Universidad Rey Juan Carlos

Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología

GRADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

Trabajo de Fin de Grado

Sistema de uso, almacenamiento y recarga in situ de cápsulas de hidrógeno mediante electrólisis integrada en vehículos híbrido de panel solar y de hidrógeno

Ziheng Jin

Curso Académico 25/26

ÍNDICE

1. RESUMEN DE TFG 5

2. INTRODUCCIÓN 6

2.1 Las medidas Europeas hacia el cambio climático 6

2.2 Evolución del uso de los combustibles en coches 7

2.2.1 Evolución de la gasolina 7

2.2.2 Evolución del diésel 8

2.2.3 Evolución de los coches eléctricos 9

2.2.4 Evolución del uso de hidrógeno 9

2.3 Hidrógeno como combustible del sector de transporte 9

2.4 Evolución de coches de hidrógeno 11

3. OBJETIVO 12

4. SOLUCIÓN TÉCNICA 13

4.1 Equipo para el combustible 13

4.1.1 Elección del tipo de electrolizador 13

4.1.2 Elección del tipo de pilas de combustible 14

4.2 Motor eléctrico 15

4.2.1 Tipos de motores eléctricos y la selección 16

4.3 Almacenamiento de hidrógeno 17

4.4 Alimentación para el electrolizador 18

4.4.1 Placas solares 18

4.4.2 Frenos regenerativos 19

4.5 Baterías 21

4.6 Dimensionamiento de los equipos 22

4.6.1 Las ruedas del vehículo 22

4.6.2 Baterías, convertidor, inversores y los motores. 24

4.6.3 VCU y almacenamiento del combustible 26

4.6.4 PEMFC y PEMWE 28

4.6.5 Placas Solares 35

4.6.6 Sistema de Refrigeración 37

4.7 Coste de fabricación y precio PVP 38

4.7.1 Lista de Materiales 38

4.7.2 Coste de los materiales 39

4.7.3 Precio PVP 40

4.8 Prestaciones del vehículo 40

5. Conclusiones 47

6. Bibliografía 48

ANEXO I Plano Principal del Vehículo ____ ***54***

ANEXO II Lista de los materiales y su precio ____ ***55***

ANEXO II Especificaciones de las placas solares ____ ***56***

ANEXO III Especificaciones de los tanques de hidrógeno ____ ***57***

ANEXO IV Especificaciones del motor eléctrico ____ ***58***

ANEXO V Ficha técnica del vehículo ____ ***60***

ANEXO VI Especificaciones ____ ***63***

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de hidrógeno [17]. ____ *10*
Tabla 2. Comparación del Poder Calorífico de los combustibles. ____ *11*
Tabla 3. Comparación de electrolizadores [28]. ____ *13*
Tabla 4. Comparación de pilas de combustibles [30]. ____ *14*
Tabla 5. Comparación de motores eléctricos [33]. ____ *16*
Tabla 6. Características del almacenamiento del hidrógeno [35]. ____ *17*
Tabla 7. Comparación de placas solares ____ *18*
Tabla 8. Comparación de características de diferentes baterías ion litio [43]. ____ *21*
Tabla 9. Peso de los componentes de las ruedas ____ *24*
Tabla 10. Características de la batería Ion Litio NMC utilizado ____ *25*
Tabla 11. Características del motor eléctrico utilizado ____ *26*
Tabla 12. Datos de los tanques de referencia ____ *28*
Tabla 13. Datos del tanque principal y de las cápsulas Intercambiables ____ *28*
Tabla 14. Resultado de los cálculos PEMFC para su dimensionamiento ____ *32*
Tabla 15. Resultado de los cálculos PEMWE para su dimensionamiento ____ *35*
Tabla 16. Lista de Materiales ____ *39*
Tabla 17. Coste de los materiales ____ *39*
Tabla 17 (cont.). Coste de los materiales. ____ *40*
Tabla 18. Porcentaje y Precio PVP ____ *40*
Tabla 19. Peso de cada componente y peso del vehículo en vacío ____ *41*
Tabla 20. Peso final del vehículo estimado ____ *41*
Tabla 21. Datos para el cálculo de la autonomía del vehículo ____ *42*
Tabla 22. Resultados del cálculo de la autonomía en ruta urbana a 60 km/h constante. ____ *43*
Tabla 23. Resultados del cálculo de la autonomía en ruta rural a 100 km/h constante ____ *44*
Tabla 24. Prestaciones del vehículo ____ *45*
Tabla 25. Comparación de emisiones de CO_2 ____ *46*

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Objetivos de REPowerEU. 6
Figura 2. Emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del transporte de la UE (EEA). 7
Figura 3. Evolución de ventas de vehículos. 8
Figura 4. Evolución del precio del diésel. Fuente: Boletín Petrolera de la Unión Europea. 8
Figura 5. Evolución de uso de coches eléctricos (Global EV Outlook 2025). 9
Figura 6. Obtención del hidrógeno en función de sus emisiones de CO_2. 10
Figura 7. Línea cronológica de coches de hidrógeno de Toyota de pilas de combustibles [21]. 11
Figura 8. Toyota Mirai (Toyota). 11
Figura 9. NamX HUV (NAMX). 12
Figura 10. BMW iX5 (BMW España). 12
Figura 11. Electrolizador alcalino (Repsol). 13
Figura 12. Pila de combustible (CNH2). 14
Figura 13. Pila de combustible PEM tradicional. 15
Figura 14. Tamaño del mercado de pilas de combustible en USA, 2014-2024. 15
Figura 15. Motores de Imanes Permanentes (PMSM). 16
Figura 16. Motor asíncrono o inducción. 16
Figura 17. Motor de Reluctancia Variable. 16
Figura 18. Motor Sin Escobilla (BLDC). 16
Figura 19. Tanque de hidrógeno presurizado de tipo IV 17
Figura 20. Comparación de distintos Paneles Solares. Fuente: Clean Energy Review. 19
Figura 21. Frenos regenerativos (Movilidad eléctrica) 19
Figura 22. Funcionamiento de un freno regenerativo. 20
Figura 23. Eficiencia del frenado regenerativo a velocidades específicas 20
Figura 24. Comparación de distintos tipos de baterías de ion litio. 21
Figura 25. Arquitectura de hardware de un VCU. Fuente: Embien 27
Figura 26. Filtro de iones. Fuente: Hengst Filters 32
Figura 27. Dimensionamiento de los paneles solares 36

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1. Plano general del proyecto. Fuente: elaboración propia. 22
Plano 2. Las ruedas del vehículo. Fuente: elaboración propia. 23
Plano 3. Baterías, convertidor, inversores y los motores del vehículo, Fuente: elaboración propia. 24
Plano 4. VCU y almacenamiento del combustible. Fuente: elaboración propia. 27
Plano 5. PEMFC y PEMWE. Fuente: elaboración propia. 29
Plano 6. Panel Solar. Fuente: elaboración propia 35
Plano 7. Sistema de refrigeración. Fuente: elaboración propia. 37

1. RESUMEN DE TFG

En el presente trabajo se va a realizar un estudio de la mejora de la viabilidad del uso de hidrógeno verde en los coches eléctricos por pilas de combustibles. Se va a hacer un estudio de la modificación de los coches de pilas de combustibles para ser más autosuficientes y mejorar en la autonomía introduciendo tecnologías avanzadas de hoy en día. El objetivo principal de dicho proyecto es la contribución en la descarbonización del sector de transporte, lo cual es una de las industrias a la que mayor CO_2 genera, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero y acelerando la transición hacia la neutralidad climática en 2050.

Para ello, se hace un estudio del dimensionado del coche introduciendo un Electrolizador de Agua con Membrana de Intercambio de Protones, PEMWE (*Proton Exchange Water Electrolyzers*). Para mejor la eficiencia de la producción del hidrógeno, se intentará mantener el electrolizador a una temperatura de un rango de 60-80 °C. Para ello, se usará el calor sobrante de los motores eléctricos, de la pila de combustible y de las baterías de litio introduciendo un intercambiador de calor en el sistema de refrigeración de coche. Cabe mencionar que el líquido refrigerante tiene que ser especial para pilas de combustible y se va a colocar un filtro iónico para cuidar de la conductividad del refrigerante.

Para la producción del hidrógeno con el electrolizador PEMWE, se va a utilizar el agua de la salida de la pila de combustible PEMFC, pasando por un filtro iónico antes de entrar al electrolizador para evitar daños internos a causa de los residuos iónicos y la conductividad del agua. También se dispondrá de un tanque de agua desionizada de 15 litros, por si no hay agua suficiente a causa de las posibles pérdidas.

En cuanto a la energía necesaria a la PEMWE, se va a usar placas solares monocristalinos tipo IBC para una eficiencia mejor situados en el tejado del coche de unos 2 metros, y frenos regenerativos alimentando la batería de principal y la batería auxiliar del coche. Por otra parte, para el depósito del hidrógeno, se van a usar tanques cilíndricos de tipo IV de 700 bares. El tanque principal constará de un almacenamiento de 5 kg de hidrógeno y 3 cápsulas cilíndricas intercambiables de 1 kg de almacenamiento.

Tras los cálculos obtenidos a partir del análisis de dos escenarios diferentes, el coche tiene una autonomía media de 1500 km. El primer escenario consta de una ruta urbana, que se circula a 60 km/h de velocidad media, por lo que, la autonomía llega hasta los 2100 km en total. El segundo escenario consta de una ruta rural o zona montañosa con carreteras irregulares, a 100 km/h de velocidad media, este llega aproximadamente 900 km.

Entre los hallazgos más significativos del estudio de viabilidad económica, destaca el elevado coste inicial de compra del vehículo, cuyo Precio de Venta al Público se sitúa en 121.444 €. No obstante, este elevado coste inicial debe valorarse en relación con los beneficios económicos que ofrece el vehículo durante su vida útil. La viabilidad del modelo se sustenta en dos razones operativas clave: la mitigación total de los costes de explotación derivados del consumo de combustibles fósiles y, un alto rendimiento energético que confiere al sistema una autonomía operativa que prácticamente duplica la de un vehículo de combustión convencional.

2. INTRODUCCIÓN

2.1 Las medidas Europeas hacia el cambio climático

El calentamiento global sigue siendo un problema a nivel mundial hoy en día. Varios países están de acuerdo en realizar un cambio que fue adoptado en el Acuerdo de París, el 12 de diciembre de 2015, durante la 21ª Conferencia de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (COP 21). El mundo acuerda cumplir un objetivo, reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero que afecta negativamente a la seguridad y salud a nivel global. Para cumplir el objetivo, se establece limitar el aumento del calentamiento de la temperatura mundial a 1,5 °C con respecto a niveles preindustriales [1].

En 2019, el Parlamento Europeo aprobó el "Pacto Verde Europeo", una estrategia que consiste en un paquete de iniciativas políticas establecida en la UE para la transición hacia la neutralidad climática en el año 2050 [2]. Finalmente, en mayo de 2022, los dirigentes de la Unión Europea se ponen en acuerdo en la eliminación gradual de la dependencia del uso de combustibles fósiles de países externos a Europa, la unificación de fuerzas para lograr un sistema energético más resiliente y una aceleración de la transición hacia una energía limpia (REPowerEU, 2022)[3]. En la Figura 1 se muestra un gráfico resumen del plan REPowerEU.

Figura 1. Objetivos de REPowerEU.

En el contexto nacional, en mayo de 2021, España aprueba la Ley 7/2021 de cambio climático y transición energética y ese mismo año, en junio, se aprueba la Ley Europea del Clima, Reglamento 2021/1119, que tiene como objetivo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a un 55 % respecto a 1990, donde ambas normativas están alineadas. Esta legislación también viene incluida un marco legislativo llamado "Objetivo 55", como un paso intermedio, donde se establece que hasta 2030, todos los turismos nuevos disminuyan las emisiones de CO_2 en un 55 % y las furgonetas nuevas en un 50 % respecto al año 1990 [4].

Uno de los focos de actuación para mitigar las emisiones de CO_2 y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles es el sector transporte. Según *European Environment Agency* (EEA), "el transporte por carretera representa aproximadamente una quinta parte de las emisiones de la UE. Las emisiones de CO_2 en el transporte varían significadamente según el medio." (Figura 2)[5].

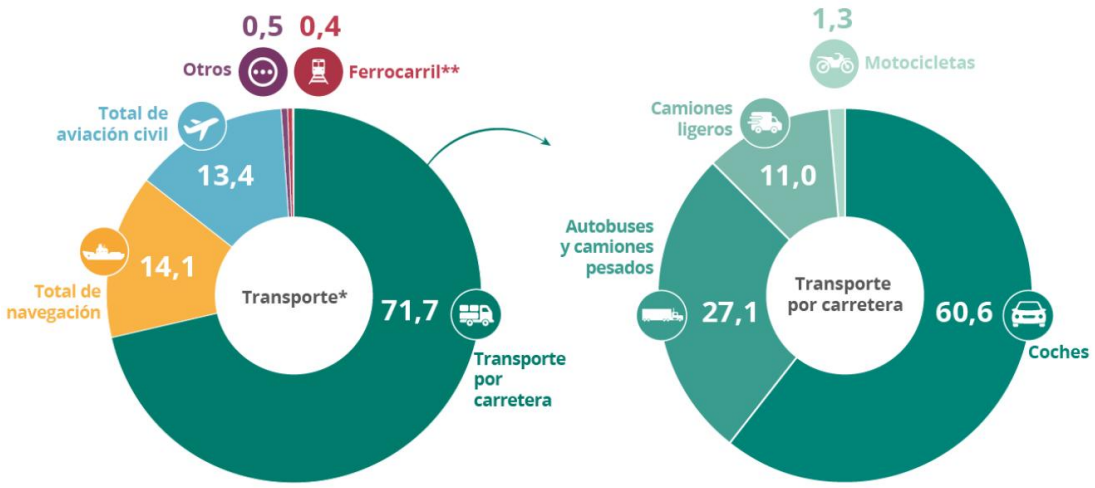


Figura 2. Emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del transporte de la UE (EEA).

De todo el transporte, los coches son el contribuyente principal a las emisiones de CO_2 del transporte, representando un 60,6 % en las emisiones de las carreteras de Europa con una tasa de ocupación de 1,6 personas por coche.

Debido a esto, el 27 de octubre de 2022, con vistas a la celebración de la COP27, en la Comisión Europea se lanza una propuesta por el Parlamento Europeo y el Consejo donde todos los coches a partir de 2035, turismos y furgonetas nuevos matriculados, sean de emisión cero [4]. Aunque más tarde, en la Unión Europea se está debatiendo en cambiar el 100 % de los vehículos a un objetivo de 90 % donde el 10 % restante solo lo pueden cubrir los vehículos híbridos enchufables, híbridos de autonomía extendida y coches de combustión interna alimentada con combustibles sintéticos renovables [6].

Finalmente, el 10 de febrero de 2026, el Parlamento Europeo aprueba la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero un 90 % para 2040 respecto a 1990, con el objetivo de llegar a la neutralidad climática en 2050. Esta medida incluye el sector de transporte, una medida para la aceleración hacia la transformación a los vehículos de emisión cero.

2.2 Evolución del uso de los combustibles en coches

2.2.1 Evolución de la gasolina

El primer vehículo en usar el combustible fósil fue creado en 1885 y patentado en 1886 por el ingeniero Carl Benz como el primer triciclo de combustión interna con gasolina como combustible.

A finales del siglo XIX y principios del siglo XX, se usaba la gasolina de destilación directa como el principal combustible a nivel mundial, un combustible de bajo octanaje y baja calidad, produciendo efectos como el "golpeteo" (detonación prematura) [7]. Para resolver el problema del "golpeteo", en 1921 Thomas Midgley Jr. descubrió que al añadir el aditivo tetraetilo de plomo mejoraba el rendimiento al tener mayor compresión en el motor, creando la Gasolina con Plomo. No fue hasta 1969 donde se descubre que las partículas de plomo inorgánicos emitidas después de la combustión son altamente absorbibles en el cuerpo humano, causando deformidades en los nuevos nacimientos y graves efectos perjudiciales en el coeficiente intelectual en los recién nacidos [8].

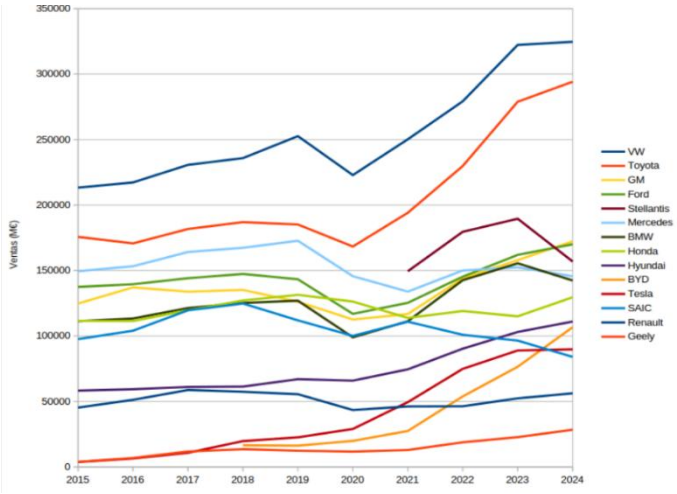


Figura 3. Evolución de ventas de vehículos.

En 1975, Estados Unidos decreta la Ley de Aire Limpio para la eliminación progresiva del uso de la gasolina con plomo. No obstante, en España no fue hasta el año 2000 donde comienza la transición de esta gracias al Reglamento 403/2000.

Hoy en día, gracias a los avances tecnológicos en las refinerías, se usan gasolinas de 95/98 con aditivos químicos, como Metilcilopentadienil Manganeso Tricarbonilo (MMT) o el tolueno, que mejoran el octanaje entre 2 y 4 puntos, por ende, la combustión y el rendimiento del motor [9]. En la Figura 3 se muestra una evolución de las ventas de vehículos de las principales compañías en los últimos 10 años.

2.2.2 Evolución del diésel

En 1892, el ingeniero Rudolf Diesel inventa el motor Diésel. Este motor ofrece mejor rendimiento del uso del combustible [10], pero más cara en cuanto al mantenimiento por la complejidad de sus piezas. No obstante, la obtención del diésel era mucho más barata que la gasolina, esto es debido a que está en una posición más fácil y directa dentro de la columna de destilación.

Figura 4. Evolución del precio del diésel. Fuente: Boletín Petrolera de la Unión Europea.

Este no se introdujo como combustible hasta la posguerra de la Segunda Guerra Mundial por la crisis de la gasolina [11]. Se volvió muy popular gracias a su fiabilidad y par motor, por su alto rendimiento y ahorro en el uso del combustible. Pero también ha tenido muchas restricciones gubernamentales por su producción de diferentes óxidos de nitrógeno (NOx) y su gran emisión de partículas. Para ello, la Unión Europea aprueba la Ley Euro 6, donde obliga a los fabricantes de vehículos diésel reducir la emisión de NOx drásticamente. Para ello, se ha desarrollado coches de motor diésel de doble circulación para bajar la temperatura de los gases de combustible y con inyección del catalizador AdBlue para reaccionar con el NOx evitando sus emisiones a la atmósfera.

