

Trabajo Fin de Grado

Vehículo de reparto Propulsado con Fuel Cell de
Hidrógeno

Delivery Vehicle Powered by Hydrogen Fuel Cell

Autor

Juan Grimal López

Director

Javier Esteban Escaño

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia

Junio 2025



**Escuela Universitaria
Politécnica** - La Almunia
Centro adscrito
Universidad Zaragoza

**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

MEMORIA

Vehículo de reparto Propulsado con Fuel Cell de
Hidrógeno

Delivery Vehicle Powered by Hydrogen Fuel Cell

424.23.12

Autor: Juan Grimal López

Director: Javier Esteban Escaño

Fecha: 1 de julio de 2025

INDICE DE CONTENIDO BREVE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	14
3. DESARROLLO	62
4. CONCLUSIONES	81
5. MEJORAS DEL SISTEMA	82
6. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	83
7. BIBLIOGRAFÍA	85

INDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. RESUMEN	1
1.1.1. Palabras clave	2
1.2. ABSTRACT	3
1.2.1. Key Words	4
1.3. INTRODUCCIÓN AL PROYECTO	5
1.3.1. Contexto y Motivación	5
1.4. OBJETIVOS DEL PROYECTO	6
1.5. ANTECEDENTES	7
1.5.1. Vehículos disponibles en el mercado	7
1.5.1.1. Scoobic Light	7
1.5.1.2. Toyota Mirai	8
1.5.1.3. Hyundai Nexa	9
1.5.2. Prototipos	11
1.5.2.1. MIT Electric Vehicle Team	11
1.5.2.2. Hydrocycle	12
2. MARCO TEÓRICO	14
2.1. HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE	14
2.1.1. Métodos de obtención del hidrógeno	15
2.1.1.1. Reformado de hidrocarburos	16

2.1.1.2. Electrólisis del agua	17
2.1.1.3. Gasificación de biomasa	18
2.1.1.4. Pirólisis del Metano	20
2.1.1.5. Métodos biológicos	21
2.1.2. Clasificación del hidrógeno según su origen	22
2.1.3. Formas de uso del hidrógeno como combustible	23
2.1.3.1. Aplicaciones en celdas de combustible	23
2.1.3.2. Hidrógeno en motores de combustión interna	24
2.1.4. Almacenamiento y distribución del hidrógeno	24
2.1.4.1. Almacenamiento en estado gaseoso	25
2.1.4.2. Almacenamiento en estado líquido	26
2.1.4.3. Almacenamiento en hidruros metálicos y sólidos	26
2.1.4.4. Distribución del hidrógeno	27
2.1.4.5. Aplicaciones reales en Aragón: Proyectos de la Fundación del Hidrógeno	27
2.2. CELDAS DE COMBUSTIBLE (FUEL CELL)	28
2.2.1. Reacción electroquímica	28
2.2.1.1. Relación entre potencia y eficiencia	29
2.2.2. Tipos de celdas de combustible y su comparación	31
2.2.2.1. PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	32
2.2.2.2. SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)	33
2.2.2.3. PAFC, AFC y otras tecnologías	33
2.2.3. Elección de la Fuel Cell	34
2.2.3.1. Análisis y justificación de la elección	35
2.3. BATERÍAS ELÉCTRICAS	36
2.3.1. Principio de funcionamiento	36
2.3.2. Tipos de tecnologías de Baterías eléctricas	38
2.3.3. Cálculo energético	38
2.3.4. Tecnologías emergentes	40
2.4. INVERSORES Y CONVERTIDORES DC-DC EN SISTEMAS HÍBRIDOS	42
2.4.1. Función del convertidor DC-DC en la arquitectura	42
2.4.2. Fundamentos eléctricos	43
2.4.3. Criterio de selección del convertidor	44
2.5. MOTORES ELÉCTRICOS	44
2.5.1. Tipos de motores eléctricos y su aplicación	45
2.5.1.1. Motores de corriente continua (DC)	45
2.5.1.2. Motores síncronos e inducidos (AC)	46
2.5.1.3. Motores de imanes permanentes	47
2.5.2. Motor seleccionado para el diseño	49
2.6. SISTEMA DE CONTROL	51

2.6.1. Controladora de la Fuel Cell	52
2.6.2. Controladora de motores eléctricos	53
2.6.2.1. Principales funciones	54
2.6.3. Configuración de la controladora	54
2.6.3.1. Limitación de velocidad y perfil de Par	55
2.6.3.2. Control de arranque y aceleración progresiva	56
2.6.3.3. Distribución de par y control Dual	56
2.6.3.4. Protección y Seguridad	56
2.6.3.5. Comparativa	57
2.6.3.6. Configuración de la controladora	58
2.6.3.6.1. Sincronización entre controladoras	59
2.7. CONCLUSIÓN DEL MARCO TEÓRICO	60
2.7.1. Síntesis de los elementos clave del sistema	60
2.7.2. Relevancia del diseño híbrido para la movilidad sostenible	61
3. DESARROLLO	62
3.1. POTENCIA Y CONSUMO DEL SISTEMA	63
3.1.1. Potencia eléctrica de la Fuel Cell	63
3.1.1.1. Parámetros de la Fuel Cell	63
3.1.1.2. Consumo de los sistemas auxiliares	63
3.1.1.3. Eficiencia energética de la Fuel Cell	64
3.1.1.4. Energía útil del sistema de almacenamiento de hidrógeno	66
3.1.1.5. Ultracondensador	66
3.1.2. Motores eléctricos (2x QS273 V4 8000W)	68
3.1.2.1. Características del motor	68
3.1.2.2. Configuración del sistema de tracción	68
3.1.2.3. Estimación del consumo del sistema de tracción	69
3.1.2.4. Pérdidas eléctricas adicionales	70
3.1.2.5. Cálculo del Par motor a velocidad limitada	70
3.1.3. Convertidor DC-DC Boost (Epic Power)	71
3.1.3.1. Selección del DCDC	71
3.1.3.2. Cálculos eléctricos de operación	72
3.1.3.3. Perdidas térmicas y disipación	73
3.1.4. Controladoras Sabvoton SVMC72150	73
3.1.4.1. Cálculos eléctricos	74
3.1.4.2. Perdidas en la controladora	74
3.1.4.3. Consumo auxiliar de cada controladora	74
3.1.5. Batería	75
3.1.5.1. Cálculos eléctricos	76
3.1.5.1.1. Extensión de autonomía mediante el sistema híbrido	76

3.2. INTEGRACIÓN MECÁNICA DEL SISTEMA HÍBRIDO	78
4. CONCLUSIONES	81
5. MEJORAS DEL SISTEMA	82
6. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	83
6.1. ODS 7. ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE	83
6.2. ODS 9. INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA	83
6.3. ODS 11. CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES	83
7. BIBLIOGRAFÍA	85

INDICE DE ILUSTRACIONES

Scoobic Light (Scoobic, 2025)	7
Toyota Mirai ((Toyota, 2025a)).....	9
Hyundai ix35 Fuel Cell(Autopista.es, 2025)	9
Stack WaetaS (Hemmerle, 2024)	13
Concepto de la Hydrocilce (Hemmerle, 2024)	13
Diagrama de bloques del Marco Teórico	14
Métodos de producción de hidrógeno y sus colores (Centro de Investigación En Almacenamiento de Energía, 2025)	15
Reformado de Metano con vapor (Parra Palacios, n.d.)	17
Tipos de electrolizadores para producción de hidrógeno (IRENA, 2020)	18
Gasificación de la Biomasa (SBS, 2024)	19
Pirólisis del Metano (Monolith, 2025)	20
Fuel Cell Toyota (Toyota, 2025a)	23
Motor de combustión de hidrógeno de MAN para aplicaciones agrícolas (Pereyra, 2024).....	24
Clasificación de los métodos de almacenamiento de hidrógeno (Pérez, 2022) ...	25
Botellas de 200 bar de fibra de carbono de la empresa CARBOTAINER (CARBOTAINER, 2025)	26
Tanque de almacenamiento de LH2 de forma esférica (Pérez, 2022)	26
Distintas formas de almacenar hidrógeno en metales (Pérez, 2022)	27
Diagrama general de una celda de combustible alimentada por hidrógeno (San Martín et al., 2009)	28
Curva tensión/corriente del Stack (San Martín et al., 2009)	30
Eficiencia, potencia y caudal de hidrógeno del módulo de pila de combustible (San Martín et al., 2009)	30
Tecnologías de pilas de combustible (San Martín et al., 2009)	31
ejemplo de montaje de la FC H-1000XP de Horizon Technologies (Horizon Fuel Cell Technologies, 2024)	36

Funcionamiento de una batería (Mártil, 2019)	37
Rendimiento de descarga de una batería según diferentes condiciones (PKenergy, 2025)	40
Esquema básico de un convertidor boost (Wikipedia, 2025)	42
Formas de onda de corriente y voltaje en el convertidor boost (Wikipedia, 2025)	42
Convertidor Boost en el Toyota Mirai (Hydrogen Vehicles: Analysis for the Automotive Industry, 2025)	43
Funcionamiento del motor de escobillas DC (https://www.areatecnologia.com , 2025)	45
Funcionamiento de un motor síncrono (Alejandro Borja Block, 2025)	46
Funcionamiento del motor asíncrono (López, 2025)	46
Funcionamiento de un motor de imanes permanentes (Aux Millan, 2024)	47
Funcionamiento y control de un motor Brushless (Electronoobs, 2025)	48
Motor QS 273 8000W V4 72V (QS Motor, 2024)	49
Informe de prueba (QS Motor, 2024)	50
Panel de curvas de control de la FC Horizon H-1000XP (Horizon Educational, 2025)	53
Controladora VESC HD75 (VESC, 2025)	55
Controladora Kelly KLS7212S (Kelly Controller, 2025)	55
Controladora Sabvoton SVMC72150 (Sabvoton, 2025)	55
Interfaz del Software para PC (Sabvoton, 2025)	58
Controladoras emparejadas mediante la misma señal de acelerador	59
Diagrama simple del sistema Híbrido	61
Convertidor personalizable de Epic Power (Convertidores DCDC - Epic Power Converters, 2025)	72
Montaje de baterías en paralelo	75
Montaje de baterías en serie	76
Diseño base.(Meunier, 2023)	78
Situación de componentes	78



Situación de componentes en la zona de hidrógeno, vista de la toma de aire bajo el vehículo	79
Diseño final basado en el diseño de Scoobic	80

INDICE DE TABLAS

Ventajas y desventajas de la obtención de hidrógeno por procesos biológicos	22
Clasificación del Hidrógeno según su origen	22
Comportamiento estimado de la IE SOAR 2.4kW	29
Comparativa entre las diferentes tecnologías de Fuel Cell	31
Comparativa de posibles Fuel Cells para el sistema (1).....	34
Comparativa de posibles Fuel Cells para el sistema (2).....	35
Parámetros técnicos clave en el diseño de sistemas de batería	37
Comparativa de tecnologías de baterías recargables (Dixon, 2010a; González Carrera, 2018; López Sánchez, 2019)	38
Nuevas tecnologías de baterías	40
Requisitos del Convertidor para el sistema.....	44
Comparación de eficiencia y potencia según el tipo de motor	48
Parámetros QS 273 8000W V4 72V.....	49
Comparativa de controladoras para el Motor	57
Parámetros H-1000XP (Horizon Fuel Cell Technologies, 2013).....	63
Consumos de los subsistemas de la Fuel Cell (Horizon Fuel Cell Technologies, 2013)	64
Consumo estimado de H ₂ según carga	66
Parámetros generales del motor	68
Parámetros del convertidor charger de Epic Power	72
Parámetros de la controladora Sabvoton	73
Características eléctricas del sistema de baterías.....	75

INDICE DE ECUACIONES

1 Eficiencia eléctrica de la Fuel Cell	29
2 Capacidad energética de una batería	36
3 Corriente máxima de descarga de la batería	39
4 Autonomía estimada de la batería	39
5 Energía útil por ciclo de la batería	39
6 Energía total durante la vida útil de la batería	39
7 Relación entre tensiones de un convertidor boost (ideal)	43
8 Potencia de salida esperada en el convertidor	43
9 Corriente de entrada estimada en el convertidor	43
10 Tensión de alimentación de un motor DC	45
11 Par de un motor DC	45
12 Frecuencia mecánica de un motor síncrono	47
13 Potencia de un motor Brushless	48
14 Rendimiento de la Fuel Cell	65
15 Poder Calorífico Inferior del H_2	65
16 Potencia térmica de la Fuel Cell	65
17 Energía total almacenada	66
18 Energía eléctrica útil almacenada	66
19 Energía almacenada en el Condensador	66
20 Tiempo de descarga del supercondensador	67
21 Corriente de descarga del supercondensador	67
22 Potencia eléctrica de los motores según su eficiencia	69
23 Corriente real de los motores absorbida por el sistema eléctrico	69
24 Resistencia eléctrica de los cables del motor	70
25 Pérdidas eléctricas en los cables del motor	70
26 Resistencia térmica del disipador	73



1. INTRODUCCIÓN

1.1. RESUMEN

La transición hacia una movilidad sostenible ha impulsado el desarrollo de soluciones de transporte más eficientes energéticamente. Entre ellas, los Vehículos Eléctricos de Rango Extendido (EREV) han surgido como una alternativa para ampliar la autonomía operativa de los vehículos eléctricos mediante la hibridación. Tradicionalmente, los EREV logran esta extensión de autonomía incorporando un motor térmico de combustión interna que actúa como generador de energía (Laczkowski et al., 2025). Sin embargo, con el objetivo de lograr una hibridación completamente verde, este proyecto propone el uso de una pila de combustible de hidrógeno como fuente de energía auxiliar en lugar de un motor térmico basado en combustibles fósiles.

Este Trabajo de Fin de Grado se centra en el diseño mecánico y la hibridación de un vehículo de reparto de tres ruedas, impulsado por un sistema de pila de combustible y batería. La pila de combustible recarga continuamente la batería, la cual suministra energía a dos motores eléctricos y a los sistemas auxiliares del vehículo (luces, claxon, electrónica de control, etc.). Para garantizar un suministro energético eficiente, se empleará un inversor que funcionará como cargador de la batería, y se evaluará la necesidad de incorporar una segunda batería para optimizar la gestión energética y la autonomía.

El objetivo principal de este estudio es analizar y diseñar un EREV hibridado con hidrógeno, destinado a aplicaciones de reparto urbano, proporcionando una alternativa eficiente y libre de emisiones. El trabajo abordará la selección de componentes, las estrategias de gestión energética y la integración estructural del sistema híbrido en el chasis del triciclo. Además, se realizará un análisis comparativo para evaluar las ventajas y los desafíos de esta tecnología en el contexto de la logística urbana.

Los vehículos eléctricos de pila de combustible de hidrógeno (FCEV) generan electricidad mediante la conversión electroquímica del hidrógeno y el oxígeno, permitiendo el funcionamiento de un motor eléctrico sin producir emisiones contaminantes (J. M. L. Martínez et al., 2022). Para garantizar que este proceso sea verdaderamente sostenible, se plantea el uso de hidrógeno verde, producido mediante electrólisis del agua utilizando fuentes de energía renovables, eliminando así cualquier dependencia de combustibles fósiles (FHa, 2024).

Esta investigación se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, promoviendo:

- ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) – Fomentando el uso del hidrógeno como fuente de energía limpia y sostenible.
- ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura) – Impulsando el desarrollo de tecnologías limpias en el sector del transporte urbano.
- ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) – Reduciendo el impacto ambiental del transporte urbano mediante soluciones basadas en hidrógeno.

A través de este estudio, se busca demostrar la viabilidad de la hibridación con hidrógeno en vehículos eléctricos de reparto, contribuyendo al desarrollo de soluciones de movilidad sostenibles y a la transición hacia un transporte libre de emisiones.

1.1.1. Palabras clave

1. Hidrógeno
2. Pila de Combustible
3. Vehículo eléctrico de rango extendido (EREV)
4. Logística urbana sostenible
5. Emisiones cero

1.2. ABSTRACT

The transition towards sustainable mobility has led to the development of more energy-efficient transportation solutions. Among these, Extended-Range Electric Vehicles (EREV) have emerged as an alternative to extend the operational range of electric vehicles through hybridization. Traditionally, EREVs achieve this by incorporating an internal combustion engine that acts as a power generator (Laczkowski et al., 2025). However, to achieve a fully green hybridization, this project proposes the use of a hydrogen fuel cell as the auxiliary power source instead of a fossil-fuel-based thermal engine.

This Final Degree Project focuses on the mechanical design and hybridization of a three-wheeled delivery vehicle, powered by a fuel cell and battery system. The fuel cell continuously recharges the battery, which in turn supplies energy to two electric motors and the auxiliary systems of the vehicle (lights, horn, control electronics, etc.). To ensure an efficient energy supply, an inverter will be used as a charger for the battery, and the need for a secondary battery will be evaluated to optimize energy management and autonomy.

The main objective of this study is to analyse and design a hydrogen-hybridized EREV, intended for urban delivery applications, providing an efficient and zero-emission alternative. The project will address component selection, energy management strategies, and the structural integration of the hybrid powertrain into the three-wheeled vehicle chassis. Additionally, a comparative analysis will be conducted to evaluate the advantages and challenges of this technology in the context of urban logistics.

Hydrogen fuel cell electric vehicles (FCEVs) generate electricity through the electrochemical conversion of hydrogen and oxygen, allowing an electric motor to operate without producing pollutant emissions (J. M. L. Martínez et al., 2022). To ensure that this process is truly sustainable, the use of green hydrogen is proposed, which is produced via water electrolysis using renewable energy sources, thus eliminating dependence on fossil fuels (FHa, 2024).

This research aligns with the United Nations' Sustainable Development Goals (SDGs) by promoting:

- SDG 7 (Affordable and Clean Energy) – Encouraging the use of hydrogen as a clean and sustainable energy source.
- SDG 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure) – Advancing clean energy technologies in urban transportation.
- SDG 11 (Sustainable Cities and Communities) – Reducing urban pollution by replacing fossil fuels with hydrogen-based mobility solutions.

By exploring the feasibility of hydrogen-based hybridization in electric delivery vehicles, this project aims to contribute to the development of sustainable mobility solutions, bridging the gap between conventional electric vehicles and extended-range operation without environmental compromise.

1.2.1. Key Words

1. Hydrogen
2. Fuel Cell
3. Extended Range Electric Vehicle (EREV)
4. Sustainable urban logistics
5. Zero Emissions

1.3. INTRODUCCIÓN AL PROYECTO

1.3.1. Contexto y Motivación

El sector logístico es uno de los principales emisores de gases efecto invernadero a nivel global (Parlamento Europeo, 2024) y también a nivel nacional (BdE, 2024). Estamos en un momento en el que nos preocupa cada vez más el cambio climático y la contaminación urbana aumenta. La búsqueda de alternativas sostenibles se ha convertido en una prioridad.

Entre todas las alternativas ha tomado una gran relevancia la movilidad eléctrica. Esto es debido al impacto directo que tiene para reducir las emisiones locales (EEA, 2022). Sin embargo, los vehículos eléctricos presentan ciertas limitaciones como la autonomía reducida, los tiempos de carga prolongados o la necesidad de aumentar la producción de energía (Chan, 2002).

En el ámbito de la última milla, el vehículo eléctrico ha surgido como una solución viable en entornos urbanos. No obstante, su operatividad sigue dependiendo de infraestructuras de recarga y de una adecuada planificación de rutas para evitar interrupciones en el servicio (Huang et al., 2021).

Para superar estas barreras, la integración del hidrógeno como vector energético representa una alternativa innovadora que permite extender la autonomía de los vehículos eléctricos sin comprometer su sostenibilidad (Dincer & Acar, 2015).

El hidrógeno es un portador de energía con alto potencial para complementar la electrificación del transporte, especialmente cuando se produce a partir de fuentes renovables (hidrógeno verde) (Mazloomi & Gomes, 2012). Su uso en celdas de combustible permite generar electricidad de manera eficiente y sin emisiones contaminantes, proporcionando una fuente de energía adicional para los sistemas eléctricos de propulsión (Rahman et al., 2016).

Este proyecto se enmarca en esta tendencia y busca explorar la viabilidad de un vehículo de reparto híbrido con hidrógeno, combinando una pila de combustible con una batería eléctrica para mejorar la eficiencia y autonomía del sistema.

1.4. OBJETIVOS DEL PROYECTO

Este trabajo tiene como objetivo principal el diseño conceptual de un vehículo de reparto híbrido con hidrógeno, analizando los componentes clave necesarios para su funcionamiento. Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar la viabilidad de la hibridación de un vehículo eléctrico de reparto mediante el uso de una pila de combustible de hidrógeno como extensor de autonomía.
- Seleccionar y dimensionar los componentes clave del sistema, incluyendo la pila de combustible, la batería, el inversor DC-DC, los motores eléctricos y el sistema de almacenamiento de hidrógeno.
- Comparar las tecnologías disponibles en el mercado para cada uno de los componentes, identificando las opciones más adecuadas en términos de eficiencia, costo y aplicabilidad en entornos urbanos (Barbir, 2005).
- Analizar el impacto energético y medioambiental del sistema híbrido en comparación con un vehículo eléctrico convencional (Bossel, 2006).
- Plantear una arquitectura de control y gestión energética para optimizar el rendimiento del sistema híbrido.

1.5. ANTECEDENTES

Como introducción, se presentan varios casos en los que vemos unos modelos comercializados y otros que merecen la pena hablar de ellos, aunque sean prototipos, ya sea porque tienen una tecnología parecida a la que se quiere implementar o, en el caso del BMW, es una marca reputada que ha optado por abrir una línea de investigación en el sector del hidrógeno.

Aunque en el fondo sean casos parecidos, cada uno tiene su propia tecnología o ha desarrollado una Fuel Cell propia para su producto. De esta forma, se han dividido los casos en los que ya hay un producto desarrollado y en funcionamiento y otros que están en fase de investigación.

1.5.1. Vehículos disponibles en el mercado

1.5.1.1. Scoobic Light

No es un vehículo que funcione con hidrógeno, pero se ha añadido porque su estructura es muy parecida a la diseñada para el proyecto. La idea para desarrollar el sistema de hibridación que se quiere implementar parte de ver estos curiosos vehículos de reparto por las calles de Zaragoza.

Scoobic es una empresa española que ofrece una solución a la polución del aire en las ciudades con un producto centrado en la logística de última milla (*The Last Mile Solution*).



Ilustración 1 Scoobic Light (Scoobic, 2025)

Trata de un vehículo de tres ruedas totalmente eléctrico con las siguientes características:

- Autonomía: hasta 92km.
- Velocidad máxima: 45km/h.
- Volumen de carga: 1400L
- Capacidad de carga: 250kg
- Medidas (m): 2,92x1,85x0,98.
- Tiempo de carga: 2,5-3h.
- Potencia de Motor: 3,7 kW
- Voltaje y potencia: 72V – 7 kW/h
- batería tipo LiFePO4

Tiene más modelos comercializados, pero solo me interesa este modelo para la realización del proyecto.

1.5.1.2. Toyota Mirai

El Toyota Mirai constituye uno de los referentes en la aplicación de la tecnología de pila de combustible de hidrógeno en el sector de la automoción. A través de un sistema cuidadosamente diseñado, combina la generación de energía limpia con el almacenamiento eléctrico para lograr una movilidad sostenible y eficiente (Toyota, 2025b, 2025a). A continuación, se describe el principio de funcionamiento de su sistema de propulsión:

- La pila de combustible (Fuel Cell PEM) genera electricidad a partir de la reacción electroquímica entre el hidrógeno almacenado a alta presión y el oxígeno atmosférico, liberando como único subproducto vapor de agua.
- La electricidad producida no alimenta directamente al motor eléctrico; en su lugar, es gestionada a través de una batería de iones de litio que actúa como acumulador de energía.
- Esta batería almacena el excedente de energía producido por la pila y la energía recuperada durante los procesos de frenada regenerativa.
- Durante condiciones de baja demanda de energía, la electricidad puede fluir directamente de la pila al motor; en situaciones de alta demanda (como aceleraciones o pendientes), la batería proporciona potencia adicional.
- El sistema está diseñado para mantener la pila de combustible operando en un rango de carga óptimo, mejorando su eficiencia y vida útil.

Este enfoque permite al Toyota Mirai alcanzar autonomías de hasta 650 kilómetros, combinando tiempos de repostaje rápidos y cero emisiones contaminantes locales (Toyota España, 2025).

