío η / COPdHW	ηwh / COPdHW	72/1,81	70/1,74
Unidad exterior		WH-UD12HE5	WH-UD16HE5
Potencia sonora ⁴⁾	Calor	65	65
Dimensiones / Peso neto	Al x An x Pr	1340 x 900 x 320 / 101	1340 x 900 x 320 / 101
Refrigerante (R410A) / CO ₂ Eq.	kg / T	2,55/5,324	2,55/5,324
Diámetro tubería	Líquido / Gas	3/8 (15,88)	3/8 (15,88)
Rango de longitud de tubería / Desnivel de altura [int./ext.]	m / m	3 - 1/30	3 - 50/30
Longitud de tubería para gas adicional / Cantidad adicional de gas	m / g/m	1 - 90	10/50
Rango de funcionamiento - temperatura exterior	Calor	-2 - +35	-20 - +35
	Frío	+1 - +43	+16 - +43
Salida de agua	Calor / Frío	20 - 1/5 - 20	20 - 55/5 - 20

¹⁾ Escala de A+++ a D. ²⁾ El fusible y sección mínima de cable son los indicados de acuerdo con el REBT. Estos valores pueden variar en función de la longitud, tipo e instalación del cable contempladas en el REBT. La sección de cable para alimentación conjunta contempla la alimentación de una resistencia eléctrica de 3 kW 3-fase de A+ a F. ³⁾ Potencia sonora de acuerdo con 811/2013, 813/2013 y EN12102-1:2017 a +7 °C. ⁴⁾ Cálculos EER y COP realizados de acuerdo con EN 14511. ⁵⁾ Este producto se ha diseñado para ser utilizado con agua de calidad del agua 90/83/CE, modificada por la Directiva JUE 2015/1787. La vida útil del producto no está garantizada en caso del uso de agua subterránea, como agua de manantiales o pozos, el uso de agua del grifo si contiene sales u otras impurezas, o en áreas de calidad del agua ácida. Los costes de mantenimiento y garantía relacionados con estos casos son responsabilidad del cliente.

Accesorios	Accesorios
CZ-TAW1	Aquarea Smart Cloud para control remoto y mantenimiento mediante Wi-Fi inalámbrico o con cable
CZ-TAW1-CBL	Cable alargador de 10 m para CZ-TAW1
CZ-NS4P	PCB para funciones adicionales
PAW-A2W-RTWIRED	Termostato de sala LCD
PAW-A2W-RTWIREDLESS	Termostato de sala LCD sin cable

Más accesorios en las páginas 52, 54.

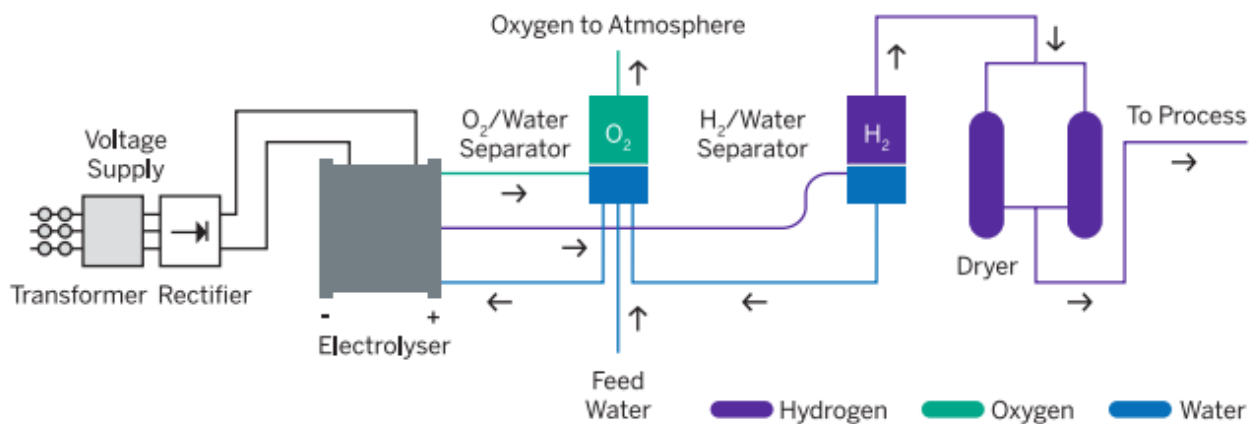


CONTROL VÍA INTERNET: Opcional. GOOD DESIGN AWARD 2017. Unidades interiores All in One y Bi-bloc generación J y H galardonadas con el prestigioso premio de diseño Good Design 2017.