A parte de los problemas medioambientales asociados al uso del diésel, hay otro problema, la volatilidad de los precios (Figura 4) por su ubicación en países con conflictos geopolíticos.

2.2.3 Evolución de los coches eléctricos

El primer motor eléctrico tiene ya más de 2 siglos ya que fue inventado por Ányos Jedlik en 1828 en Hungría. Sin embargo, no fue hasta 1888 cuando apareció en Alemania el que es considerado el primer coche eléctrico con un motor eléctrico funcional de corriente alterna gracias a Nikola Tesla, diseñado y construido por el inventor Andreas Flocken [12].

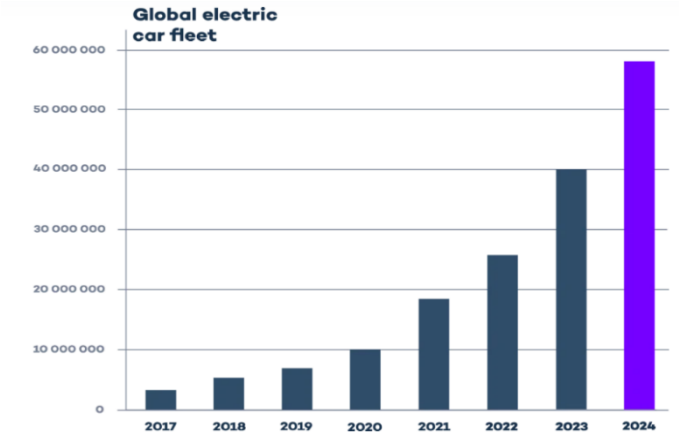


Figura 5. Evolución de uso de coches eléctricos (Global EV Outlook 2025).

En la Figura 5 se muestra la evolución del uso de coches eléctricos en los últimos años. El verdadero "Boom" de los coches eléctricos fue en 2020, con un crecimiento de ventas en 43 % en un año. Al final del año 2024, se asume que hay aproximadamente 58 millones de coches eléctricos en la carretera. China, Europa y Estados Unidos lideran la venta de los coches eléctricos en el mundo, con un 95 % de todas las ventas en 2024 [13].

2.2.4 Evolución del uso de hidrógeno

En1806, después de las guerras Napoleónicas, François Isaac de Rivaz, soldado retirado y físico francés, intentó aplicar a un automóvil un motor de combustión interna con hidrógeno [14]. En 1842, William Grove consiguió producir electricidad a partir del agua y gracias a esto, se creó la primera pila de combustible por Francis T-Bacon.

En las últimas décadas, muchas compañías empezaron a diseñar coches con el uso de hidrógeno como principal combustible para eliminar la dependencia de los combustibles fósiles. En España, solo hay dos coches de hidrógeno en venta, Hyundai Nexo y Toyota Mirai, ambos coches son de pilas de combustibles con autonomías de 650-700 km [15].

Aunque de momento solo haya coches de hidrógeno de pilas de combustibles, muchas compañías están investigando sobre un motor de combustión interna de hidrógeno para la posibilidad de reciclar y reutilizar motores de coches.

2.3 Hidrógeno como combustible del sector de transporte

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica, siendo este el más ligero, simple y abundante del universo, forma parte del 75 % de la materia existente. Aunque en la mayoría de los casos siempre se encuentra combinada con otros elementos, los más comunes son el oxígeno y el carbono, formando agua y compuestos orgánicos [16].

Por tanto, el hidrógeno es un vector energético ya que no se puede obtener directamente de la naturaleza como sucede con el carbón, petróleo o gas natural. Por lo que, se obtiene mediante distintos "métodos de fabricación". Dependiendo del método, se puede clasificar el hidrógeno como un combustible medioambientalmente válido o no (Figura 6). En la Tabla 1 se explican, además, de manera resumida los diferentes tipos de hidrógeno en función de su proceso de obtención.

Figura 6. Obtención del hidrógeno en función de sus emisiones de CO_2.

Tabla 1. Tipos de hidrógeno [17].

Tipo:	Definición
Hidrógeno marrón/negro	Obtención del hidrógeno a partir de la gasificación del hidrocarburo (marrón) o del carbón (negro).
Hidrógeno gris	Obtención del hidrógeno a partir del gas natural con diferentes procesos, entre ellas se destaca el reformado de vapor u oxidación parcial.
Hidrógeno amarillo	Obtención del hidrógeno a partir de la electrólisis, uso del agua como materia prima. La energía usada para la electrólisis es mixta.
Hidrógeno azul	Obtención del hidrógeno similar al hidrógeno gris, pero se aplican técnicas de captura y almacenaje del dióxido de carbono reduciendo hasta un 95 %.
Hidrógeno rosa	Obtención del hidrógeno similar al hidrógeno amarillo, pero energía procedente de una central nuclear.
Hidrógeno verde	Obtención del hidrógeno a partir de la electrólisis, uso del agua como materia prima y la electricidad procedente de una fuente renovable.

Como se puede apreciar en la Figura 6, la obtención del hidrógeno se puede conseguir a partir de varios tipos de materia prima. Actualmente, el consumo en España del hidrógeno se sitúa en torno a 500.000 t/año, mayoritariamente de hidrógeno gris. La producción del hidrógeno proviene directamente de la propia refinería de petróleo y en algunas ocasiones, de fábricas de productos químicos y metalurgias.

Una de las soluciones a la reducción masiva en la dependencia del uso de los combustibles fósiles es la reducción de la automoción de motor de combustión interna que depende de esta. Como muestra en la Figura 2, los coches representan un 60,6 % aproximadamente de las emisiones de gases de efectos invernaderos de transporte en carreteras. Por lo que, para llegar a la neutralidad climática en 2050 y la descarbonización del planeta, la Unión Europea apuesta firmemente en el uso del hidrógeno verde como el vector energético clave, las razones de ello son [18]:

- Tiene un poder calorífico superior al resto de los combustibles (Tabla 2) al tener una densidad tan baja [19].
- Los gases que emite después de la combustión para la producción de la energía es vapor de agua, no tiene emisiones de gases de efecto invernadero, por lo que, cumple con las políticas climáticas establecidas en la Agenda 2030 [20].
- Uso de la electrólisis para la carga de la batería del coche. Esta reacción solo produce agua al hacer el hidrógeno reaccionar con el oxígeno.

Tabla 2. Comparación del Poder Calorífico de los combustibles.

Combustible	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)
Hidrógeno	141,86	119,93
Metano	55,53	50,02
Propano	50,36	45,6
Gasolina	47,5	44,5
Diésel	44,8	42,5
Metano	19,96	18,05

2.4 Evolución de coches de hidrógeno

Los vehículos de hidrógeno pueden clasificarse en dos grandes categorías: aquellos que emplean pilas de combustible para generar electricidad a partir de la reacción electroquímica entre hidrógeno y oxígeno, y aquellos que utilizan motores de combustión interna de ciclo Otto adaptados para funcionar con hidrógeno. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de los diferentes coches de hidrógeno de la compañía Toyota.

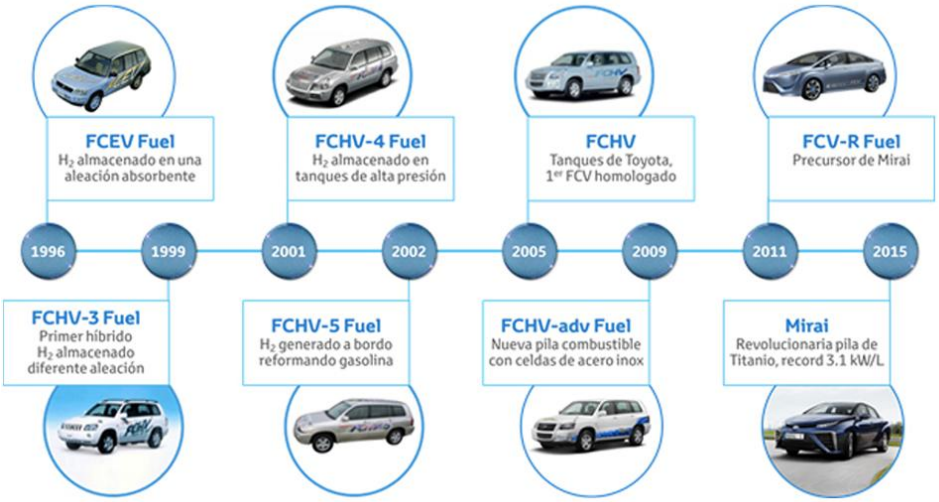


Figura 7. Línea cronológica de coches de hidrógeno de Toyota de pilas de combustibles [21].

Como se puede apreciar en la Figura 7, Toyota apuesta enormemente por coches de hidrógeno de pilas de combustible. La razón de ello es que en un motor de combustión interna de hidrógeno (H2-ICE) tiene una pérdida de potencia mecánica por el rozamiento entre las piezas mecánicas, pérdida de calor por la combustión y en las emisiones de los gases residuales como el vapor de agua y la posibilidad de producción de gases nocivos como el NO_X por las altas temperaturas de combustión [22].

Figura 8. Toyota Mirai (Toyota).

El vehículo más moderno es el Toyota Mirai (Figura 8), lanzado en 2015 como el primer vehículo híbrido eléctrico de pila de combustible (FCHV) con una autonomía de hasta 650 km. En 2019, se mejora la autonomía hasta 850 km. Cuenta con frenos regenerativos, una velocidad máxima de 175

km/h y 182 CV de poder con un par de 300 Nm [23].

Figura 9 .NamX HUV (NAMX).

En 2022, la empresa marroquí NamX diseña uno de los SUV de lujo más revolucionado hasta hoy en día, NamX HUV (Figura 9). Se trata de un coche tipo SUV que usa pilas de combustibles a partir de hidrógeno para la generación de electricidad que alimenta al motor eléctrico. Presenta una particularidad de disponer de un tanque principal de hidrógeno y 6 cápsulas intercambiables recargables. Tiene una autonomía de aproximadamente 800 km, 300-550 CV de poder y lo más importante, cero emisiones de gases de efecto invernadero.

Figura 10. BMW iX5 (BMW España).

Una de las empresas de automoción más importantes del mundo, BMW, también apostará por coches de pilas de combustible. La empresa presentará el modelo, BMW iX5 en 2028 con datos técnicos de 401 CV de poder, autonomía de hasta 504 km y una media de 3-6 minutos de repostaje [24].

3. OBJETIVO

La finalidad de este proyecto es estudiar la viabilidad técnica, energética y económica de un vehículo de pila de combustible alimentado con hidrógeno verde. Gracias a ello, se pretende acelerar la descarbonización en el sector automovilístico para alcanzar la neutralidad climática en 2050. Para ello, a continuación, se citan los objetivos parciales que se han de cumplir:

- Diseñar un coche que pueda tener electrólisis integrada y la selección del mejor tipo de electrolizador para la producción de hidrógeno verde, siendo este autosuficiente y más independiente de los suministros externos.
- Implementar paneles solares en el tejado del vehículo y/o frenos regenerativos para la obtención de energía para alimentar la electrólisis de producción de hidrógeno verde o cargar la batería principal del vehículo.
- Diseñar el almacenamiento del hidrógeno que sea fácilmente extraíble y fácil de recargar en caso de ser necesario.
- Realizar un diagrama PID con lazos de control para el funcionamiento óptimo del vehículo.
- Elaborar un estudio económico con el fin de evaluar la viabilidad y la rentabilidad de la compra del vehículo para la gente común realizando un balance económico.
- Impulsar el uso y la producción del hidrógeno verde en España.
- Impulsar la necesidad de construir una red troncal de hidrógeno, conectando los mayores centros de producción de hidrógeno en España (TSO de gas español, Enagás).

4. SOLUCIÓN TÉCNICA

4.1 Equipo para el combustible

4.1.1 Elección del tipo de electrolizador

La función principal de un electrolizador es la producción del hidrógeno mediante la separación de las moléculas de agua a base de aplicar un proceso químico llamado electrólisis. Para ello, se aplica una corriente para aportar la suficiente cantidad de energía para romper los puentes de hidrógeno que unen las moléculas entre sí y los enlaces covalentes que unen los átomos dentro de la molécula [25].

El electrolizador funciona de la siguiente manera:

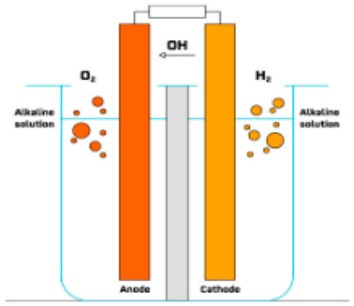


Figura 11. Electrolizador alcalino (Repsol).

1. Se introduce agua dentro del electrolizador.
2. Se aplica corriente eléctrica necesaria para la separación de las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno. En el ánodo se libera oxígeno y en el cátodo se libre hidrógeno, ambos conectados a una fuente eléctrica.
3. Los iones se mueven entre ellos gracias a que ambos son separados por un electrolito. También puede contener una membrana que mejora la pureza y la eficiencia.
4. Se recolecta los gases obtenidos por separado, como se puede ver en la Figura 11 [26].

Existen varios tipos de electrolizadores, este depende del tamaño y su función. Se resume las principales características de los distintos tipos de electrolizadores en la Tabla 3 [27]:

Tabla 3. Comparación de electrolizadores [28].

	AEL	PEM	SOEC	AEM
Consumo energía (kWh/kg H_2)	50-70	52-57	37-45	≤53
Rango de presión típico (bar)	≥30	≥50	20-50	≥35
Eficiencia (%)	60-70	70-85	75-90	60-75
Temperatura (°C)	60-80	50-80	600-900	60-80
Densidad de corriente (A/cm^2)	0,3-0,5	2-3	-	-
Tiempo de respuesta (min)	5-15	inmediato	-	-
Coste (€/kW)	1200-1800	2000-3000	-	-

Para el desarrollo de este proyecto se va a escoger el electrolizador de membrana polimérica protónica (PEM) por los siguientes motivos:

- Electrolizador de óxido sólido (SOEC) y membrana de intercambio aniónico (AEM) se descartan por ser prototipos aún.
- Tiene un rango de presión típica más alta que el resto.
- Es un equipo más compacto.
- Tiene una densidad de corriente mayor, por lo que, es una ventaja clara para proyectos renovables urbanos o similares.
- Eficiencia mayor, permite escalar la capacidad del sistema hasta los 100 kW sin perjudicar la eficiencia del sistema, mientras que en AEL tiene un límite de 10 kW.
- No es necesario la compresión del gas a la salida.

- La inversión capital es mayor, pero produce una pureza de hidrógeno de 99,99 %, facilitando el uso inmediato de este.
- Tiempo de respuesta rápida y eficiente diseño dinámico del sistema, por lo que, es ideal para fuentes de energía renovable de carácter fluctuante como la energía solar.

Uno de los pocos inconvenientes es el uso de un purificador o intercambiador iónico, ya que el agua necesaria para el funcionamiento de este electrolizador tiene que ser muy puro (desmineralizada/desionizada) con una conductividad muy baja, en torno a 0,1µS/cm [29].

4.1.2 Elección del tipo de pilas de combustible

Para el funcionamiento del vehículo, es necesario el uso de un dispositivo que transforma la energía química en energía eléctrica a bordo en tiempo real.

Las pilas de combustible (Figura 12) tienen un proceso inverso al electrolizador, parte de un combustible, que en este caso es el hidrógeno, y de un comburente, oxígeno, que reaccionan entre sí para obtener energía eléctrica en forma de corriente continua, agua y calor [30].

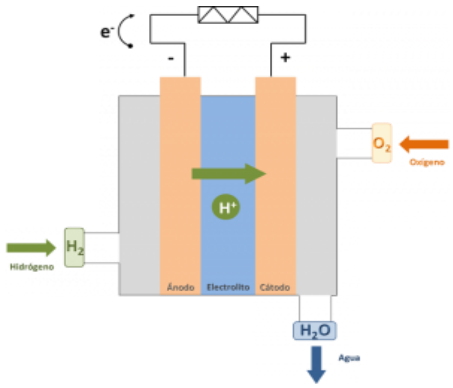


Figura 12. Pila de combustible (CNH2).

Consta de las siguientes partes:

- **Electrolito**: separa los gases permitiendo el paso de iones H^+ al cátodo y separa el e^-.
- **Electrodos**: consta de dos partes, el ánodo donde se reduce el H_2 a dos protones de H^+ y el cátodo donde reaccionan los protones H^+ y O_2.
- **Placas bipolares**: son las placas exteriores de la pila de combustible, su función principal es la conducción de los gases y la evacuación del agua.

Para la producción de la electricidad, el hidrógeno se disocia en el ánodo en protones y electrones, donde los protones pasan por el electrolito hacia el cátodo, mientras que los electrones son forzados a pasar por un circuito exterior produciendo energía eléctrica. Esto pasa ya que la membrana, donde se encuentra en el electrolito, es aislada eléctricamente.

Una vez que el electrón llega al cátodo, este reacciona con las moléculas del oxígeno junto a los protones H^+ para producir moléculas de agua con una temperatura de salida de 60-80 °C.

Existen varios tipos de pilas de combustible que se clasifican principalmente por el tipo de electrolito que utilizan, estos son los mostrados en la Tabla 4 [31]. Cada una de las pilas de combustible tiene su tipo de electrolito, y este determina el tipo de reacción en las celdas, el rango de temperatura de trabajo y al tipo de uso y aplicación:

Tabla 4. Comparación de pilas de combustibles [30].

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
T. Operación (°C)	60-80	100-120	200-250	600-700	800-1000	50-120
Rango Potencia (kW)	2-250	5-150	50-11000	100-2000	100-250	5
Densidad de corriente (A/cm^2)	0,5-2	0,1-0,5	0,2-0,4	0,15-0,3	0,2-1	0,02-0,15
Eficiencia (%)	40-70	50-60	35-45	45-60	50-65	20-30

Para el desarrollo de este proyecto, se va a escoger la pila de combustible PEMFC, por los siguientes motivos:

- No emisión de elementos contaminantes, siendo este agua y calor.
- Compatibilidad con el electrolizador PEMWE. El agua residual del PEMFC, junto al calor residual, tiene una temperatura óptima para el funcionamiento del PEMWE, siendo este también un agua muy pura sin necesidad de purificador de por medio.
- Tiene una densidad de corriente mayor, por lo que, es una ventaja clara para proyectos renovables urbanos o similares
- Tiempo de respuesta rápida y eficiente diseño dinámico del sistema, por lo que, es ideal para fuentes de energía renovable de carácter fluctuante como la energía solar.
- Es la más usada a nivel industrial, por su temperatura de operación y tamaño, es ideal para el sector automovilístico terrestre, aviaria y marina.