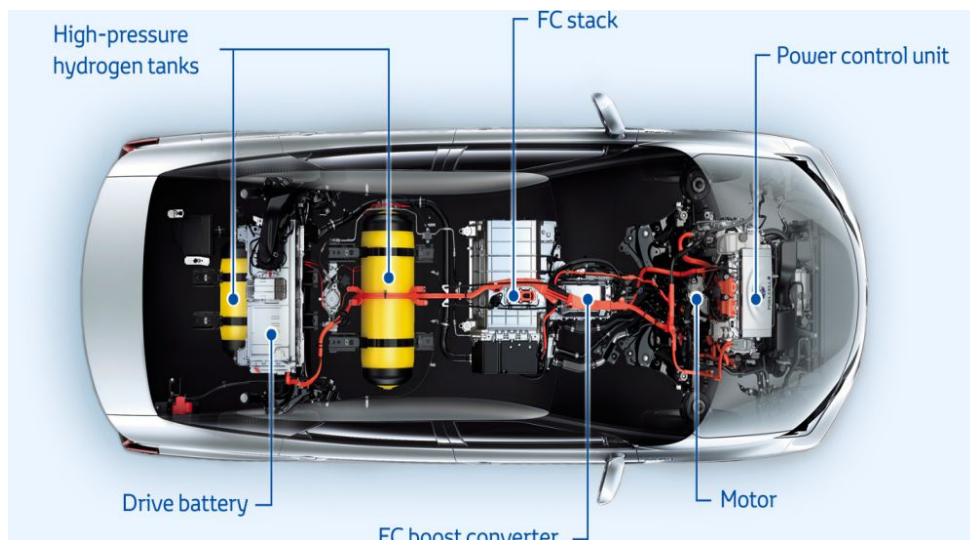


Ilustración 2 Toyota Mirai ((Toyota, 2025a))

1.5.1.3. Hyundai Nexo

El Hyundai Nexo es un SUV eléctrico de pila de combustible de hidrógeno (FCEV) que representa la segunda generación de vehículos de hidrógeno desarrollados por Hyundai, tras el ix35 Fuel Cell. Este modelo incorpora una pila de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM), que genera electricidad a partir de la reacción electroquímica entre el hidrógeno almacenado en tres depósitos de alta presión (700 bar) y el oxígeno del aire, emitiendo únicamente vapor de agua (Hyundai, 2025).

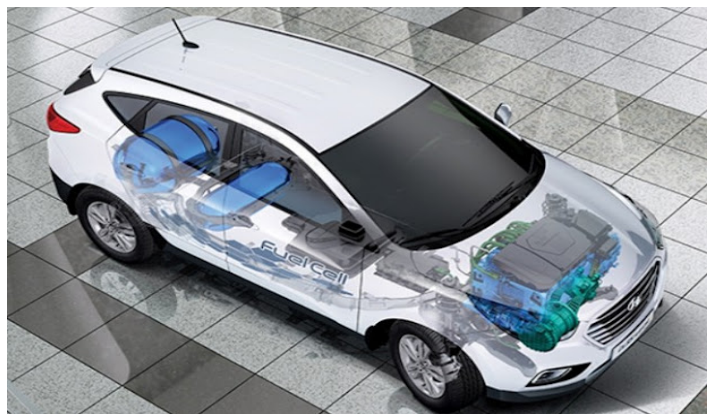


Ilustración 3 Hyundai ix35 Fuel Cell(Autopista.es, 2025)

El sistema de propulsión del Nexo se basa en un esquema híbrido que combina la pila de combustible con una batería de iones de litio de 1,56 kWh. Esta batería almacena la energía recuperada durante la frenada regenerativa y proporciona potencia adicional al motor eléctrico en situaciones de alta demanda, como aceleraciones o pendientes pronunciadas. La electricidad generada por la pila de combustible se utiliza para alimentar un motor eléctrico síncrono de imanes permanentes que entrega una potencia

de 120 kW (163 CV) y un par máximo de 395 Nm, permitiendo una aceleración de 0 a 100 km/h en 9,5 segundos y una velocidad máxima de 179 km/h (Hyundai, 2025).

El Hyundai Nexu ofrece una autonomía de hasta 666 kilómetros según el ciclo WLTP, con un consumo medio de hidrógeno de aproximadamente 0,95 kg/100 km. El repostaje de hidrógeno se realiza en menos de cinco minutos, equiparando en rapidez a los vehículos de combustión interna.

No obstante, el Hyundai Nexu enfrenta desafíos significativos para su adopción masiva, como el elevado costo de producción asociado a la tecnología de pila de combustible y la limitada infraestructura de estaciones de repostaje de hidrógeno, especialmente en regiones como España (Juan Carlos López, 2025).

1.5.2. Prototipos

1.5.2.1. MIT Electric Vehicle Team

El equipo Electric Vehicle Team (EVT) del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) ha desarrollado "Toothless", una motocicleta eléctrica propulsada por hidrógeno. Este proyecto tiene como objetivo explorar y validar la viabilidad de las pilas de combustible de hidrógeno en vehículos ligeros, promoviendo una movilidad sostenible y eficiente.



Referencia 1 Prototipo moto hidrógeno del MIT EVT (EVT, 2023)

Características Técnicas Principales:

- Chasis Base: Adaptación de una Ducati 900SS de 1999, modificada para integrar el sistema de propulsión por hidrógeno.
- Sistema de Propulsión:
 - Pila de Combustible: Tipo PEM (Proton Exchange Membrane) suministrada por Doosan, que convierte, a través de un proceso químico, el hidrógeno en electricidad.
 - Motor Eléctrico: Síncrono de imanes permanentes, alimentado por la electricidad generada por la pila de combustible y la batería.
 - Batería de Iones de Litio: Actúa como buffer energético:
 - Recibe la electricidad de la pila de combustible cuando no toda se usa al momento.
 - Entrega energía rápidamente cuando el conductor necesita más potencia de la que la pila puede generar instantáneamente.

- Gestiona también la energía recuperada durante la frenada regenerativa.
- Almacenamiento de Hidrógeno: Cilindro de gas a alta presión ubicado bajo el asiento trasero.
- Sistema de Gestión Energética: Controlador de potencia que regula la distribución de energía entre la pila de combustible, la batería y el motor eléctrico.

Funcionamiento del Sistema

La pila de combustible genera electricidad mediante la reacción electroquímica entre el hidrógeno almacenado y el oxígeno del aire, produciendo únicamente vapor de agua como subproducto. Esta electricidad alimenta directamente al motor eléctrico y carga la batería de iones de litio. La batería proporciona energía adicional durante las demandas de alta potencia, como aceleraciones o pendientes pronunciadas. Además, el sistema incorpora frenada regenerativa, recuperando energía cinética durante la desaceleración y almacenándola en la batería.

Debido a que es un proyecto *Open Source*, se puede obtener toda la información relacionada con el prototipo de la moto realizada por el *MIT Electric Vehicle Team* en el repositorio que ellos mismos tienen en la web.(EVT, 2023).

1.5.2.2. Hydrocycle

El proyecto Hydrocycle tiene como objetivo el desarrollo de una motocicleta eléctrica propulsada por hidrógeno, concebida como una alternativa sostenible a los vehículos urbanos ligeros convencionales. Impulsado por un consorcio germano-checo liderado por el Fraunhofer IWU, el proyecto busca construir un prototipo completamente funcional antes de finalizar el año 2025, cumpliendo con los estándares de homologación de la Unión Europea (Hemmerle, 2024).

Características técnicas y funcionalidad

- Sistema de pila de combustible: se utilizará una pila PEM desarrollada por *WätaS Wärmetauscher Sachsen GmbH*, especialmente diseñada para aplicaciones compactas como motocicletas.

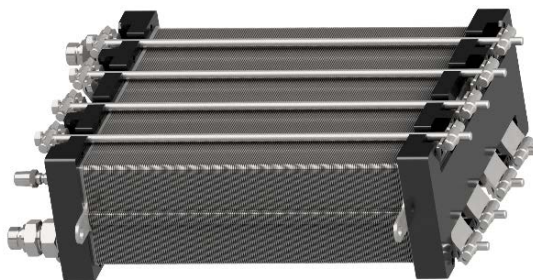


Ilustración 4 Stack WaetaS (Hemmerle, 2024)

- Diseño compacto: uno de los principales desafíos es la integración del sistema de pila de combustible dentro del limitado espacio estructural de una motocicleta, manteniendo la ergonomía y funcionalidad del vehículo.
- Almacenamiento de hidrógeno: se contempla la incorporación de un depósito a presión optimizado para vehículos ligeros. Se estima que 1 kg de hidrógeno proporciona una autonomía aproximada de 100 km, similar a la eficiencia observada en automóviles.
- Aplicación urbana: el vehículo está orientado principalmente a entornos urbanos, siendo una solución ideal para servicios de reparto y logística de última milla, gracias a su agilidad, bajas emisiones sonoras y tiempo de repostaje reducido frente a soluciones 100% eléctricas.

Distribución de tareas y colaboración internacional

- Socios checos: se encargan del diseño del vehículo, incluyendo el bastidor, la ergonomía y la integración del sistema completo.
- Socios alemanes: lideran el desarrollo del tren motriz y la tecnología de la pila. *Fraunhofer IWU*, además, coordina la ingeniería de producción y la optimización del sistema energético.



Ilustración 5 Concepto de la Hydrocilce (Hemmerle, 2024)

2. MARCO TEÓRICO

En este punto, se estudia desde un enfoque teórico, los componentes que integran la moto de reparto hibridada con hidrógeno. De esta forma, se logran los conocimientos que se precisan favoreciendo un diseño eficiente y estructurado.



Ilustración 6 Diagrama de bloques del Marco Teórico

2.1. HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE

El hidrógeno se ha consolidado en los últimos años como un vector energético estratégico para alcanzar los objetivos de descarbonización y neutralidad climática, especialmente en sectores difíciles de electrificar como el transporte pesado, la industria o la logística urbana. Su uso como combustible se basa en su alta densidad energética en masa, su capacidad para producir electricidad sin emisiones contaminantes cuando se emplea en pilas de combustible, y su potencial para integrarse con energías renovables como la solar o la eólica (MITECO, 2020).

En España, el interés institucional por el hidrógeno se ha traducido en documentos como la Hoja de Ruta del Hidrógeno, publicada por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, que establece un marco de desarrollo hasta 2030 para su producción, almacenamiento y uso, especialmente en la movilidad y el transporte público (MITECO, 2020). Paralelamente, comunidades como Aragón han impulsado proyectos demostrativos a través de entidades como la Fundación para el Desarrollo de

Nuevas Tecnologías del Hidrógeno, que lidera iniciativas de integración del hidrógeno verde en flotas de transporte público y distribución urbana (FHa, 2025b).

Desde el ámbito académico, estudios recientes como el de (Martínez López, 2024) demuestran la viabilidad técnica y económica del hidrógeno como fuente de energía para el transporte por carretera. Dicho trabajo analiza no solo la eficiencia y las emisiones, sino también la infraestructura necesaria para su despliegue a escala regional, en línea con las prioridades marcadas por los planes estratégicos nacionales y europeos.

En este contexto, el presente trabajo se centra en el diseño teórico de un vehículo de reparto híbrido eléctrico-hidrógeno, en el que una pila de combustible alimentada con hidrógeno verde actúa como extensor de autonomía de un sistema eléctrico base. El objetivo es contribuir al estudio y viabilidad de nuevas soluciones de movilidad sostenible en entornos urbanos, aplicando tecnologías limpias y realistas desde el punto de vista energético y económico.

2.1.1. Métodos de obtención del hidrógeno

El hidrógeno no se encuentra en estado libre en la naturaleza, por lo que debe producirse a partir de compuestos que lo contienen, como el agua o los hidrocarburos. Los métodos de obtención más empleados se agrupan en dos grandes categorías: termoquímicos, como el reformado de hidrocarburos, y electroquímicos, como la electrólisis del agua. La elección del método depende de factores como el coste, la disponibilidad de recursos, la finalidad del hidrógeno y, especialmente, el impacto ambiental del proceso (MITECO, 2020).

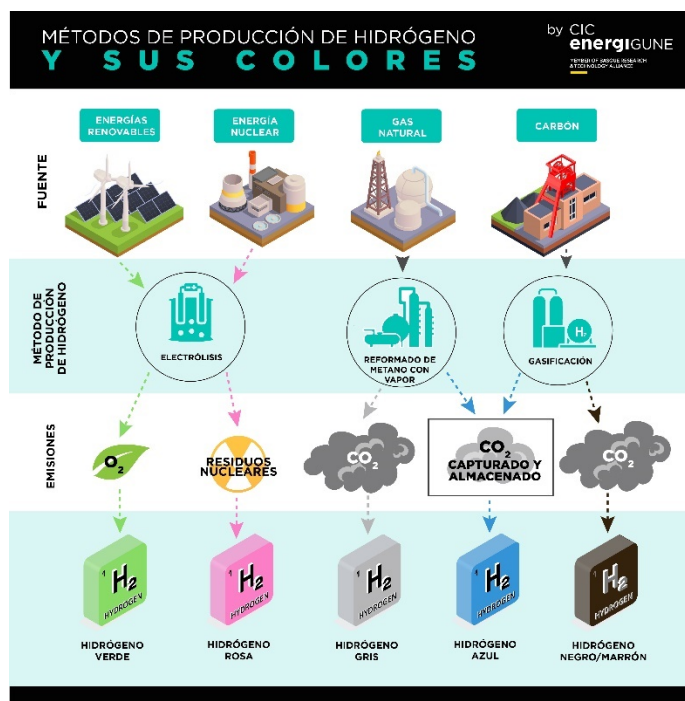


Ilustración 7 Métodos de producción de hidrógeno y sus colores (Centro de Investigación En Almacenamiento de Energía, 2025)

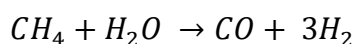
Actualmente, la mayoría del hidrógeno a nivel industrial se produce mediante reformado de gas natural con vapor (SMR), un proceso eficiente, pero con una alta huella de carbono, lo que da lugar al llamado hidrógeno gris. No obstante, el desarrollo de tecnologías limpias ha impulsado la electrólisis como alternativa sostenible, especialmente si se combina con energía de origen renovable, lo que permite obtener hidrógeno verde, libre de emisiones contaminantes.

Un ejemplo destacado de esta transición tecnológica es el proyecto SINNOGENES H₂, coordinado por la Fundación Hidrógeno Aragón, donde ya se produce hidrógeno verde mediante electrólisis para su uso en el transporte público. Este tipo de iniciativas demuestra la viabilidad técnica y logística del hidrógeno renovable en aplicaciones reales en España (FHa, 2025b).

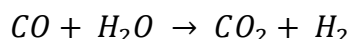
2.1.1.1. Reformado de hidrocarburos

El reformado de hidrocarburos, en particular del metano, es actualmente el método más utilizado para la producción de hidrógeno a escala industrial. La técnica más extendida es el reformado con vapor de agua (Steam Methane Reforming, SMR), en el que el metano (CH₄) reacciona con vapor de agua (H₂O) a temperaturas elevadas (700–1100 °C) en presencia de un catalizador metálico, como el níquel. Este proceso ocurre en varias etapas, que pueden describirse mediante las siguientes reacciones:

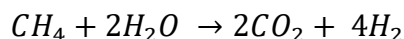
1. Reformado principal (endotérmico):



2. Reacción de desplazamiento del gas de agua (Water-Gas Shift):



3. Reacción global del proceso:



El producto intermedio, conocido como syngas (mezcla de H₂ y CO), puede aprovecharse para otros procesos industriales o reconvertirse a mayor cantidad de hidrógeno puro mediante la segunda reacción. La separación del hidrógeno se realiza habitualmente mediante un sistema de adsorción por oscilación de presión (Pressure Swing Adsorption, PSA), que permite obtener un gas de alta pureza, aunque con un consumo energético adicional que contribuye indirectamente a la huella de carbono del proceso (Kilner, 2022).

El reformado de metano es una tecnología madura, eficiente (con rendimientos superiores al 70 %) y de bajo coste, lo que explica que represente actualmente más del 90 % del hidrógeno producido a nivel mundial (MITECO, 2020). Sin embargo, también es una de las vías más contaminantes, ya que libera grandes cantidades de CO₂. Por ello, el hidrógeno producido por este método se denomina hidrógeno gris. Si se integra con sistemas de captura y almacenamiento de carbono (CCS), el producto final es

hidrógeno azul, que reduce las emisiones, pero requiere una infraestructura más compleja y costosa (Martín, 2020; Tuñón, 2022).

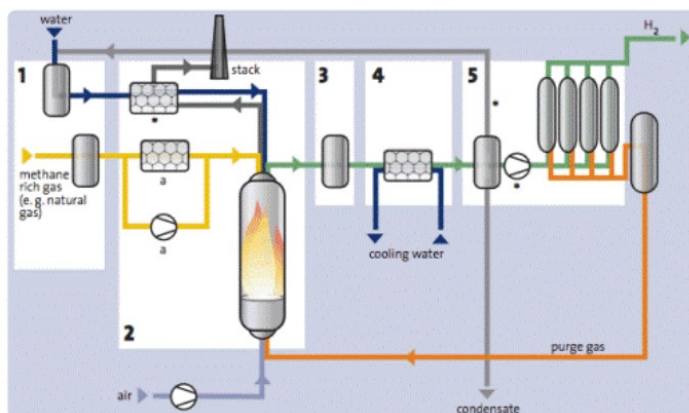


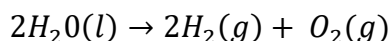
Ilustración 8 Reformado de Metano con vapor (Parra Palacios, n.d.)

Distintos estudios académicos coinciden en que, aunque el reformado es la opción predominante hoy en día, debe considerarse una tecnología transitoria hasta que la electrólisis con energía renovable se consolide como solución sostenible y competitiva en costes (Hernando, 2018).

2.1.1.2. Electrólisis del agua

La electrólisis del agua es un proceso electroquímico que permite descomponer el agua (H_2O) en hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2) mediante la aplicación de una corriente eléctrica. Este método es especialmente relevante cuando se alimenta con electricidad procedente de fuentes renovables, ya que permite obtener hidrógeno verde, es decir, sin emisiones de CO_2 asociadas a su producción (MITECO, 2020).

La reacción global que describe el proceso es:



Existen varios tipos de electrolizadores utilizados en la industria:

- Alcalinos (AEL): los más consolidados, con bajo coste, pero menor densidad de corriente.
- PEM (Proton Exchange Membrane): mayor eficiencia y respuesta dinámica, adecuados para integración con renovables.
- SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cells): operan a alta temperatura, aún en desarrollo.

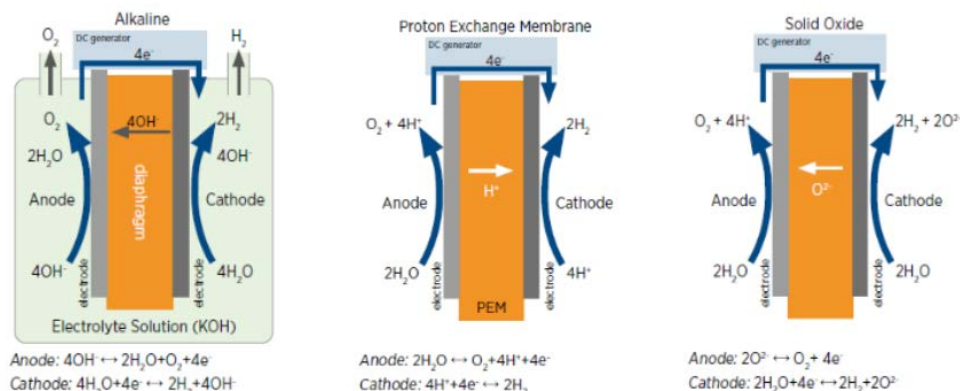


Ilustración 9 Tipos de electrolizadores para producción de hidrógeno (IRENA, 2020)

La eficiencia de la electrólisis varía entre el 60 % y el 80 %, dependiendo del tipo de electrolizador, la fuente eléctrica y el sistema de gestión térmica (Martín, 2020; Tuñón, 2022).

En los últimos años, España y especialmente Aragón han avanzado notablemente en la implementación de proyectos de electrólisis. La Fundación Hidrógeno Aragón participa en varias iniciativas que demuestran la viabilidad técnica del hidrógeno verde:

- El proyecto GREENHYSLAND, desarrollado en las Islas Baleares, representa uno de los primeros ecosistemas integrales de hidrógeno verde en Europa, con producción por electrólisis alimentada por fotovoltaica, almacenamiento y consumo en movilidad y edificios.
- NEPTUNE investiga la producción renovable de hidrógeno para su uso en la industria química, contribuyendo a reducir emisiones en sectores difíciles de electrificar.
- H2PiyR ha creado una red transfronteriza de repostaje de hidrógeno entre España y Francia, con electrolizadores instalados para abastecer vehículos de pila de combustible en entornos reales de transporte.
- Además, el proyecto EVERGREEN se centra en soluciones de almacenamiento de energía basadas en hidrógeno generado por electrólisis, útil tanto en red como en aplicaciones aisladas.

Estos proyectos reflejan cómo la electrólisis no solo es viable técnicamente, sino que ya se está aplicando en múltiples escalas y sectores, desde el transporte hasta la generación y almacenamiento de energía (FHa, 2025a).

Por último, (Hernando, 2018) señala que, aunque la electrólisis todavía implica un coste energético superior al reformado de gas natural, es actualmente la única vía de producción completamente libre de carbono, y será clave para alcanzar los objetivos de neutralidad climática en sectores estratégicos.

2.1.1.3. Gasificación de biomasa

La gasificación de biomasa es un proceso termoquímico que transforma materiales orgánicos sólidos (biomasa lignocelulósica, residuos agrícolas, forestales o industriales) en un gas combustible o gas de síntesis (syngas), compuesto principalmente por H₂, CO, CO₂, CH₄ y otros hidrocarburos ligeros. Este proceso se realiza bajo atmósfera controlada (aire, vapor o mezclas de ambos) a altas temperaturas (700–1200 °C) y con

presencia limitada de oxígeno o sin él, lo que evita la combustión total de la materia prima (de la Luz Fernández Buezas, 2021; Muñoz, 2024).

La gasificación con vapor de biomasa destaca como una alternativa renovable al reformado de hidrocarburos. Aunque el hidrógeno obtenido en este proceso se clasifica comúnmente como “hidrógeno renovable”, cuando se le aplica una captura de carbono (como la carbonatación con CaO) puede llegar incluso a considerarse hidrógeno con emisiones netas negativas, siendo una opción altamente sostenible en términos medioambientales (de la Luz Fernández Buezas, 2021).

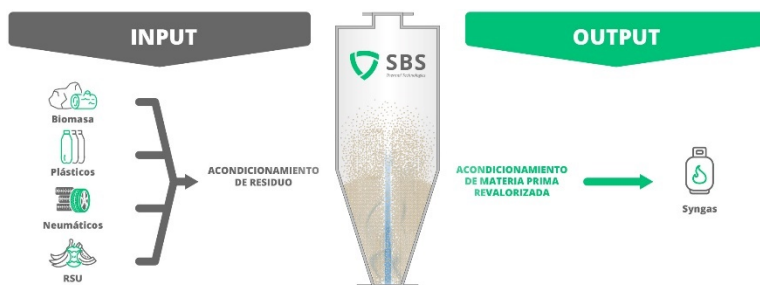
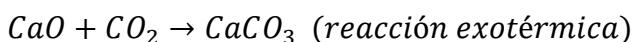


Ilustración 10 Gasificación de la Biomasa (SBS, 2024)

El proceso consta de varias etapas consecutivas:

1. Secado de la biomasa, eliminando la humedad.
2. Pirólisis o devolatilización, que descompone la biomasa en gases, alquitranes y char o carbón vegetal.
3. Gasificación, donde los productos volátiles reaccionan con el agente gasificante (vapor de agua) produciendo CO, H₂ y otros compuestos.
4. Reacciones complementarias, como la reacción de desplazamiento de gas de agua (WGS) y el reformado de alquitranes.

Estas reacciones incluyen tanto mecanismos heterogéneos (como el reformado de char) como homogéneos (reacciones entre gases). En la gasificación con vapor se favorece la formación de hidrógeno a través de reacciones como:

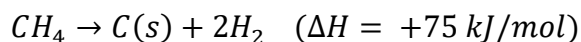


La reacción se produce dentro del mismo gasificador, lo que desplaza el equilibrio de la WGS hacia la formación de más hidrógeno (de la Luz Fernández Buezas, 2021)

La gasificación de biomasa es una tecnología que puede alcanzar emisiones netas de carbono negativas si se combina con captura y almacenamiento de carbono (CAC), (Díez, 2024). Además, tiene la capacidad de valorizar residuos agroforestales y fomentar el desarrollo rural.

2.1.1.4. Pirólisis del Metano

La pirólisis del metano, también conocida como craqueo térmico, es un proceso no oxidativo mediante el cual el metano (CH_4) se descompone térmicamente en hidrógeno (H_2) y carbono sólido (C). A diferencia del reformado con vapor o la gasificación, no requiere la adición de vapor ni oxígeno, y como resultado no se generan emisiones directas de CO_2 :



Este proceso altamente endotérmico requiere temperaturas elevadas, típicamente superiores a 1000°C , aunque puede operarse a temperaturas algo inferiores mediante el uso de catalizadores adecuados, como níquel, hierro o materiales carbonosos (Hernando, 2018; Muñoz, 2024).

Una de sus principales ventajas es que el carbono generado se obtiene en forma sólida, lo que permite su fácil separación del hidrógeno sin necesidad de procesos adicionales de captura o purificación como en el reformado convencional. Sin embargo, esta ventaja se convierte también en una limitación técnica, ya que el carbono puede depositarse sobre el catalizador, causando su desactivación progresiva (Martín, 2020).

Para mitigar este problema, se investiga el uso de reactores de lecho fluidizado, pirólisis catalítica, reactores de plasma térmico y diseños que permitan la extracción continua del carbono sólido. No obstante, se trata de una tecnología en fase de desarrollo, cuyo principal reto actual es el alto consumo energético, especialmente cuando no se aprovechan energías renovables para el suministro térmico (Tuñón, 2022).