Anexo IV

The Proton Exchange Membrane (PEM) Hydrogen Plant

Nel Hydrogen PEM water electrolyzers are designed to meet the specific needs of high purity industrial applications. They provide fast response times and production flexibility. These state-of-the-art units offer turnkey solutions for the growing need for reliable, cost-effective, manufacturing hydrogen supply.



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

TRANSFORMER/RECTIFIER

The transformer and rectifier convert the AC voltage supply into DC current input.

ELECTROLYSER

The electrolyser is based upon proton exchange membrane technology. Hydrogen gas is generated at the cathode at customer convenient pressures. Oxygen gas is produced at the anode at pressures close to ambient. The near infinite bubble point of the membrane prevents oxygen from entering the hydrogen stream. The full differential pressure design provides for safe, simple operation.

H₂/WATER SEPARATOR

The H₂/Water Separator removes liquid water from the high pressure hydrogen and safely recycles it back to the system water tank.

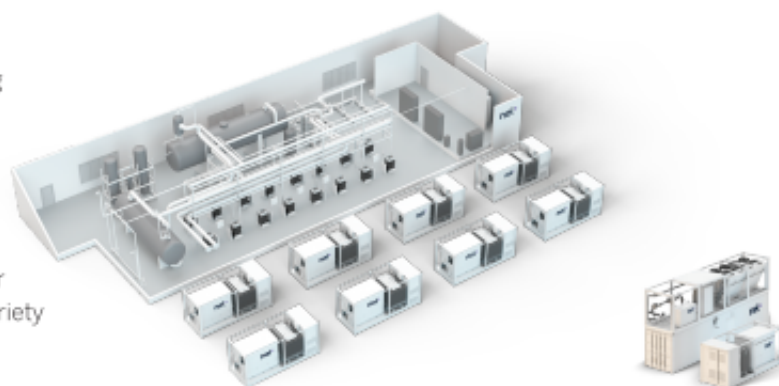
DRYER

The dryer will dry the gas to reach the suitable dew-point. It consists of multiple beds filled with a regenerative desiccant to absorb the water.

Large Scale Hydrogen Plants

Nel Hydrogen is the acknowledged expert in large scale electrolyzers. The M Series modular skid based platform enables flexible plant configuration and installation for medium to large scale hydrogen plants based on water electrolysis technology.

With minimal maintenance and siting requirements, M Series electrolyzers can produce up to 4,920 Nm³/h of hydrogen gas at 99.9995% purity on-demand. Featuring a scalable modular design that can be containerized, these systems offer solutions that are well-suited for a variety of industrial applications.



SPECIFICATIONS	MC250	MC500
Net Production Rate	246 Nm ³ /h	492 Nm ³ /h
Production Capacity Dynamic Range	10 to 100%	10 to 100%
Average Power Consumption at Stack ¹	4.5 kWh/Nm ³	4.5 kWh/Nm ³
Purity – with optional high purity dryer	99.9995%	99.9995%
O ₂ -Content in H ₂	< 1 ppm v	< 1 ppm v
H ₂ O-Content in H ₂	< 5 ppm v	< 5 ppm v
Delivery Pressure	30 barg	30 barg
Dimensions		
Process Container – W x D x H	12.2 m x 2.5 m x 3 m	12.2 m x 2.5 m x 3 m
Rectifier/Transformer Container – W x D x H	6.1 m x 2.5 m x 2.6 m	12.2 m x 2.5 m x 3 m
Ambient Temperature ²	-20 to 40°C	-20 to 40°C
Electrolyte	Proton Exchange Membrane	Proton Exchange Membrane
Feed Water Consumption	0.9 l/Nm ³	0.9 l/Nm ³