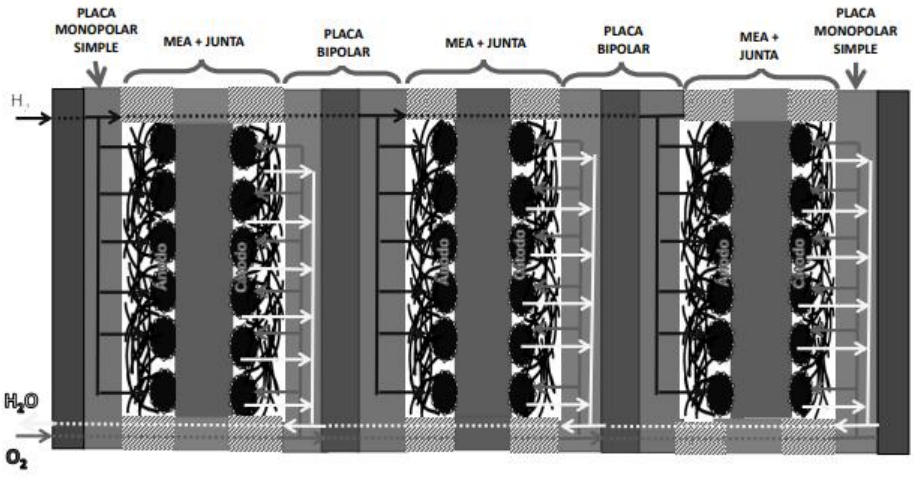


Figura 13. Pila de combustible PEM tradicional (JALVASUB ENGINEERING).

En la Figura 13 se muestra el esquema de una pila de combustible tipo PEM tradicional, mientras que en la Figura 14 se muestra el tamaño de mercado de las pilas de combustible de este tipo en USA. Como se puede observar, su crecimiento ha sido exponencial en los últimos años, lo que implica el mayor grado de desarrollo de esta tecnología y un abaratamiento de los costes.

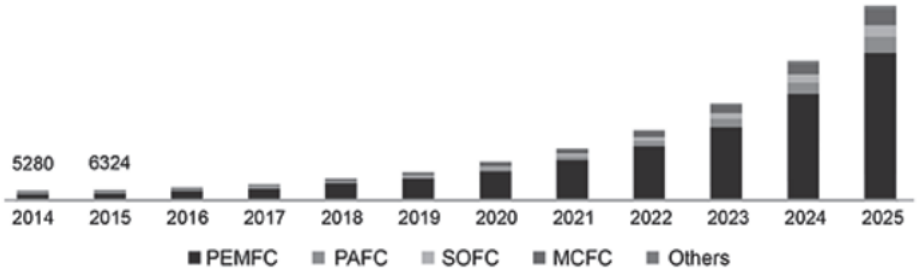


Figura 14. Tamaño del mercado de pilas de combustible en USA, 2014-2024 por JALVASUB ENGINEERING.

4.2 Motor eléctrico

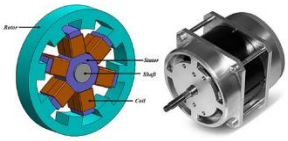
A diferencia de los motores de combustión interna, un motor eléctrico no necesita cilindros ni pistones, sino un conjunto de piezas para convertir la electricidad proveniente, en la mayoría de los casos de una batería, en energía mecánica.

Michael Faraday, padre de los motores eléctricos, demostró en 1821, por medios electromagnéticos, el principio de la conversión de la energía eléctrica en energía mecánica. El motor utiliza la corriente proveniente de la batería para generar un campo magnético en la parte fija (estator) que pone en movimiento mecánico el rotor, propulsando el vehículo [32].

4.2.1 Tipos de motores eléctricos y la selección

Una de las partes más importantes para el funcionamiento de cualquier vehículo es el motor. En este caso, se trata de un motor eléctrico. Actualmente los cuatro tipos motores eléctricos más usados en los vehículos están representados en la Tabla 5:

Tabla 5. Comparación de motores eléctricos [33].

Tipo de motor eléctrico	Eficiencia Pico (%)	Coste
Figura 15. Motores de Imanes Permanentes (PMSM).	94-97	Alto
Figura 16. Motor asíncrono o inducción.	90-93	Medio
 *Figura 17. Motor de Reluctancia Variable.*	88-92	Bajo
Figura 18. Motor Sin Escobilla (BLDC).	85-90	Medio

Para el desarrollo de este proyecto se va a elegir el uso del motor síncrono de imanes permanentes de flujo axial (PMSM), aunque la más utilizada es la radial, por los siguientes motivos:

- Se considera el futuro de los motores eléctricos por su alta eficiencia energética llegando a los 97 % del aprovechamiento de la potencia mecánica.
- Tiene una densidad de potencia (relación potencia-peso) muy alta, produce la misma potencia que un motor radial o motor de combustión interna con solo el 60-70 % de su masa. Esto también se traduce a una mejora en la autonomía por su reducido peso.

- Diseño versátil al ser un motor con una forma plana. Gracias a su tamaño reducido se puede integrar directamente en cada rueda del vehículo, ahorrando espacio, peso, y ofreciendo mejor par motor y una capacidad de respuesta más rápida.
- El motor PMSM mantienen una temperatura estable de unos 70-80 °C, por tanto, tiene una sinergia térmica perfecta con el electrolizador que trabaja de manera eficiente a una temperatura de 60-80%.
- Los motores PMSM también actúan como generadores de alta precisión, al tener frenos regenerativos instalados, el par negativo que se genera al frenar produce una cantidad de electricidad que se podrá alimentar al electrolizador o almacenarlo en la batería auxiliar.

4.3 Almacenamiento de hidrógeno

El hidrógeno es un elemento en estado gaseoso en temperaturas ambientes, por lo que, para almacenarlo se requiere de tratamientos especiales. La razón de ello es por sus propiedades físicas y químicas únicas, que lo hace difícil de contener, no es inerte con la materia que lo rodea y es altamente inflamable [34].

Para ello, se decide usar almacenamiento en tanques y cápsulas extraíbles por compresión, sus características se describen en la Tabla 6:

Tabla 6. Características del almacenamiento del hidrógeno [35].

	Tanque Principal	**Cápsulas extraíbles**
Capas	3	3
Presión (Bar)	700	700
Capacidad (kg H_2)	5	1
N.º de unidades	1	3
Estado del combustible	Gas comprimido	Gas comprimido
Capa interior (liner)	Resina de nylon 6	Resina de nylon 6
Capa intermedia	CFRP (Polímero Reforzado con Fibras de Carbono)	CFRP (Polímero Reforzado con Fibras de Carbono)
Capa externa	GRFP (Polímero Reforzado con Fibras de Vidrio)	GRFP (Polímero Reforzado con Fibras de Vidrio)

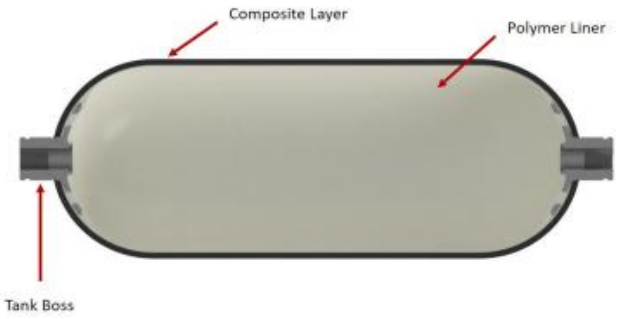


Figura 19. Tanque de hidrógeno presurizado de tipo IV

Como se puede observar en la Figura 19, se trata de un tanque de hidrógeno tipo IV. Las tres cápsulas de hidrógeno y el tanque principal van a ser del mismo material. Cada capa tiene su propia función:

- La capa interior consta de la poliamida 6 (PA6), un polímero termoplástico ampliamente utilizado en las industrias donde requieren un revestimiento interior (liners) para tanques de altas presiones. Esto es gracias a que es un polímero de baja permeabilidad, lo que hace perfecto para prevenciones de fuga de gases, inerte hacia los materiales que le rodea, ligero, barato en comparación con el resto de los metales y no presenta fragilización por hidrógeno [36].
- La capa intermedia consta del polímero reforzado con fibras de carbono (CRFP). Es un polímero termoplástico que puede extremas presiones sin ser deformadas. Cuenta con una resistencia de tracción mucho mayor que el polímero reforzado con fibras de vidrio, por

tanto, se necesita menos grosor para soportar las presiones y ofrece las resistencias mecánicas justas para evitar las deformaciones por fatiga bajo cargas y descargas constantes del gas presurizado [37].

- La capa externa consta del polímero reforzado con fibras de vidrio (GRFP). Como se mencionó en el apartado anterior, no tiene una resistencia de tracción tan alta como la CRFP y también es más pesado y menos rígido para el mismo nivel de resistencia mecánica, pero ofrece mayor resistencia al impacto, perfecto para la protección física del tanque o cápsula.

4.4 Alimentación para el electrolizador

4.4.1 Placas solares

Para la producción del hidrógeno, se necesita la aplicación de energía de una fuente externa. Para este proyecto, la energía procedente para el electrolizador vendrá de las placas solares instaladas en el techo del vehículo y de los frenos regenerativos junto a los motores instalados en cada rueda.

Para las placas solares, se descarta Amorfa y Silicio Policristalino por su baja eficiencia y su gran ocupación de espacio para su rentabilidad. Algunos de los potenciales paneles que se podrían usar están recogidos en la Tabla 7:

Tabla 7. Comparación de placas solares

	TOPCon [38]	**Type-N IBC** [39]	**HJT / Perovskita**
Eficiencia (%) [40]	21-24	23-25	25-30
Coste	Medio	Medio	Alto
Vida útil (años)	25-30	≤30	<30
Espacio necesario	Poca	Poca	Media
Coeficiente de temperatura	-0,32 %/°C	-0,29 %/°C	-0,243 %/°C
Degradación primer año	1,5 % el primer año	1,5 % el primer año	1 % el primer año
Degradación por año	0,4 % el resto de los años	0,4 % el resto de los años	0,35 % el resto de los años

Para el desarrollo de este proyecto, se va a utilizar placas solares monocristalinas de Tipo-N IBC (Contacto Posterior Interdigitado) por los siguientes motivos:

- Los paneles solares de las células tándem HJT/Perovskita son demasiados caros y difíciles de producir por los materiales que se requiere.
- Es un panel solar que sitúan todos los contactos eléctricos en la parte trasera, eliminando las sombras de las barras colectoras frontales, maximizando la captación solar y el rendimiento, siendo ideales para tejados con espacio limitado.
- **Alta eficiencia en la conversión energética**: tiene un rendimiento mayor que los monocristalinos TOPCon (Contacto pasivado de óxido de túnel).

- **Excelente rendimiento a altas temperaturas** como se muestra en Figura 20.

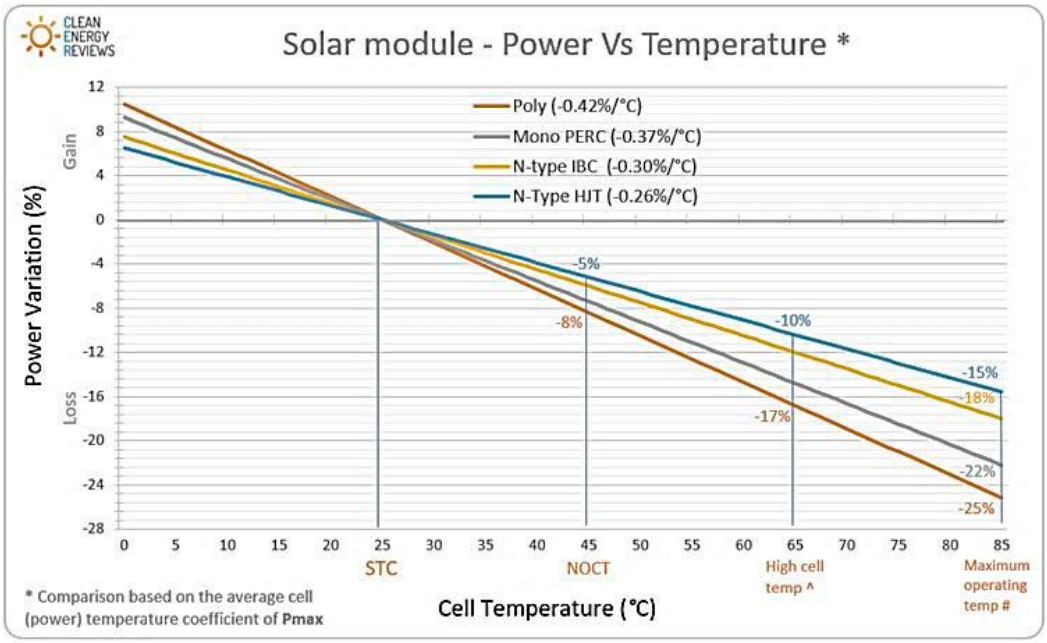


Figura 20. Comparación de distintos Paneles Solares. Fuente: Clean Energy Review.

- **Diseño visual elegante**: gracias al diseño de sus módulos, este presenta una superficie frontal sin líneas de rejilla visibles, creando una apariencia limpia y uniforme, con un color totalmente negro.

4.4.2 Frenos regenerativos

A finales del siglo XIX, el director técnico e ingeniero Louis Antoine Kriéger, comenzó a diseñar y construir coches eléctricos tirados por caballos e implementó frenos regenerativos en su eje delantero gracias a una bobina. Poco después, se empezó a implementar este sistema en los sistemas ferroviarios eléctricos en pleno auge de los trenes en Inglaterra. Un siglo después, se implementó el sistema KERS (Sistema de Recuperación de Energía Cinética) en Fórmula 1, donde alcanzó una mejora notable y abrió las puertas hacia la comercialización en las carreteras urbanas. El funcionamiento de los frenos regenerativos (Figura 21) consta del aprovechamiento de la energía cinética durante la frenada de los coches que se pierde en forma de vibración y calor por la fricción. Asimismo, gracias a este sistema, se garantiza un ahorro de energía, más autonomía y protección de los materiales frente a la fatiga por el ruido, las vibraciones y una reducción en la temperatura por energía residual.

Figura 21. Frenos regenerativos (Movilidad eléctrica)

Los motores eléctricos pueden funcionar como motor y como generador dependiendo de su torque (Figura 22). En las frenadas, el torque del motor es invertido, generando un torque negativo, donde el rotor gira inversamente generando electricidad. Gracias a un inversor, este puede ser enviado directamente a la batería o acumularse en una batería auxiliar para su uso posterior [41].

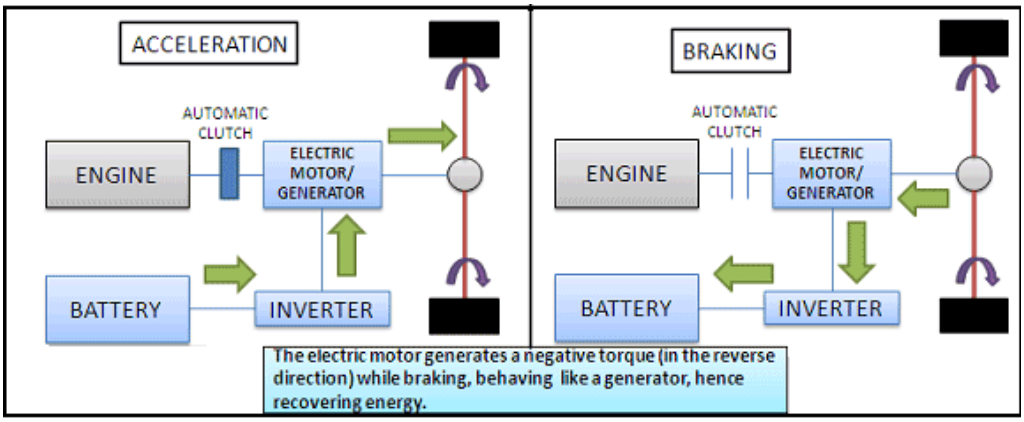


Figura 22. Funcionamiento de un freno regenerativo.

Para el estudio de su eficiencia en distintas rutas y carreteras, investigadores de la Universidad Politécnica Salesiana en Ecuador [42] hicieron un experimento en condiciones reales de conducción y en diferentes geografías de carretera (Figura 23).

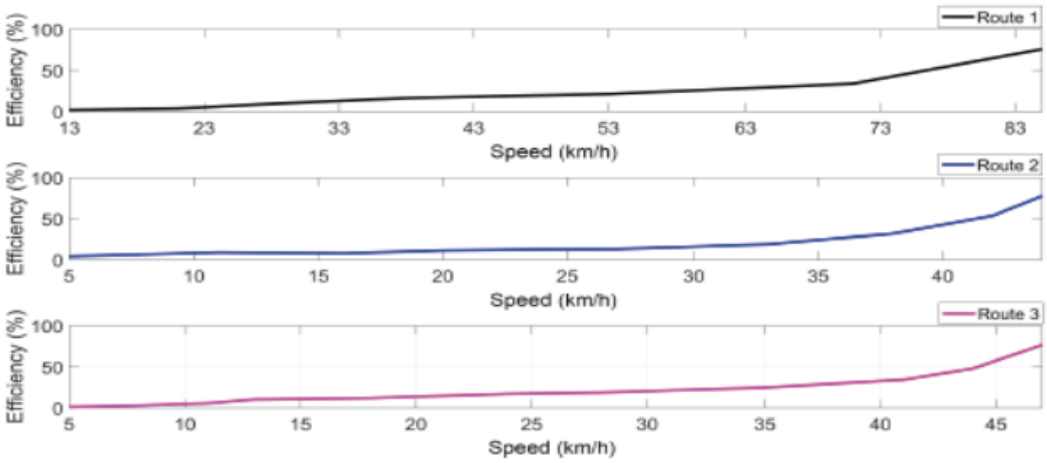


Figura 23. Eficiencia del frenado regenerativo a velocidades específicas

Donde:

- La ruta 1 consta de una mayor pendiente, lo cual se traduce en una mayor demanda de potencia del vehículo para superar las inclinaciones pronunciadas.
- La ruta 2 consta dentro de la carretera urbana, lo cual se traduce a un mayor tráfico que causa un mayor uso de los frenos.
- La ruta 3 consta de una combinación de las dos rutas anteriores.

Los resultados demuestran que los frenos regenerativos tienen mucha influencia en cuanto al peso del vehículo, el par, la velocidad, la inclinación de la calzada y el tiempo de frenado. Como se puede observar, las rutas 1 y 3 tienen mayores tiempos de frenado, por lo que se traduce a una mayor pérdida de energía cinética a mayores velocidades y altos recuperaciones de energía cinética.

4.5 Baterías

La batería es una pieza fundamental en cualquier dispositivo electrónico, en especial los vehículos, ya sean eléctricos o de combustión interna. Para los coches, se usan principalmente baterías de ion-litio. Entre ellas, destacan las mostradas en la Figura 24 por sus características, las cuales se encuentran resumidas en la Tabla 8:

Figura 24. Comparación de distintos tipos de baterías de ion litio.