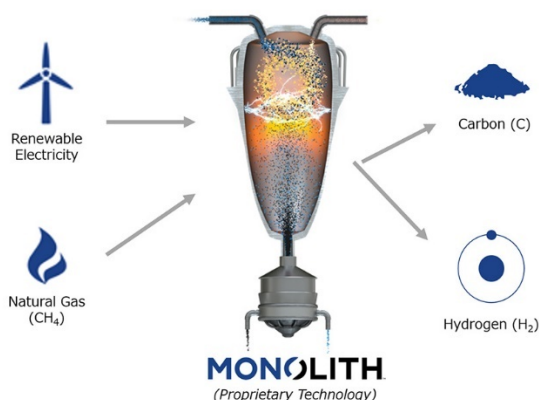


Ilustración 11 Pirólisis del Metano (Monolith, 2025)

Desde el punto de vista ambiental, la pirólisis de metano se considera una vía intermedia y prometedora: permite la obtención de hidrógeno turquesa, menos contaminante que el hidrógeno gris y más eficiente que la electrólisis, aunque sigue dependiendo de un recurso fósil (metano). Si el proceso se combina con fuentes de calor renovables y una valorización del carbono sólido generado (por ejemplo, en materiales o almacenamiento geológico), podría ser una alternativa transitoria viable hacia una economía del hidrógeno más sostenible (de la Luz Fernández Buezas, 2021; MITECO, 2020).

2.1.1.5. Métodos biológicos

La producción biológica de hidrógeno es una alternativa renovable y sostenible basada en la capacidad de ciertos microorganismos para generar H_2 como subproducto de su metabolismo. Este tipo de procesos presenta una gran ventaja ambiental, ya que puede aprovechar residuos orgánicos como sustrato, no requiere altas temperaturas ni presión y tiene una baja huella de carbono. No obstante, su desarrollo tecnológico aún se encuentra en fase experimental y preindustrial (Díez, 2024).

Existen principalmente dos vías biológicas para la producción de hidrógeno:

a) Fermentación oscura

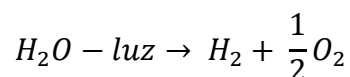
Es el método más desarrollado dentro de los procesos biológicos. Se basa en la degradación anaerobia de compuestos orgánicos (azúcares, almidones, residuos agroindustriales, etc.) por parte de bacterias fermentativas. En condiciones sin oxígeno, estos microorganismos producen hidrógeno, ácidos orgánicos y CO_2 :



La eficiencia de conversión depende del tipo de sustrato, pH, temperatura y de la cepa utilizada. Aunque los rendimientos teóricos pueden llegar a 4 moles de H_2 /mol de glucosa, los valores reales suelen estar entre 1 y 2, debido a la formación de metabolitos secundarios (Díez, 2024).

b) Fotobiológica (algas y cianobacterias)

Consiste en la producción de hidrógeno por microalgas verdes o cianobacterias en condiciones de iluminación. Estos organismos usan la energía solar para romper la molécula de agua mediante enzimas liberando oxígeno e hidrógeno:



Uno de los principales desafíos de esta vía es que la oxigenación inhibe la actividad enzimática, reduciendo considerablemente la producción neta de hidrógeno. Sin embargo, se están investigando sistemas como los fotobiorreactores cerrados y modificaciones genéticas para mitigar este efecto (de la Luz Fernández Buezas, 2021; Díez, 2024).

c) Fermentación fotoheterotrófica

Algunas bacterias fotosintéticas pueden producir hidrógeno utilizando compuestos orgánicos y luz como fuente de energía. Esta vía combina fermentación y fotosíntesis, siendo un enfoque interesante para el tratamiento de aguas residuales ricas en ácidos orgánicos (Díez, 2024).

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Uso de residuos orgánicos	Baja tasa de producción de hidrógeno
Proceso a baja temperatura y presión	Inhibición por oxígeno
No requiere electricidad ni combustibles	Escalabilidad limitada

Tabla 1 Ventajas y desventajas de la obtención de hidrógeno por procesos biológicos

La producción biológica de hidrógeno podría complementar a los métodos termoquímicos y electroquímicos en sistemas descentralizados o zonas rurales, especialmente si se combinan con digestión anaerobia para producción simultánea de biogás e hidrógeno (Díez, 2024).

2.1.2. Clasificación del hidrógeno según su origen

En el ámbito energético, el hidrógeno no se clasifica únicamente por su composición química, sino también en función del proceso mediante el cual ha sido producido. Para ello se ha adoptado una nomenclatura por colores que permite identificar rápidamente su impacto ambiental y su grado de sostenibilidad. Esta clasificación, aunque no estandarizada oficialmente, está ampliamente aceptada en estudios técnicos, institucionales y académicos (Kilner, 2022; MITECO, 2020).

Proceso	Color	Fuente	T (°C)	Emisiones	Madurez
Reformado con vapor de metano (SMR)	Gris/Azul	Gas natural	700-1100	Altas/medias (con CCS)	Alta
Electrólisis del agua	Verde	Electricidad renovable	25-80	Nulas (si es renovable)	Alta
Gasificación de biomasa	Verde	Biomasa	700-1000	Bajas o negativas (con CAC)	Media
Pirólisis del metano	Turquesa	Gas natural	>1000	Nulas (si calor es renovable)	Baja
Fermentación oscura	Verde	Residuos orgánicos	30-60	Nulas	Baja
Producción fotobiológica	Verde	Luz solar	25-40	Nulas	Muy baja
Fotofermentación	Verde	Luz + residuos	30-60	Nulas	Muy baja

Tabla 2 Clasificación del Hidrógeno según su origen

También existen otros colores, menos comunes:

- Hidrógeno rosa o púrpura: producido por electrólisis alimentada con energía nuclear.
- Hidrógeno negro o marrón: generado a partir de gasificación de carbón o lignito, con altas emisiones de CO₂.

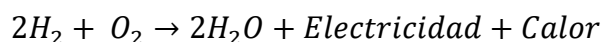
- Hidrógeno amarillo: hace referencia a la electrólisis alimentada por electricidad de red sin origen renovable garantizado.

2.1.3. Formas de uso del hidrógeno como combustible

El hidrógeno, como vector energético, puede utilizarse de manera directa o indirecta en diferentes tecnologías que transforman su energía química en energía mecánica, eléctrica o térmica. Las dos aplicaciones principales en el ámbito energético y de la movilidad son: las pilas de combustible y los motores de combustión interna adaptados.

2.1.3.1. Aplicaciones en celdas de combustible

Las celdas de combustible (fuel cells) permiten convertir la energía química del hidrógeno en energía eléctrica mediante una reacción electroquímica con oxígeno, sin que exista combustión. Esta transformación tiene lugar de forma silenciosa y eficiente, produciendo únicamente agua como subproducto:



Existen diferentes tipos de pilas de combustible, pero en movilidad la más utilizada es la PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) debido a su bajo peso, rápida respuesta y buena integración en vehículos eléctricos. Otras como las SOFC o AFC se emplean en aplicaciones estacionarias (Tuñón, 2022).

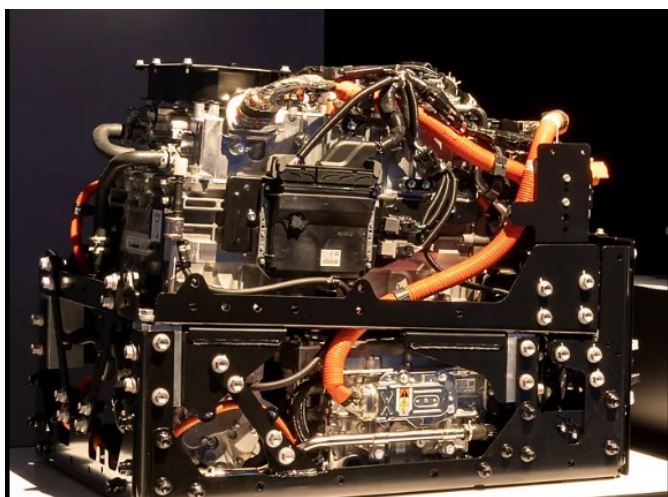


Ilustración 12 Fuel Cell Toyota (Toyota, 2025a)

Las ventajas de esta tecnología incluyen:

- Alta eficiencia energética (hasta el 60 % en sistemas eléctricos, y más en cogeneración).
- Emisiones locales nulas.
- Operación silenciosa y modular.

Las pilas de combustible ya se están utilizando en automóviles, autobuses, trenes y aplicaciones estacionarias para generación distribuida de electricidad, especialmente en zonas donde el acceso a red es limitado o inestable (Martín, 2020).

2.1.3.2. Hidrógeno en motores de combustión interna

El hidrógeno puede ser utilizado también como combustible en motores de combustión interna modificados, ya sea en estado puro o en mezcla con otros combustibles (dual-fuel). Estos motores operan de manera similar a los convencionales, pero requieren adaptaciones en el sistema de inyección, gestión de mezcla aire-combustible y control de detonación (Muñoz, 2024).

Aunque su eficiencia es inferior a la de las pilas de combustible, presenta varias ventajas:

- Aprovechamiento de tecnologías e infraestructuras existentes.
- Alta densidad de potencia.
- Tiempos de repostaje muy rápidos.

Sin embargo, la combustión del hidrógeno puede generar óxidos de nitrógeno (NO_x) si no se controla adecuadamente la temperatura y la proporción aire-combustible. Por ello, se investiga la inyección directa, refrigeración interna y estrategias de combustión por mezcla pobre para minimizar estos contaminantes (de la Luz Fernández Buezas, 2021).

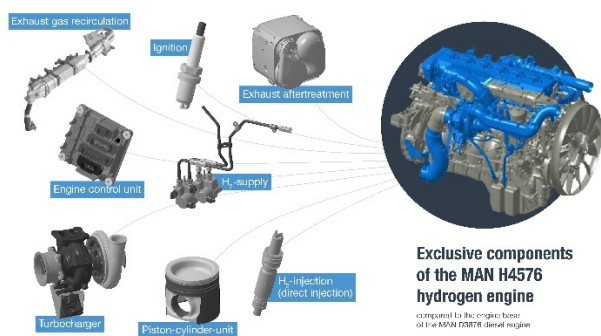


Ilustración 13 Motor de combustión de hidrógeno de MAN para aplicaciones agrícolas (Pereyra, 2024)

Los motores de combustión con hidrógeno son especialmente prometedores para:

- Vehículos pesados.
- Maquinaria agrícola y de obra.
- Aplicaciones ferroviarias o marítimas donde la electrificación directa no es viable.

2.1.4. Almacenamiento y distribución del hidrógeno

El almacenamiento y la distribución del hidrógeno representan uno de los principales retos tecnológicos para su adopción a gran escala como vector energético. Su baja densidad volumétrica, su alta difusividad y su amplio rango de inflamabilidad hacen

necesario el desarrollo de soluciones específicas para su uso seguro y eficiente en aplicaciones móviles, estacionarias e industriales (I. M. Martínez, 2019; Molina, 2021).

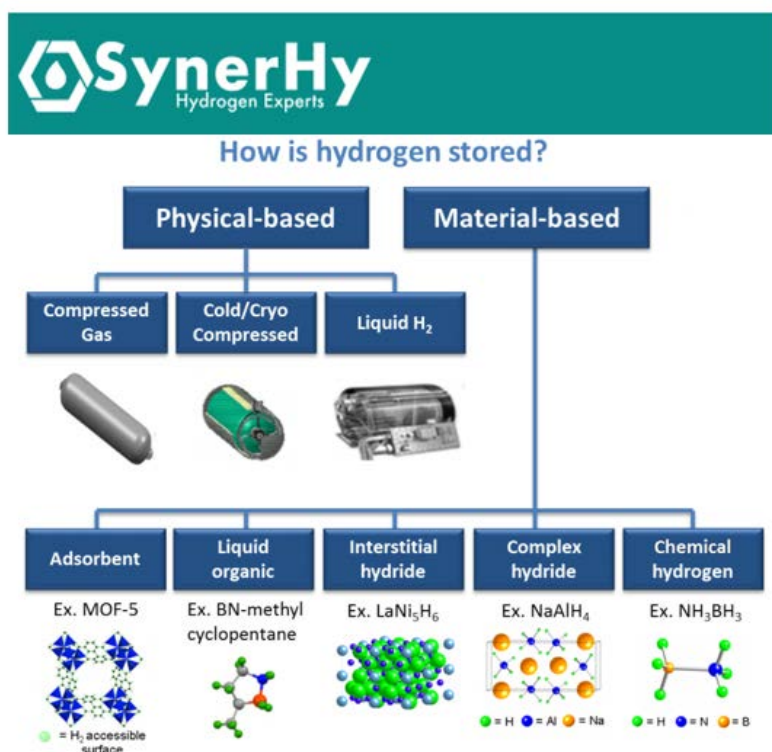


Ilustración 14 Clasificación de los métodos de almacenamiento de hidrógeno (Pérez, 2022)

2.1.4.1. Almacenamiento en estado gaseoso

El método más común es el almacenamiento en estado gaseoso comprimido, especialmente en vehículos y aplicaciones móviles. Se realiza en tanques a 350–700 bar, generalmente de tipo III o IV, fabricados con materiales compuestos que permiten alta resistencia y menor peso (Molina, 2021).

Aunque su eficiencia de conversión es buena, requiere sistemas de compresión que consumen hasta el 15 % de la energía del hidrógeno, y su diseño debe contemplar rigurosas normativas de seguridad.



Ilustración 15 Botellas de 200 bar de fibra de carbono de la empresa CARBOTAINER (CARBOTAINER, 2025)

2.1.4.2. Almacenamiento en estado líquido

El almacenamiento criogénico permite contener hidrógeno líquido a -253°C , reduciendo notablemente su volumen (hasta 850 veces). Esta opción se usa en aplicaciones aeronáuticas, naves espaciales y transporte por camión (Molina, 2021).

Sin embargo, el proceso de licuefacción consume entre el 30 y el 40 % de la energía del hidrógeno, y existen pérdidas por evaporación (boil-off), lo que limita su uso generalizado.



Ilustración 16 Tanque de almacenamiento de LH2 de forma esférica (Pérez, 2022)

2.1.4.3. Almacenamiento en hidruros metálicos y sólidos

Una alternativa más compacta es el almacenamiento en hidruros metálicos (como MgH_2 , LaNi_5H_6), que permiten absorber y liberar hidrógeno de forma reversible mediante ciclos térmicos. Aunque se consigue una alta densidad energética en volumen, el peso, la temperatura de operación ($200\text{--}400^{\circ}\text{C}$) y la lentitud de los ciclos aún limitan su uso en movilidad (Molina, 2021).

También se estudian materiales porosos como MOFs, zeolitas o nanotubos de carbono, que funcionan por adsorción, pero su tecnología todavía está en fase de investigación.

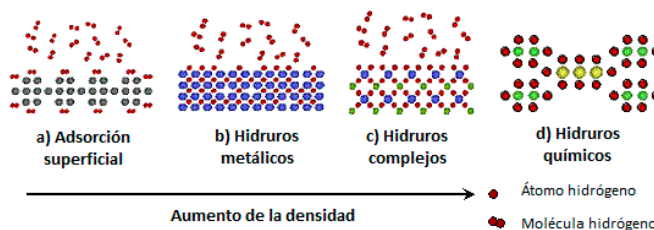


Ilustración 17 Distintas formas de almacenar hidrógeno en metales (Pérez, 2022)

2.1.4.4. Distribución del hidrógeno

El hidrógeno puede distribuirse en forma:

- Gaseosa, a través de tuberías (gasoductos) o camiones con cilindros de alta presión.
- Líquida, mediante cisternas criogénicas.
- Sólida o compuesta, como parte de materiales portadores o líquidos orgánicos hidrogenados (LOHCs).

En entornos urbanos e industriales se estudia la inyección de mezclas de hidrógeno en redes de gas natural como solución transitoria, aunque ello requiere adaptar las infraestructuras y equipos de consumo.

2.1.4.5. Aplicaciones reales en Aragón: Proyectos de la Fundación del Hidrógeno

La Fundación Hidrógeno Aragón, ubicada en el Parque Tecnológico Walqa (Huesca), lidera varios proyectos europeos de I+D relacionados con el almacenamiento y distribución de hidrógeno:

- HIGGS (Hydrogen in Gas Grids): analiza la viabilidad técnica y económica de transportar hidrógeno por redes de gas natural. Incluye bancos de ensayo reales en Aragón y propone soluciones para la adaptación de redes existentes. (FHa, 2025a)
- EVERGREEN: investiga el uso del hidrógeno como medio de almacenamiento energético estacional, conectando la producción por electrólisis renovable con sistemas de almacenamiento y posterior uso en generación eléctrica o movilidad.

Ambos proyectos posicionan a Aragón como referencia nacional en integración del hidrógeno y validan en entorno real tecnologías descritas en este capítulo.

2.2. CELDAS DE COMBUSTIBLE (FUEL CELL)

Las celdas de combustible (Fuel Cells) son dispositivos electroquímicos capaces de convertir directamente la energía química del hidrógeno en energía eléctrica y térmica, sin necesidad de combustión. Esta conversión, altamente eficiente y silenciosa, se produce mediante una reacción controlada entre el hidrógeno y el oxígeno, cuyo único subproducto es agua. Gracias a su eficiencia, modularidad y emisiones locales nulas, son consideradas una solución clave para la descarbonización de sectores como la movilidad, la generación distribuida y los sistemas híbridos.

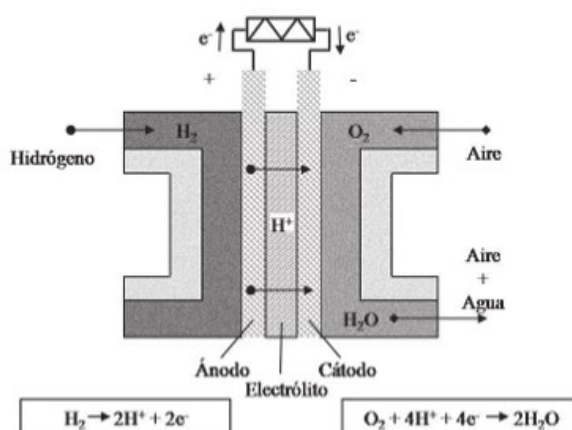
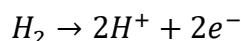


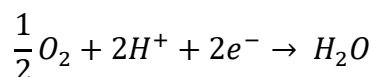
Ilustración 18 Diagrama general de una celda de combustible alimentada por hidrógeno (San Martín et al., 2009)

2.2.1. Reacción electroquímica

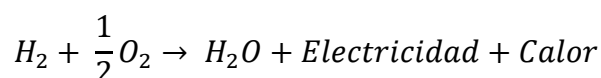
Una celda de combustible básica consta de dos electrodos (ánodo y cátodo), separados por un electrolito que transporta iones. En el ánodo, el hidrógeno se oxida liberando protones (H^+) y electrones (e^-):



Los protones atraviesan el electrolito hacia el cátodo, mientras los electrones fluyen por un circuito externo generando corriente eléctrica. En el cátodo, el oxígeno reacciona con los protones y los electrones para formar agua:



La reacción global es:



Este proceso es silencioso, sin partes móviles, y presenta eficiencias de entre el 40 % y el 60 % eléctricas, que pueden superar el 80 % si se aprovecha también el calor generado (Molina, 2021).

2.2.1.1. Relación entre potencia y eficiencia

La eficiencia eléctrica de una pila de combustible no es constante y depende directamente de las condiciones de operación: densidad de corriente, temperatura, presión de los reactivos, humedad relativa y pureza del hidrógeno. Existe una relación inversa entre la potencia suministrada y la eficiencia eléctrica, debida a pérdidas internas (activas, óhmicas y de concentración), que se intensifican con el aumento de carga (Sergio Moreno Rodríguez, 2016).

Como se ha observado en estudios experimentales con pilas PEM comerciales (por ejemplo, la Ballard Nexa™ de 1,2 kW), el rendimiento disminuye progresivamente conforme se incrementa la potencia. Este comportamiento es extrapolable a pilas como la IE SOAR 2.4 kW, que se basa en la misma tecnología PEMFC. (San Martín et al., 2009).

Carga Relativa (%)	Potencia (W)	Eficiencia estimada (%)
10	240	~58
25	600	~54-56
50	1200	~50
100	2400	~42-45

Tabla 3 Comportamiento estimado de la IE SOAR 2.4kW

En el estudio experimental se define la eficiencia eléctrica como:

$$\eta_{el} = \frac{V_{celda} * I}{\dot{m}_{H_2} PCI_{H_2}}$$

1 Eficiencia eléctrica de la Fuel Cell

Donde:

- η_{el} : eficiencia eléctrica de la pila.
- V_{celda} : tensión de operación de la celda (V).
- I : corriente suministrada (A).
- \dot{m}_{H_2} : caudal másico de hidrógeno consumido (kg/s).
- PCI_{H_2} : poder calorífico inferior del hidrógeno (120 MJ/kg).

Este modelo permite calcular la eficiencia en función del caudal de hidrógeno medido o estimado. En el caso de la IE SOAR, cuyo consumo máximo se sitúa en torno a 50 NL/min, se pueden establecer estimaciones realistas en función de la carga relativa.

Como se ha puede ver en la *Ilustración 19*, operar la pila en su zona óptima de carga parcial (30–70 %) permite maximizar el rendimiento eléctrico y minimizar la degradación de los componentes, especialmente la membrana polimérica y los electrodos. En este TFG, el sistema híbrido se configura para que:

- La pila de combustible funcione de forma continua, en una zona de alta eficiencia.
- Los picos de demanda los absorba una batería, optimizando así la potencia neta entregada al tren de potencia.

Esta estrategia operativa prolonga la vida útil del stack, mejora la eficiencia global del sistema y reduce el consumo de hidrógeno.

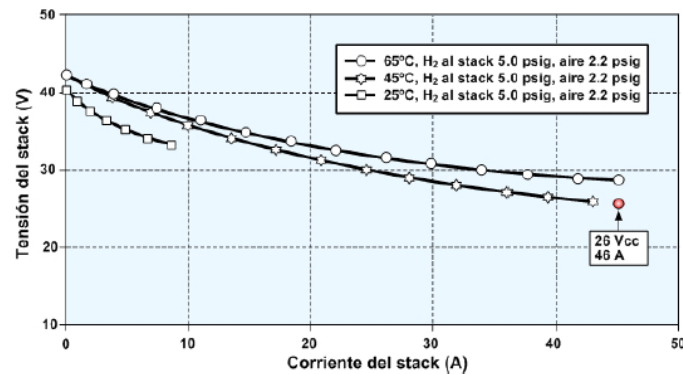


Ilustración 19 Curva tensión/corriente del Stack (San Martín et al., 2009)

El comportamiento de las pilas de combustible debe distinguirse entre los puntos de máxima eficiencia y de máxima potencia. En virtud de la aplicación concreta, interesará fijar el punto de funcionamiento de la pila de combustible, con alta eficiencia o con alta potencia. A partir del punto de trabajo seleccionado, se derivarán estrategias de control diferentes. En la Ilustración 20, aparecen las gráficas que representan la eficiencia eléctrica y la potencia, para distintos caudales de suministro de hidrógeno (San Martín et al., 2009).

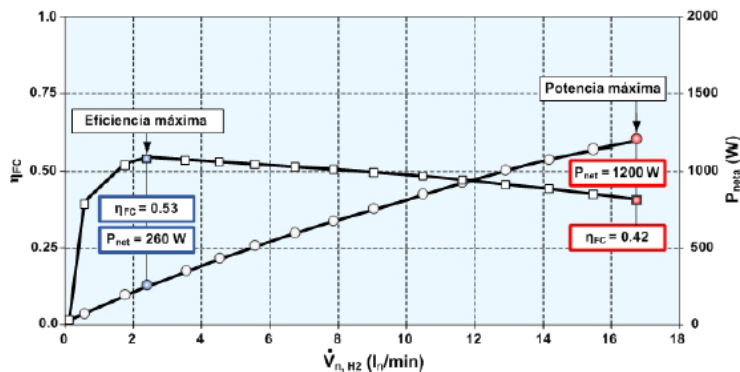


Ilustración 20 Eficiencia, potencia y caudal de hidrógeno del módulo de pila de combustible (San Martín et al., 2009)

2.2.2. Tipos de celdas de combustible y su comparación

Las celdas de combustible pueden clasificarse según el tipo de electrolito utilizado y la temperatura de operación. Cada tecnología presenta ventajas específicas según el entorno de aplicación. En este proyecto se ha optado por el uso de una pila de combustible PEMFC, por ser la más adecuada para sistemas móviles y ligeros como un triciclo de reparto eléctrico.