SPECIFICATIONS	M2000	M3000	M4000	M5000
Net Production Rate	1,968 Nm ³ /h	2,952 Nm ³ /h	3,936 Nm ³ /h	4,920 Nm ³ /h
Production Capacity Dynamic Range	10 to 100%	10 to 100%	10 to 100%	10 to 100%
Average Power Consumption at Stack ¹	4.5 kWh/Nm ³	4.5 kWh/Nm ³	4.5 kWh/Nm ³	4.5 kWh/Nm ³
Purity – with optional high purity dryer	99.9995%	99.9995%	99.9995%	99.9995%
O ₂ -Content in H ₂	< 1 ppm v	< 1 ppm v	< 1 ppm v	< 1 ppm v
H ₂ O-Content in H ₂	< 5 ppm v	< 5 ppm v	< 5 ppm v	< 5 ppm v
Delivery Pressure	30 barg	30 barg	30 barg	30 barg
Footprint	Dependent upon configuration	Dependent upon configuration	Dependent upon configuration	Dependent upon configuration
Ambient Temperature	10-40°C	10-40°C	10-40°C	10-40°C
Electrolyte	Proton Exchange Membrane	Proton Exchange Membrane	Proton Exchange Membrane	Proton Exchange Membrane
Feed Water Consumption	0.9 l/Nm ³	0.9 l/Nm ³	0.9 l/Nm ³	0.9 l/Nm ³

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

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

² Additional low ambient and high ambient temperature options available for MC units..

Anexo V



Introduction

Assembled with 11BB bifacial PERCium cells and gapless ribbon connection technology, these double glass modules have the capability of converting the incident light from the rear side together with the front side into electricity, providing higher output power, lower temperature coefficient, less shading loss, as well as enhanced tolerance for mechanical loading.



Higher output power



More reliable, more stable power generation



Less shading effect

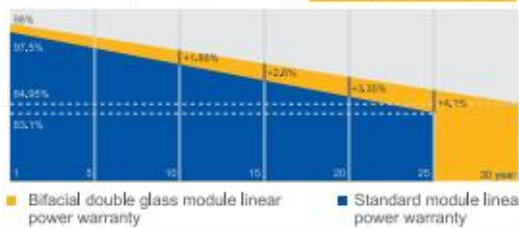


Lower temperature coefficient

Superior Warranty

- 12-year product warranty
- 30-year linear power output warranty

0.45% Annual Degradation Over 30 years



Comprehensive Certificates

- IEC 61215, IEC 61730, UL 61215, UL 61730
- ISO 9001: 2015 Quality management systems
- ISO 14001: 2015 Environmental management systems
- ISO 45001: 2018 Occupational health and safety management systems
- IEC 62941: 2019 Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Quality system for PV module manufacturing



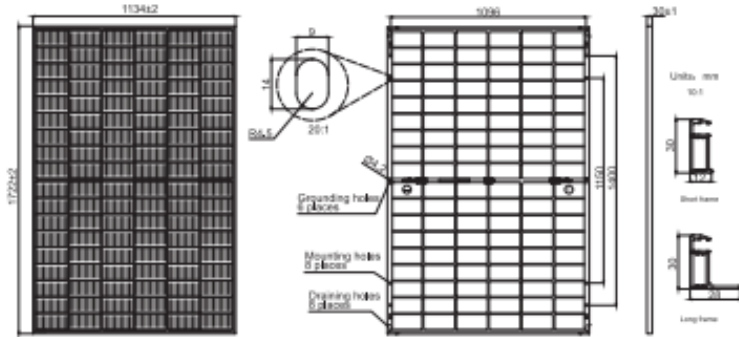
JA SOLAR

www.jasolar.com

Specifications subject to technical changes and tests. JA Solar reserves the right of final interpretation.