Tabla 8. Comparación de características de diferentes baterías ion litio [43].

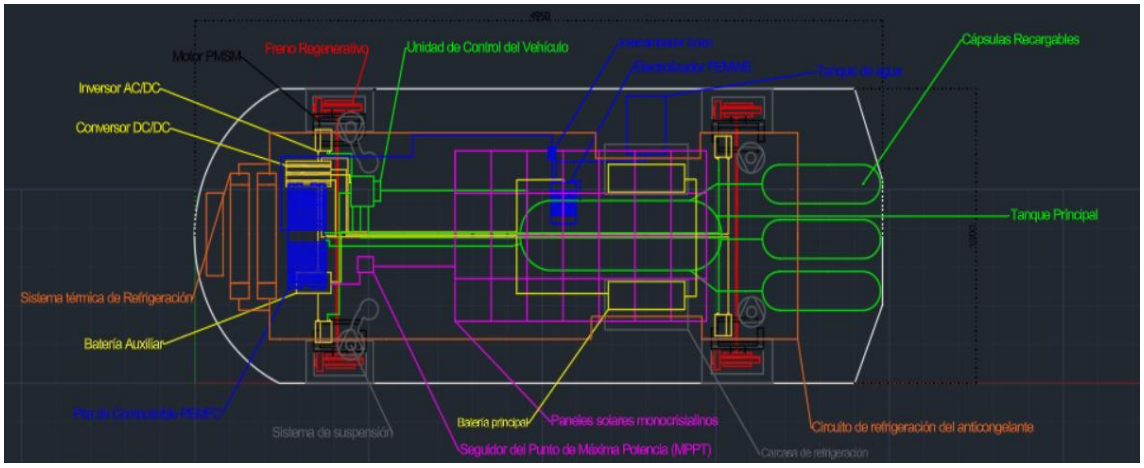
Características	NMC	LFP	NCA
Densidad energética (Wh/kg)	150-220	90-120	200-250
Ciclos de Vida	1000-2000	<2000	1000-2000
Estabilidad térmica	Alta	Muy alta	Alta
Tensión Nominal (V)	3,6	3,2	3,6

Para el desarrollo de este proyecto se opta por la utilización de batería ion-litio NMC (Níquel-Manganeso-Cobalto) por los siguientes motivos:

- Aunque el precio es más caro que la batería ion-litio LFP (Litio ferro-fosfato), la batería ion litio NMC tiene una densidad energética mucho mayor ya que se busca una mayor autonomía para el mismo peso. Esto también se traduce a un menor peso y uso del espacio.
- Aunque la batería litio NCA (Níquel Cobalto Alumnio) tiene una densidad mayor, este presenta ciertas desventajas que incluye el sobrecalentamiento, perjudicando el ciclo de vida, y la fuga térmica que se traduce a un mayor requerimiento en la refrigeración [44].

4.6 Dimensionamiento de los equipos

El Plano I que aparece a continuación, es el plano del vehículo de hidrógeno que se ha desarrollado en este proyecto realizado en AUTOCAD. También se le ha incluido en el ANEXO I para una mejor observación si se quiere realizar un análisis con más detalle.



Plano 1. Plano general del proyecto. Fuente: elaboración propia.

Como puede observarse, en la zona central se sitúa la pila de combustible PEMFC junto con el electrolizador PEMWE, elementos encargados de la gestión y conversión de la energía asociada al hidrógeno. En la parte posterior se encuentra el sistema de almacenamiento, compuesto por un tanque principal y varias cápsulas recargables para el almacenamiento de hidrógeno.

El sistema de propulsión eléctrica está formado por un motor síncrono de imanes permanentes (PMSM), alimentado a través de convertidores electrónicos de potencia AC/DC y DC/DC. Asimismo, se incorpora una batería principal que actúa como elemento de almacenamiento energético complementario, junto con una batería auxiliar destinada a alimentar los sistemas auxiliares del vehículo.

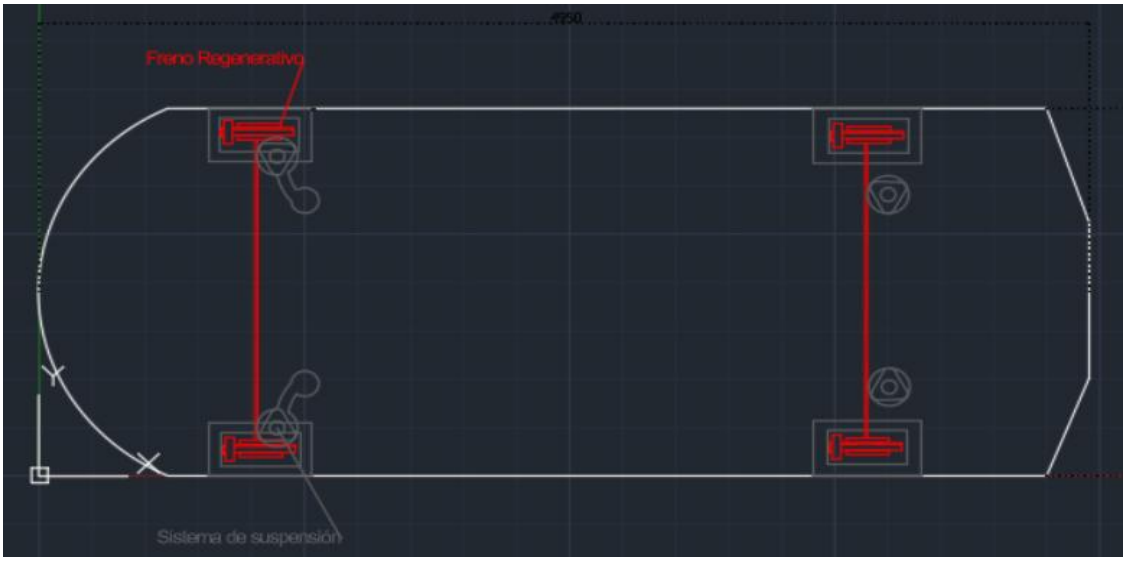
El diseño integra además paneles solares monocristalinos conectados a un seguidor del punto de máxima potencia (MPPT), permitiendo aprovechar la energía solar para apoyar la gestión energética del sistema. Por otro lado, se contempla la recuperación de energía durante las frenadas mediante un sistema de frenado regenerativo.

Finalmente, el esquema incluye diferentes circuitos de refrigeración y sistemas de control destinados a garantizar el funcionamiento seguro y eficiente de los distintos componentes del vehículo.

4.6.1 Las ruedas del vehículo

El Plano II muestra la disposición del sistema de frenado regenerativo integrado en el vehículo. Se observa la incorporación de dispositivos de frenado regenerativo en ambos ejes, permitiendo recuperar parte de la energía cinética durante las fases de desaceleración y frenado. La energía recuperada es convertida en energía eléctrica y almacenada en el sistema de acumulación energética del vehículo para su posterior utilización.

La distribución del sistema en los ejes delantero y trasero favorece una recuperación energética más uniforme durante la conducción, contribuyendo a mejorar la eficiencia global del vehículo y a reducir el consumo de hidrógeno asociado al sistema de propulsión.



Plano 2. Las ruedas del vehículo. Fuente: elaboración propia.

El dimensionado estándar de los neumáticos se expresa bajo el formato [**ANCHO** (mm)]/[**PERFIL** (% ANCHO)]**R**[**DIÁMETRO** (pulgadas)]. Esta medida varía enormemente según el modelo y el propósito del vehículo [45].

El proyecto consta de un vehículo tipo SUV, para ello existen dos configuraciones distintas:

- Configuración cuadrática.
- Configuración Escalonada o "Staggered".

Para este proyecto, se va a elegir la Configuración Escalonada, que consiste en una configuración más común en SUV enfocado al alto rendimiento. Esto se debe a que el eje trasero utiliza ruedas más anchas para manejar mejor la tracción en acelerar, mayor estabilidad en curvas ya que evita que la parte trasera se descontrolo proporcionando un mayor aplomo en curvas rápidas.

Se tomará como referencia el dimensionado de los neumáticos del coche BMW X5, estas medidas provienen de las especificaciones técnicas oficiales de fábrica (OEM) [46]:

- Eje delantero: 255/50R19
- Eje trasero: 285/45R19 [47]

Como se puede observar (Planos I y II), en cada rueda se instalará un freno regenerativo que posteriormente se conectará directamente con un motor PMSM de flujo axial cada uno. Con ello, se va a calcular el peso de cada rueda con un desglose de sus respectivos componentes (Tabla 9):

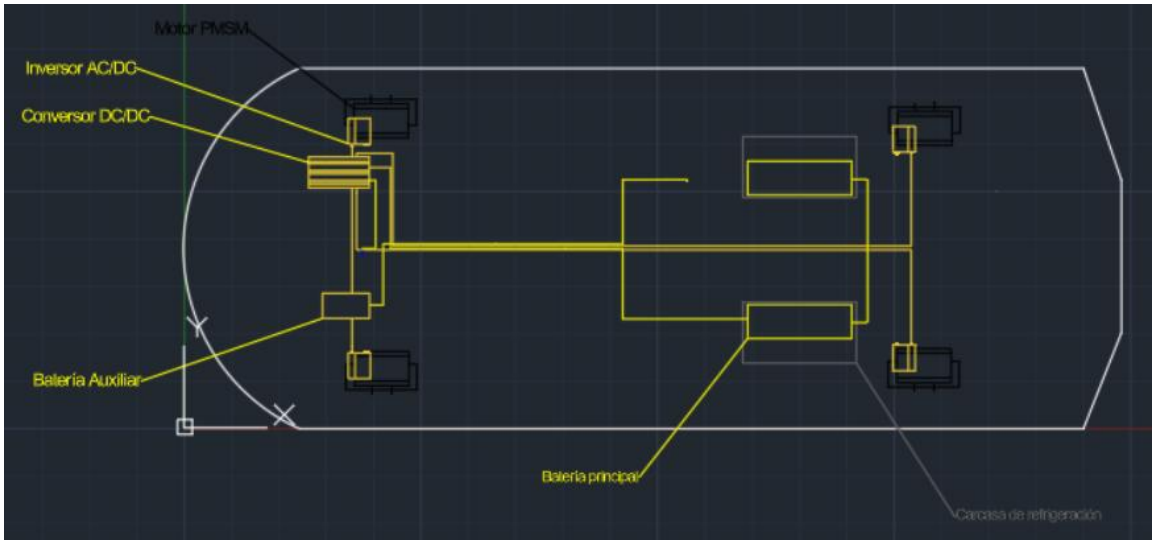
Tabla 9. Peso de los componentes de las ruedas

Componente	Peso (kg)
Motor PMSM	= 52,4 * 4
Llanta de aleación [48]	= 12 * 4
Disco de freno[49]	= 15 * 4
Pinza de freno [50]	= 1,9 * 4
Buje, rodamiento y tornillería	≈ 4,5 * 4
Neumático delantero	= 2 * 14
Neumático trasero	= 2 * 16
Total	403.2

4.6.2 Baterías, convertidor, inversores y los motores.

El Plano 3 muestra la distribución de los principales componentes del sistema eléctrico de propulsión del vehículo. El sistema está constituido por una batería principal, encargada de suministrar la mayor parte de la energía necesaria para la tracción, una batería auxiliar destinada a alimentar los servicios auxiliares y sistemas de control, y la electrónica de potencia formada por un convertidor DC/DC y un inversor AC/DC. La energía almacenada en la batería principal es acondicionada mediante el convertidor DC/DC para adaptar los niveles de tensión requeridos por los distintos subsistemas. Posteriormente, el inversor AC/DC transforma la corriente continua procedente del sistema de almacenamiento en corriente alterna para alimentar el motor síncrono de imanes permanentes (PMSM), responsable de la propulsión del vehículo.

La disposición de los componentes busca una integración compacta del sistema eléctrico, reduciendo las distancias de cableado de potencia y facilitando la gestión energética entre las unidades de almacenamiento, los convertidores electrónicos y el sistema de tracción. Por último, la ubicación de la batería principal en una posición próxima al centro del vehículo contribuye a una distribución más equilibrada de masas, favoreciendo la estabilidad dinámica y el comportamiento durante la conducción.



Plano 3. Baterías, convertidor, inversores y los motores del vehículo, Fuente: elaboración propia.

Para la máxima eficiencia del uso de los frenos regenerativos, se instalará un motor PMSM de flujo axial en cada rueda, esto presenta las siguientes mejoras:

- **Capacidad de recuperación**: al tener 4 motores conectados a 4 frenos regenerativos, se aprovecha al máximo la energía cinética que se pierde en las frenadas.
- **Torque Vectoring**: este tipo de tecnología automotriz ayuda a la distribución de la potencia del motor en cada rueda de forma independiente, gracias al control de unidad del vehículo (Plano 3) instalado en el coche, se puede gestionar de forma eficiente el par motor a las ruedas exteriores en una curva, mejorando el agarre y la eficiencia del uso de la potencia. Gracias a este sistema, el peso de las ruedas calculadas anteriormente puede ser compensadas gracias a este sistema [51].

En cuanto a las baterías, la batería principal y la auxiliar consta de baterías de ion litio NMC de tipo *pouch* (tipo bolsa) [52].

La batería principal consta de una configuración de 120S2P (2 bolsas en paralelo de 60 celdas en serie) de 6 Ah cada bolsa, un total de 12 Ah, de 3,7 voltios nominales estándar. Cada bolsa constará de una carcasa de refrigeración donde circulará el sistema de refrigeración principal del vehículo (Plano 7).

El cálculo de la potencia nominal de la batería principal:

$$V_{nom\,total} = Celdas * V_{nom} = 444\,V \quad (1)$$

$$P_{nom\,total} = V_{nom\,total} * Ah = 5328\,Wh \approx 5{,}33\,kWh \quad (2)$$

La dimensión de los dos módulos divididos sería aproximadamente de 78 x 25 x 16 cm cada uno. En cuanto al peso, esto se calcularía tomando de referencia la marca Soundan New Energy Tecnology Co:

$$Peso_{total} = 120\,celdas * 0{,}318\frac{Kg}{celda} \approx 38{,}2\,kg \quad (3)$$

En cuanto a la batería auxiliar, se implementará un sistema auxiliar de baja tensión ion litio NMC de 13 celdas en serie tipo pouch, de 3,7 voltios nominales estándar de 6Ah, dando 48,1 V. El peso de calculará de la misma forma con la ecuación 3 tomando la misma referencia, llegando a pesar 4,13 kg (Tabla 10).

Tabla 10. Características de la batería Ion Litio NMC utilizado

Tipo de batería	Ion litio NMC
Configuración de la batería	120S2P
Número de celdas	120
Voltaje Nominal	444 V
Potencia Nominal	5,33 kWh
Peso de la batería	38,2 kg
Dimensionamiento de un módulo	78 x 25 x 16 cm

Los motores del vehículo, como se ha mencionado anteriormente (véase apartado 4.2.1), se instalará en cada rueda un motor PMSM de flujo axial tomando como referencia la marca Matris. Cada rueda tendrá una potencia de 50 CV, un total de 200 CV:

$$P_{coche} = CV * \ 0{,}74\frac{kW}{CV} = 148\ kW \quad (4)$$

El rendimiento de los motores es de 98%, el resto se disipará en forma de calor:

$$P_{calor} = P_{coche} * \ 0{,}02 \ \approx 2{,}96\ kW \quad (5)$$

Cabe destacar que el motor de la empresa Matris viene con un diseño "apilable", significa que, si en un futuro el coche necesita más potencia para llevar más carga, solo es necesario apilar o encajar otro disco de motor sin la necesidad de cambiar el chasis. Esta configuración, tendrá un peso total de 209,6 kg, 52,4 kg por motor. En la Tabla 11 se muestran sus características.

Se debe instalar un inversor AC/DC en cada rueda del coche para el funcionamiento del motor síncrono y para la generación de energía gracias a los frenos regenerativos. En cuanto a la conexión del inversor hacia las baterías, se debe instalar un convertidor DC/DC.

Tabla 11. Características del motor eléctrico utilizado

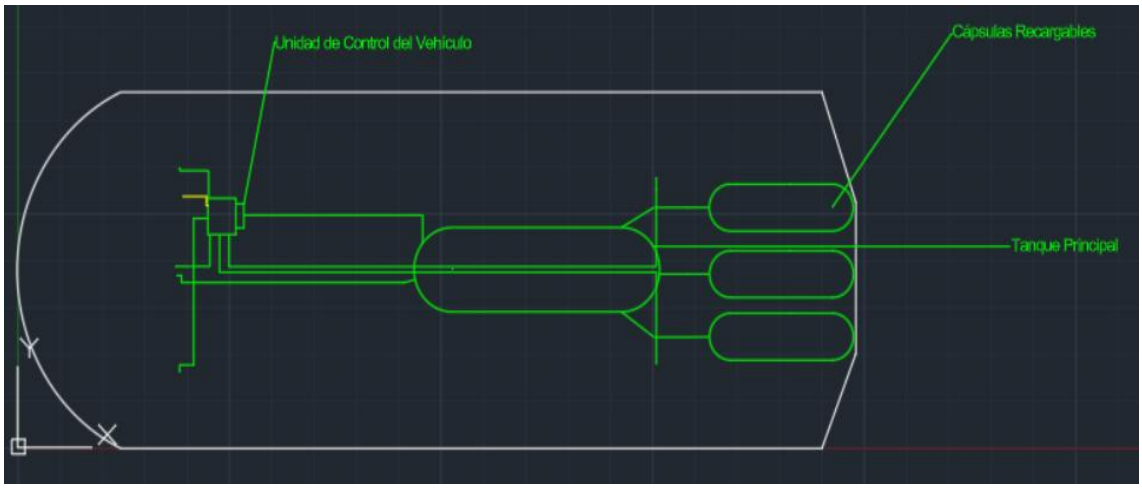
Tipo de motor	Motor eléctrico de imanes permanentes de flujo axial
Cantidad de motores	4
Eficiencia	98 %
Potencia máxima del coche	148 kW (200CV)

4.6.3 VCU y almacenamiento del combustible

El Plano 4 muestra la disposición de la Unidad de Control del Vehículo (VCU, *Vehicle Control Unit*) y del sistema de almacenamiento de hidrógeno. La VCU actúa como el centro de supervisión y control del vehículo, coordinando el funcionamiento de los diferentes subsistemas energéticos y de propulsión para garantizar una operación eficiente y segura.

En la parte central y trasera del vehículo se sitúa el sistema de almacenamiento de combustible, compuesto por un tanque principal y tres cápsulas recargables auxiliares destinadas al almacenamiento de hidrógeno. Esta configuración permite incrementar la capacidad total de almacenamiento, proporcionando una mayor autonomía operativa al vehículo.

La ubicación de los depósitos en la zona posterior favorece el aprovechamiento del espacio disponible y facilita la conexión con el sistema de suministro de hidrógeno hacia la pila de combustible. Asimismo, la distribución propuesta busca mantener una disposición compacta de los componentes y minimizar las longitudes de las conducciones necesarias para el transporte del combustible.