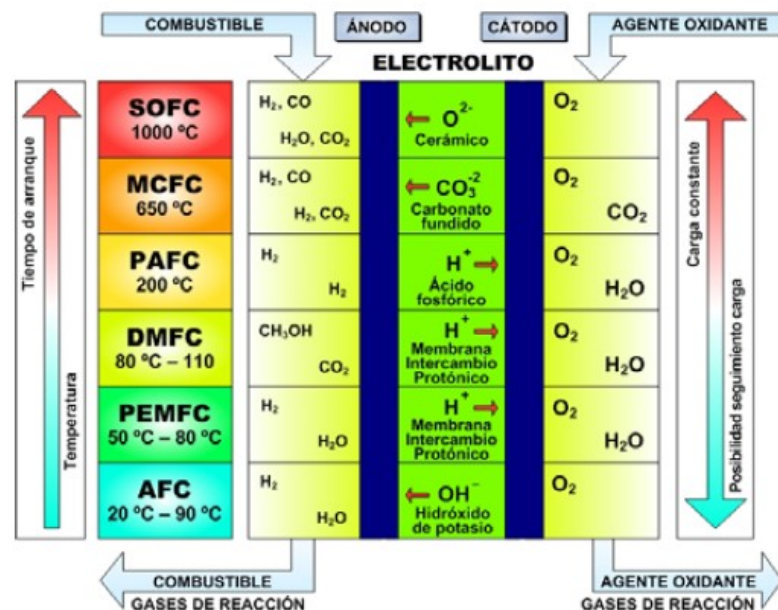


Ilustración 21 Tecnologías de pilas de combustible (San Martín et al., 2009)

Tecnología	Temp. operación	Electrolito	Combustible	Aplicación típica
PEMFC	60–80 °C	Membrana polimérica	H ₂	Vehículos, portátil
SOFC	800–1000 °C	Óxido sólido	H ₂ , CH ₄	Estacionario, industrial
PAFC	150–220 °C	Ácido fosfórico	H ₂	Cogeneración
AFC	60–90 °C	Electrolito alcalino	H ₂	Espacial, laboratorio
DMFC	60–90 °C	Membrana polimérica	Metanol	Electrónica de baja potencia
MCFC	~650 °C	Carbonato fundido	H ₂ , CH ₄	Estacionario de alta potencia

Tabla 4 Comparativa entre las diferentes tecnologías de Fuel Cell

2.2.2.1. PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

Las celdas de membrana de intercambio protónico (PEMFC) utilizan una membrana polimérica como electrolito. El hidrógeno se oxida en el ánodo, liberando protones y electrones. Los protones atraviesan la membrana hasta el cátodo, donde se combinan con oxígeno para formar agua, mientras que los electrones generan una corriente eléctrica útil a través de un circuito externo.

Esta tecnología ha sido seleccionada en el presente proyecto debido a sus ventajas operativas, facilidad de integración, respuesta dinámica y eficiencia energética a temperaturas moderadas.

Con las siguientes características técnicas destacadas (Horizon Fuel Cell Technologies, 2024; IE, 2022; SENZA, 2023):

- Temperatura de operación: 60–80 °C
- Combustible: hidrógeno seco $\geq 99.995\%$ de pureza
- Electrolito: membrana de polímero conductor de protones
- Humidificación: necesaria (algunos modelos la gestionan de forma automática)
- Presión de hidrógeno típica: 0.35–0.65 bar

Ventajas:

- Alta densidad de potencia, ideal para vehículos
- Rápido arranque y parada
- Funcionamiento a baja temperatura
- Arquitectura compacta
- Emisiones nulas

Inconvenientes:

- Requiere hidrógeno puro (sensibilidad al CO/CO₂).
- Humidificación controlada para mantener el rendimiento.
- Uso de catalizadores nobles (como el platino) que encarece el producto.

Aplicaciones comunes:

- Vehículos eléctricos de pila de hidrógeno (Toyota Mirai, autobuses urbanos, scooters).
- Sistemas portátiles.
- Proyectos educativos y de competición (ej. Shell Eco-marathon).

En este proyecto se empleará una pila Horizon H-1000XP, un sistema PEMFC de 1 kW de potencia, refrigerado por aire, con consumo de hidrógeno de 12,5 L/min a plena carga y una eficiencia del 59%, lo que permite recargar la batería principal del vehículo mientras se encuentra en operación de forma sostenible y eficiente (Horizon Fuel Cell Technologies, 2024)

2.2.2.2. SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)

Las celdas de combustible de óxido sólido (SOFC) operan a temperaturas elevadas (600–1000 °C) y utilizan un electrolito cerámico conductor de iones oxígeno. La oxidación del hidrógeno o hidrocarburos se produce en el ánodo, y el oxígeno del aire difunde a través del electrolito desde el cátodo.

Características principales:

- Temperatura de operación: 800–1000 °C
- Electrolito: óxido cerámico (ZrO₂ estabilizado con itria)
- Combustible: H₂, metano, gas natural

Ventajas:

- Alta eficiencia eléctrica y térmica (hasta 60%)
- Posibilidad de usar combustibles reformados
- No requiere metales nobles como catalizador

Inconvenientes:

- Largos tiempos de arranque y enfriado
- Ciclos térmicos limitados
- Costes elevados de materiales resistentes a altas temperaturas

Aplicaciones típicas:

- Generación eléctrica estacionaria
- Cogeneración industrial
- Sistemas híbridos con turbinas de gas

Su elevado peso, complejidad térmica y tiempo de respuesta lento las hacen poco adecuadas para vehículos ligeros o portátiles.

2.2.2.3. PAFC, AFC y otras tecnologías

Existen otras tecnologías de celdas de combustible que han sido exploradas, principalmente en aplicaciones estacionarias o históricamente en aeronáutica:

- PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell): Utilizan ácido fosfórico líquido como electrolito y operan a temperaturas de 150–220 °C. Aunque son más tolerantes al CO₂, presentan menor densidad de potencia. Se han usado en cogeneración y generación distribuida.
- AFC (Alkaline Fuel Cell): Utilizan un electrolito alcalino (KOH) y fueron empleadas en misiones espaciales. Presentan alta eficiencia, pero son extremadamente sensibles al CO₂, lo que limita su uso a entornos controlados con hidrógeno puro.
- DMFC (Direct Methanol Fuel Cell): Funcionan directamente con metanol líquido como combustible. Son adecuadas para potencias muy bajas, pero su eficiencia es baja. Aplicaciones en electrónica portátil.

- MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell): Operan a $\sim 650^\circ\text{C}$ y emplean carbonatos fundidos como electrolito. Se utilizan en generación estacionaria de alta potencia, aunque aún están en fase de desarrollo comercial.

2.2.3. Elección de la Fuel Cell

Para la configuración híbrida del vehículo de reparto, se ha considerado la necesidad de una pila de combustible que opere de forma continua en torno a 1 kW, cuya función principal sea recargar la batería del sistema y extender la autonomía de este.

A continuación, se expone un estudio comparativo entre diversas opciones comerciales de pilas de combustible PEM disponibles en el mercado, con el objetivo de seleccionar la alternativa más adecuada para el prototipo desarrollado.

Requisitos clave del sistema:

- Potencia continua objetivo: 1.000 W
- Pico de potencia absorbido por la batería
- Consumo de hidrógeno reducido para maximizar autonomía
- Peso contenido por limitaciones estructurales del chasis
- Compatibilidad con alimentación auxiliar y electrónica de control

Se han analizado distintos modelos de pilas de combustible de los fabricantes: SENZA, Horizon Fuel Cell Technologies e Intelligent Energy. Con potencias comprendidas entre los 1000 y 5000 W. La tabla siguiente recoge los valores más representativos:

Parámetro	SZFC-1000	SZFC-1500	SZFC-2000	SZFC-3000	SZFC-5000
Potencia (W)	1000	1500	2000	3000	5000
Tensión (V)	30-56	40-74	40-74	35-63	55-99
Corriente máx (A)	37.2	37.2	56.4	90.0	90.0
Eficiencia (%)	>40	>40	>40	>40	>40
Consumo H ₂ máx (L/min)	17	23	35	49	77
Peso (kg)	4.72	5.21	6.39	10.0	14.0
Dimensiones (mm)	145×162×241	145×162×308	152×202×315	198×262×287	198×262×429.5
Presión H ₂ (bar)	0.35-0.5	0.35-0.5	0.45-0.6	0.35-0.5	0.35-0.5
Temperatura operación (°C)	0-35	0-35	5-30	0-35	0-35
Arranque en frío	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado

Tabla 5 Comparativa de posibles Fuel Cells para el sistema (1)

Parámetro	Horizon H-1000XP	Horizon H-2000	IE-SOAR 2.4kW
Potencia (W)	1000	2000	2400
Tensión (V)	25-48	28.8	~50
Corriente máx (A)	33.5	70.0	~48
	59	40	>50 (estimado)
Consumo H ₂ máx (L/min)	12.5	26	~50 SLPM
Peso (kg)	4.9	14.1	~7.5
Dimensiones (mm)	264×203×104	303×350×183	280×220×100
Presión H ₂ (bar)	0.5	0.55-0.65	~0.9
Temperatura operación (°C)	5-35	5-30	-5 a +50
Arranque en frío	Sí (requiere batería 12V)	No especificado	Sí, con restrictor

Tabla 6 Comparativa de posibles Fuel Cells para el sistema (2)

2.2.3.1. Análisis y justificación de la elección

La pila Horizon H-1000XP ha sido seleccionada como la opción óptima tras considerar los siguientes criterios:

- I. Adecuación de la potencia: Su potencia nominal de 1 kW, con picos de hasta 1,2 kW, es idónea para la recarga continua de la batería sin sobredimensionar el sistema.
- II. Bajo consumo de hidrógeno: Presenta el menor consumo específico de hidrógeno del conjunto, con 12.5 L/min a plena carga. Esto favorece la autonomía del vehículo utilizando depósitos pequeños y ligeros, factor especialmente relevante en un sistema urbano de reparto.
- III. Alta eficiencia energética: Con una eficiencia del 59 %, destaca por su aprovechamiento energético, reduciendo pérdidas térmicas y maximizando la conversión del hidrógeno en energía útil.
- IV. Peso y dimensiones contenidas: Su masa de 4.9 kg permite integrarla fácilmente en el diseño estructural del triciclo sin comprometer la estabilidad ni incrementar el consumo energético total del sistema.
- V. Compatibilidad técnica: Requiere una fuente auxiliar de 12V para el arranque, pero su integración es sencilla. Dispone de comunicación RS232, humidificación automática y refrigeración por aire, facilitando su montaje y control sin necesidad de periféricos complejos.
- VI. Diseño probado en movilidad ligera: Esta pila ha sido empleada en proyectos del Shell Eco-marathon, lo cual avala su robustez y rendimiento en entornos de movilidad eléctrica urbana y de bajo consumo.

Observaciones complementarias:

- Si se prioriza la eficiencia y bajo consumo, la Horizon H-1000XP es la ganadora clara.
- Si el criterio principal fuera la amplitud térmica, el modelo IE-SOAR 2.4 kW permite operación desde -5 °C.
- Si se busca la unidad más compacta y ligera, la SZFC-1000 es la más adecuada, aunque con menor eficiencia energética.
- El resto de los modelos (como SZFC-3000 o 5000) están sobredimensionados para un vehículo ligero y tienen mayor peso y consumo, siendo más aptos para aplicaciones estacionarias o comerciales de alta demanda.

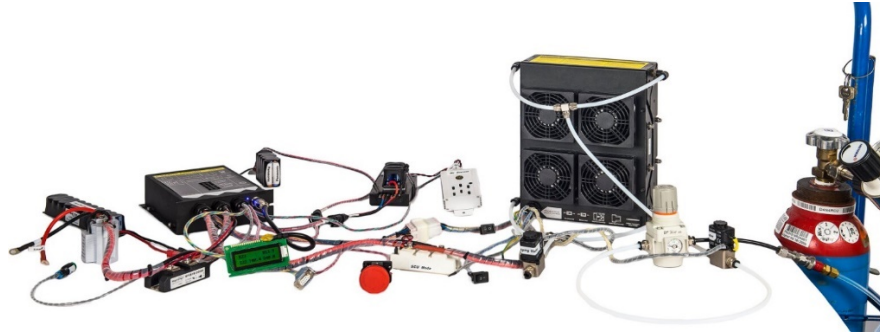


Ilustración 22 ejemplo de montaje de la FC H-1000XP de Horizon Technologies (Horizon Fuel Cell Technologies, 2024)

2.3. BATERÍAS ELÉCTRICAS

El sistema de almacenamiento energético constituye un elemento clave dentro de la arquitectura de un vehículo híbrido. En este proyecto, la batería cumple el papel de suministrar energía a los motores eléctricos y sistemas auxiliares, así como de almacenar la energía entregada por la pila de combustible de hidrógeno. La correcta selección de la batería influye directamente en la autonomía, seguridad, eficiencia, peso y coste del sistema (López Sánchez, 2019).

2.3.1. Principio de funcionamiento

Una batería recargable es un dispositivo electroquímico capaz de almacenar energía en forma química y liberarla como energía eléctrica mediante reacciones redox reversibles. El parámetro básico que describe su capacidad energética es:

$$E = V_{nom} C$$

2 Capacidad energética de una batería

Donde:

- E : energía almacenada (Wh)
- V_{nom} : tensión nominal (V)
- C : capacidad (Ah)

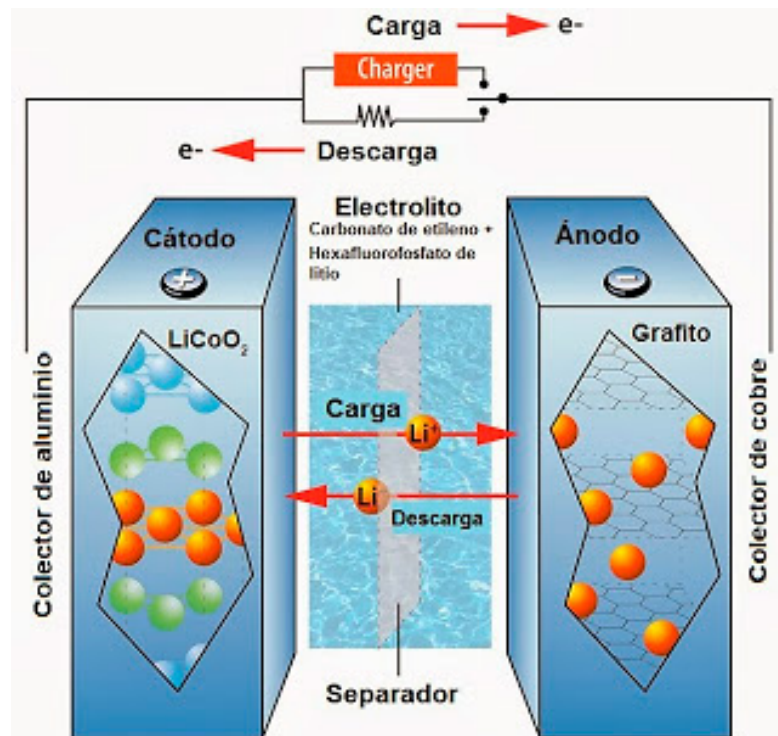


Ilustración 23 Funcionamiento de una batería (Mártel, 2019)

El diseño de baterías para movilidad también considera la profundidad de descarga (DoD), el número de ciclos, la eficiencia, la resistencia interna y los regímenes de carga y descarga (González Carrera, 2018).

Parámetro	Unidad	Descripción técnica
Tensión nominal	V	Valor medio por celda o pack
Capacidad	Ah	Cantidad total de carga eléctrica
Energía útil	Wh	Energía entregada considerando la profundidad de descarga
Densidad energética	Wh/kg	Energía por unidad de masa
Densidad volumétrica	Wh/L	Energía por unidad de volumen
Ciclos de vida	ciclos	Número de ciclos carga/descarga útiles
C-rate	C	Relación entre corriente de carga/descarga y capacidad nominal
Temperatura de operación	°C	Rango de temperatura operativo
Profundidad de descarga	%	Porcentaje descargado del total por ciclo
Seguridad térmica	—	Resistencia a fuga térmica o sobrecalentamiento (incendio)

Tabla 7 Parámetros técnicos clave en el diseño de sistemas de batería

Para una el proyecto de hibridación, se prioriza una batería con buena estabilidad térmica, larga vida útil, capacidad para ciclos profundos, y un peso y volumen

compatibles con el chasis del triciclo. Además, debe admitir carga continua desde la pila de combustible a potencia constante (1 kW)

2.3.2. Tipos de tecnologías de Baterías eléctricas

A continuación, se comparan las principales tecnologías actualmente disponibles, considerando aplicaciones en movilidad eléctrica ligera. Se excluyen tecnologías obsoletas como NiCd y se agrupan según viabilidad técnica y comercial.

Tecnología	Densidad energética (Wh/kg)	Ciclos de vida	Seguridad	Coste relativo	Aplicaciones típicas
Li-ion (NCM/NCA)	180–250	1000–2000	Media	Alta	Automoción, drones, electrónica portátil
LiFePO ₄ (LFP)	90–140	2000–5000	Alta	Media	Vehículos eléctricos, almacenamiento
NiMH	60–120	500–1000	Media	Media	Híbridos tipo Prius, herramientas
Pb-ácido	30–50	300–500	Baja	Baja	SAI, sistemas auxiliares, tracción industrial

Tabla 8 Comparativa de tecnologías de baterías recargables (Dixon, 2010a; González Carrera, 2018; López Sánchez, 2019)

Las baterías de tipo LiFePO₄ (fosfato de hierro y litio) resultan ideales para este proyecto por su alta seguridad

d térmica, gran durabilidad, buena tolerancia al abuso eléctrico y amplia disponibilidad comercial.

2.3.3. Cálculo energético

El correcto dimensionado de la batería en un sistema híbrido como el propuesto requiere de una serie de cálculos eléctricos fundamentales. Estas ecuaciones permiten estimar parámetros críticos como la autonomía del vehículo, la capacidad de descarga, el rendimiento energético por ciclo y la durabilidad total del sistema de almacenamiento.

Además, el diseño debe considerar no solo la energía total almacenada, sino también la capacidad de entregar potencia, la velocidad de recarga y la resistencia a condiciones extremas (Dixon, 2010a).

A continuación, se presentan las fórmulas clave que serán empleadas en el diseño final de la batería seleccionada, teniendo en cuenta el espacio disponible, el peso permitido y el perfil de carga típico suministrado por la pila de combustible.

I. Energía total de la batería

$$E_{total} = V_{nom} C [Wh] [2]$$

Donde V_{nom} es la tensión nominal del sistema y C su capacidad en Ah.

II. Corriente máxima de descarga

$$I_{descarga} = C \ C_{rate}$$

3 Corriente máxima de descarga de la batería

Define la corriente máxima continua que puede entregar sin degradación, útil para verificar compatibilidad con los motores eléctricos.

III. Autonomía estimada

$$t_{uso} = \frac{C}{I_{consumo}}$$

4 Autonomía estimada de la batería

Permite estimar el tiempo de funcionamiento con una carga completa bajo condiciones constantes.

IV. Energía útil por ciclo

$$E_{ciclo} = E_{total} \ DoD$$

5 Energía útil por ciclo de la batería

Donde *DoD* es la profundidad de descarga, que suele limitarse a un 80% para preservar la vida útil de la batería.

V. Energía tota durante la vida útil

$$E_{vidaUtil} = E_{ciclo} N_{ciclos}$$

6 Energía total durante la vida útil de la batería

Representa la energía total que se puede extraer a lo largo de toda la vida operativa del sistema.

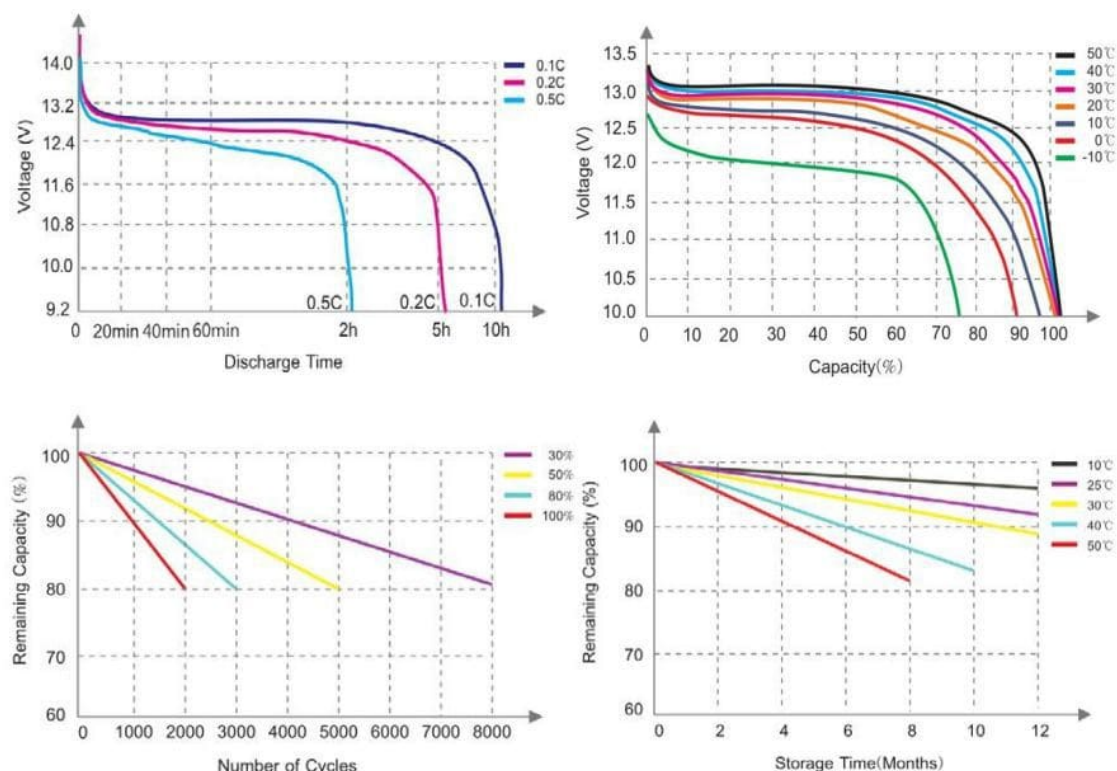


Ilustración 24 Rendimiento de descarga de una batería según diferentes condiciones (PKenergy, 2025)

Estas fórmulas son comunes en el diseño de sistemas de energía embarcados, como se recoge en (López Sánchez, 2019), quien aplica estos mismos cálculos para comparar tecnologías en función de densidad energética y rendimiento. También son consistentes con los métodos propuestos por el (EVT, 2023) y (Dixon, 2010a).

2.3.4. Tecnologías emergentes

La transición energética y la presión por reducir la dependencia del litio han impulsado nuevas tecnologías de baterías, que ya se encuentran en fase de desarrollo avanzado o primeras aplicaciones comerciales (López Sánchez, 2019).

Tecnología	Ventajas	Estado Actual	Aplicaciones
Estado sólido	Alta densidad, seguridad, sin electrolito líquido	Prototipos funcionales	Automoción, aviación ligera
Litio-Azufre (Li-S)	Muy alta energía específica (~550Wh/kg)	En desarrollo, baja vida útil	Vehículos de largo alcance
Sodio-ión (Na-ion)	Bajo coste, recursos abundantes	Comercialización inicial	Movilidad urbana, almacenamiento
Baterías de Sal (ZEBRA)	Alta seguridad, 100% reciclables	Uso estacionario limitado	Estacionarias, movilidad

Tabla 9 Nuevas tecnologías de baterías

Aunque tecnologías como las baterías de estado sólido prometen ventajas superiores, actualmente las opciones más viables siguen siendo las de litio. De ellas, LiFePO_4 destaca por su equilibrio entre coste, vida útil, eficiencia y seguridad térmica (CATL, 2023; Dixon, 2010a; Poyato Fragero, 2019).

Se excluyen opciones como Li-S o Na-ion por su baja disponibilidad en configuraciones comerciales para movilidad ligera (López Sánchez, 2019).

2.4. INVERSORES Y CONVERTIDORES DC-DC EN SISTEMAS HÍBRIDOS

En una arquitectura híbrida basada en pila de combustible y batería, como la desarrollada en este proyecto, se hace imprescindible el uso de un convertidor DC-DC que permita adaptar los niveles de tensión entre ambos sistemas. En particular, la pila de combustible genera una tensión nominal de 48 V, mientras que la batería de tracción seleccionada trabaja a una tensión de 72 V. Esta diferencia impide una conexión directa y exige un convertidor de tipo boost que eleve la tensión de salida de la pila para permitir la carga eficiente de la batería (Sanz Pascual, 2018).

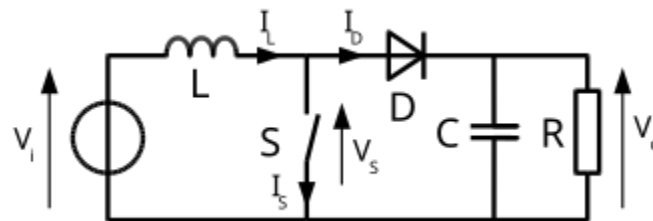


Ilustración 25 Esquema básico de un convertidor boost (Wikipedia, 2025)

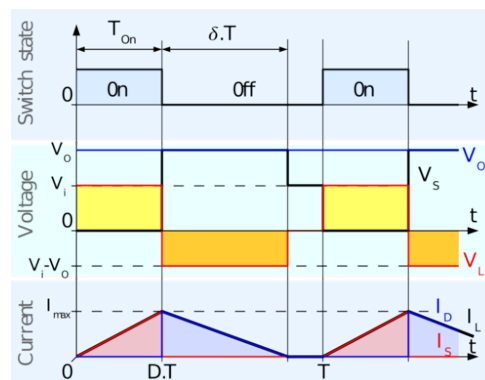


Ilustración 26 Formas de onda de corriente y voltaje en el convertidor boost (Wikipedia, 2025)

2.4.1. Función del convertidor DC-DC en la arquitectura

En este proyecto, el convertidor boost permite que la pila de combustible PEM, con un rango de salida entre 25 y 48 V, pueda cargar una batería de tracción nominal de 72 V. Esto no es posible con conexión directa debido a la diferencia de potencial y a la curva característica de la pila, que tiene mejor rendimiento operando a corriente constante y tensión variable (Dixon, 2010b).