MECHANICAL DIAGRAMS



Remark: customized frame color and cable length available upon request

SPECIFICATIONS

Cell	Mono
Weight	21.5kg
Dimensions	1722±2mm×1134±2mm×30±1mm
Cable Cross Section Size	4mm ² (IEC), 12 AWG(UL)
No. of cells	108(6x18)
Junction Box	IP68, 3 diodes
Connector	QC 4.10-351/ MC4-EVO2A
Cable Length (Including Connector)	Portrait: 200mm(+)/300mm(-); 800mm(+)/800mm(-)(Landscape) Landscape: 1100mm(+)/1100mm(-)
Front Glass/Back Glass	1.6mm/1.6mm
Packaging Configuration	36pcs/Pallet 936pcs/40HQ Container

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC

TYPE	JAM54D30 -400/GB	JAM54D30 -405/GB	JAM54D30 -410/GB	JAM54D30 -415/GB	JAM54D30 -420/GB	JAM54D30 -425/GB
Rated Maximum Power(Pmax) [W]	400	405	410	415	420	425
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	37.07	37.23	37.32	37.45	37.58	37.72
Maximum Power Voltage(Vmp) [V]	31.01	31.21	31.45	31.61	31.80	31.98
Short Circuit Current(Isc) [A]	13.79	13.67	13.95	14.02	14.10	14.18
Maximum Power Current(Imp) [A]	12.90	12.98	13.04	13.13	13.21	13.29
Module Efficiency [%]	20.5	20.7	21.0	21.3	21.5	21.8
Power Tolerance	0→+5W					
Temperature Coefficient of Isc(α _{Isc})	+0.045%/°C					
Temperature Coefficient of Voc(β _{Voc})	-0.275%/°C					
Temperature Coefficient of Pmax(γ _{Pmp})	-0.350%/°C					
STC	Irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C, AM1.5G					

Remark: Electrical data in this catalog do not refer to a single module and they are not part of the offer. They only serve for comparison among different module types.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS WITH 10% SOLAR IRRADIATION RATIO

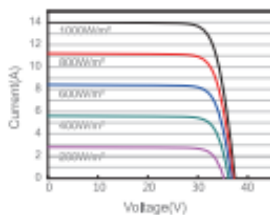
TYPE	JAM54D30 -400/GB	JAM54D30 -405/GB	JAM54D30 -410/GB	JAM54D30 -415/GB	JAM54D30 -420/GB	JAM54D30 -425/GB
Rated Max Power(Pmax) [W]	428	433	439	444	449	455
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	37.15	37.31	37.40	37.53	37.63	37.78
Max Power Voltage(Vmp) [V]	31.01	31.20	31.44	31.61	31.84	32.08
Short Circuit Current(Isc) [A]	14.76	14.84	14.93	15.00	15.10	15.18
Max Power Current(Imp) [A]	13.80	13.89	13.95	14.05	14.11	14.18
Irradiation Ratio(rear/front)	10%					
*For NexTracker installations, Maximum Static Load, Front is 2400Pa while Maximum Static Load, Back is 2400Pa. **Bifaciality=Pmax_rear/Rated Pmax_front						

OPERATING CONDITIONS

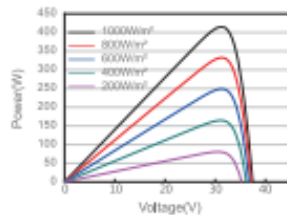
Maximum System Voltage	1500V DC
Operating Temperature	-40°C→+85°C
Maximum Series Fuse Rating	30A
Maximum Static Load,Front*	3600Pa(75 lb/ft ²)
Maximum Static Load,Back*	2400Pa(50 lb/ft ²)
NOCT	45±2°C
Bifaciality**	70%±10%
Fire Performance	UL Type 29

CHARACTERISTICS

Current-Voltage Curve JAM54D30-415/GB



Power-Voltage Curve JAM54D30-415/GB



Current-Voltage Curve JAM54D30-415/GB