Plano 4. VCU y almacenamiento del combustible. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se procede a explicar las funciones del VCU [53]:

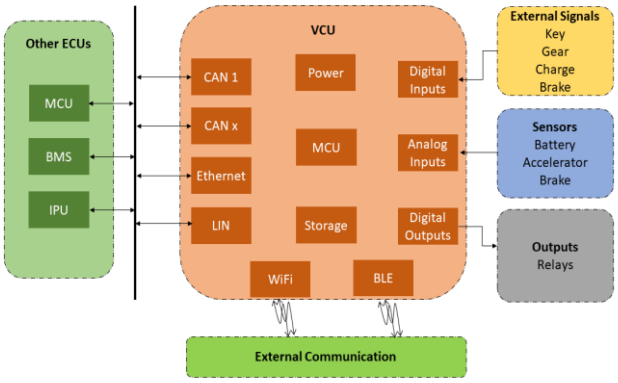


Figura 25. Arquitectura de hardware de un VCU. Fuente: Embien

- **Interacción con Unidades de Control Eléctrico (ECU):** la VCU sirve como central de comunicación entre diferentes ECU dentro del vehículo. Recibe datos de sensores y transductores instalados en diversos sistemas y componentes del vehículo. También están conectados a varios sistemas como Sistemas Avanzados de Asistencia al Conductor, información entretenimiento y funciones de conectividad.
- **Control de tren motriz:** una de las funciones críticas de la VCU es saber el tipo de modo en operación según la disponibilidad de la energía y los requisitos del conductor. Este incluye modos como Potencia o Económica, y modo Limp cuando se detecta una anomalía dentro del vehículo, los RPM y la entrega de potencia están limitados para permitir conducir de manera segura hasta el centro de servicio más cercano.
- **Monitoreo de sistemas críticos:** la VCU es responsable de monitorear los sistemas críticos del vehículo. Esto incluye análisis constantes de la salud de los componentes como la batería, el motor y el sistema de carga, gracias a los sensores y transductores instalados.

Para el almacenaje de hidrógeno (véase 4.3), se va a coger de referencia a la compañía Hexagon Purus, compañía líder global en la producción de tanques de hidrógeno tipo IV [54].

Para el tanque principal de 5 kg de H_2, el peso se calculará a partir de una interpolación, cogiendo de referencia dos tanques (Tabla 12):

Tabla 12. Datos de los tanques de referencia

	Tanque 1	Tanque 2
Presión (Bar)	700	700
Capacidad de hidrógeno (kg)	3,1	9,8
Longitud del cilindro (mm)	1050	2154
Diámetro exterior (mm)	440	530
Peso del cilindro (kg)	59	188

A partir de la ecuación 6, se calcula los datos técnicos del tanque principal y de las cápsulas extraíbles de este proyecto (Tabla 13):

$$y = y_1 + \frac{(x - x_1) \cdot (y_2 - y_1)}{x_2 - x_1} \tag{6}$$

Tabla 13. Datos del tanque principal y de las cápsulas Intercambiables

	Tanque Principal	Cápsulas
Presión (Bar)	700	700
N.°	1	3
Capacidad de hidrógeno (kg)	5	1
Longitud del cilindro (mm)	1363	853
Diámetro exterior (mm)	466	312
Peso del cilindro (kg)	96	19

Peso total del almacenaje:

$$Peso_{almacenaje} = Peso_{tanque} + 3 * Peso_{cápsulas} + 8\ kg\ H_2 = 161\ kg \tag{7}$$

También es necesario implementar un Regulador de Presión de Doble Etapa y una Válvula Reguladora de Temperatura y Térmicas Integradas, la razón de ello son:

- Es necesario un regulador de presión de doble etapa para reducir el efecto de *droop*, ya que este efecto provoca pérdida de rendimiento y oscilaciones en la red eléctrica, llegando a daños internas del sistema eléctrico. [55]
- Por balance de materia, esta caída de presión provoca el efecto inverso de Joule-Thomson, donde si la caída de presión fuera de una sola etapa, este congelaría todo a su paso por la absorción del calor, por lo que, es necesario un regulador de presión de doble etapa junto a una válvula de reguladora de temperatura.
- Al ser un vehículo, la demanda de hidrógeno no es constante, por lo que, un regulador de dos etapas ayuda a manejar la cantidad exacta de hidrógeno en las aceleraciones sin caídas repentinas de presión que pueden apagar la pila de combustible [56].

4.6.4 PEMFC y PEMWE

El Plano 5 muestra la disposición de los principales elementos que conforman el sistema de generación y conversión energética del vehículo. El conjunto está integrado por una pila de combustible PEMFC, un electrolizador PEMWE, un intercambiador térmico y un tanque de agua, todos ellos conectados para gestionar los flujos de materia y energía necesarios para el funcionamiento del vehículo. La ubicación propuesta de estos componentes responde a criterios de integración espacial y funcional dentro de la arquitectura global del sistema. En los apartados

siguientes se describe en detalle la función y el principio de funcionamiento de cada uno de estos elementos:

Plano 5. PEMFC y PEMWE. Fuente: elaboración propia.

4.6.4.1 PEMFC

La pila de combustible utilizada (PEMFC) tiene un total de 440 celdas y una densidad de corriente de 1 A/cm². Para calcular la cantidad de energía que se produce y su peso se debe tener en cuenta ciertos parámetros [57]:

- El comportamiento de cada celda tiene que ser idénticas, y el cálculo de la potencia del conjunto se puede obtener superponiendo varias celdas.
- La reacción electroquímica tiene que ser como lo demuestra la ecuación 8:

$$\begin{gathered} Anode: 2H_2 = 4H^+ + 4e^- \\ Cathode: O_2 + 4H^+ + 4e^- = 2H_2O \\ Total: 2H_2 + O_2 = 2H_2O \end{gathered} \quad (8)$$

- El voltaje de salida de la pila de combustible será calculado a partir de la diferencia entre la potencial de Nernst (ecuación 10) y pérdidas de potencia, que serían de activación, de la resistencia óhmica y de la polarización por concentración:

$$E_{PEMFC/Celda} = E_{Nernst} - v_{act} - v_{ohm} - v_{con} \quad (9)$$

- **Voltaje de Nernst:**

$$E_{Nernst} = 1{,}229 - 0{,}85 * 10^{-3} * (T - 298{,}15) + 4{,}3085 * 10^{-5} * T[ln(p_{H2}) + 0{,}5ln(p_{O2})] \quad (10)$$

Para p_{H2} y p_{O2} son las presiones parciales que se calcula a partir del modelo clásico de Amphlett y Mann, cuyos valores son 0,21 atm para la presión parcial de oxígeno asumiendo presión atmosférica al cátodo y al ánodo a temperatura de operación de 80 °C o 353,15 K. [58]

Para el cálculo de la presión parcial de hidrógeno, se tiene que asumir que el aire entrante está completamente seco, teniendo la siguiente ecuación:

$$P_{H2} = P_{ánodo} - P_{H_2O_{sat}} \quad (11)$$

Donde $P_{H_2O_{sat}}$ es la presión de saturación del agua, que a partir de un diagrama psicométrico con aplicación Living Psychrometrics se halla su valor, dando 0,47 atm.

$$P_{H2} = 1 - 0{,}47 = 0{,}53\ atm$$

Con todos los valores obtenidos, se procede a calcular la potencia de Nernst con la ecuación 10:

$$E_{Nernst} = 1{,}229 - 0{,}85 * 10^{-3} * (353{,}15 - 298{,}15) + 4{,}3085 * 10^{-5} * 353{,}15 * [ln(\,0{,}53) + 0{,}5 * ln(\,0{,}21)] = 1{,}16\ V$$

- **Pérdida por activación:**

$$v_{act} = -\left[\xi_1 + \xi_2 * T\ +\ \xi_3 * T * ln\left(C_{O_2}\right) +\ \xi_4 * T * ln(Intensidad\ corriente)\right] \quad (12)$$

Para el cálculo de la ecuación la pérdida por activación, se requiere el conocimiento de los 4 coeficientes constantes en la ecuación 12 a partir del modelo estudiado por Amphlett y de las concentraciones de oxígeno y del hidrógeno [59]:

$$\xi_1 = -0{,}948 \quad \xi_3 = 7{,}6 * 10^{-5} \quad \xi_4 = -1{,}93 * 10^{-5}$$

Para saber el valor del coeficiente ξ_2, se tiene que calcular a partir de la ecuación 13:

$$\xi_2 = 0{,}00286 + 0{,}0002 * \ln(A_{activación}) + 4{,}3 * 10^{-5} * \ln(C_{H^+}) \quad (13)$$

Se va a suponer un área de activación 210 cm² y las concentraciones se calculan a partir de la ley de Henry con las siguientes ecuaciones:

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5{,}08 * 10^6 * \exp\left(-\frac{498}{T}\right)} = 1{,}69 * 10^{-7}\ \frac{mol}{cm^3} \quad (14)$$

$$C_{H_2} = \frac{P_{H_2}}{1{,}09 * 10^6 * \exp\left(-\frac{77}{T}\right)} = 6{,}05 * 10^{-7}\ \frac{mol}{cm^3} \quad (15)$$

$$\xi_2 = 0{,}00286 + 0{,}0002 * \ln(210) + 4{,}3 * 10^{-5} * \ln(6{,}05 * 10^{-7}) = 0{,}0033$$

Por tanto, al tener una densidad de 1Ah/cm², la corriente sería de 210 A, la pérdida por activación tendría un valor de:

$$v_{act} = -\,[-0{,}948 + 0{,}0033 * 353.15\ +\ 7.6 * 10^{-5} * 353{,}15 * ln(1{,}69 * 10^{-7}) +\ -1{,}93 * 10^{-5} * 353{,}15 * ln(210)] = 0{,}24\ V$$

- **Pérdida óhmica:**

$$v_{ohm} = i \cdot R \quad (16)$$

$$R\ = \frac{(r_M * l)}{A_{activación}} \quad (17)$$

Donde r_M es la resistividad, se calcula a partir de la ecuación 18, de la membrana protónica de Nafion y l es el grosor de la membrana con un valor de 0,178 mm: [60]

$$r_M = \frac{181{,}6 * (1 + 0{,}03i + 0{,}062 * \left(\frac{T}{303}\right)^2 * i^{2.5})}{(\lambda - 0{,}634 - 3i) * exp\left(4{,}18\left(\frac{T-303}{T}\right)\right)} \quad (18)$$

La densidad de corriente, i, es 1 A/cm² y el parámetro λ se obtiene a partir de la ecuación 19:

$$\lambda = 0{,}043 + 17{,}81 * a_w - 39{,}85 * a_w^2 + 36 * a_w^3 \quad (19)$$

La actividad del agua, a_w, tiene un valor comprendido entre 0,25 a 0,85 dependiendo de la temperatura y las condiciones del agua. Para este proyecto, la actividad del agua tiene un valor de 0,85 ya que la membrana protónica Nafion no está sumergida completamente.

$$\lambda = 0{,}043 + 17{,}81 * 0{,}85 - 39{,}85 * 0{,}85^2 + 36 * 0{,}85^3 \approx 8{,}5$$

La resistividad de la membrana a partir de la ecuación 18:

$$r_M = \frac{181{,}6 * (1 + 0{,}03 + 0{,}062 * \left(\frac{353{,}15}{303}\right)^2 * 1^{2.5})}{(8{,}5 - 0{,}634 - 3) * exp\left(4{,}18\left(\frac{353{,}15-303}{353{,}15}\right)\right)} = 22{,}96\ \Omega\ cm$$

Por tanto, la resistencia de membrana a partir de la ecuación 17:

$$R = \frac{(22{,}96 * 0{,}0178)}{210} = 0{,}002 \frac{\Omega}{cm^2}$$

La pérdida óhmica a partir de la ecuación 16:

$$v_{ohm} = i \cdot 0{,}002 = 0{,}002\ V$$

- **Pérdida de polarización por concentración:**

$$v_{con} = -B * ln\left(1 - \frac{i}{i_{max}}\right) \quad (20)$$

Donde B es el coeficiente semi empírico del voltaje, que tiene un valor de 0,0136, i_{max} es la densidad de corriente máxima con un valor de 2 A/cm2. A partir de la ecuación 20, se calcula la pérdida por polarización por concentración:

$$v_{con} = -0{,}0136 * ln\left(1 - \frac{1}{2}\right) = 0{,}0094\ V$$

Con la ecuación 9, se calcula el voltaje de salida del PEMFC por celda:

$$E_{PEMFC/Celda} = 1{,}16 - 0{,}24 - 0{,}002 - 0{,}0094 = 0{,}9\ V$$

Con un rendimiento de:

$$\eta_{PEMFC} = \frac{0{,}9}{1{,}16} * 100 = 76\ \%$$

$$V_{nominal\ Stack} = 0{,}9 * 440 = 396\ V$$

$$P_{nominal\ Stack\ PEMFC} = 396\ V * 210\ A = 83160\ W = 83{,}16\ kW$$

Teniendo en cuenta de que se asume isoterma e isentrópica la mayoría de los procesos, se le baja el rendimiento a 66%, siendo un rendimiento muy alto aún.

La ecuación 21 se usará para calcular el peso de la pila de combustible:

$$W_{PEMFC} = P_{nominal\ Stack}/\rho_{PEMFC} \quad (21)$$

Donde ρ_{PEMFC} es la densidad por kilogramo de PEMFC con un valor de 2 kW/kg.

$$W_{PEMFC} = \frac{83{,}16}{2} = 41{,}58\ kg$$

Para el dimensionamiento de la pila de combustible, se ha estimado un área activa de 210 cm², que se traduciría a unos 14,5 x 14,5 cm en anchura y en altura. Sumando un marco perimetral exterior para la entrada de gases y la salida del vapor de agua, más el hueco de los tornillos tensores, se podría asumir una anchura y altura de 22 x 22 cm.

Para la longitud, cada celda individual tendrá un grosor de 1,4 mm, medida estándar industrial en coches que utilizan PEMFC, con un total de 616 mm o 61,6 cm de longitud más 8 cm, 4 cm por cada extremo, de una placa terminal de apriete de aluminio grueso.

Sumando el peso de las dos placas de aluminio grueso en los extremos se tiene el peso total:

$$W_{total} = W_{PEMFC} + 10{,}45 = 52{,}03\ kg$$

Se resume los resultados en la Tabla 14:

Tabla 14. Resultado de los cálculos PEMFC para su dimensionamiento

Voltaje Nerst	1,16 V
Pérdida por Activación	0,24 V
Pérdida Óhmica	0,002 V
Pérdida por Polarización de Concentración	0,0094 V
Voltaje de salida PEMFC por celda	0,9 V
Voltaje nominal PEMFC Stack	396 V
Potencia nominal PEMFC Stack	83,16 kW
Rendimiento PEMFC	66%
Peso PEMFC Stack	52,03 kg
Dimensionamiento	22 x 69,6 x 22 cm

4.6.4.2 PEMWE

El electrolizador (véase apartado 4.1.1.) cuenta con un total de 80 celdas con dos placas de hierro que les protegen de daños externos o vibraciones. La fuente de alimentación del electrolizador para producir el hidrógeno viene principalmente del vapor de agua residual que se produce durante el funcionamiento de la pila de combustible, cerrando así el circuito o del depósito de agua cuando el vapor de agua no es suficiente.

Figura 26. Filtro de iones. Fuente: Hengst Filters

Cabe mencionar que el vapor de agua residual debe pasar por un intercambiador iónico antes de entrar al electrolizador, ya que puede contener restos iónicos o residuos del Stack que pueden dañar permanentemente al electrolizador, disminuyendo la

vida útil. Para ello, se instala un intercambiador iónico entre la pila de combustible y el electrolizador, este debe ser sencillo de montar y desmontar por si en un futuro no absorbe o purifica lo suficiente el vapor de agua y es necesario cambiarlo. Para ello, se va a usar el Intercambiador de iones Blue.iox de Hensgt (Figura 26), diseñado específicamente para proteger pilas de combustibles y electrolizadores disminuyendo la conductividad del fluido y los residuos iónicos [61].

El electrolizador PEMWE tiene el mismo funcionamiento o parecido a la PEMFC, solo que, en esta parte, se produce hidrógeno en vez de consumirlo. Al tener las mismas características, propiedades y componentes similares, se puede calcular el voltaje de cada célula, peso, dimensionamiento y producción de hidrógeno de PEMWE:

- El comportamiento de cada celda tiene que ser idénticas, y el cálculo de la potencia del conjunto se puede obtener superponiendo varias celdas.
- La reacción electroquímica tiene que ser como lo demuestra la ecuación 8:

$$\begin{aligned} Anode: H_2O &= 2H^+ + \frac{1}{2}\,O_2 + 2e^- \\ Cathode: 2H^+ + 2e^- &= H_2 \\ Total: 2H_2O &= H_2 + \frac{1}{2}\,O_2 \end{aligned} \tag{22}$$

- El voltaje de la célula de la electrólisis será calculado a partir del sumatorio (ecuación 23) entre la potencial de Gibbs (ecuación 24) más pérdidas de potencia, que serían de activación, de la resistencia óhmica y de la polarización por concentración:

$$E_{PEMWE/celda} = E_{Gibbs} + v_{act} + v_{ohm} + v_{con} \tag{23}$$

- **Voltaje de Gibbs**:

$$E_{Gibbs} = \frac{\Delta G}{nF} = 1{,}229 \approx 1{,}23\ V \tag{24}$$

Donde ΔGes la energía libre de Gibbs que para separar la molécula de agua debe tener como mínimo 237,22 kJ/mol. n es el número de electrones involucrados en la reacción y F es la constante de Faraday con un valor de 96485 C/mol.

- **Voltaje de activación:**

Se va a usar la ecuación de Tafel (ecuación 25) [62]:

$$v_{act} = A * \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \tag{25}$$

Se debe de tener en cuenta ciertos parámetros:

- i es la densidad de corriente de trabajo con un valor de 1,5 A/cm².
- i_0 es la densidad de corriente de intercambio (parámetro cinético del catalizador de platino) que se calcula con la ecuación de Butler-Volmer (ecuación 26):

$$i_0 = -\left(exp^{\frac{\alpha_a * n * F}{R * T} * \eta_a} + exp^{\frac{\alpha_c * n * F}{R * T} * \eta_c}\right)^{-1} = 1{,}96 * 10^{-6}\,\frac{A}{cm^2} \tag{26}$$

Donde $\alpha_a = \alpha_c = 0{,}5$ asumiendo que la reacción es simétrica, η es el sobrepotencial del platino que se va a asumir un valor de 0,4 V ya que la reacción de reducción del oxígeno es la principal fuente de pérdida de eficiencia energética.