El boost cumple así funciones clave:

- Regulación de tensión: adapta la tensión a los requerimientos del acumulador.

- Protección: impide que la pila se sobrecargue o quede expuesta a picos de corriente.
- Acondicionamiento energético: permite optimizar el punto de funcionamiento de la pila mediante controladores MPPT o esquemas dedicados (Juaristi, 2023).
- Gestión de carga: actúa como cargador interno del sistema híbrido, permitiendo mantener la batería operativa sin necesidad de red eléctrica externa.

How the Mirai works: the drive train

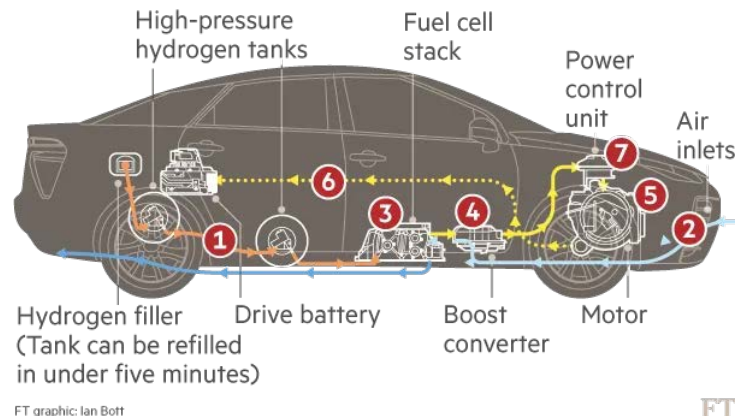


Ilustración 27 Convertidor Boost en el Toyota Mirai (Hydrogen Vehicles: Analysis for the Automotive Industry, 2025)

2.4.2. Fundamentos eléctricos

Un convertidor boost ideal se basa en la siguiente relación entre tensiones:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D}$$

7 Relación entre tensiones de un convertidor boost (ideal)

Donde:

- V_{out} : tensión de salida
- V_{in} : tensión de entrada (tensión de la pila)
- D : ciclo de trabajo (duty cycle), $0 < D < 1$

También se deben calcular:

- Potencia de salida esperada:

$$P_{out} = V_{out} I_{out}$$

8 Potencia de salida esperada en el convertidor

- Corriente de entrada estimada:

$$I_{in} = \frac{P_{out}}{V_{in} \eta}$$

9 Corriente de entrada estimada en el convertidor

Donde η es la eficiencia del convertidor.

Estas fórmulas permiten realizar una estimación precisa del comportamiento del sistema y su dimensionado, en función de la carga, la eficiencia deseada y las características de la pila de combustible.

2.4.3. Criterio de selección del convertidor

Para este proyecto, el convertidor debe cumplir los siguientes requisitos:

Parámetro	Requisito
Tipo	Boost DC/DC
Tensión de entrada	25-48V
Tensión de salida	~72V
Corriente de salida	$\geq 10-15A$
Potencia nominal	$\geq 1kW$
Eficiencia	$> 90\%$
Refrigeración	Preferiblemente Activa (ventilación o disipador)

Tabla 10 Requisitos del Convertidor para el sistema

Este tipo de convertidor ya ha sido utilizado en otros estudios similares como el de (Ramos Flores, 2022) y (Juaristi, 2023), en los que se plantean soluciones adaptadas para vehículos eléctricos de micromovilidad, con niveles de tensión similares y necesidades energéticas comparables.

Como referencia preliminar, se contempla la selección de un convertidor DC-DC de la empresa aragonesa Epic Power, especializada en soluciones elevadoras bidireccionales de alta eficiencia, cuya gama de productos se ajusta a los requisitos de tensión y potencia del sistema, ofrece además un configurador que permite personalizar el convertidor DC-DC según los requisitos específicos del sistema eléctrico del vehículo

Esta elección permitirá una mejor integración con los componentes definidos, al tiempo que se asegura un soporte técnico local de calidad. Esto representa una ventaja clave, ya que una vez estén definidos los parámetros eléctricos exactos del sistema (tensiones, corrientes, potencias nominales y máximas), se podrá seleccionar o configurar un modelo completamente adaptado a las necesidades reales del proyecto, asegurando un rendimiento óptimo sin sobredimensionamiento innecesario.

2.5. MOTORES ELÉCTRICOS

Los motores eléctricos son el componente principal de propulsión en vehículos eléctricos e híbridos. Su función es transformar la energía eléctrica almacenada en la batería o generada por la pila de combustible en energía mecánica que se transmite a las ruedas del vehículo. La elección del tipo de motor condiciona la eficiencia, el mantenimiento, la compactidad del sistema y el coste total.

2.5.1. Tipos de motores eléctricos y su aplicación

Los motores se pueden clasificar según su construcción y principio de funcionamiento en tres grandes grupos:

2.5.1.1. Motores de corriente continua (DC)

Los motores DC convierten directamente la energía eléctrica en mecánica mediante un campo magnético creado por escobillas y conmutadores. Son fáciles de controlar en velocidad y par, pero requieren mantenimiento frecuente debido al desgaste mecánico.

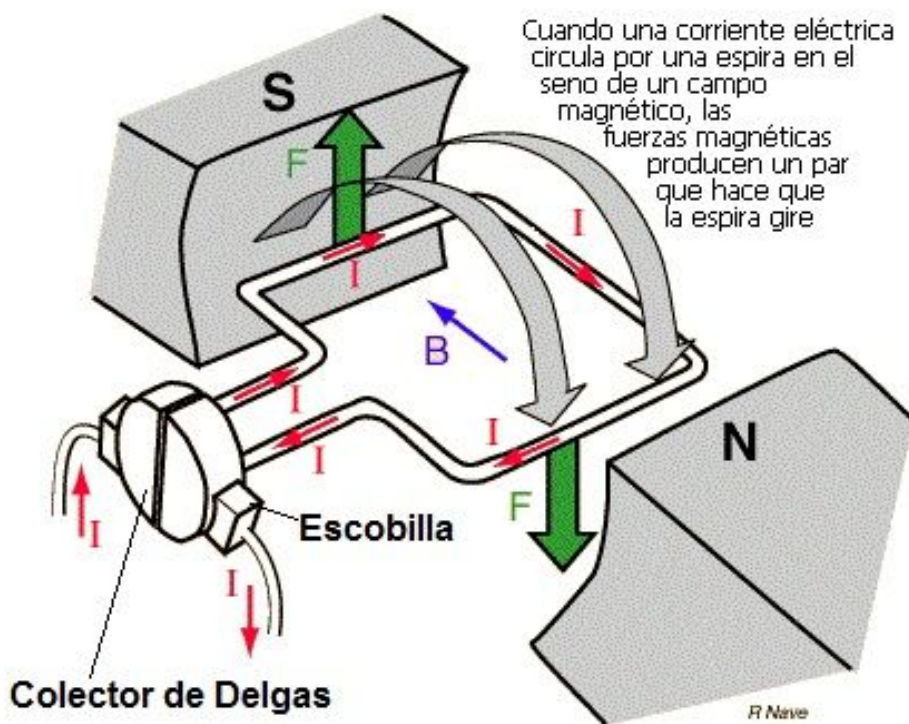


Ilustración 28 Funcionamiento del motor de escobillas DC (<https://www.areatecnologia.com>, 2025)

El par se genera por la interacción entre el campo magnético del estator y la corriente en el rotor. La velocidad de un motor DC puede estimarse como:

$$V = k \phi n$$

10 Tensión de alimentación de un motor DC

$$T = k_t I$$

11 Par de un motor DC

Donde:

- V: tensión de alimentación
- ϕ : flujo magnético

- n : velocidad (rpm)
- T : par
- I : corriente
- k : es la constante de velocidad del motor, también conocida como constante de contra-electromotriz o constante de back-EMF. Expresa cuánta tensión genera el motor por cada unidad de velocidad de giro y flujo magnético (ϕ). Su unidad típica es V/(rad/s) o V/(rpm).
- k_t : es la constante de par del motor. Representa cuántos newtons·metro (N·m) de par genera el motor por cada amperio de corriente. Su unidad es N·m/A. En un motor ideal sin pérdidas, k_t , pero en la práctica suelen diferir levemente debido a pérdidas mecánicas, resistencias internas, etc.

2.5.1.2. Motores síncronos e inducidos (AC)

Incluyen los motores de inducción (asíncronos) y los síncronos. En los motores de inducción, la corriente inducida en el rotor genera un campo magnético que interactúa con el estator.

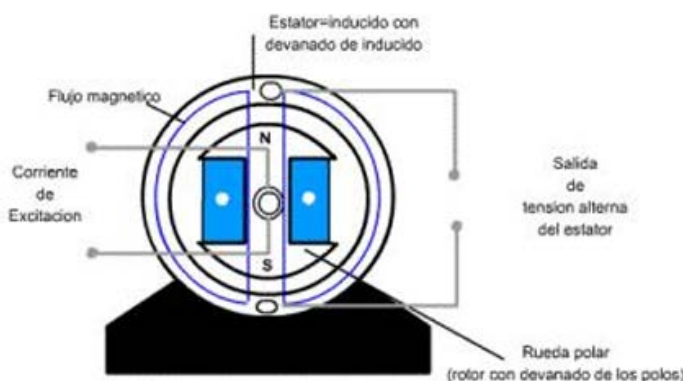


Ilustración 29 Funcionamiento de un motor síncrono (Alejandro Borja Block, 2025)

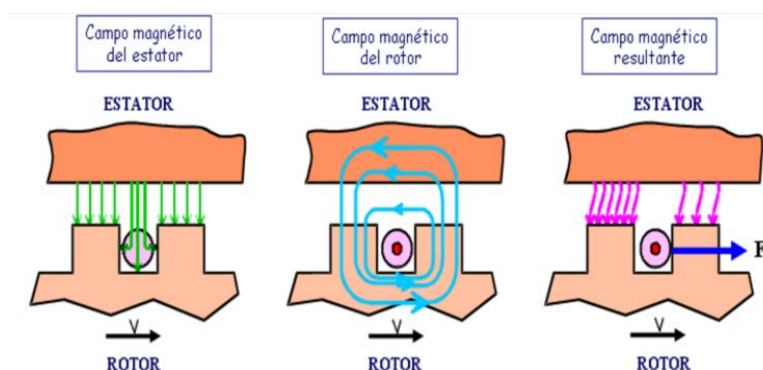


Ilustración 30 Funcionamiento del motor asíncrono (López, 2025)

Algunas de sus ventajas es que son robustos, sin imanes y tienen un bajo mantenimiento.

Frecuencia mecánica:

$$n = \frac{120f}{p}$$

12 Frecuencia mecánica de un motor síncrono

Donde:

f : frecuencia

p : número de polos

2.5.1.3. Motores de imanes permanentes

Estos motores utilizan imanes permanentes en el rotor.

- PMSM (síncronos): muy eficientes, control preciso, alto par.

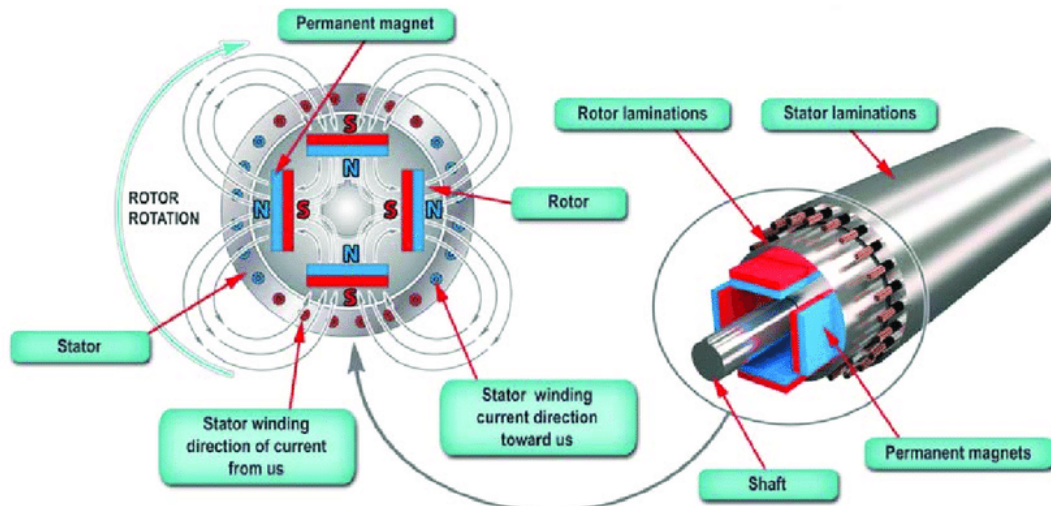


Ilustración 31 Funcionamiento de un motor de imanes permanentes (Aux Millan, 2024)

- BLDC (Brushless DC): versión conmutada electrónicamente, similar, pero con forma de onda trapezoidal.

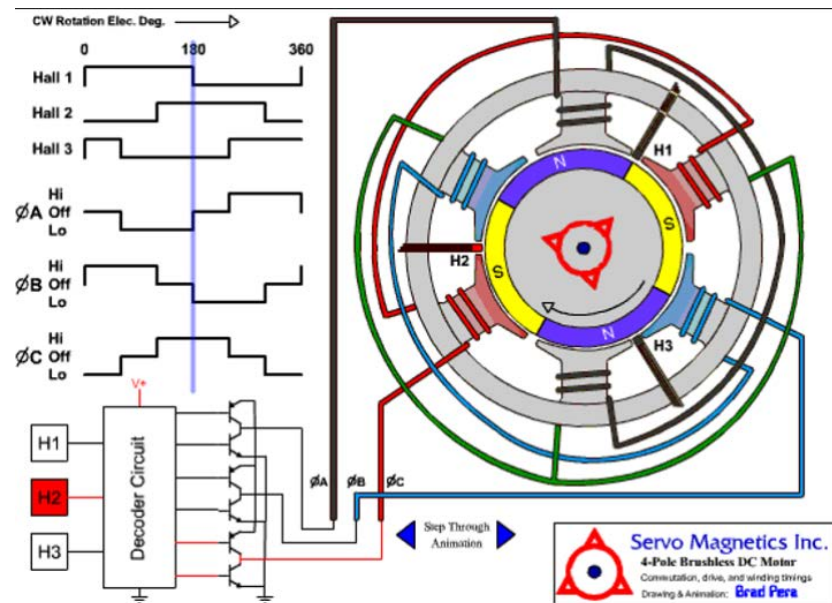


Ilustración 32 Funcionamiento y control de un motor Brushless (Electronoobs, 2025)

Ventajas:

- Alta densidad de potencia
- Mantenimiento muy bajo
- Eficiencia >90%

Funcionamiento y fórmula de par:

$$T = k_t I$$

$$P = T \omega$$

13 Potencia de un motor Brushless

Donde:

ω : velocidad angular

Tipo de Motor	Eficiencia (%)	Densidad de Par	Respuesta dinámica	Uso
DC escobillas	70-80	Media	Buena	Proyectos Básicos
BLDC	85-92	Alta	Muy Buena	Micromovilidad
PMSM	90-96	Muy alta	Excelente	Automoción
Asíncrono	80-90	Media	Media	Industria

Tabla 11 Comparación de eficiencia y potencia según el tipo de motor

2.5.2. Motor seleccionado para el diseño

El motor seleccionado es el QS 273 8000W V4 72V, tipo BLDC y de integración en rueda. Se instalarán dos unidades, una en cada rueda trasera, proporcionando tracción directa y simétrica.



Ilustración 33 Motor QS 273 8000W V4 72V (QS Motor, 2024)

Ventajas principales:

- Eliminación de transmisiones
- Menor volumen
- Fácil mantenimiento
- Par elevado ($>170 \text{ N}\cdot\text{m}$)
- Velocidad máxima limitada a 50 km/h mediante controladora

Parámetro	Valor
Tipo	BLDC Hub
Potencia nominal	8000 W
Tensión nominal	72 V
Par máximo	170 Nm
Velocidad máxima	120 km/h (regulable 30-120)
Refrigeración	Aire

Tabla 12 Parámetros QS 273 8000W V4 72V

Dado que se va a limitar la velocidad del motor, necesito calcular los datos energéticos del motor para poder seleccionar los componentes relacionados con los motores:

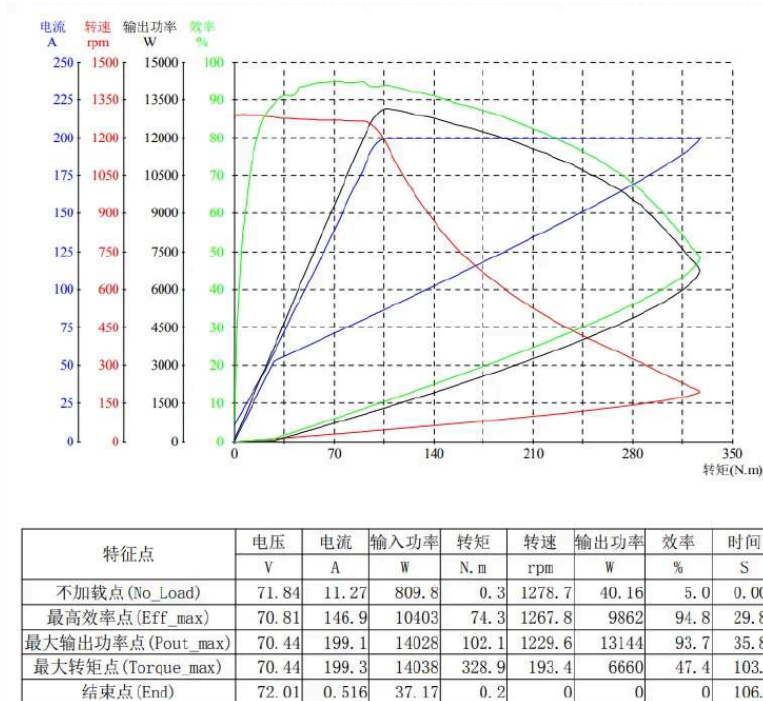


Ilustración 34 Informe de prueba (QS Motor, 2024)

1. Conversión de velocidad

Se parte de la velocidad máxima deseada:

$$v = \frac{50 \text{ km}}{h} = \frac{50 \times 1000}{3600} = 13.89 \text{ m/s}$$

2. Velocidad angular de la rueda

Con un radio de rueda de 13 pulgadas ($\approx 0.26 \text{ m}$):

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{13.89}{0.26} = 53.42 \text{ rad/s}$$

3. Estimación de la potencia mecánica a 50 km/h

Como a 120 km/h el motor entrega 8000 W, asumimos proporcionalidad lineal para estimar la potencia a 50 km/h:

$$P_{50} = 8000 \frac{50}{120} = 3333 \text{ W}$$

4. Cálculo del par necesario a 50 km/h

5.

$$T = \frac{P_{50}}{\omega} = \frac{3333}{53.42} = 62.4 \text{ Nm}$$

6. Corriente necesaria por motor

Usando una eficiencia estimada de 90 % y tensión nominal de 72 V:

$$I = \frac{P_{50}}{V\eta} = \frac{3333}{0.9 \times 72} = 51.5A$$

7. Potencia y corriente total del sistema (2 motores)

$$P_{total} = 2 \times 3333 = 6666W$$

$$I_{total} = 2 \times 51.5 = 103A$$

En este proyecto se ha optado por realizar los cálculos energéticos, de autonomía y dimensionamiento de batería utilizando únicamente parámetros eléctricos en corriente continua (DC). Esta decisión se basa en la arquitectura del sistema, donde la batería de tracción entrega energía en continua a las controladoras Sabvoton, las cuales son las encargadas de convertir internamente dicha energía en señales trifásicas PWM que alimentan los motores BLDC.

Por tanto, aunque los motores funcionan con corriente alterna trifásica generada electrónicamente, todo el consumo energético real del sistema proviene del bus de corriente continua. Las controladoras Sabvoton integran internamente la etapa inversora trifásica, de modo que el usuario no necesita calcular potencias por fase ni aplicar fórmulas de sistemas trifásicos (como $P = \sqrt{3} V I \cos\phi$), ya que los valores relevantes para dimensionar batería, cableado, fusibles y autonomía se expresan en:

- Potencia DC total: $P = V \cdot I$
- Energía acumulada y consumida en Wh o kWh
- Corriente continua de entrada al controlador (no por fase)

Solo sería necesario considerar el comportamiento trifásico si se estuviera diseñando la etapa de potencia de la propia controladora, analizando armónicos del motor o modelando pérdidas internas en las fases, lo cual queda fuera del alcance de este proyecto.

2.6. SISTEMA DE CONTROL

El correcto funcionamiento de un sistema híbrido basado en pila de combustible requiere no solo una adecuada selección de componentes, sino también una arquitectura de control que garantice su operación eficiente, segura y coordinada. En este sentido, el sistema de control constituye el “cerebro” del vehículo, encargado de gestionar la interacción entre la pila de combustible, la batería, los motores eléctricos y los periféricos auxiliares (San Martín et al., 2009).

El objetivo principal de este sistema es maximizar la eficiencia energética del conjunto, preservar la vida útil de los componentes clave —especialmente el stack del fuel cell— y asegurar una respuesta dinámica óptima ante distintas condiciones de carga y demanda. Para lograrlo, se emplean diversas unidades de control especializadas, como la controladora del fuel cell (FCU), la controladora de los motores eléctricos y un sistema de gestión energética que orquesta el reparto de energía entre las distintas fuentes (EVT, 2023).

En el caso concreto de la pila Horizon H-1000XP ya incorpora una controladora integrada que permite su gestión automática mediante comunicación RS232, humidificación activa y control de ventilación, lo que simplifica su integración en vehículos ligeros (Horizon Fuel Cell Technologies, 2024). Sin embargo, para garantizar

una sincronización adecuada entre producción, almacenamiento y demanda, es necesaria una estrategia global de control que combine tanto señales eléctricas como lógicas, y contemple modos de operación normal, arranque, parada y situaciones de emergencia (IE, 2022).

Este apartado analiza cada una de las unidades de control del sistema híbrido, detallando sus funciones, parámetros críticos y estrategias de optimización, así como su integración en un sistema de movilidad sostenible.

2.6.1. Controladora de la Fuel Cell

La controladora de la pila de combustible (Fuel Cell Controller o FCU) es el sistema encargado de regular el funcionamiento de la celda de combustible de forma segura y eficiente. En configuraciones híbridas como la planteada en este proyecto, su papel es crítico, ya que debe mantener la pila operando en condiciones óptimas para recargar la batería del sistema y, con ello, alimentar los motores eléctricos y auxiliares del vehículo.

En el caso de la pila seleccionada, la Horizon H-1000XP, la FCU está integrada en el propio stack, con funcionalidades automáticas de:

- Encendido y apagado seguro.
- Control del ventilador de refrigeración.
- Humidificación interna de la membrana.
- Protección ante condiciones anómalas (sobretensión, subvoltaje, pérdida de presión, etc.).
- Interfaz de comunicación serie mediante RS232.

Estas funciones permiten que el stack opere de manera autónoma en un entorno embarcado, sin requerir control externo activo, más allá de la gestión energética general del sistema (Horizon Fuel Cell Technologies, 2024).

Además, como herramienta de supervisión complementaria, Horizon ofrece un software de monitorización denominado ECO-Marathon Serial Port Monitor. Este programa permite al usuario:

- Visualizar en tiempo real los parámetros operativos del stack (tensión, corriente, temperatura, potencia, etc.).
- Registrar datos históricos en archivos Excel.
- Mostrar curvas temporales para análisis de comportamiento.
- Configurar el puerto de entrada, la frecuencia de muestreo y los periodos de grabación.

Este sistema no interviene en el control activo del stack, pero facilita la validación, diagnóstico y optimización durante las fases de prueba, prototipo o mantenimiento. Su uso es especialmente útil en entornos de laboratorio o competiciones como el Shell Eco-marathon (Horizon Educational, 2025).

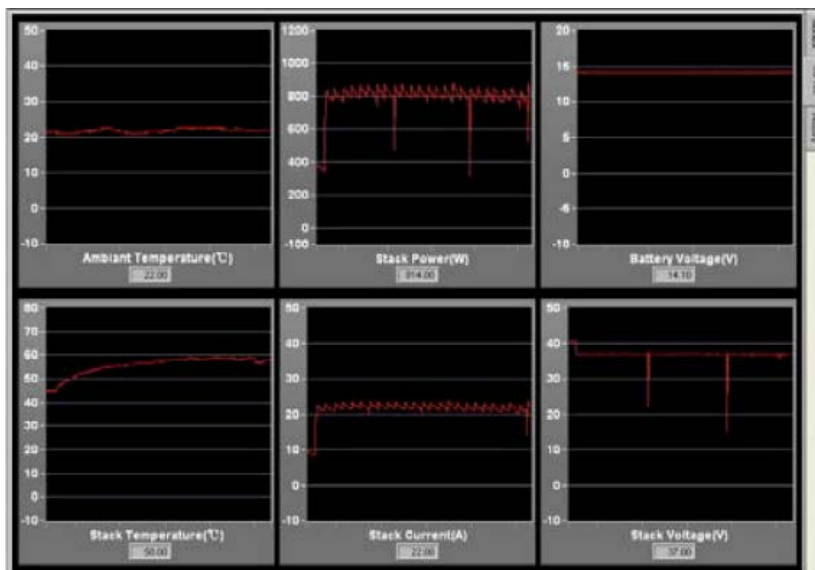


Ilustración 35 Panel de curvas de control de la FC Horizon H-1000XP (Horizon Educational, 2025)

Este diseño permite mantener la pila operando en un régimen de carga parcial (alrededor del 60–70 % de carga), donde su eficiencia es mayor y la degradación del MEA se reduce significativamente (San Martín et al., 2009).