A es el valor del pendiente de Tafel, que se va a asumir con una ecuación de aproximación lineal (ecuación 27).

$$A = \frac{R * T}{\alpha * n * F} = 0{,}03 \tag{27}$$

Con la ecuación 25, la potencia de activación sería:

$$v_{act} = 0{,}03 * \ln\left(\frac{1{,}5}{1{,}96 * 10^{-6}}\right) = 0{,}406 \approx 0{,}41\ V$$

- **Voltaje óhmico:**

Al usar la misma membrana protónica que la pila de combustible, sustituyendo los valores de la ecuación 18, se calcula la resistividad y con ella, la resistencia y voltaje con las ecuaciones 16 y 17, asumiendo una intensidad de corriente de 100 A:

$$r_M = \frac{181{,}6 * (1 + 0{,}03 * 1{,}5 * +0{,}062 * \left(\frac{353{,}15}{303}\right)^2 * 1{,}5^{2.5})}{(8{,}5 - 0{,}634 - 3) * exp\left(4{,}18\left(\frac{353{,}15 - 303}{353{,}15}\right)\right)} = 26{,}32\ \Omega\ cm \tag{18}$$

$$R\ = \frac{(26{,}32 * 0{,}0178)}{66{,}7} = 0{,}007\frac{\Omega}{cm^2} \tag{17}$$

$$v_{ohm} = 0{,}007 * 1{,}5 = 0{,}011\ V$$

- **Voltaje de polarización por activación:**

Al ser la misma reacción, pero inversa, se puede asumir las mismas condiciones para calcular la cantidad de voltajes de las pérdidas de polarización por activación, a partir de la ecuación 20:

$$v_{con} = -\ B * ln\left(1 - \frac{i}{i_{max}}\right) = 0{,}0094\ V$$

Donde la densidad de corriente máxima, i_{max}, es 3 A/cm², mientras que el coeficiente empírico, B, de transporte de masa sigue siendo la misma.

Con la ecuación 20, se calcula el voltaje de la celda del electrolizador:

$$E_{PEMWE/celda} = 1{,}23 + 0{,}41 + 0{,}011 + 0{,}009 = 1{,}66\ V$$

Con un rendimiento de:

$$\eta_{electrolizador} = \frac{E_{Gibbs}}{E_{\frac{PEMWE}{celda}}} * 100 = 74\ \% \tag{28}$$

$$P_{nominal\ Stack\ electrolizador} = Nº\ Celdas * E_{\frac{PEMWE}{celda}}\ *\ Intensidad = 14335{,}6\ W$$

Por la misma razón que se le impuso a la pila de combustible, se le baja el rendimiento a un 64 %.

Para el cálculo del peso del electrolizador, este sigue un procedimiento similar al cálculo del peso de la pila de combustible. Se estima un área de activación de 72 cm² de placas rectangulares, que se traduciría a unos 8,5 x 8,5 cm en anchura y en altura. Sumando un marco perimetral exterior para la entrada de gases y la salida del vapor de agua, más el hueco de los tornillos tensores, se podría asumir una anchura y altura de 12 x 12 cm.

$$Peso\ celdas = 80 * 0{,}11\ kg = 8{,}8\ kg$$

Para la longitud, cada celda individual tendrá un grosor de 1,7 mm, medida estándar industrial en coches que utilizan PEMWE, con un total de 136 mm o 13,6 cm de longitud más 8 cm, 4 cm por cada extremo, de una placa terminal de apriete de aluminio grueso.

$$Peso\ Placas\ y\ tornillería = 10{,}45 + 3 = 13{,}45\ kg$$

$$Peso\ total = 8{,}8 + 13{,}45 = 22{,}25\ kg$$

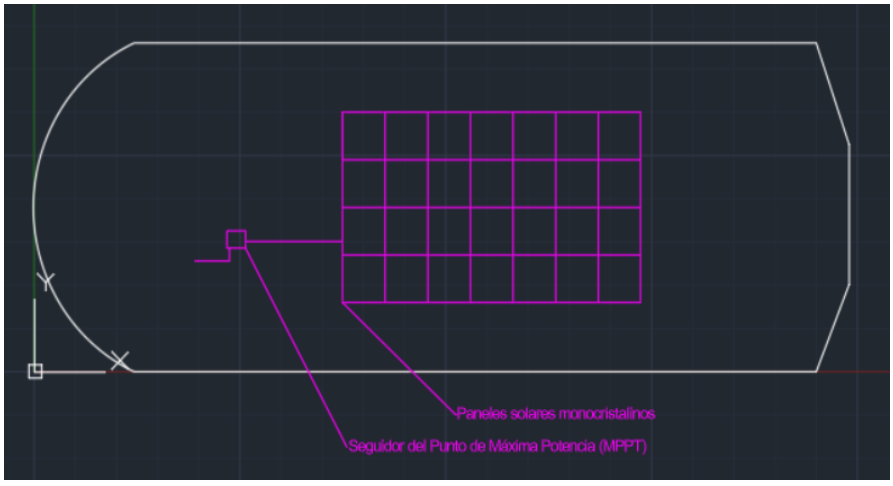
Finalmente, en la Tabla 15 se resumen los datos del dimensionamiento del PEMWE.

Tabla 15. Resultado de los cálculos PEMWE para su dimensionamiento

Voltaje Gibbs	1,23 V
Pérdida por Activación	0,41 V
Pérdida Óhmica	0,011 V
Pérdida por Polarización de Concentración	0,0094 V
Voltaje de salida PEMWE por celda	1,66 V
Voltaje nominal PEMWE Stack	132,8 V
Potencia nominal PEMWE Stack	14,33 kW
Rendimiento PEMWE	64%
Peso PEMWE Stack	22,25 kg
Dimensionamiento	12 x 21,6 x 12 cm

4.6.5 Placas Solares

El plano 6 muestra la disposición del sistema fotovoltaico integrado en el vehículo. Este sistema está formado por un conjunto de paneles solares monocristalinos conectados a un seguidor del punto de máxima potencia (MPPT, *Maximum Power Point Tracker*), encargado de optimizar la captación de energía solar y maximizar el rendimiento de los módulos bajo diferentes condiciones de operación. La ubicación propuesta para los paneles permite aprovechar la superficie disponible del vehículo para la generación de energía eléctrica complementaria. La energía producida puede ser empleada para apoyar la alimentación de determinados subsistemas o contribuir a la gestión energética global del vehículo. En los apartados siguientes se detallan las características técnicas y el funcionamiento del sistema fotovoltaico.



Plano 6. Panel Solar. Fuente: elaboración propia

Para el panel solar, se va a coger de referencia a la empresa Maysun Solar IBC FULL BLACK de 425-450 W de potencia pico. Con una superficie de 2 m² aproximadamente, con un dimensionamiento de 1722 x 1134 x 30 mm (Figura 27). Tiene un peso de 20,80 kg, contiene un total de 108 células solares monocristalinos. La eficiencia varía de 21,8-23 % dependiendo la temperatura de operación [63].

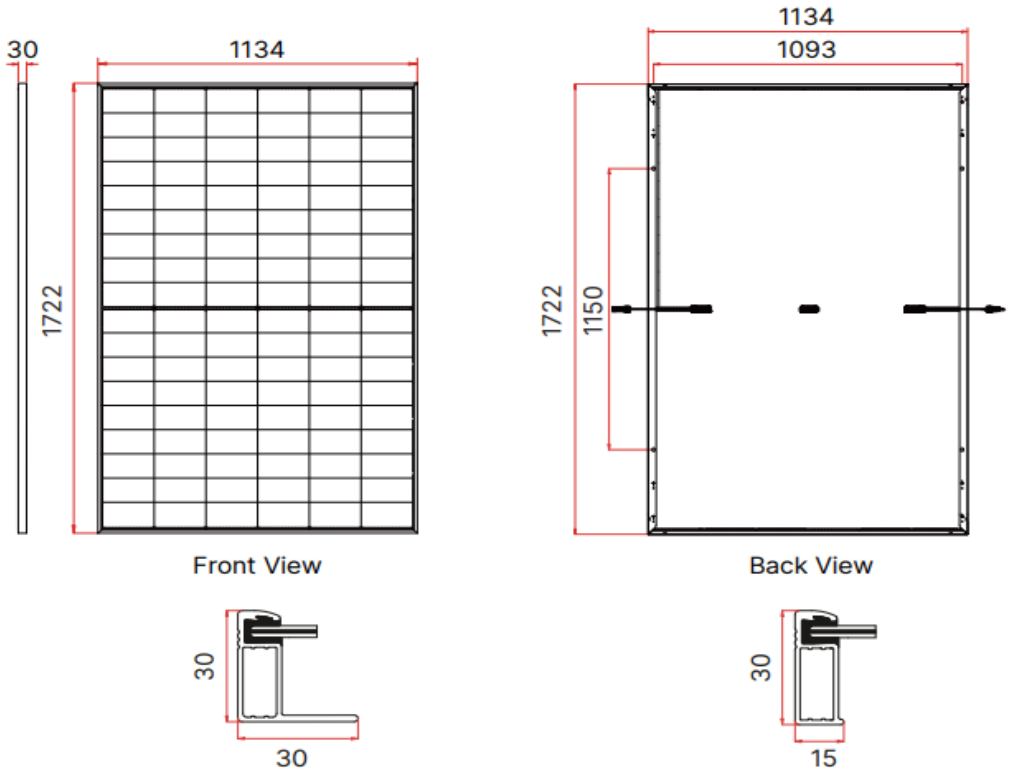


Figura 27. Dimensionamiento de los paneles solares

Para el cálculo de la potencia producida al día, hay que tomar en cuenta las Horas Solares Pico (HSP), que se define como el número de horas en un día con una hipotética irradiancia solar constante de1000 W/m², y la localización de referencia.

El valor de HSP es diferente en distintas estaciones del año, en invierno tiene un valor de 4 de media, pero la eficiencia de la placa aumenta por la disminución de la temperatura, mientras que en verano tiene un valor de 7 de media, pero eficiencia baja por las altas temperaturas. Para el cálculo se va a tomar de referencia la estación de primavera/otoño, con un HSP de 5 de media y con una temperatura ambiente media de 20 °C [64].

Tomando un factor de rendimiento global, PR, de 0,85, y el factor de ensuciamiento, F_E, con un valor de 0,9. La producción diaria de potencia sería:

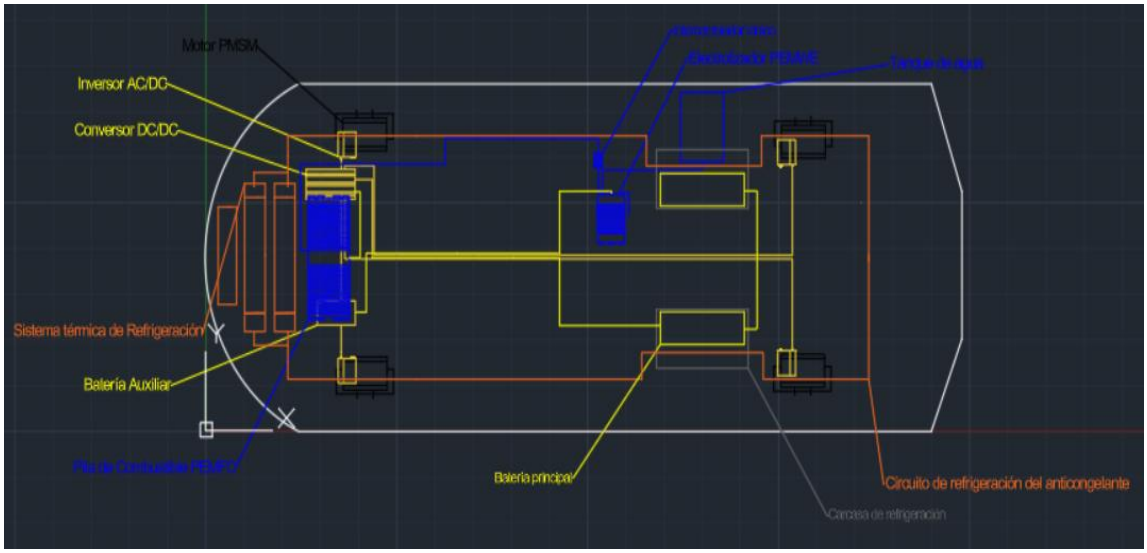
$$W_{diario} = P_p * HSP * PR * F_E = 1{,}721 \frac{kWh}{dia} \quad (29)$$

4.6.6 Sistema de Refrigeración

El Plano 7 muestra la integración de los principales subsistemas energéticos del vehículo dentro de la arquitectura global propuesta. En ella se representa la disposición conjunta de la pila de combustible PEMFC, el electrolizador PEMWE, el sistema de almacenamiento eléctrico formado por la batería principal y la batería auxiliar, el motor síncrono de imanes permanentes (PMSM) y la electrónica de potencia asociada, compuesta por el convertidor DC/DC y el inversor AC/DC.

Asimismo, se incluye el sistema de gestión térmica, integrado por el circuito de refrigeración y los elementos destinados a la disipación del calor generado durante el funcionamiento de los distintos componentes. La distribución adoptada busca optimizar el aprovechamiento del espacio disponible, facilitar las interconexiones entre subsistemas y garantizar unas condiciones adecuadas de operación en términos energéticos y térmicos.

Este plano permite visualizar la interacción entre los diferentes sistemas que intervienen en la generación, almacenamiento, conversión y utilización de la energía dentro del vehículo, constituyendo una visión global de la solución de diseño propuesta. De este modo, el plano de conjunto permite comprobar la compatibilidad espacial de los diferentes componentes y verificar la viabilidad de su integración dentro del vehículo.



Plano 7. Sistema de refrigeración. Fuente: elaboración propia.

Como se muestra el Plano 7, las líneas de color naranja representan el sistema término de refrigeración principal del vehículo.

El recorrido del refrigerante del sistema de refrigeración consiste en:

1. El refrigerante sale de los filtros situado en la parte delantera del coche, a temperatura ambiente.

2. Pasa por la primera rueda del coche, bajando la temperatura del motor menor o igual a 80 °C, para evitar la desmagnetización del neodimio por el efecto del punto de Curie [65].

3. Se traslada el calor de la primera rueda para evaporar el resto de las gotas del vapor de agua saturado que sale de la pila de combustible para alimentar más tarde al electrolizador. Para ello, se usará Válvulas Reguladoras de Temperatura y Térmicas Integradas (TPRRD), como son de 3 vías, controlan el flujo de refrigerante líquido para regular el calor térmico del vapor de agua para su uso posterior en el electrolizador.

4. Se enfría las baterías pasando dentro de las carcasas que rodea las baterías para más tarde, usar el calor recogido, calentar el depósito que contiene agua para usarla en el electrolizador.

5. El calor de las ruedas traseras recogida por el refrigerante podrá ser intercambiada parcialmente con el aire entrante antes de pasar por la otra rueda delantera.

6. El refrigerante entra de nuevo a los filtros para refrigerarse.

Por último, hay que tener en cuenta que se trata de una pila de combustible PEM que genera altas tensiones. Por lo que, para evitar un cortocircuito y proteger el componente más caro del coche, es necesario el uso de un anticongelante tipo BSC 2 (*Battery Coolant System 2*). Cabe destacar que el precio es 10 veces más caro que un refrigerante de un coche normal. Y como medida preventiva, se puede instalar un intercambiador iónico en el sistema térmico para mantener la conductividad del líquido refrigerante siempre en un valor bajo y constante para evitar daños en la pila de combustible y en el electrolizador a la hora de refrigerar o calentar.

4.7 Coste de fabricación y precio PVP

Una vez dimensionado las partes y los equipos principales del vehículo, se recurre a la estimación del coste de fabricación de este. Dado que el objeto de este Trabajo Fin de Grado es el diseño y empaquetado técnico del vehículo y no el diseño de la infraestructura de una planta de producción masiva o fábrica, el estudio económico se centra exclusivamente en el Coste de Fabricación Directo. Para ello, se ha optado por aplicar el Método de la Lista de Materiales (BOM o *Bill Of Materials*) optimizada para una escala de producción limitada o que se trate de un prototipo avanzado [66].

4.7.1 Lista de Materiales

La Tabla 16 presenta la estructura jerárquica de componentes del vehículo propuesto. La descomposición se ha realizado siguiendo criterios funcionales, agrupando los distintos elementos en subsistemas de propulsión, almacenamiento energético, producción y gestión de hidrógeno, generación fotovoltaica, electrónica de potencia y estructura mecánica. Esta clasificación facilita tanto el análisis de costes como la evaluación técnica de las diferentes partes que conforman el vehículo.

Tabla 16. Lista de Materiales

Nivel 0	Nivel 1	Nivel 2
Vehículo Híbrido Lazo Cerrado de Hidrógeno (1u)	Sistema de Propulsión eléctrica (1u)	Motor PMSM de Flujo Axial (4u)
		Inversor de Carburo de silicio (4u)
		Cableado Blindado de Alta tensión (1u)
	Planta de Potencia Química (1u)	Stack de Pila de Combustible de 440 celdas (1u)
		Compresor de Aire y Bombas de Recirculación (1u)
	Sistema de Almacenamiento de Hidrógeno de 700 bares (1u)	Tanque Principal Estructural Tipo IV 5 kg (1u)
		Cápsula Modular Intercambiable Tipo IV 1 kg (3u)
		Reguladores de Presión de doble etapa y Válvulas TPRRD
	Producción de potencia química y lazo térmico (1u)	Stack electrolizador 80 celdas (1u)
		Intercambiador de calor y circuito de lazo térmico (1u)
		Filtro de intercambio iónico (2u)
	Sistema de almacenamiento eléctrico (1u)	Batería tipo Pouch de configuración 120S2P (1u)
		Sistema de Gestión de Batería (1u)
	Sistema de Generación Fotovoltaica Integrada (1u)	Panel Solar tipo IBC (1u)
		Regulador MPPT (1u)
	Electrónica de Control y Potencia (1u)	Convertidor DC-DC elevador (1u)
		Convertidor DC-DC reductor (1u)
		Unidad de Control del Vehículo (1u)
	Partes externas (1u)	Chasis monocasco de aluminio (1u)
		Conjunto de suspensión y dirección (1u)
		Llanta de aleación ligera (4u)
		Neumático delantero 255/50R19 (2u)
		Neumático trasero 285/45R19 (2u)
		Pinzas de freno (4u)
		Discos de freno de aluminio ligero AMC (4u)

4.7.2 Coste de los materiales

La Tabla 17 recoge la estimación económica de los principales componentes que integran el vehículo propuesto. Para cada elemento se indica el número de unidades requeridas, el coste unitario considerado y el coste total asociado. Esta estimación permite obtener una primera aproximación al coste de fabricación del prototipo, sirviendo como base para el posterior análisis de viabilidad económica. El coste total de los componentes asciende a 54.650 €, sin incluir gastos asociados al proceso de fabricación, ensamblaje, certificación, ingeniería de desarrollo y comercialización.