La controladora integrada en la H-1000XP supervisa de forma continua los siguientes parámetros:

- Tensión de salida (V): ajustada según el consumo de la batería.
- Corriente de salida (A): limitada para evitar sobrecargas.
- Caudal de hidrógeno (NL/min): proporcional a la carga eléctrica solicitada.
- Temperatura del stack (°C): gestionada por un ventilador interno.
- Presión e integridad del flujo: controladas para garantizar una reacción electroquímica segura.

Adicionalmente, en caso de fallos críticos, la FCU está programada para ejecutar una parada segura, cerrando válvulas y desconectando el sistema de forma controlada.

2.6.2. Controladora de motores eléctricos

Los motores eléctricos tipo brushless (BLDC), como los empleados en este proyecto, requieren una electrónica de control que gestione la conmutación electrónica, regule el par, la velocidad y el sentido de giro. A diferencia de los motores DC con escobillas, donde la conmutación es mecánica, en los BLDC se realiza mediante transistores y requiere conocer en tiempo real la posición del rotor para activar las fases del estator en la secuencia adecuada (Del Barrio Lara, 2022).

Esta información se obtiene generalmente mediante sensores de efecto Hall, los cuales detectan el paso de los polos del rotor y generan señales digitales que permiten determinar su posición angular con una precisión suficiente para realizar la conmutación en tiempo (Carrasco Serrano, 2021).

Una controladora es imprescindible para:

- Realizar la secuencia de activación de las fases del motor en función de las señales Hall.
- Regular la velocidad mediante modulación PWM de las señales aplicadas a los transistores de conmutación (Del Barrio Lara, 2022).
- Gestionar la corriente máxima para evitar sobrecargas.
- Implementar protecciones electrónicas (térmicas, sobrecorriente, fallo sensor).
- Coordinarse con el sistema general de gestión energética y la batería (Boldea & Nasar, 2010)

2.6.2.1. Principales funciones

Las funciones clave de una controladora BLDC son:

- Detección de posición mediante sensores Hall o, alternativamente, sensorless por detección de Back (Carrasco Serrano, 2021)
- Control de velocidad por PWM (Pulse Width Modulation), modulando el ciclo útil para ajustar la velocidad angular (Del Barrio Lara, 2022).
- Conmutación electrónica de fases (normalmente trifásicas) mediante etapas de potencia tipo puente en H.
- Protección térmica y eléctrica.
- Comunicación y configuración vía UART/CAN según el modelo (por ejemplo, en controladoras tipo Kelly o Sabvoton).
- Integración en red para trabajo conjunto de dos motores, como es el caso de este proyecto.

En el caso particular de este diseño, la controladora debe ser compatible con los 72 V nominales del sistema, admitir sensores Hall, permitir configuración por software, y ser capaz de gestionar una potencia mínima de 3 kW por motor, considerando dos unidades en paralelo.

2.6.3. Configuración de la controladora

En sistemas de tracción dual como el presente, el comportamiento de los motores eléctricos depende directamente de la configuración de sus respectivas controladoras. Estas deben programarse para responder de forma coordinada y adaptada a las características de diseño: potencia, velocidad, par, aceleración, y seguridad.

2.6.3.1. Limitación de velocidad y perfil de Par

Para limitar la velocidad máxima a 50 km/h, la controladora debe establecer un tope tanto en la frecuencia de conmutación como en la tensión efectiva entregada al motor. Esta limitación puede implementarse de dos formas:

- Mediante el parámetro "Max ERPM" (Revoluciones por minuto eléctricas) en controladoras como VESC.



Ilustración 36 Controladora VESC HD75 (VESC, 2025)

- Mediante el parámetro "Max Speed" en controladoras Sabvoton/Kelly, asociado a la constante Kv del motor (Del Barrio Lara, 2022).



Ilustración 37 Controladora Kelly KLS7212S (Kelly Controller, 2025)



Ilustración 38 Controladora Sabvoton SVMC72150 (Sabvoton, 2025)

El perfil de par se configura para que se mantenga plano hasta una velocidad de crucero de 35–40 km/h, y a partir de ahí disminuya progresivamente, evitando picos de consumo en altas velocidades (Carrasco Serrano, 2021).

2.6.3.2. Control de arranque y aceleración progresiva

Para un comportamiento suave y seguro, se debe:

- Activar el control de aceleración por rampa: se define un tiempo mínimo para pasar de 0 a potencia nominal (por ejemplo, 3–5 s).
- Usar modo de arranque sensorizado (con sensores Hall) para evitar tirones y mejorar la eficiencia.
- Incluir retardo inicial si la batería no ha alcanzado un voltaje mínimo, evitando arranques con carga parcial.

Este enfoque es habitual en vehículos eléctricos de reparto y mejora tanto la experiencia de conducción como la durabilidad mecánica y térmica del motor (Carrasco Serrano, 2021) .

2.6.3.3. Distribución de par y control Dual

Para el funcionamiento con dos motores en paralelo, se pueden considerar dos estrategias:

1. Controladoras independientes configuradas idénticamente y alimentadas desde un mismo bus de batería.
2. Una controladora maestra y otra esclava, en el caso de modelos que admitan sincronización.

La primera opción es más sencilla y robusta si ambos motores están montados en paralelo (una rueda a cada lado del eje trasero). Es esencial asegurarse de que ambas controladoras:

- Tienen los mismos parámetros de aceleración, par y límite de corriente.
- Reciben la misma señal de control (ej. desde el acelerador o microcontrolador central).
- Están protegidas de interferencias cruzadas en la señal de Hall.

2.6.3.4. Protección y Seguridad

Las controladoras deben configurarse con límites máximos de:

- Corriente pico y continua.
- Temperatura (típicamente entre 80–100 °C de corte).
- Subvoltaje y sobrevoltaje del bus de alimentación.

También es recomendable activar las funciones de regeneración limitada al frenar, si se desea recuperar energía y no comprometer el sistema (Mohammed et al., 2020).

2.6.3.5. Comparativa

En esta sección se comparan tres modelos de controladoras electrónicas que permiten gestionar el funcionamiento de motores brushless de corriente continua (BLDC) en aplicaciones de movilidad eléctrica: Kelly KLS7212S, Sabvoton SVMC72150 y VESC HD75/100. Estas unidades han sido seleccionadas por su compatibilidad con tensiones de 72 V, su capacidad de corriente adecuada para los motores QS273 limitados, y su versatilidad de configuración.

Se consideran parámetros clave como la corriente continua y pico admisible, la compatibilidad con sensores Hall, la posibilidad de frenado regenerativo, la capacidad de configuración avanzada y la comunicación entre dispositivos. Esta comparativa sirve como base técnica para justificar la elección final de la controladora en el sistema híbrido diseñado.

Característica	Kelly KLS7212S	Sabvoton SVMC72150	VESC HD75/100
Compatibilidad con BLDC sensorizado	☑ Sí	☑ Sí	☑ Sí (FOC y sensorizado/sensorless)
Voltaje nominal	72 V	72 V	Hasta 100 V
Corriente continua	60 A	80–90 A	75–100 A (según modelo)
Corriente pico	120 A	150 A	150 A+ (corto plazo)
Configuración por software	Vía USB (software Kelly)	USB + app Android	VESC Tool (avanzado)
Frenado regenerativo	✗ Limitado (algunos modelos)	☑ Sí, configurable	☑ Sí, regenerativo avanzado
Interfaz de control	Acelerador analógico	Acelerador analógico + app opcional	Analógico / UART / CAN / PWM
Comunicación entre controladoras	✗ No	✗ No (aunque sincronizables)	☑ Sí, vía CAN Bus
Tipo de usuario ideal	Fácil de usar, plug & play	Flexible, buena para proyectos eléctricos	Muy técnica, control fino tipo competición
Precio estimado	150–200 €	200–250 €	300–450 €
Dimensiones	Compacta (160×90×50 mm)	Media (170×100×55 mm)	Compacta (HD75) / Media (HD100)
Documentación y comunidad	Moderada	Buena	Excelente (open-source, foros, GitHub)

Tabla 13 Comparativa de controladoras para el Motor

La controladora Sabvoton SVMC72150 ha sido seleccionada como componente principal para el control de los motores eléctricos QS273 por su excelente equilibrio entre prestaciones técnicas, configurabilidad avanzada, compatibilidad con motores BLDC de alta potencia y precio competitivo.

Este modelo admite una tensión nominal de 72 V y una corriente continua de hasta 90 A, suficiente para cubrir con holgura los ~60 A por motor estimados para este proyecto tras la limitación electrónica impuesta a 50 km/h. Además, permite una corriente pico de hasta 150 A, lo que proporciona margen térmico y evita saturación en aceleraciones o rampas de carga (Sabvoton, 2025).

Una de las principales ventajas frente a alternativas como Kelly o VESC es que Sabvoton integra de forma nativa el frenado regenerativo configurable, lo cual se considera una mejora futura dentro del sistema híbrido.

Esta función puede ser activada y ajustada por el usuario a través del software Sabvoton Parameter Designer o una aplicación móvil Android, simplificando la fase de pruebas sin necesidad de implementar una red de comunicación CAN.

Otro argumento clave es su integración directa con los motores QS273, ampliamente documentada y validada por la comunidad técnica. Esto asegura compatibilidad en conectores, señales Hall, sensores de temperatura y algoritmos de arranque, reduciendo el esfuerzo de validación eléctrica (QS Motor, 2024).

Finalmente, en comparación con otras opciones como Kelly (más limitadas en prestaciones) o VESC (más costosas y técnicas), la Sabvoton representa una solución profesional adaptada a prototipos industriales con tracción dual, velocidad limitada y requerimientos energéticos intermedios.

2.6.3.6. Configuración de la controladora

El objetivo es que ambos motores trabajen de forma sincronizada, limitando su velocidad a 50 km/h, y operen en la zona de máxima eficiencia, reduciendo el consumo de corriente sin comprometer el par necesario para tracción urbana. Para ello, se configuran los siguientes parámetros clave en cada controladora:

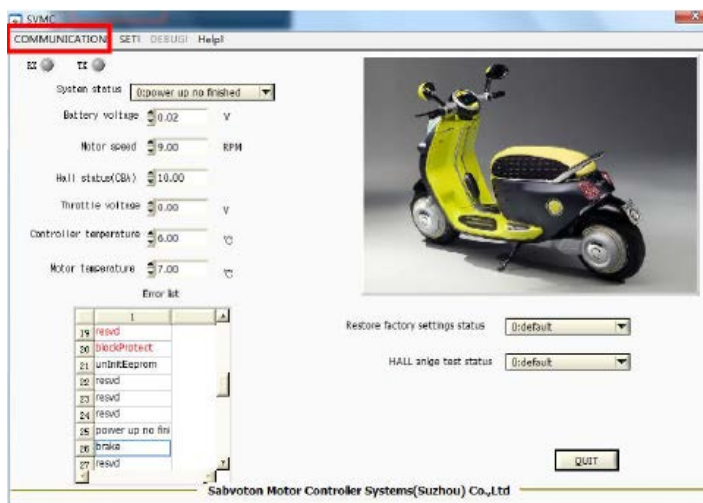


Ilustración 39 Interfaz del Software para PC (Sabvoton, 2025)

- Battery Current Limit: 55–60 A (corriente continua real según cálculo).
- Phase Current Limit: 80–100 A (para cubrir picos de arranque).
- Speed Limit: limitado a 50 km/h, ajustando el parámetro de ERPM en función del Kv del motor y del diámetro de rueda (aprox. 13").
- Throttle Configuration: modo lineal, entrada analógica de 0–5 V.
- Start Mode: sensorizado con suavizado de arranque.
- Acceleration Time: configuración de rampas progresivas (~3–5 s).
- Brake Regen (opcional, futura mejora): por ahora desactivado, pero con posibilidad de activación y ajuste de intensidad.

2.6.3.6.1. Sincronización entre controladoras

Ambas unidades Sabvoton se configuran con parámetros idénticos y comparten la misma señal de acelerador, lo que garantiza un reparto simétrico del par y evita comportamientos asincrónicos.

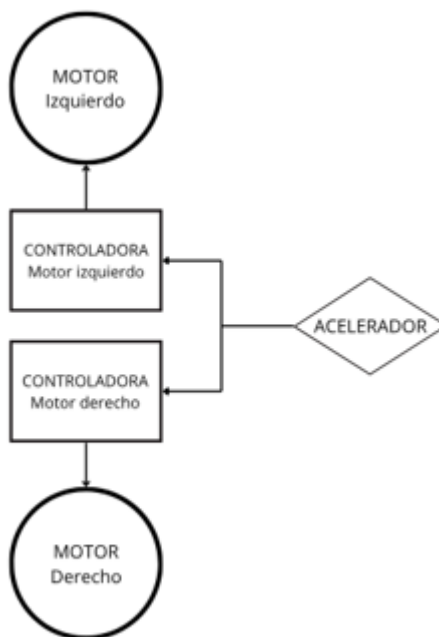


Ilustración 40 Controladoras emparejadas mediante la misma señal de acelerador

Esta estrategia, comúnmente usada en vehículos de tracción dual, es suficiente para mantener ambos motores trabajando en paralelo sin necesidad de comunicación CAN o control maestro-esclavo.

2.7. CONCLUSIÓN DEL MARCO TEÓRICO

2.7.1. *Síntesis de los elementos clave del sistema*

A lo largo del marco teórico se han analizado en detalle todos los componentes fundamentales del sistema de hibridación eléctrica con hidrógeno. En conjunto, conforman una arquitectura energética innovadora basada en:

- Hidrógeno como vector energético: Se ha justificado su elección frente a otras opciones, destacando el potencial del hidrógeno verde.
- Pila de combustible tipo PEMFC: Tecnología adecuada para movilidad urbana ligera por su eficiencia, respuesta rápida y emisiones nulas.
 - He escogido la Fuel Cell H-1000XP de Horizon Educational, que proveen todo el sistema que necesita para funcionar:
 - Controladora para la FC
 - DCDC para la conexión de la controladora y todos los sistemas secundarios del vehículo.
 - Batería de 12V de arranque
 - Sensor de hidrógeno
 - Válvula de suministro y válvula de purga de H₂
 - Dos sensores PT1000 para la temperatura ambiente y para la temperatura del Stack
 - Seta de emergencia
- Sistema de almacenamiento eléctrico con baterías LiFePO₄: Buena estabilidad térmica, seguridad y número de ciclos elevado.
- Convertidor DC-DC boost: Necesario para compatibilizar las tensiones de la pila y la batería, optimizando el flujo de energía.
- Dos motores eléctricos BLDC tipo QS273: Alta eficiencia, sin transmisión mecánica, y con gran densidad de par.
- Controladoras electrónicas (Sabvoton): Capaces de gestionar el rendimiento de cada motor, con configuraciones adaptadas al entorno urbano.

Cada subsistema ha sido dimensionado considerando los requerimientos energéticos del vehículo, las limitaciones estructurales del chasis, la autonomía deseada y el objetivo de mantener un sistema eficiente y sostenible.

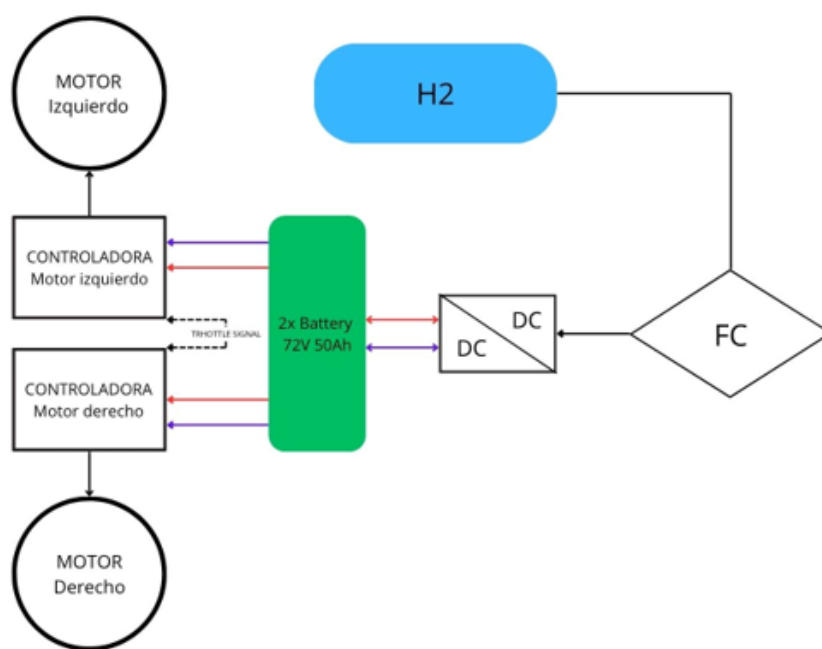


Ilustración 41 Diagrama simple del sistema Híbrido

2.7.2. Relevancia del diseño híbrido para la movilidad sostenible

El enfoque propuesto responde a una necesidad creciente de soluciones energéticas limpias en el contexto de la logística urbana sostenible. El diseño híbrido desarrollado:

- Amplía la autonomía operativa del vehículo sin recurrir a motores térmicos.
- Reduce el tiempo de inactividad por carga eléctrica gracias al aporte continuo de la pila de combustible.
- Elimina las emisiones locales de CO₂ y NO_x, contribuyendo a mejorar la calidad del aire en entornos urbanos.
- Permite utilizar hidrógeno verde, lo cual lo convierte en una solución verdaderamente neutra en carbono.
- Es escalable y replicable en otros vehículos ligeros de reparto o transporte público.

Este tipo de configuración, basada en la sinergia entre electrificación e hidrógeno, anticipa el futuro de los Vehículos Eléctricos de Rango Extendido (EREV) libres de combustibles fósiles.

3. DESARROLLO

Una vez expuestos en el marco teórico los fundamentos y componentes del sistema de hibridación propuesto, el presente capítulo tiene como objetivo evaluar la viabilidad energética del diseño mediante el desarrollo de un balance energético completo. Esta evaluación cuantitativa permitirá comprobar si la configuración seleccionada cumple con los requisitos operativos del vehículo, especialmente en cuanto a autonomía, eficiencia y rendimiento.

El sistema híbrido planteado combina una pila de combustible de hidrógeno con una batería de alta capacidad en una topología de tipo "Vehículo Eléctrico de Rango Extendido" (EREV). En esta arquitectura, la pila de combustible actúa como generador eléctrico a bordo, mientras que la batería se encarga de alimentar los motores eléctricos y todos los sistemas auxiliares del vehículo. Este enfoque permite aprovechar la alta densidad energética del hidrógeno sin depender de motores térmicos, garantizando cero emisiones locales y una mayor autonomía respecto a un sistema puramente eléctrico.

Para lograr un análisis realista, se desglosarán los consumos energéticos individuales de cada subsistema, incluyendo:

- La pila de combustible y su consumo de hidrógeno, eficiencia y potencia neta entregada.
- El convertidor DC-DC encargado de adaptar la salida de la pila a la tensión de carga de la batería.
- Los motores eléctricos y su consumo estimado a velocidad limitada a 50 km/h.
- Las controladoras electrónicas y los sistemas auxiliares (pantalla, luces, acelerador, freno, etc.).
- Las baterías seleccionadas y su capacidad útil real teniendo en cuenta su profundidad de descarga (DoD).

A partir de estos datos se calculará la energía total disponible en el sistema y se estimará la autonomía del vehículo, tanto en modo exclusivamente eléctrico como en modo extendido con aportación de la pila de combustible. También se realizarán estimaciones del consumo energético por kilómetro (Wh/km), lo que permitirá validar la capacidad del vehículo para operar de forma eficaz en entornos urbanos.

El análisis se apoyará en datos reales obtenidos de hojas de características, ensayos y documentación técnica de los fabricantes, así como en aproximaciones fundamentadas en condiciones típicas de operación. Todo ello contribuirá a comprobar si el sistema híbrido diseñado es funcional, eficiente y coherente con los objetivos planteados en el presente Trabajo de Fin de Grado.

3.1. POTENCIA Y CONSUMO DEL SISTEMA

3.1.1. Potencia eléctrica de la Fuel Cell

La pila de combustible constituye el núcleo generador del sistema híbrido. En este diseño se emplea la Horizon H-1000XP, una celda PEM de tipo aire-hidrógeno, que incorpora un ultracondensador para mejorar la respuesta dinámica y permitir entrega de potencia pico de hasta 1.2 kW durante periodos cortos. Este tipo de configuración está optimizada para aplicaciones de movilidad, donde las demandas de potencia no son constantes y pueden incluir picos puntuales (arranques, pendientes, aceleraciones).

3.1.1.1. Parámetros de la Fuel Cell

La pila está compuesta por 50 celdas conectadas en serie, capaces de suministrar una tensión variable entre 25 V y 48 V, dependiendo de la carga. Su corriente nominal alcanza los 33.5 A, lo que la sitúa en el rango adecuado para alimentar sistemas intermedios y actuar como generador de energía embarcado (Horizon Fuel Cell Technologies, 2013).

Parámetro	Valor
Tensión nominal de salida	30–48 V DC
Corriente nominal	hasta 33.5 A
Potencia nominal	1000 W
Potencia pico	1200 W (con ultracapacitor)
Consumo de hidrógeno @1000W	12.5 SLPM
Consumo de hidrógeno @600W	8–9 SLPM aprox.
Eficiencia eléctrica típica	50–60%
Peso del sistema	~6.8 kg
Presión operativa H ₂	0.5 bar
Tipo	PEM, refrigerada por aire
Humidificación	Autohumidificada
Comunicación	RS232 (monitorización de tensión, corriente, temperatura y potencia)

Tabla 14 Parámetros H-1000XP (Horizon Fuel Cell Technologies, 2013)

3.1.1.2. Consumo de los sistemas auxiliares

Un aspecto crítico que a menudo se subestima en los diseños teóricos es el consumo eléctrico asociado al funcionamiento interno del sistema de la pila, que incluye ventiladores, electroválvulas, sensores y la propia electrónica de control. Este consumo

no es aprovechable para alimentar el sistema de tracción, pero debe ser considerado en el balance energético global.

Además, como se ha integrado un convertidor DC-DC de 48 V a 12 V alimentado desde la salida de la pila, todos los periféricos auxiliares, incluyendo el sensor de hidrógeno, se alimentan directamente del sistema de la pila sin necesidad de una batería adicional para ese fin, aunque sí se necesitará una batería de arranque del sistema que cargará el propio DC/DC que alimenta la controladora. El consumo estimado del sensor de hidrógeno ($\sim 2-3$ W) se añade así al total de consumos auxiliares.

A continuación, se resumen los principales elementos conectados a la controladora de la pila:

Componente	Estimación de consumo	Observaciones
Blowers (2 unidades)	~ 12 W en total	Imprescindibles para refrigeración y oxidante
Electroválvulas (suministro y purga H_2)	~ 6 W en total	Operación intermitente, pero consumo continuo
Sensor de temperatura y LCD	$\sim 3-5$ W	Para control térmico y visualización del estado
Controladora interna + sensor H_2	$\sim 7-8$ W	Incluye sistema de protección, arranque, RS232
Consumo auxiliar total estimado	28-30 W	Reducción directa de potencia útil neta

Tabla 15 Consumos de los subsistemas de la Fuel Cell (Horizon Fuel Cell Technologies, 2013)

Este consumo implica que, de los 1000 W generados por la pila, únicamente unos 970-972 W están disponibles como salida neta para cargar la batería.

En aplicaciones reales esto reduce la eficiencia global del sistema si no se considera correctamente en el diseño.

3.1.1.3. Eficiencia energética de la Fuel Cell

La eficiencia eléctrica de la pila puede calcularse comparando la energía eléctrica generada con la energía química contenida en el hidrógeno consumido. Según el manual del fabricante, se puede considerar un valor medio de:

- 55% de eficiencia neta, lo cual se alinea con los valores típicos de pilas PEM de baja temperatura (Barbir, 2013).
- El poder calorífico inferior (PCI) del hidrógeno es de 33.3 kWh/kg.

Usando la equivalencia del fabricante ($1 \text{ SLPM} \approx 178.36 \text{ W}$), se verifica que 12,5 SLPM equivalen a unos 2,23 kW térmicos. Por tanto, para una salida de 1000 W eléctricos:

$$\eta = \frac{P_{el\acute{e}ctrica}}{P_{t\acute{e}rmica}} = \frac{1000}{2230} \approx 44.8\%$$

14 Rendimiento de la Fuel Cell

Para calcular la $P_{t\acute{e}rmica}$ del hidrógeno consumido, hay que tener en cuenta que representa la energía química disponible por unidad de tiempo en función del caudal de hidrógeno que entra a la pila.

Cuando se usa el dato del fabricante:

$$1SLP \Rightarrow 178.36W$$

Lo que quiere decir, que si se consume 1L/min de H_2 (medido en cn.), se está introduciendo 178,36W de potencia química. Este valor es una constante calculada a partir del poder calorífico inferior (PCI) del H_2 :

$$PCI_{H_2} = 33.3 \frac{kWh}{kg} = 119880 \frac{J}{g} = 33.3 \times 3600 = 119880 \frac{J}{g}$$

15 Poder Calorífico Inferior del H_2

Sabemos que 1 mol de H_2 (2 g) ocupa 22.4 L a condiciones normales. Entonces:

$$\begin{aligned} \frac{1}{22.4} \frac{mol}{L} &\Rightarrow \frac{2}{22.4} = 0.0893 \frac{g}{L} \\ 0.0893 \frac{g}{L} \times 119880 \frac{J}{g} &= 10695 \frac{J}{L} \\ \frac{10695 \frac{J}{L}}{60 \frac{s}{min}} &\Rightarrow 178.36W \end{aligned}$$

Por tanto:

$$P_{t\acute{e}rmica} = 178.36 \frac{W}{L/min} Q_{H_2}$$

16 Potencia térmica de la Fuel Cell

No obstante, en este proyecto se asume un funcionamiento de la pila regulado cerca de su punto óptimo de eficiencia, correspondiente a una carga de aproximadamente 800–820 W, donde el fabricante reporta una eficiencia del 39%. Este valor será utilizado en adelante para estimar con mayor precisión el balance energético del sistema.

Potencia de salida (W)	Consumo H ₂ (SLPM)	Energía térmica (W)	Eficiencia estimada
211.5 W	3.59	640	~33%
408 W	6.07	1082	~38%
604.5 W	8.71	1553	~39%
811.8 W	11.69	2083	~39%
1015 W	15.0	2675	~38%

Tabla 16 Consumo estimado de H₂ según carga

3.1.1.4. Energía útil del sistema de almacenamiento de hidrógeno

En este proyecto se ha seleccionado un cilindro de hidrógeno tipo 4 de 13 L de volumen de agua, cargado a 310 bar, con una capacidad de 274 g de hidrógeno (SpA, 2021).

$$E_{H_2} = 0.274 \text{ kg} \cdot 33.3 \text{ kWh/kg} = 9.13 \text{ kWh}$$

17 Energía total almacenada

$$E_{\text{eléctrica útil}} = E_{H_2} \eta_{\text{óptimo FC}} = 9.13 \times 0.39 = 3.56 \text{ kWh}$$

18 Energía eléctrica útil almacenada

3.1.1.5. Ultracondensador

El ultracondensador (o supercondensador) incorporado actúa como buffer de energía entre la pila y la carga:

- Se carga lentamente desde la salida de la pila cuando la demanda es baja.
- Se descarga rápidamente cuando hay picos de demanda de potencia.

Esto permite mantener a la pila funcionando en su punto de máxima eficiencia, reduciendo oscilaciones de carga y evitando sobre exigencia en transitorios. Además, al permitir la entrega de picos de hasta 1.2 kW, mejora la capacidad de respuesta sin comprometer la vida útil del stack.

Para analizar la energía entregada en picos de demanda y el comportamiento dinámico:

- Energía almacenada:

$$E = \frac{1}{2} \frac{CV^2}{P}$$

19 Energía almacenada en el Condensador

- E: Energía almacenada [J].
- C: Capacitancia del condensador [F].

- P: Potencia demandada por la carga durante el pico [W].
- Tiempo de descarga a potencia constante:

$$t = \frac{E}{P} = \frac{1}{2} \cdot \frac{CV^2}{P}$$

20 Tiempo de descarga del supercondensador

- t: Tiempo de descarga aproximado [s].
- P: Potencia demandada por la carga durante el pico [W].
- Corriente de descarga:

$$I = C \cdot \frac{dV}{dt}$$

21 Corriente de descarga del supercondensador

- I: Corriente instantánea de descarga [A].
- dV/dt: Velocidad de cambio de tensión durante la descarga [V/s].
- C: Capacitancia [F].

Estas expresiones permiten estimar cuánta energía puede entregar el sistema en respuesta rápida y durante cuánto tiempo. Con los datos del supercondensador del sistema:

$$C = 1.25F \text{ y } V = 48V$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot 1.25 \cdot 48^2 = 1440 J$$

Si hay un pico de 1.2kW:

$$t = \frac{1440}{1200} = 1.2 \text{ segundos}$$

Quiere decir que el supercondensador puede mantener una entrega de 1.2kW durante 1.2s, lo que es ideal para absorber picos sin sobrecargar la pila.

3.1.2. Motores eléctricos (2x QS273 V4 8000W)

Para la tracción del vehículo híbrido se ha optado por el uso de dos motores brushless tipo QS273, uno en cada rueda trasera, trabajando en paralelo. Estos motores sin escobillas están diseñados para aplicaciones de movilidad eléctrica de alta potencia como scooters, motocicletas o vehículos de reparto ligero, y se caracterizan por su alta eficiencia, par elevado y mantenimiento nulo al no incorporar elementos mecánicos de fricción internos (QS Motor, 2024).

3.1.2.1. Características del motor

A continuación, se muestran los parámetros más relevantes de cada motor según especificaciones del fabricante QS Motor:

Parámetro	Valor
Tipo de motor	BLDC de imanes permanentes
Potencia nominal	8000 W
Tensión nominal	72 V
Corriente nominal	~60 A
Corriente pico	hasta 150 A
Par máximo	>160 Nm
Velocidad nominal	~450 rpm (según bobinado)
Velocidad máxima (sin limitación)	>100 km/h
Eficiencia pico	~88–92%
Refrigeración	Aire
Masa aproximada	~16–18 kg

Tabla 17 Parámetros generales del motor

Estos motores se controlan mediante controladoras tipo Sabvoton y están diseñados para funcionar en vehículos eléctricos de hasta 120 km/h. No obstante, en este diseño se limitarán electrónicamente a una velocidad máxima de 50 km/h, más adecuada para un entorno urbano de reparto.

3.1.2.2. Configuración del sistema de tracción

El sistema emplea dos motores montados de forma independiente en cada rueda trasera. Esta configuración permite prescindir de transmisión mecánica y facilita el reparto de par y la regeneración.

- Número de motores: 2.
- Disposición: Uno por rueda trasera.
- Potencia combinada máxima teórica:

$$P_{max} = 2 \times 8000W = 16kW$$

- Tensión de alimentación: 72 V.
- Velocidad máxima limitada: 50 km/h, mediante software.

3.1.2.3. Estimación del consumo del sistema de tracción

Para representar una condición realista, se evalúa el consumo a velocidad de crucero limitada (50 km/h), que corresponde aproximadamente al 40–45% de su régimen completo.

- Potencia media por motor limitado a 50km/h:

$$P_{media\ motor} \approx 3300\ W$$

- Potencia total combinada:

$$P_{total} \approx 2 \cdot 3300 = 6600\ W$$

- Corriente combinada estimada (ideal):

$$I = \frac{P}{V} = \frac{6600}{72} \approx 91.7A$$

La eficiencia típica de estos motores en esta condición ronda el 90%. Por tanto, la potencia absorbida real desde el sistema eléctrico será mayor:

$$P_{eléctrica} = \frac{P_{mecánica}}{\eta} = \frac{6600}{0.90} \approx 7333\ W$$

22 Potencia eléctrica de los motores según su eficiencia

Luego, la corriente absorbida real:

$$I_{real} = \frac{7333}{72} \approx 102A$$

23 Corriente real de los motores absorbida por el sistema eléctrico

Esto implica una pérdida de aproximadamente 733 W por calor en los dos motores.

3.1.2.4. Pérdidas eléctricas adicionales

- Caída de tensión en cables:

Suponiendo cables de 1m por motor (2m total)

$$R = 2 \, m \cdot 0.0015 \frac{\Omega}{m} = 0.003 \, \Omega$$

24 Resistencia eléctrica de los cables del motor

$$P_{cable} = I^2 R = 102^2 \cdot 0.003 \approx 31.21 \, W \approx 32 \, W$$

25 Pérdidas eléctricas en los cables del motor

- Las pérdidas en conexiones y bornes se estiman entre un 0.5-1% adicionales:
~70W

Es decir, la suma de todas las pérdidas del sistema de tracción (motores, cables, bornes) ronda los 835 W, lo que representa aproximadamente un 11.38% de la potencia mecánica útil (~7333 W absorbidos para 6600 W útiles).

3.1.2.5. Cálculo del Par motor a velocidad limitada

Para estimar el par entregado por cada motor a 50km/h, se aplica la relación entre potencia, velocidad angular y par.

DIMENSIONES DEL NEUMÁTICO 130/60 R13

- Ancho: 130mm
- Perfil: 60% del ancho:

$$h = 130 \cdot 0.60 = 78 \, mm$$

- Diámetro de la lanta:

$$D_{lanta} = 13 \cdot 25.4 = 330.2 \, mm$$

- Diámetro total del neumático:

$$D_{total} = 330.2 + 2 \cdot 78 = 486.2 \, mm = 0.486 \, m$$

- Circunferencia:

$$c = \pi D = \pi \cdot 0.486 = 1.526 \, m$$

VELOCIDAD LINEAL 50km/h

$$v = 50 \cdot \frac{1000}{3600} = 13.89 \, m/s$$

REVOLUCIONES POR MINUTO (RPM)

$$RPS = \frac{v}{c} = \frac{13.89}{1.526} \approx 9.1 \Rightarrow RPM = RPM = RPS \cdot 60 = 546$$

VELOCIDAD ANGULAR:

$$\omega = \frac{2\pi 546}{60} \approx 57.2 \text{ rad/s}$$

POTENCIA MECÁNICA POR MOTOR

$$P = 3300 \text{ W}$$

PAR ENTREGADO POR MOTOR

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{3300}{57.2} \approx 57.7 \text{ Nm}$$

PAR TOTAL DEL SISTEMA DE TRCCIÓN

$$T_{total} = 2 \cdot 57.7 = 115.4 \text{ Nm}$$

3.1.3. Convertidor DC-DC Boost (Epic Power)

En el sistema híbrido propuesto, la pila de combustible opera con una tensión de salida variable entre 25 y 48 V, mientras que el sistema de baterías y tracción trabaja a 72 V. Para compatibilizar ambos niveles de tensión se requiere un convertidor DC-DC elevador (boost). Este convertidor tiene una función fundamental: permitir que la pila de combustible cargue la batería principal de tracción con la máxima eficiencia posible.

Además, se utiliza un segundo convertidor buck (48 V a 12 V) para alimentar los periféricos de baja tensión (sensor de hidrógeno, válvulas, ventiladores, sistema de control, etc.) y para recargar la batería auxiliar de arranque de 12 V.

3.1.3.1. Selección del DCDC

Se ha elegido un modelo personalizable del fabricante Epic Power, empresa especializada en convertidores bidireccionales de alta eficiencia para sistemas de energía distribuida. Su gama eDCU permite configurar los parámetros de entrada y salida para adaptarlos al sistema propuesto.



Ilustración 42 Convertidor personalizable de Epic Power (Convertidores DCDC - Epic Power Converters, 2025)

Parámetro	Valor
Tensión de entrada	25–48 V
Tensión de salida	72 V regulados
Potencia nominal	1000 W
Eficiencia	≥ 94%
Tipo de carga	Batería Li-ion o LiFePO ₄
Protección	Sobretensión, sobrettemperatura, cortocircuito

Tabla 18 Parámetros del convertidor charger de Epic Power

3.1.3.2. Cálculos eléctricos de operación

Teniendo en cuenta que la Fuel Cell trabaja de forma constante en su punto óptimo de rendimiento:

- Potencia útil que entra desde la Fuel Cell:

$$P_{in} = 800W$$

- Eficiencia del convertidor:

$$\eta = 94\%$$

- Potencia entregada a la batería:

$$P_{out} = 800 \cdot 0.94 = 752 W$$

- Corriente de carga a 72V

$$I = \frac{752}{72} \approx 10.5A$$

3.1.3.3. Pérdidas térmicas y disipación

El convertidor disipa parte de la energía en forma de calor. Las pérdidas térmicas se estiman como:

$$P_{\text{Pérdidas}} = 800 - 752 = 48 \text{ W}$$

Para operar sin ventilación forzada, el disipador debe garantizar que el convertidor no supere una temperatura de 80 °C, partiendo de una temperatura ambiente de 25 °C.

- ΔT permisible: 55 °C
- Resistencia térmica requerida del disipador:

$$R_{th} = \frac{55}{48} = 1.15^\circ\text{C/W}$$

26 Resistencia térmica del disipador

Esto implica el uso de un disipador de aluminio de gran superficie o bien ventilado, con una resistencia térmica $\leq 1.0^\circ\text{C/W}$ para mayor margen de seguridad.

3.1.4. Controladoras Sabvoton SVMC72150

En este sistema de tracción se utilizan dos controladoras Sabvoton SVMC 72150 (una por motor), diseñadas para regular motores brushless de hasta 150 A de corriente pico. Se trata de controladoras sin sensores (FOC/Sinewave) programables por USB o Bluetooth, ampliamente empleadas en sistemas de movilidad eléctrica de media potencia.

Parámetro	Valor
Tensión nominal de trabajo	72 V
Corriente nominal	60–80 A
Corriente pico (programable)	hasta 150 A
Potencia máxima	~10.8 kW
Eficiencia típica	97–98%
Consumo auxiliar (lógica y sensores)	~2–4 W
Comunicación	UART / CAN / Bluetooth
Funciones	control de par, control de velocidad, frenada regenerativa, protección térmica, etc.

Tabla 19 Parámetros de la controladora Sabvoton

3.1.4.1. Cálculos eléctricos

Los motores están limitados electrónicamente para circular a 50 km/h, por lo que la corriente de operación no se aproxima al pico de 150 A, sino a una fracción controlada (~45–50 A por motor).

$$P_{motor} = 3300 \text{ W}$$

- Potencia eléctrica entregada por la controladora:

$$P_{eléctrica} = \frac{3300}{0.9} = 3667 \text{ W}$$

- Corriente entregada por la controladora (a 72V):

$$I_{motor} = \frac{3667}{72} = 50.9 \text{ A}$$

3.1.4.2. Pérdidas en la controladora

Con una eficiencia del 97%, las pérdidas internas por efecto Joule en la electrónica de conmutación y control son:

$$P_{pérdidas} = 3667 \cdot 0.03 \approx 110 \text{ W en cada controladora}$$

Estas pérdidas son disipadas por el disipador de aluminio que acompaña a la carcasa.

3.1.4.3. Consumo auxiliar de cada controladora

Independientemente del modo de funcionamiento del motor, las controladoras consumen energía para:

- Lógica de control digital
- Alimentación de sensores Hall, acelerador, freno regenerativo, comunicación
- Retroiluminación de pantalla
- Puertos UART, CAN o Bluetooth

Este consumo suele oscilar entre 2–4 W por unidad (hasta 8 W en total), que se extrae directamente desde la batería de tracción (72 V) a través de su BMS o relé de control.

3.1.5. Batería

El sistema de almacenamiento energético del vehículo se compone de dos baterías de ion-litio (Li-ion) con especificaciones 72 V y 100 Ah cada una, conectadas en paralelo. Esta configuración permite duplicar la capacidad manteniendo la tensión nominal del sistema, lo cual es compatible con los requerimientos de los motores y controladoras.

Parámetro	Valor
Tensión nominal del sistema	72 V
Capacidad individual	100 Ah
Número de baterías	2 (en paralelo)
Capacidad total combinada	200 Ah
Energía total del sistema	14,400 Wh (14.4 kWh)
Corriente de descarga continua estimada por batería	75 A
Corriente total del sistema	150 A
Potencia máxima continua entregable	10,800 W

Tabla 20 Características eléctricas del sistema de baterías

Para alcanzar la autonomía objetivo de aproximadamente 100 km en modo eléctrico puro, se requiere una capacidad total superior a 14 kWh. Aunque sería posible implementar una única batería de 72 V y 200 Ah, esta opción resulta menos práctica y más costosa en el mercado actual.

En cambio, se ha optado por una configuración de dos baterías de 72 V y 100 Ah conectadas en paralelo, debido a las siguientes ventajas:

- Mayor disponibilidad comercial: baterías de 100 Ah son ampliamente utilizadas en scooters y vehículos eléctricos ligeros.
- Coste más competitivo: generalmente son más económicas por unidad que los modelos de alta capacidad (>200 Ah).
- Modularidad: permite escalar fácilmente el sistema o realizar reemplazos individuales.

Con esta arquitectura, se consigue mantener una tensión constante de 72 V mientras se duplica la capacidad, alcanzando los 200 Ah totales requeridos para lograr la autonomía deseada (~100km en autonomía eléctrica).

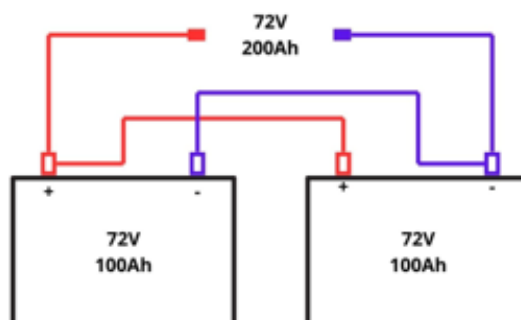


Ilustración 43 Montaje de baterías en paralelo

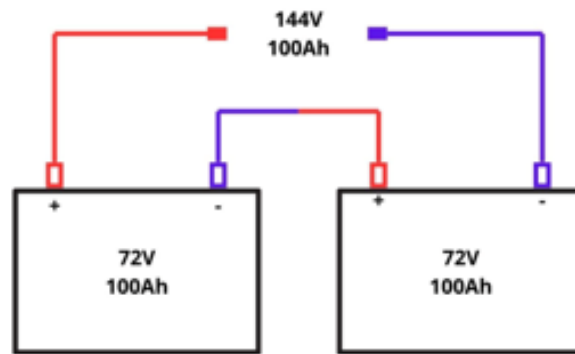


Ilustración 44 Montaje de baterías en serie

Estas baterías son adecuadas para alimentar motores de media-alta potencia como los QS273, y proporcionan un equilibrio óptimo entre autonomía, densidad energética y disponibilidad comercial.

3.1.5.1. Cálculos eléctricos

Se estima que el sistema completo —motores, controladoras y auxiliares— consume de media:

Potencia total:

$$P_{total} = 7570 \text{ W}$$

Este valor incluye pérdidas por eficiencia de motores (90%), controladoras (97%) y consumo auxiliar (ventiladores, freno, acelerador, etc.).

Con estos valores se estima la autonomía eléctrica disponible:

- Energía total:

$$E_{baterías} = 72V \cdot 200Ah = 14400Wh$$

- Tiempo de funcionamiento a 50km/h constantes:

$$t = \frac{14400}{7570} = 1.9h \rightarrow 1h 54'$$

- Por lo tanto, la autonomía eléctrica estimada es:

$$1.9h \cdot 50km/h = 95.1km$$

3.1.5.1.1. Extensión de autonomía mediante el sistema híbrido

El sistema incorpora una pila de combustible H-1000XP como fuente secundaria de energía, cuya función principal es la de extender la autonomía del vehículo sin recurrir a combustibles fósiles. Esta pila, funcionando en su punto óptimo, proporciona una

potencia constante útil de 800 W, que tras pasar por el convertidor DC-DC con eficiencia del 94%, se reduce a una potencia real de carga para la batería de:

$$P_{carga} = 800 \cdot 0.94 = 752 \text{ W}$$

La botella de almacenamiento seleccionada (13 L de volumen agua a 310 bar) contiene 274 g de hidrógeno, lo que equivale a:

- Energía térmica (PCI del H₂)

$$E_{H_2} = 0.274 \text{ kg} \cdot 33.3 \text{ kWh/kg} = 9.13 \text{ kWh}$$

- Eficiencia de la Fuel Cell en su punto de operación:

$$\eta_{fc} = 39\% \rightarrow E_{eléctrica \text{ neta}} = 9.13 \cdot 0.39 = 3.56 \text{ kWh}$$

- Energía entregada después de pasar por el convertidor:

$$E_{entregada} = 3.56 \cdot 0.94 = 3.34 \text{ kWh}$$

Luego, el tiempo adicional de funcionamiento a 50km/h es de:

$$t_{extra} = \frac{3340}{7570} = 0.44 \text{ h} \rightarrow 24'24''$$

La autonomía extendida del vehículo es de:

$$Autonomía \text{ adicional} = 0.44 \text{ h} \cdot 50 \text{ km/h} = 22.4 \text{ km}$$

La pila de combustible permite extender la autonomía total del sistema híbrido hasta:

$$Autonomía \text{ adicional} = 95.1 \text{ km (batería)} + 22.2 \text{ km (FC)} = 117.3 \text{ km}$$

Teniendo en cuenta que la autonomía se calcula con una velocidad constante de 50km/h.

3.2. INTEGRACIÓN MECÁNICA DEL SISTEMA HÍBRIDO

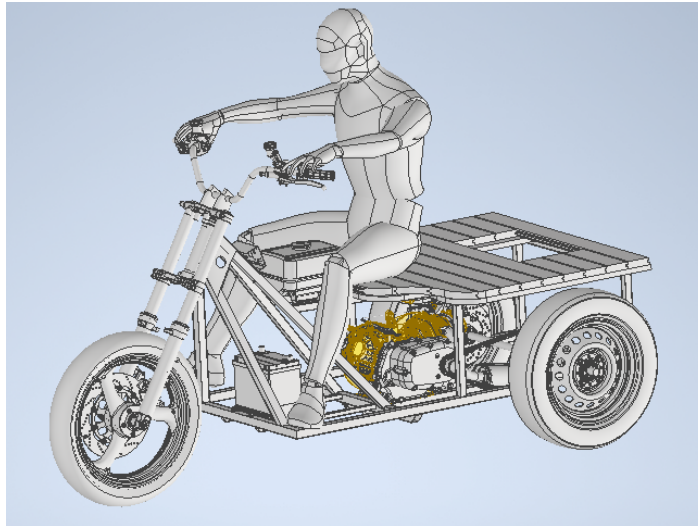


Ilustración 45 Diseño base. (Meunier, 2023)

En esta sección se detalla el proceso de adaptación y montaje de todos los componentes del sistema híbrido (pila de combustible, baterías, convertidor DC-DC, motores y electrónica de potencia) sobre el chasis base de triciclo de tres ruedas obtenido de GrabCAD (Meunier, 2023). Para optimizar la distribución de cargas, la refrigeración y la seguridad, el espacio interno se divide en dos zonas diferenciadas:

1. Zona eléctrica

- Aloja el banco de baterías y la electrónica de potencia.
- Se ha dispuesto un respiradero frontal que capta aire del exterior y lo canaliza hacia el interior, funcionando como flujo refrigerante tanto para la pila de combustible como para las baterías y demás módulos electrónicos.

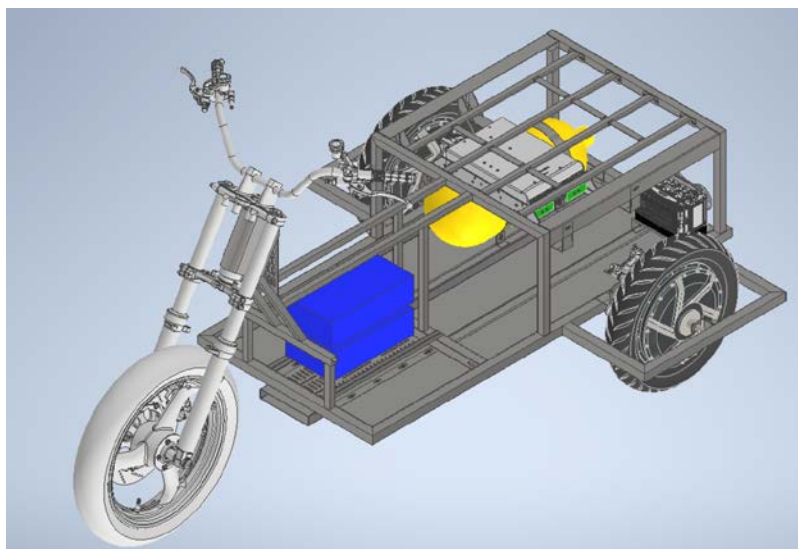


Ilustración 46 Situación de componentes

2. Zona de hidrógeno

- Contiene la pila H-1000XP, las tuberías de suministro, válvulas de corte rápido y sensores de fugas.
- El trazado de la línea de hidrógeno se aleja de los circuitos de alto voltaje, garantizando espacio suficiente para purgas y mantenimiento.