Tabla 17. Coste de los materiales

Componentes	Unidades	Coste Unitario (€)	Precio total (€)
Motor PMSM de Flujo Axial	4	1.850	7.400
Inversor de Carburo de silicio	4	800	3.200
Cableado Blindado de Alta tensión	1	600	600
Stack de Pila de Combustible de 440 celdas	1	7.050	7.050
Compresor de Aire y Bombas de Recirculación	1	1.800	1.800
Tanque Principal Estructural Tipo IV 5 kg	1	4.200	4.200
Cápsula Modular Intercambiable Tipo IV 1 kg	3	2.400	7.200
Reguladores de Presión de doble etapa y Válvulas TPRRD	2	900	1.800
Stack electrolizador 80 celdas	1	2.300	2.300

Tabla 17 (cont.)18. Coste de los materiales.

Componentes	Unidades	Coste Unitario (€)	Precio total (€)
Intercambiador de calor y circuito de lazo térmico	1	1.800	1.800
Filtro de intercambio iónico	2	150	300
Batería tipo Pouch de configuración 120S2P	1	2.100	2.100
Sistema de Gestión de Batería	1	500	500
Panel Solar tipo IBC	1	120	120
Regulador MPPT	1	130	130
Convertidor DC-DC elevador	1	525	525
Convertidor DC-DC reductor	1	525	525
Unidad de Control del Vehículo	1	800	800
Chasis monocasco de aluminio	1	8.500	8.500
Conjunto de suspensión y dirección	1	1.200	1.200
Llanta de aleación ligera	4	150	600
Neumático delantero 255/50R19	2	200	400
Neumático trasero 285/45R19	2	200	400
Pinzas de freno	4	50	200
Discos de freno de aluminio ligero AMC	4	250	1.000
TOTAL			54.650

*Todos los precios de los componentes son estimaciones a partir de comparaciones con los datos ofrecidos por la Departamento de energía de Estados Unidos (DOE), comparación de precios en mercados mayoristas e información ofrecida por proveedores y comercios minoristas. [67], [63], [54], [48], [49], [50]

4.7.3 Precio PVP

Una vez tenido el coste total de los materiales se procede a calcular el precio de venta al público (PVP) que se desglosa en la siguiente tabla [68]:

Tabla 19. Porcentaje y Precio PVP

Concepto	Porcentaje	Valor (€)
Fabricación y producción	45 %	54.650
Impuestos	21 %	25.503
I+D y logística	12 %	14.573
Distribución y Concesionario	18 %	21.860
Margen de Fabricante	4 %	4.858
Total PVP	100 %	121.444

4.8 Prestaciones del vehículo

Se va a hacer un estudio de la autonomía del vehículo en dos tipos de carreteras, similares al estudio realizado para la eficiencia de los frenos regenerativos, una autonomía en zona urbana con autopista y otro estudio en zonas rurales y recorridos montañosos.

Primero de todo, es necesario conocer el peso total del vehículo. Utilizando la lista de materiales, se podrá estimar de manera aproximada el peso del vehículo (Tabla 19):

Tabla 20. Peso de cada componente y peso del vehículo en vacío

Componentes	Unidades	Peso Unitario (kg)	Peso total (kg)
Motor PMSM de Flujo Axial	4	52,2	208,8
Inversor de Carburo de silicio	4	4,8	19,2
Cableado Blindado de Alta tensión	1	32	32
Stack de Pila de Combustible de 440 celdas	1	52	52
Compresor de Aire y Bombas de Recirculación	1	35	35
Tanque Principal Estructural Tipo IV 5 kg	1	96	96
Cápsula Modular Intercambiable Tipo IV 1 kg	3	19	57
Reguladores de Presión de doble etapa y Válvulas TPRRD	2	16	32
Stack Electrolizador PEM 80 celdas	1	22,25	22,25
Intercambiador de calor y circuito de lazo térmico	1	25	25
Filtro de intercambio iónico	2	3	6
Batería tipo Pouch de configuración 120S2P	1	38,2	38,2
Sistema de Gestión de Batería	1	10	10
Panel Solar tipo IBC	1	20,80	20,8
Regulador MPPT	1	2	2
Convertidor DC-DC elevador	1	14	14
Convertidor DC-DC reductor	1	14	14
Unidad de Control del Vehículo	1	5	5
Chasis monocasco de aluminio	1	580	580
Conjunto de suspensión y dirección	1	250	250
Llanta de aleación ligera	4	12	44
Neumático delantero 255/50R19	2	14	27
Neumático trasero 285/45R19	2	16	27
Pinzas de freno	4	1,9	6
Buje, Rodamiento y tornillería	4	4,5	18
Discos de freno de aluminio ligero AMC	4	15	32
TOTAL			1.673,25

*Todos los pesos de los componentes son estimaciones a partir de comparaciones con los datos ofrecidos por la Departamento de energía de Estados Unidos (DOE), fichas técnicas ofrecidas por proveedores, artículos de investigación científica y comercios minoristas.

El peso en vacío del vehículo será 1673,25 kg. Si se considera una media de dos personas de 70 kg de peso, el depósito de agua lleno y los tanques de hidrógeno llenos también se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 20:

Tabla 21. Peso final del vehículo estimado

Elemento	Peso (kg)
Dos Personas	140
Coche en vacío	1.673,25
Hidrógeno	8
Agua desionizada	15
Total	1.836,25

Por último, en la tabla 21 se definirán el resto de los elementos que afectan al rendimiento del vehículo [69]:

Tabla 22. Datos para el cálculo de la autonomía del vehículo

Masa total del vehículo (m)	1.836,25 kg
Área Frontal del vehículo (A)	2,58 m^2
Coeficiente aerodinámico (Cd) [70]	0,30
Coeficiente de rodadura (Cr1) en terreno estable [71]	0,010
Coeficiente de rodadura (Cr2) en terreno rocoso	0,020
Densidad del viento a 25 °C y 1 atm (ρ)	1,184 kg/m^3
Potencia producida por el panel solar (P_{solar})	1,721 kWh/día
Energía consumida por los ECU y el VCU ($E_{ECU\ VCU}$)	2 kW
Energía consumida por el aire acondicionado (E_{clima})	4 kW
Eficiencia de Motor Matris (η)	0,98
Energía de la batería principal	5,33 kWh

Suponiendo que las fuerzas utilizadas en la aceleración se anulan con la energía regenerada en las frenadas, se calcula la autonomía para la ruta urbana, asumiendo una velocidad media de 60 km/h (16,67 m/s) y que hay un HSP de 6 horas:

- **Energía total almacenada:**

$$Energía_{H_2} = masa_{H_2} * PCI_{H_2} * \eta_{PEMFC} \quad (30)$$

$$Energía_{H_2} = 8\ kg * 119{,}93 \frac{MJ}{kg} * \frac{1000 * 1\ h}{3600\ s} * 0{,}66 = 175{,}9\ kWh$$

$$Energía_{total} = Energía_{Batería} + Energía_{H_2} - Energía_{VCU\ ECU} - Energía_{clima}$$
$$= 175{,}9 + 5{,}33 - 2 - 4 = 174{,}23\ kWh$$

- **Fuerza de rozamiento total:**

$$Fuerza\ rozamiento\ rodadura = m_{vehículo} * g * Cr1 \quad (31)$$

$$Fuerza\ rozamiento\ rodadura = 1836{,}25\ kg * 9{,}81 \frac{m}{s^2} * 0{,}010 = 180{,}14\ N$$

$$Fuerza\ rozamiento\ viento = \frac{1}{2} * \rho * Cd * A * v^2 \quad (32)$$

$$Fuerza\ rozamiento\ viento = \frac{1}{2} * 1{,}184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0{,}3 * 2{,}58\ m^2 * 16{,}67^2 \frac{m}{s} = 127{,}33\ N$$

$$Fuerza\ rozamiento\ Total$$
$$= Fuerza\ rozamiento\ rodadura + Fuerza\ rozamiento\ viento$$

$$Fuerza\ rozamiento\ Total = 180{,}14 + 127{,}33 = 307{,}47\ N$$

- **Potencia requerida por los motores:**

$$P_{mec} = Fuerza\ rozamiento\ Total * v \quad (33)$$

$$P_{mecánica} = 307{,}47 * 16{,}67 = 5.125{,}52\ W$$

$$P_{eléctrica} = \frac{P_{mecánica}}{\eta} = \frac{5{,}12}{0{,}98} = 5{,}22\ kW \quad (34)$$

$$P_{requerida\ total} = P_{eléctrica} - P_{solar} = 5{,}22\ kW - \frac{1{,}721\,\frac{kWh}{día}}{6\,\frac{h}{día}} = 4{,}93\ kW$$

- **Autonomía total:**

$$Tiempo\ de\ conducción = \frac{Energía\ total}{P_{requerida\ total}} = \frac{174{,}33}{4{,}93} = 35{,}36\ h \qquad (34)$$

$$Autonomía = 60\,\frac{km}{h} * 35{,}36\ h = 2.121{,}6\ km$$

En la Tabla 22 se muestran los resultados obtenidos para el cálculo de la autonomía en ruta urbana.

Tabla 23. Resultados del cálculo de la autonomía en ruta urbana a 60 km/h constante.

Energía total almacenada	174,23 kWh
Fuerza de rozamiento de rodadura	180,14 N
Fuerza de rozamiento del viento	127,33 N
Potencia mecánica	5,12 kW
Potencia eléctrica	5,22 kW
Tiempo de conducción a 60 km/h constante	35,36 h
Autonomía ruta urbana	2.121,6 km

Para la segunda ruta, este constará de rutas comunes entre pueblos alejados de la zona urbana o rutas que son montañosas y carreteras no tan cuidadas como las que se encuentran en las ciudades. Asumiendo que tiene una velocidad constante de 100 km/h (27,78 m/s) y que hay un HSP de 6 horas, se utilizan las mismas ecuaciones para calcular la autonomía de la zona urbana:

- **Energía total almacenada:**

$$Energía_{H_2} = 8\ kg * 119{,}93\,\frac{MJ}{kg} * \frac{1000 * 1h}{3600\ s} * 0{,}66 = 175{,}9\ kWh$$

$$Energía_{total} = Energía_{Batería} + Energía_{H_2} - Energía_{VCU\ ECU} - Energía_{clima}$$
$$= 175{,}9 + 5{,}33 - 2 - 4 = 174{,}23\ kWh$$

- **Fuerza de rozamiento total:**

$$Fuerza\ rozamiento\ rodadura = 1836{,}25\ kg * 9{,}81\,\frac{m}{s^2} * 0{,}020 = \ 360{,}27\ N$$

$$Fuerza\ rozamiento\ viento = \frac{1}{2} * \rho * Cd * A * v^2 \qquad (32)$$

$$Fuerza\ rozamiento\ viento = \frac{1}{2} * 1{,}184\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} * 0{,}3 * 2{,}58\ m^2 * 27{,}78^2\,\frac{m}{s} = 353{,}61\ N$$

$$Fuerza\ rozamiento\ Total$$
$$= \ Fuerza\ rozamiento\ rodadura + Fuerza\ rozamiento\ viento$$

$$Fuerza\ rozamiento\ Total = 360{,}27 + 353{,}71 = 713{,}98\ N$$

- **Potencia requerida por los motores:**

$$P_{mec} = \ Fuerza\ rozamiento\ Total * v \tag{33}$$

$$P_{mecánica} = 713{,}98 * 27{,}78 = 19834{,}36\ W$$

$$P_{eléctrica} = \frac{P_{mecánica}}{\eta} = \frac{19834{,}36}{0{,}98} = 20{,}23\ kW \tag{34}$$

$$P_{requerida\ total} = P_{eléctrica} - P_{solar} = 20{,}23\ kW - \frac{1{,}721\frac{kWh}{día}}{6\frac{h}{día}} = 19{,}94\ kW$$

- **Autonomía total:**

$$Tiempo\ de\ conducción = \frac{Energía\ total}{P_{requerida\ total}} = \frac{174{,}23}{19{,}94} = 8{,}73\ h \tag{34}$$

$$Autonomía = 100\frac{km}{h} * 8{,}73\ h = 873\ km$$

En la Tabla 23 se muestran los resultados obtenidos para el cálculo de la autonomía en ruta rural.

Tabla 24. Resultados del cálculo de la autonomía en ruta rural a 100 km/h constante

Energía total almacenada	174,23 kWh
Fuerza de rozamiento de rodadura	360,27 N
Fuerza de rozamiento del viento	353,61 N
Potencia mecánica	5,12 kW
Potencia eléctrica	5,22 kW
Tiempo de conducción a 100 km/h constante	8,73 h
Autonomía ruta rural	873 km

Una vez obtenido las dos autonomías en dos rutas distintas, se hace una media entre las dos:

$$Autonomía_{media} = \frac{2121{,}6 + 873}{2} = 1497{,}3\ km\ \approx 1.500\ km$$

Con los datos que se han usado para calcular la autonomía del coche, se utilizarán para calcular la velocidad máxima que puede llegar el vehículo:

$$P_{mec\ max} = P_{coche} * \eta_{motor} = 148\ kW * 0{,}98 = 145{,}04\ kW \tag{35}$$

$$P_{mec\ max} = (m \cdot g \cdot C_{r\ media}) \cdot v + \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A\right) \cdot v^3 \tag{36}$$

$$145{,}04 * 10^3 = (1836{,}25 * 9{,}81 * 0{,}015) * v + \left(\frac{1}{2} * 1{,}184 * 0{,}3 * 2{,}58\right) * v^3$$

$$v_{max} \approx 64{,}56\frac{m}{s} \approx 232{,}46\frac{km}{h}$$

Para calcular el tiempo necesario de acelerar de 0 -100 km/h, se asume que se tiene un par de 600 Nm (150 Nm por eje). Este se calcula en dos fases:

- **Fase I: Aceleración de 0 a 40 km/h**

Es necesario que el vehículo llegue a una velocidad base que para motores de flujo axial es de unos 40 km/h, por lo que, el motor entrega el par de arranque, que sería los 600 Nm de golpe [72]:

$$F_{traccion\ max} = \frac{P_{mec\ max}}{v_{base}} = \frac{145004\ W}{11{,}11\ m/s} = 13055\ N$$

Se resta las fuerzas de rozamiento a la fuerza de tracción:

$$F_{traccion\ neta} = 13055 - 1836{,}25 * 9{,}81 * 0{,}015 - \int_0^{11{,}11} \frac{1}{2} * 1{,}184 * 0{,}3 * 2{,}58 * 2v dv$$
$$= 12728{,}24\ N$$

$$a_1 = \frac{F_{traccion\ neta}}{m_{coche}} = 6{,}932 \frac{m}{s^2} \quad (37)$$

$$t_1 = \frac{v_{base}}{a_1} = \frac{11{,}11}{6{,}932} = 1{,}6\ s$$

- **Fase II: Aceleración de 40 a 100 km/h**

Una vez llegado a la velocidad base, el motor eléctrico trabaja a una potencia constante. Para ello, se va a aplicar la variación de energía cinética necesaria para acelerar de 40 km/h a 100 km/h:

$$\Delta E_{cinetic} = \frac{1}{2} \cdot m_{coche} \cdot \left(v_{final}^2 - v_{base}^2\right) \quad (38)$$

$$\Delta E_{cinetic} = \frac{1}{2} * 1836{,}25 * (27{,}78^2 - 11{,}11^2) = 595{,}214\ kJ$$

Las fuerzas de rozamiento en esta fase aumentan en comparación con la Fase I por el aumento de la velocidad media. Por tanto, se va a usar un valor medio integrado como en la fase I de 40km/h a 100km/h para calcular el rozamiento aerodinámico:

$$F_{aerodinamico} = \int_{11{,}11}^{27{,}78} \frac{1}{2} * 1{,}184 * 0{,}3 * 2{,}58 * 2v\ dv = 297{,}05\ N$$

Usando la potencia máxima y la velocidad media de esta fase, 19,44 km/s, se calcula la potencia neta:

$$P_{neta} = 145044 - (567{,}25) * 19{,}44 = 134016{,}66\ W$$

$$t_1 = \frac{\Delta E_{cinetic}}{P_{neta}} = \frac{595{,}214\ kJ}{134{,}017 \frac{kJ}{s}} = 4{,}44\ s$$

$$t_{0-100km/h} = t_1 + t_2 = 1{,}6 + 4{,}44 = 6{,}04\ s$$

En la Tabla 24 se resumen las prestaciones del vehículo.

Tabla 25. Prestaciones del vehículo

Potencia mecánica máxima	145,004 kW
Par del motor	600 Nm (150 Nm por rueda)
Velocidad máxima	232,46 km/h
Tiempo de aceleración de 0-100 km/h	6,04 s

Por último, considerando las previsiones de mercado para el periodo comprendido entre 2030 y 2050, los vehículos SUV podrían representar aproximadamente el 62 % de las nuevas matriculaciones. Bajo la hipótesis de una incorporación anual de 6 millones de nuevos SUV y un kilometraje medio de 15.000 km por vehículo y año, las emisiones asociadas al parque de nueva matriculación resultan muy significativas cuando se emplean tecnologías convencionales basadas en combustibles fósiles.

Tal como se observa en la Tabla 25, un SUV convencional con unas emisiones medias de 180 gCO_2/km generaría aproximadamente 16,2 millones de toneladas de CO_2 al año. Por su parte, los vehículos híbridos, aunque presentan una mejora respecto a los vehículos convencionales gracias a su mayor eficiencia energética, seguirían emitiendo alrededor de 11,7 millones de toneladas de CO_2 anuales.

Tabla 26. Comparación de emisiones de CO_2

Tipo de coche	Emisiones directas por kilómetro	Totales emitidas
Convencional	180 g/km	16.200.000 toneladas CO_2
Híbrida	130 g/km	11.700.000 toneladas CO_2
Eléctrica	0 g/km	0 toneladas CO_2
Pila de combustible	0 g/km	0 toneladas CO_2

En contraste, los vehículos eléctricos de batería y los vehículos de pila de combustible presentan emisiones directas nulas durante su funcionamiento, por lo que la sustitución de los SUV convencionales por estas tecnologías permitiría evitar la emisión de hasta 16,2 millones de toneladas de CO_2 al año. Del mismo modo, en comparación con los vehículos híbridos, la reducción potencial alcanzaría los 11,7 millones de toneladas anuales.

Estos resultados ponen de manifiesto el importante papel que pueden desempeñar las tecnologías de propulsión libres de emisiones directas en los objetivos de descarbonización del sector transporte. Dado que los SUV constituyen uno de los segmentos con mayor crecimiento y volumen de ventas, la electrificación de este tipo de vehículos tendría un impacto especialmente relevante en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

En el caso particular de los vehículos de pila de combustible alimentados con hidrógeno verde, la reducción de emisiones no se limita únicamente a la fase de utilización del vehículo. Si el hidrógeno se obtiene mediante procesos de electrólisis alimentados con fuentes renovables, las emisiones asociadas al ciclo energético completo pueden reducirse drásticamente respecto a las tecnologías convencionales basadas en combustibles fósiles. Por ello, los vehículos de pila de combustible se presentan como una alternativa tecnológica especialmente interesante para aplicaciones que requieren elevadas autonomías, tiempos de repostaje reducidos y una utilización intensiva del vehículo.