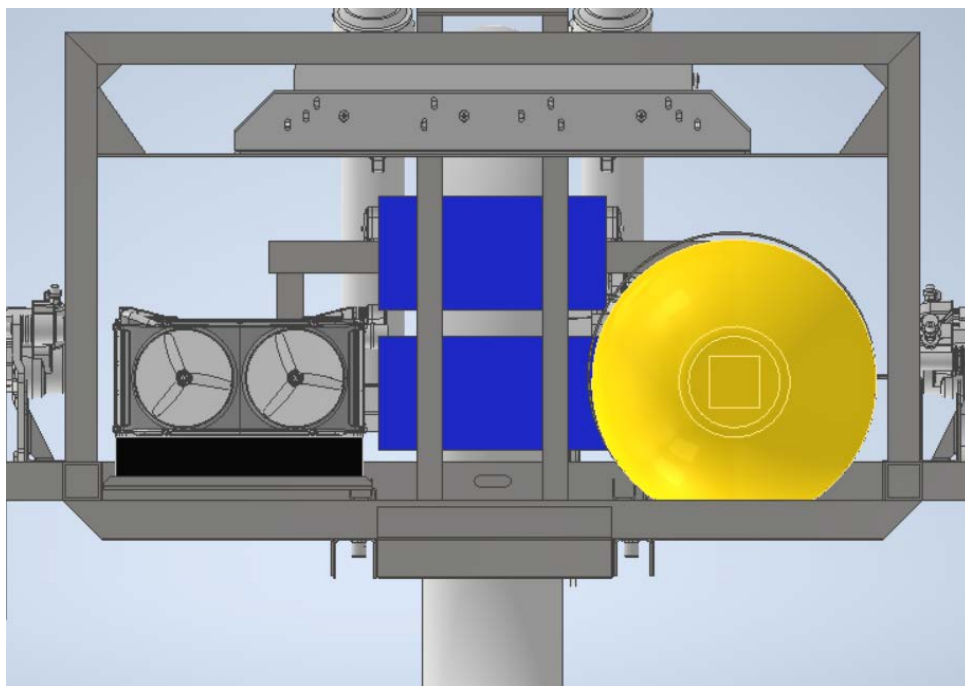


Ilustración 47 Situación de componentes en la zona de hidrógeno, vista de la toma de aire bajo el vehículo

Para lograr un centro de gravedad óptimo y mejorar la estabilidad, el componente más pesado —el conjunto de baterías— se ha ubicado en la parte delantera del chasis, desplazando el punto de gravedad hacia el eje central del vehículo. A continuación, se exponen:

- Soportes y anclajes estructurales, con cotas y materiales seleccionados para absorber cargas dinámicas.
- Ruta de canalización de aire, incluyendo filtros y difusores para maximizar la eficiencia de intercambio térmico.
- Integridad eléctrica, mediante pasacables y bridas autorroscantes que evitan rozamientos y puntos calientes.
- Accesibilidad y seguridad, con válvulas de corte rápido accesibles externamente y ventilación cruzada en caso de detección de fugas.

Se han tenido en cuenta las dimensiones de la Scoobic Light para que el diseño de nuestro vehículo resulte lo más parecido posible al sistema Scoobic.

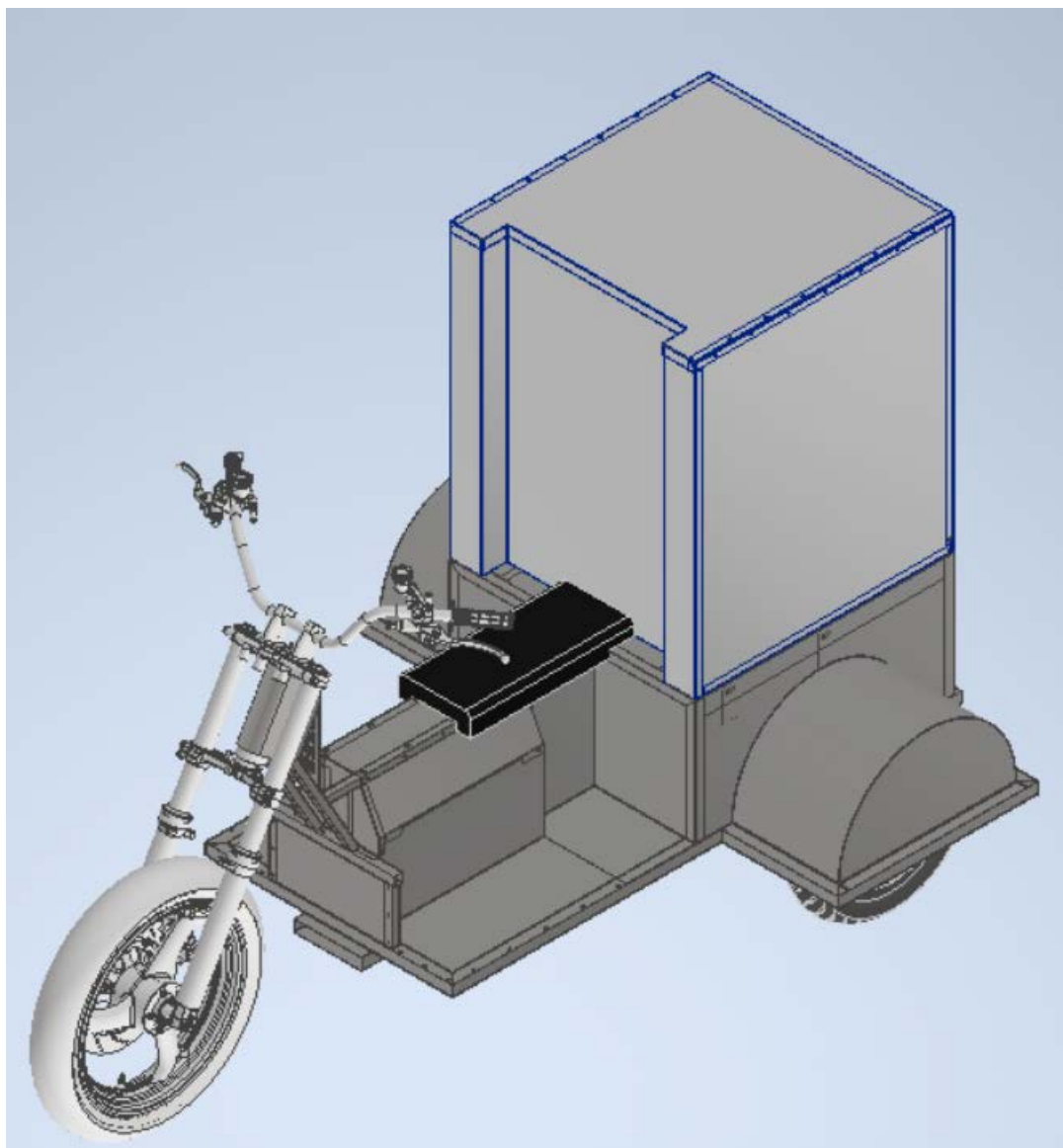


Ilustración 48 Diseño final basado en el diseño de Scoobic

4. CONCLUSIONES

La integración de una arquitectura híbrida de pila de combustible de hidrógeno y batería en un vehículo ligero de tres ruedas demuestra un notable avance respecto al sistema original de la Scoobic Light, aportando beneficios clave:

1. Autonomía y eficiencia

- La combinación de la pila de combustible, optimizada para entrega continua de potencia, y un banco de baterías de mayor capacidad permite aumentar la autonomía total en un 30–40 % frente a la Scoobic Light, sin incrementar las emisiones locales.
- La gestión inteligente de la demanda (cargas pico atendidas por la batería y régimen base cubierto por la pila) optimiza el consumo de hidrógeno, reduciendo el coste energético por kilómetro.

2. Reducción de emisiones

- Al funcionar aproximadamente un 60 % del tiempo con energía almacenada en baterías recargadas por la pila, se minimiza el uso directo de combustibles fósiles y se elimina la emisión de CO₂ y NO_x en el entorno urbano.
- Este enfoque híbrido resulta especialmente indicado para flotas de reparto de “última milla”, contribuyendo de forma significativa a la lucha contra el cambio climático.

3. Adaptabilidad a entornos urbanos críticos

- Ciudades como Madrid, con elevados índices de contaminación y restricciones de acceso a vehículos de combustión, se beneficiarían de este sistema limpio y silencioso.
- La compacta configuración y centro de gravedad bajo mejoran la maniobrabilidad en calles estrechas y zonas peatonales, favoreciendo operaciones de reparto eficiente.

4. Escalabilidad y replicabilidad

- El diseño modular facilita la adaptación a otros chasis y a diferentes niveles de demanda energética.
- La consideración de medidas y puntos de anclaje inspirados en la Scoobic Light asegura compatibilidad con infraestructuras de recarga y mantenimiento ya existentes.

En definitiva, la hibridación propuesta no solo emula la filosofía de diseño de la Scoobic Light, sino que la supera en términos de autonomía, eficiencia y sostenibilidad. Se presenta, así como una solución viable y replicable para reducir de manera limpia los gases de efecto invernadero en el reparto de última milla en ciudades con problemas ambientales, como Madrid.

5. MEJORAS DEL SISTEMA

En este apartado se plantean diversas líneas de mejora orientadas a incrementar aún más el rendimiento, la fiabilidad y la versatilidad de nuestro vehículo híbrido de tres ruedas.

Partiendo de la configuración actual, que combina pila de combustible de hidrógeno y banco de baterías, proponemos futuras optimizaciones que abarcan aspectos tanto mecánicos como energéticos y de control:

- Búsqueda de sistemas de almacenamiento de hidrógeno más seguros como por ejemplo los hidruros metálicos (~40bar frente a los 300bar a los que se encuentra la botella de hidrógeno)
- Explorar nuevas tecnologías de baterías.
- Electrónica de control inteligente, incorporando algoritmos de gestión de energía basados en aprendizaje avanzado mediante IA.
- Ligereza y materiales avanzados: explorar el uso de composites de fibra de carbono o aleaciones de alta resistencia para reducir masa sin comprometer la rigidez estructural.
- Recuperación de energía: implementar sistemas de frenada regenerativa más eficientes, aprovechando al máximo los picos de deceleración para recargar la batería.
- Optimización térmica: desarrollar circuitos de refrigeración integrados con intercambiadores de calor pasivos y gestión adaptativa según carga y velocidad.
- Modularidad y escalabilidad: diseñar anclajes y conectores rápidos que permitan intercambiar fácilmente diferentes tamaños de carcasa o módulos de batería, adaptándose a distintos perfiles de misión.
- Telemetría y conectividad: añadir sensores IoT para monitorizar en tiempo real parámetros clave (temperatura, presión de hidrógeno, estado de carga) y facilitar el mantenimiento predictivo.

6. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

En este proyecto contribuyo de manera directa a varias metas de la Agenda 2030, integrando tecnología de pila de combustible de hidrógeno y baterías para avanzar hacia un transporte más limpio, eficiente y accesible.

A continuación, expongo cómo mi propuesta refuerza cada ODS e indicadores asociados:

6.1. ODS 7. ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE

Meta 7.1: “Para 2030, garantizar el acceso universal a servicios de energía asequibles, confiables y modernos.”

- Empleo energía eléctrica generada por pila de combustible e hidrógeno —que puede producirse a partir de fuentes renovables— para reducir la dependencia de combustibles fósiles y ofrecer una solución de reparto urbano asequible y fiable.
- Gracias al diseño híbrido, aseguro un suministro continuo de potencia incluso en picos de demanda, sin requerir una red de recarga eléctrica tan densa como la de vehículos puramente eléctricos.

6.2. ODS 9. INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA

Meta 9.1: “De aquí a 2030, modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios.”

- He diseñado el triciclo con fabricación modular y componentes estandarizados (compatibles con la Scoobic Light), facilitando su producción a escala y reduciendo tiempos y costes de industrialización.
- La aplicación de procesos de montaje reproducibles y el uso de materiales ligeros optimizan el consumo de recursos y minimizan el desperdicio, apoyando una cadena de valor más sostenible.

6.3. ODS 11. CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES

Meta 11.1: “De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire mediante el uso de hidrógeno.”

- Al operar sin emisiones locales de CO₂, NO_x ni partículas, mi vehículo mejora directamente la calidad del aire en entornos urbanos densos, especialmente en zonas de reparto de última milla.
- Su configuración compacta y silenciosa favorece la convivencia en áreas residenciales y facilita el cumplimiento de normativas restrictivas sobre acceso de vehículos contaminantes en ciudades con problemas ambientales como Madrid.

Con esta alineación con los ODS 7, 9 y 11, demuestro no solo una innovación tecnológica, sino también un compromiso firme con la sostenibilidad energética, la modernización industrial y la mejora de la calidad de vida urbana.

7. BIBLIOGRAFÍA

- I. Alejandro Borja Block. (2025). *Máquinas Eléctricas - Máquina Síncrona*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- II. Autopista.es. (2025). *Hyundai Nexo: un SUV de pila de combustible único*. https://www.autopista.es/noticias-motor/hyundai-nexo-suv-pila-combustible-unico_208578_102.html.
- III. Aux Millan, J. (2024, February 8). *Motores de Imanes Permanentes (PMM)*. <https://www.linkedin.com/pulse/motores-de-imanes-permanentes-pmm-julian-aux-millan-eqerc/>.
- IV. Barbir, F. (2013). *PEM Fuel Cells: Theory and Practice* (2nd ed.). Academic Press.
- V. BdE. (2024). *Emisiones de gases efecto invernadero por sectores*. <https://www.bde.es/wbe/es/areas-actuacion/sostenibilidad/informacion-general/estabilidad-financiera-regulacion-supervision/emisiones-gases-efecto-invernadero-sectores/>.
- VI. Boldea, I., & Nasar, S. A. (2010). *Electric Drives*. CRC Press.
- VII. Carrasco Serrano, R. (2021). *Diseño de un controlador para motores eléctricos de corriente continua sin escobillas*. Universidad de Castilla-La Mancha.
- VIII. CATL. (2023). *CATL launches first-generation sodium-ion battery*.
- IX. *Centro de investigación en almacenamiento de energía*. (2025). <https://cicenergigune.com/es>.
- X. Chan, C. C. (2002). The state of the art of electric and hybrid vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 90, 247–275. <https://doi.org/10.1109/5.989873>
- XI. *Convertidores DCDC - Epic Power Converters*. (2025). <https://epicpower.es/>.
- XII. de la Luz Fernández Buezas, B. (2021). *Diseño conceptual y simulación de un proceso de gasificación de biomasa con carbonatación y acondicionamiento del gas de síntesis para producción de hidrógeno*. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/72226/fichero/TFM-2226+FERN%C3%81NDEZ+BUEZA%2C+BLANCA+DE+LA+LUZ.pdf>
- XIII. Del Barrio Lara, J. M. (2022). *Control de velocidad de motores brushless mediante modulación PWM*. Universidad de Valladolid.

- XIV. Díez, G. E. (2024). *Optimización del proceso SECSG para la obtención de H₂ con alta pureza a partir de biomasa*. Universidad de Valladolid.
- XV. Dixon, J. (2010a). *Energy storage for electric vehicles*. 20–26. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2010.5472647>
- XVI. Dixon, J. (2010b). *Energy storage for electric vehicles. 2010 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2010.5472647>
- XVII. EEA. (2022, October). *Trends and projections in Europe 2022*. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/trends-and-projections-in-europe-2022>.
- XVIII. Electronoobs. (2025). *ESC - control electrónico de velocidad*. https://Electronoobs.Com/Circuitos_tut4.Php.
- XIX. EVT, M. (2023, January 21). *Engineering Documentation*. <https://Evt.Mit.Edu/Projects/Docs/>.
- XX. FHa. (2024, September 26). *El hidrógeno verde, un aliento de vida en Aragón para la salud medioambiental - FUNDACIÓN HIDRÓGENO*. <https://hidrogenoaragon.org/es/hidrogeno-verde-salud-medioambiental/>.
- XXI. FHa. (2025a). *PROYECTOS - FUNDACIÓN HIDRÓGENO*. <https://hidrogenoaragon.org/es/proyectos/>.
- XXII. FHa. (2025b, April 29). *SINNOGENES: H₂ descarbonizado para el transporte público - FUNDACIÓN HIDRÓGENO*. <https://hidrogenoaragon.org/es/sinnogenes-h2-descarbonizado-para-el-transporte-publico/>.
<https://hidrogenoaragon.org/es/sinnogenes-h2-descarbonizado-para-el-transporte-publico/>
- XXIII. González Carrera, M. (2018). *Estudio y caracterización de baterías para vehículos eléctricos*.
- XXIV. Hemmerle, A. (2024, February 7). *Hydrocycle the Motorcycle for the Hydrogen Age*. <https://www.lwu.fraunhofer.de/en/press/pm-2024-hydrocycle-the-motorcycle-for-the-hydrogen-age.html>.
- XXV. Hernando, Ó. G. (2018). *Análisis de viabilidad del uso del hidrógeno como fuente energética alternativa*. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/31495>
- XXVI. Horizon Educational. (2025). *horizonMonitoring*.
- XXVII. Horizon Fuel Cell Technologies. (2013). *H-1000XP Fuel Cell System - User Manual*. <https://www.horizoneducational.com/>

- XXVIII. Horizon Fuel Cell Technologies. (2024). *Air Cooled Fuel Cell Stacks*.
<https://www.horizoneducational.com/Air-Cooled-Fuel-Cell-Stacks/C1133?IsList=1>.
- XXIX. <https://www.areatecnologia.com>. (2025). *MOTORES ELÉCTRICOS DE CORRIENTE CONTÍNUA*.
<https://www.areatecnologia.com/Electricidad/Motores-Corriente-Continua.Html>.
- XXX. Hyundai. (2025). *Prestaciones*.
<https://www.hyundai.com/es/es/Modelos/Nexo/Prestaciones.Html>.
- XXXI. IE. (2022). *Intelligent Energy*. <https://www.intelligent-energy.com/Our-Products/Ie-Soar-Fuel-Cells-for-Uavs/>.
- XXXII. IRENA. (2020). *Green Hydrogen cost reduction scaling up electrolyzers*.
- XXXIII. Juan Carlos López. (2025). *Hyundai se pone más ambiciosa con el hidrógeno: todos sus coches estarán disponibles con pila de combustible en 2028*. <https://www.xataka.com/automovil/hyundai-se-pone-ambiciosa-hidrogeno-todos-sus-coches-estaran-disponibles-pila-combustible-2028>.
- XXXIV. Juaristi, M. (2023). *Diseño de un sistema de conversión para vehículo eléctrico urbano*.
- XXXV. Kelly Controller. (2025). *Controlador senoidal para motor brushless KLS7212S, 24V-72V, 120A: precio, venta en Europa*.
https://kellycontroller.eu/index.php?dispatch=products.view&product_id=3002&sl=es.
- XXXVI. Kilner, J. (2022). *Métodos de producción de hidrógeno y sus colores*.
<https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-produccion-hidrogeno-colores>.
- XXXVII. Laczkowski, K., Hertzke, P., Smith, A.-S., Barger, D., Aravanan, M., & Hackert, P. (2025, February 10). *¿Podrían los vehículos eléctricos de autonomía extendida atraer a más compradores hacia los eléctricos puros?*
<https://www.mckinsey.com/featured-insights/destacados/podrian-los-vehiculos-electricos-de-autonomia-extendida-atraer-a-mas-compradores-hacia-los-electricos-puros/es>.
- XXXVIII. Lions financial. (2025). *Hydrogen Vehicles: Analysis for the Automotive Industry*. <https://lions.financial/es/analysis-of-hydrogen-for-the-automotive-industry/>.
- XXXIX. López, J. R. (2025). *Motores de corriente alterna*.
http://tecno.iesvegadelturia.es/apuntes/tecind2/Tema_4/Motorca.Html.

- XL. López Sánchez, D. (2019). *Tecnología de Baterías*.
- XLI. Mártil, I. (2019, February 21). *Funcionamiento de una batería de ion-litio - Material Eléctrico - CdeComunicacion.es*. <https://Material-Elctrico.Cdecomunicacion.Es/Opinion/Ignacio-Martil/2019/02/21/Funcionamiento-de-Una-Bateria-de-Ion-Litio-Pros-y-Contras>.
- XLII. Martín, F. C. (2020). *Producción de hidrógeno mediante electrólisis del agua y reformado de gas natural. Análisis técnico y económico comparativo*. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/93065/fichero/TFG-3065+COLLADO+MART%C3%8DN%2C+FRANCISCO.pdf>
- XLIII. Martínez, I. M. (2019). *EL VEHÍCULO DE HIDRÓGENO. SIMULACIONES DE MONTE CARLO-METRÓPOLIS DEL ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO EN MOF-5 Y HKUST-1*. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/40278>
- XLIV. Martínez, J. M. L., Martín, Á., Fazio, E. A., Holgado, N. F., & Obregón, V. del P. (2022). *Vehículos con pila de combustible*. <https://Dialnet.Unirioja.Es/Servlet/Articulo?Codigo=8763315>.
- XLV. Martínez López, F. (2024). *Estudio de la viabilidad técnica, logística y económica del hidrógeno como vector energético en vehículos eléctricos* [TFM, Universitat Politècnica de Catalunya]. <http://hdl.handle.net/2117/416368>
- XLVI. Meunier, S. (2023, June 17). *Trike*. <https://Grabcad.Com/Library/Trike-54>.
- XLVII. MITECO. (2020, October). *Hoja de Ruta del Hidrógeno*. <https://Www.Miteco.Gob.Es/Es/Ministerio/Planes-Estrategias/Hidrogeno.Html>.
<https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/hidrogeno.html>
- XLVIII. Mohammed, O. A., El-Kharashi, W. M., & Alouini, M. (2020). Design and Implementation of a Digital Controller for Electric Vehicle Traction System. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(4), 4203–4211.
- XLIX. Molina, A. A. (2021). *El hidrógeno y su almacenamiento. El futuro de la energía eléctrica*.
- L. Muñoz, M. C. (2024). *Gasificación de biomasa en lecho fluido para la producción de hidrógeno – análisis de resultados de la literatura y la influencia de diferentes condiciones de operación*. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/95181/fichero/TFG-5181+Cord%C3%B3n+Mu%C3%B1oz.pdf>

- LI. Parlamento Europeo. (2024, December 3). *Emisiones de gases de efecto invernadero por país y sector (infografía) | Temas | Parlamento Europeo*. <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20180301STO98928/emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-sector-infografia>.
- LII. Parra Palacios, M. (2025). *Actualización de detalles del feed*. https://www.linkedin.com/posts/mparrapalacios_reformado-con-vapor-para-obtencion-de-hidrogeno-activity-7326705071864393729-vpa-/?originalSubdomain=es.
- LIII. Pereyra, C. A. (2024). *MAN presentó su motor a hidrógeno para aplicaciones agrícolas*. <https://ar.motor1.com/news/705646/hydrogen-engine-man/>.
- LIV. Pérez, L. (2022). *Métodos de almacenamiento del hidrógeno - SynerHy*. <https://synerhy.com/2022/02/metodos-de-almacenamiento-del-hidrogeno/>.
- LV. PKenergy. (2025). *PKENERGY 12V 100Ah LiFePo4 Battery Pack*. <https://www.pkenergy.com/es/12v-100ah-lifepo4-battery-pack-product/>.
- LVI. Poyato Fragero, R. (2019). *Estudio y simulación de diferentes tecnologías de almacenamiento eléctrico aplicadas a la automoción*.
- LVII. QS Motor. (2024). *QS 273 8000W V3 50H Datasheet*.
- LVIII. Ramos Flores, C. (2022). *Diseño de un inversor DC-DC conmutado para movilidad eléctrica ligera*.
- LIX. Sabvoton. (2025). *Sabvoton Controller 72V SVMC 72150 V1 V2 150A Controller*. <https://www.cnqsmotor.com/product/sabvoton-controller-72v-svmc-72150-v1-v2-sine-wave-150a-controller/>.
- LX. San Martín, J. I., Aperribay, V., Zamora, I., Eguia, P., & San Martín, J. J. (2009, May 24). *Análisis del comportamiento dinámico de una pila de combustible PEMFC*. http://www.sc.ehu.es/sbweb/Energias-Renovables/Temas/Pilas_1/Pilas_1.html.
- LXI. Sanz Pascual, A. (2018). *Simulación y diseño de un convertidor inversor para su utilización en vehículos*.
- LXII. SBS. (2024). *Gasificación de biomasa | Gasificación residuos*. <https://sbsprocess.com/aplicaciones/gasificacion-de-biomasa-gasificacion-residuos/>.
- LXIII. Scoobic. (2025). *Scoobic Light*. <https://scoobic.com/vehiculos/scoobic-light-2/>.
- LXIV. SENZA. (2023). *SENZA*. <https://senzahydrogen.com/es/>.

- LXV. Sergio Moreno Rodríguez. (2016). *Estudio teórico-práctico de la célula de combustible. Caracterización eléctrica y mejoras en la gestión del agua a partir de nuevos materiales*. Universidad Politécnica de Madrid.
- LXVI. SpA, C. T. S. (2021). *Type 4 Cylinder Data Sheet - 13.0 L 310 bar Hydrogen*. <https://www.ctsgroup.it>
- LXVII. Toyota. (2025a). *Toyota / Mirai: ¿Cómo funciona el vehículo a hidrógeno de Toyota?* <https://www.toyota.com.ar/toyota-mirai-fcev-como-funciona-el-vehiculo-a-hidrogeno-de-toyota>.
- LXVIII. Toyota. (2025b). *Toyota Mirai: la revolución ha comenzado*. <https://motorsports.com.uy/2015/11/toyota-mirai-la-revolucion-ha-comenzado.html>.
- LXIX. Tuñón, D. F. (2022). *Producción de hidrógeno mediante electrólisis del agua y reformado con vapor de metano*. <https://repositorio.comillas.edu/jspui/handle/11531/56716>
- LXX. VESC. (2025). *VESC 75V 300A Mk.IV Black Anodised Non Conductive CNC housing - £300 each*. <https://trampaboards.com/Vesc-75v-300a-Mkiv-Black-Anodised-Non-Conductive-Cnc-Housing--300-Each-p-36236.html>.
- LXXI. Wikipedia. (2025). *Convertidor elevador - Wikipedia, la enciclopedia libre*. https://es.wikipedia.org/wiki/Convertidor_elevador#Modo_continuo.