En consecuencia, la progresiva sustitución de los vehículos convencionales e híbridos por vehículos eléctricos o de pila de combustible podría contribuir de forma significativa al cumplimiento de los objetivos climáticos fijados para mediados de siglo, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles y mitigando el impacto ambiental asociado al transporte por carretera.

5. Conclusiones

Las principales conclusiones del Trabajo Fin de Grado sobre sistema de uso, almacenamiento y recarga in situ de cápsulas de hidrógeno mediante electrólisis integrada en vehículos híbrido de panel solar y de hidrógeno son los siguientes:

- El uso de un electrolizador dentro de un coche de hidrógeno usando placas solares como fuente de energía mayoritariamente, alivia el estrés energético que puede suponer a la Red Eléctrica central. Las placas solares producen cerca de 630 kWh al año, multiplicando este valor por 6 millones, este tiene un valor de 3150 GWh al año de electricidad que la red europea no tiene que fabricar ni transportar.

- El uso del electrolizador alimentada por pila de combustible destruye la autonomía del coche, ya que se necesita 61 kWh de media de energía por kilogramo de hidrógeno producido, mientras que una pila de combustible produce 20 kWh de promedio por kilogramo de hidrógeno usado y el resto se pierde en forma de calor. Por tanto, el electrolizador solo se debe activarse durante las horas de forma intermitente para absorber los picos de energía durante las frenadas regenerativas o cuando el motor está apagado y este en estado estacionario mediante energía solar o la cantidad de energía recargada en la batería auxiliar.

- El coche presenta una autonomía muy alta. En rutas urbanas, presenta una autonomía de hasta 2121,6 km y en rutas rurales o montañosas con carreteras irregulares, presenta una autonomía de hasta 873 km, con una media de aproximadamente 1500 km.

- El precio PVP es de 121.444 €, más del 100 % de la media que presenta el mercado automovilístico. Pero hay que tener en cuenta de que un vehículo que usa gasolina tiene una autonomía media de 750 km y uno de diésel de 800 km, también suponiendo un ahorro en compra de combustibles fósiles 22.000 a 30.000 € a lo largo de la vida útil.

- A pesar las excelentes métricas de autonomía y reducción de emisiones calculadas, la viabilidad de una implementación masiva a gran escala está muy limitada por la disponibilidad geopolítica de metales preciosos. Tanto el *stack* del electrolizador como la pila de combustible, emplean tecnología de membrana de intercambio protónico, muy dependiente del Platino e Iridio, catalizadores esenciales en los electrodos.

- La sustitución progresiva de los SUV convencionales por vehículos eléctricos o de pila de combustible permitiría reducir de forma significativa las emisiones de CO_2 asociadas al transporte por carretera. Los resultados obtenidos evidencian el elevado potencial de estas tecnologías para contribuir a la descarbonización del sector y al cumplimiento de los objetivos climáticos establecidos para 2050.

- Se concluye que este diseño es una solución tecnológica para casos específicos o flotas logística de alto valor, a menos que futuras líneas tecnológicas de investigación consigan sustituir el platino u Iridio por otros tipos de metales.

6. Bibliografía

[1] 'Parlamento Europeo (2015). El proceso internacional de lucha contra el cambio climático. https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/naciones-unidas/cop21/resultados-cop-21-paris.html'.

[2] 'Diario Oficial de la Unión Europea (2019). REGLAMENTO (UE) 2019/631 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 17 de abril de 2019 por el que se establecen normas de comportamiento en materia de emisiones de CO2 de los turismos nuevos y de los vehículos comerciales ligeros nuevos, y por el que se derogan los Reglamentos (CE) n.o 443/2009 y (UE) n.o 510/2011 https://www.boe.es/doue/2019/111/L00013-00053.pdf'.

[3] 'Comisión Europea (2022). COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO del 18 de mayo de 2022, AL CONSEJO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y AL COMITÉ EUROPEO DE LAS REGIONES https://eur-lex.europa.eu/resource.html'.

[4] 'Comisión Europea (2022). Vehículos de emisión cero: el primer acuerdo en el marco del «Objetivo 55» pondrá fin a la venta de vehículos nuevos en Europa que emitan CO2 a partir de 2035, Bruselas, 28 de octubre de 2022 https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/es/ip_22_6462/IP_22_6462_ES.pdf'.

[5] '¿cuánto Contaminan Los, A., & Se, lo C. en las I. (s. f.). Emisiones de CO2 de los coches: hechos y cifras (infografía). Europa.eu. Recuperado 11 de abril de 2026, de https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2019/3/story/20190313STO31218/20190313STO31218_es.pdf'.

[6] 'Etui.org. Fuels or Biofuels, de https://www.etui.org/news/eu-u-turn-banning-combustion-engine-2035#:~:text=As%20part%20of%20the%20broader,%2C%20e-fuels%20or%20biofuels'.

[7] 'Garaje Hermético 2023, Historia de la GASOLINA… Te vamos a sorprender youtube.comGaraje Hermético 2023, Historia de la GASOLINA… Te vamos a sorprender youtube.com'.

[8] 'Ritchie, H. (2022). How the world eliminated lead from gasoline. Our World in Data. https://ourworldindata.org/leaded-gasoline-phase-out'.

[9] 'Xenum octane booster: información y comprar. (s. f.). Aditivox.com, de https://www.aditivox.com/aditivos-gasolina-mejoradores/146-xenum-octane-booster'.

[10] 'Diferencia de precio entre un coche diésel o gasolina. (s. f.). Mapfre.es, de https://www.motor.mapfre.es/consejos-practicos/consejos-para-ahorrar/diesel-o-gasolina/'.

[11] 'Del carbón al gasóleo, la historia del diésel. (2019, octubre 8). Castillo Grupo. https://castillogrupo.com/blog/del-carbon-al-gasoleo-la-historia-del-diesel/'.

[12] 'Iberdrola.com. Historia del coche eléctrico, de https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/historia-coche-electrico'.

[13] 'The global electric vehicle market in 2025. (2024, abril 23). Virta.Global. https://www.virta.global/global-electric-vehicle-market'.

[14] 'Escobar, Á. (2022, noviembre 18). La épica historia del hidrógeno como solución al coche diésel comenzó... ¡en 1806! Auto Bild España. https://www.autobild.es/reportajes/epica-historia-hidrogeno-como-solucion-coche-diesel-comenzo-1806-1157305'.

[15] 'Redondo, N. L. (2025, julio 7). Coches de hidrógeno en España ¿cuál me debería comprar y por qué? Movilidad Eléctrica. https://movilidadelectrica.com/coches-hidrogeno/'.

[16] 'España, T. (2026, marzo 25). Qué es el hidrógeno. Toyota ES; Toyota España. https://www.toyota.es/electrificacion/hidrogeno/que-es-el-hidrogeno'.

[17] 'Sitio web del Hidrógeno. (s. f.). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, de https://www.miteco.gob.es/es/energia/hidrocarburos-nuevos-combustibles/hidrogeno.html'.

[18] 'Hidrógeno renovable: ¿qué ventajas tiene para Europa? (s. f.). Temas | Parlamento Europeo, de https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20210512STO04004/hidrogeno-renovable-que-ventajas-tiene-para-europa'.

[19] 'Unizar.es, de https://zaguan.unizar.es/record/119583/files/BOOK-2022-037.pdf'.

[20] 'Stargatehydrogen-com. Hydrogen fuel, de https://stargatehydrogen-com./blog/hydrogen-fuel/'.

[21] 'Europe, T. (2020, abril 22). Toyota y el hidrógeno: una historia de pasado, presente y (mucho) futuro. Toyota y el hidrógeno: una historia de pasado, presente y (mucho) futuro; Toyota Europe. https://prensa.toyota.es/toyota-y-el-hidrogeno-una-historia-de-pasado-presente-y-mucho-futuro/'.

[22] 'sopp+sopp. (2023, noviembre 15). Hydrogen Fuel Cell vs Hydrogen Combustion Vehicles: What's the difference? — sopp + sopp. Sopp + Sopp. https://www.soppandsopp.co.uk/news/hydrogen-fuel-cells-vs-hydrogen-combustion-engines'.

[23] 'Toyota Mirai'.

[24] '(S. f.-g). Bmw.es. BMW iX5, de https://www.bmw.es/es/more-bmw/concept-cars/bmw-ix5-hydrogen.html'.

[25] 'Electrólisis. (2025, agosto 12). REPSOL. https://www.repsol.com/es/energia-avanzar/energia/que-es-electrolisis/index.cshtml'.

[26] 'Electrolizador: qué es y cómo produce hidrógeno verde. (2025, diciembre 24). Universidad Europea; Universidad Europea | Universidad presencial (Madrid, Valencia, Alicante, Canarias, Málaga) y Online. https://universidadeuropea.com/blog/electrolizador/'.

[27] 'Hyto Energy Company Limited. (s. f.). Guía de escala de electrolizadores: aplicaciones y costos a gran vs. pequeña escala. Hyto Energy Company Limited. Recuperado 26 de abril

de 2026, de https://www.hyto-life.com/es/blog/large-scale-vs-small-scale-electrolyzers-applications-and-differences'.

[28] 'Electrolyzer comparison. (2026, enero 7). GRZ Technologies. https://www.grz-technologies.com/knowledge_center/electrolyzer-comparison/'.

[29] 'El hidrogeno verde en aplicaciones comunes como los autos, 1) ¿A Qué Presión y. Temperatura se Usa. (s. f.). Preguntas y respuestas – Introducción a la industria del hidrógeno verde. Unepfi.org, de https://www.unepfi.org/wordpress/wp-content/uploads/2021/07/PREGUN1.pdf#:~:text=Respuesta:%20Para%20el%20proceso%20de%20electrólisis%20es,pretratamiento%20del%20agua%20en%20un%20proceso%20de'.

[30] 'Pilas de Combustible - Centro Nacional del Hidrógeno. (2019, febrero 7). Centro Nacional del Hidrógeno. https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/'.

[31] 'de Castilla y León, J. (s. f.). Tipos de pilas de combustible. Jcyl.es, de https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/tipos-pilas-combustible.html'.

[32] 'ZonaECO. (s. f.). Historia del motor eléctrico. Hyundai.com, de https://www.hyundai.com/canarias/es/zona-eco/historia-del-motor-electrico/'.

[33] 'García, G. (2025, octubre 9). Tipos de motores eléctricos para coches: ventajas, eficiencia y mantenimiento. Híbridos y Eléctricos. https://www.hibridosyelectricos.com/coches/todo-necesitas-saber-sobre-motores-electricos-emplean-coches-tipos-ventajas-cifras-clave_81706_102.html'.

[34] 'Anekwe, I. M. S., Mustapha, S. I., Akpasi, S. O., Tetteh, E. K., Joel, A. S., & Isa, Y. M. (2025). The hydrogen challenge: addressing storage, safety, and environmental concerns in hydrogen economy. International Journal of Hydrogen Energy, 167(150952), 150952. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.150952'.

[35] 'Toyota Gosei. Tanque de hidrógeno a presión (S. f.). Toyoda-gosei.com, de https://www.toyoda-gosei.com/upload/news_en/268/bc2f923823015e0b0f1a69c5db679179.pdf'.

[36] 'Influencia del hidrógeno en metales/ fragilización por hidrógeno. (s. f.). Influencia del hidrógeno en metales/ fragilización por hidrógeno, de https://www.zwickroell.com/es/sectores/energia/influencia-del-hidrogeno-en-metales-fragilizacion-por-hidrogeno/'.

[37] 'How to select the right Hydrogen tanks Liners, Matrix, and Fiber materials. (s. f.). Addcomposites.com, de https://www.addcomposites.com/post/how-to-select-the-right-hydrogen-tanks-liners-metrix-and-fiber-materials'.

[38] 'Fraunhofer ISE evaluates common UV tests for TOPCon modules for practical relevance - Fraunhofer ISE. (2025, abril 10). Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2025/fraunhofer-ise-evaluates-common-uv-tests-for-topcon-modules-for-practical-relevance.html'.

[39] 'Brian. (2025, octubre 14). Comparing IBC technology and TOPCon technology for solar panels. Professional Distributed PV Module Manufacturer; Maysun Solar.

https://www.maysunsolar.com/blog-comparing-ibc-technology-and-topcon-technology-for-solar-panels/'.

[40] 'Mártil, I. (2023, octubre 24). Influencia de la temperatura en la eficiencia de un módulo fotovoltaico. Material Eléctrico - CdeComunicacion.es. https://material-electrico.cdecomunicacion.es/opinion/ignacio-martil/2023/10/24/influencia-de-temperatura-en-la-eficiencia-en-modulo-fotovoltaico'.

[41] 'Clemson vehicular electronics laboratory: Regenerative braking. (s. f.). Clemson.edu, de https://cecas.clemson.edu/cvel/auto/systems/regenerative_braking.html'.

[42] 'J.Valladolid, M.Calle, A.Guiracoche, Universidad Politécnica Salesiana. Análisis de la eficiencia del freno regenerativo en un vehículo eléctrico mediante pruebas experimentales. (Enero 2023) (S. f.-b). Redalyc.org. Recuperado 1 de mayo de 2026, de https://www.redalyc.org/journal/5055/505573889002/html/'.

[43] 'Shopify, A. P. I. (2025, September 19). ¿Cuáles son las medidas de las llantas para SUV? ¡Descúbrelo aquí! elige llantas. https://eligellantas.com/blogs/news/llantas-para-suv'.

[44] 'Bmw.Es. Ficha Ténica BMWX5, from https://www.bmw.es/es/coches-bmw/x/bmw-x5/datos-tecnicos-bmw-x5.html/bmw-x5-xdrive40i.bmw'.

[45] 'Car Tyre Sizes. (n.d.). Michelin.es. What car tyre size should I buy?, from https://www.michelin.es/auto/car-tyre-sizes'.

[46] 'KIPARDO. (2025, May 7). How much do rims weigh? KIPARDO Alloy Wheels Manufacturer. https://www.kipardoracing.com/how-much-do-rims-weigh-and-why-it-matters-for-your-auto-business/'.

[47] 'DISCO DE FRENO 1 UNID. X CAJA 08.5833.15 BREMBO - RENAULT. Recambium, from https://www.recambium.com/frenos-coche/disco-de-freno-1-unid-x-caja-08583315-brembo-08583315.html'.

[48] 'Pinzas de freno deportivos calle AP RACING CP5100. (n.d.). Giefferacing.com, from https://www.giefferacing.com/es/todos-los-productos/frenos/pinzas-de-freno/pinzas-de-freno-deportivos-calle/cp5100/cp5100-806s4.pinzas-de-freno-4-pistones-ap-racing-para-coches-de-calle.html'.

[49] 'Cleary, C. (2025, July 29). Torque vectoring: ¿Qué es y para qué sirve? Sportlife Ibérica S.L. https://www.autopista.es/noticias-motor/torque-vectoring-que-es-sirve-ecn_312336_102.html'.

[50] '3.7V NMC batería celda-LYTH batería. . Lythbattery.com, 2026, from https://lythbattery.com/nmc-cell/?lang=es'.

[51] 'Automotive vehicle control unit - deep dive into automotive VCU. (n.d.). Embien, from https://www.embien.com/automotive-insights/automotive-vehicle-control-unit-deep-dive-into-automotive-vcu'.

[52] 'Purus, H. (2021, July 1). TYPE IV HYDROGEN CILINDER. Hexagon Purus. https://hexagonpurus.com'.

[53] 'Cashco.com. Understanding pressure droop in pressure reducing regulators, from https://www.cashco.com/media/marketing/understanding-pressure-droop-in-pressure-reducing-regulators.html'.

[54] 'Chen, J., Veenstra, M., Purewal, J., Hobein, B., & Papasavva, S. (2019). Modeling a hydrogen pressure regulator in a fuel cell system with Joule–Thomson effect. International Journal of Hydrogen Energy, 44(2), 1272–1287. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.020'.

[55] 'Liu, H., Qin, J., Li, C., Li, C., & Dong, P. (2024). Performance comparison and potential evaluation of energy systems with different fuel cells for electric aircraft. Applied Thermal Engineering, 242(122447), 122447. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122447'.

[56] 'Werner, C., Gores, F., Busemeyer, L., Kallo, J., Heitmann, S., & Griebenow, M. (2015). Characteristics of PEMFC operation in ambient- and low-pressure environment considering the fuel cell humidification. CEAS Aeronautical Journal, 6(2), 229–243. https://doi.org/10.1007/s13272-014-0142-z'.

[57] 'Carneiro, L. F., Fernandes, N. T. D., Costa Junior, E. F. da, & Matencio, T. (2025). Comparison between different activation overvoltage descriptions for semiempirical proton-exchange membrane fuel cell models. ACS Omega, 10(15), 15381–15392. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c11603'.

[58] 'Jahanbakhsh, M., Aydin, E., Vinothkannan, M., & Erkey, C. (2026). Modeling and machine learning driven optimization of performance of CeO2–TiC-enhanced nafion membranes in PEMFC. International Journal of Hydrogen Energy, 238(154945), 154945. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2026.154945'.

[59] 'Blue.iox Ion exchanger - Efficient filtration for fuel cells. (n.d.). Hengst.com, from https://www.hengst.com/en/products/productgroups/46-filtration-fuel-cells/1073-ion-exchanger-blueiox'.

[60] 'Marshall, A. T. (2018). Using microkinetic models to understand electrocatalytic reactions. Current Opinion in Electrochemistry, 7, 75–80. https://doi.org/10.1016/j.coelec.2017.10.024'.

[61] M. Solar, 'Maysun Solar 182 mm Mono IBC 108 Cells 425-450W Full Black 1722mm x 1134mm x 30mm', 2025. [Online]. Available: www.maysunsolar.com

[62] 'POWEN. (2023, July 12). Horas solares y Hora solar pico en España por provincia. POWEN. https://powen.es/numero-horas-solares-en-espana/'.

[63] 'Webcraft, A. G. (n.d.). Temperatura de Curie. Supermagnete.es, from https://www.supermagnete.es/magnetismo/Temperatura-de-Curie'.

[64] 'Mecalux. (n.d.). Lista de materiales (BOM): el mejor aliado en la cadena de producción. Mecalux.Es, from https://www.mecalux.es/blog/lista-materiales-bom'.

[65] 'Powering today, Transforming tomorrow. (2011, July 8). The Department of Energy's Energy.gov. https://www.energy.gov'.

[66] 'PowerArt Guille García Alfonsín. Cuanto cuesta fabricar y vender un coche S04E03. Junio 2019, from https://youtu.be/JFurVETFHqc?si=emYzc8Ts9jgD7dx4'.

[67] J. M. Escola, 'BATERÍAS DE IÓN Litio', vol. 1, p. 3, 2022.

[68] Official, E. B. L. (2025, May 13). Tipos de baterías de iones de litio: ¿Cuál alimenta mejor su dispositivo? EBLOfficial. https://www.eblofficial.com/es/blogs/battery-101/lithium-ion-battery-types.

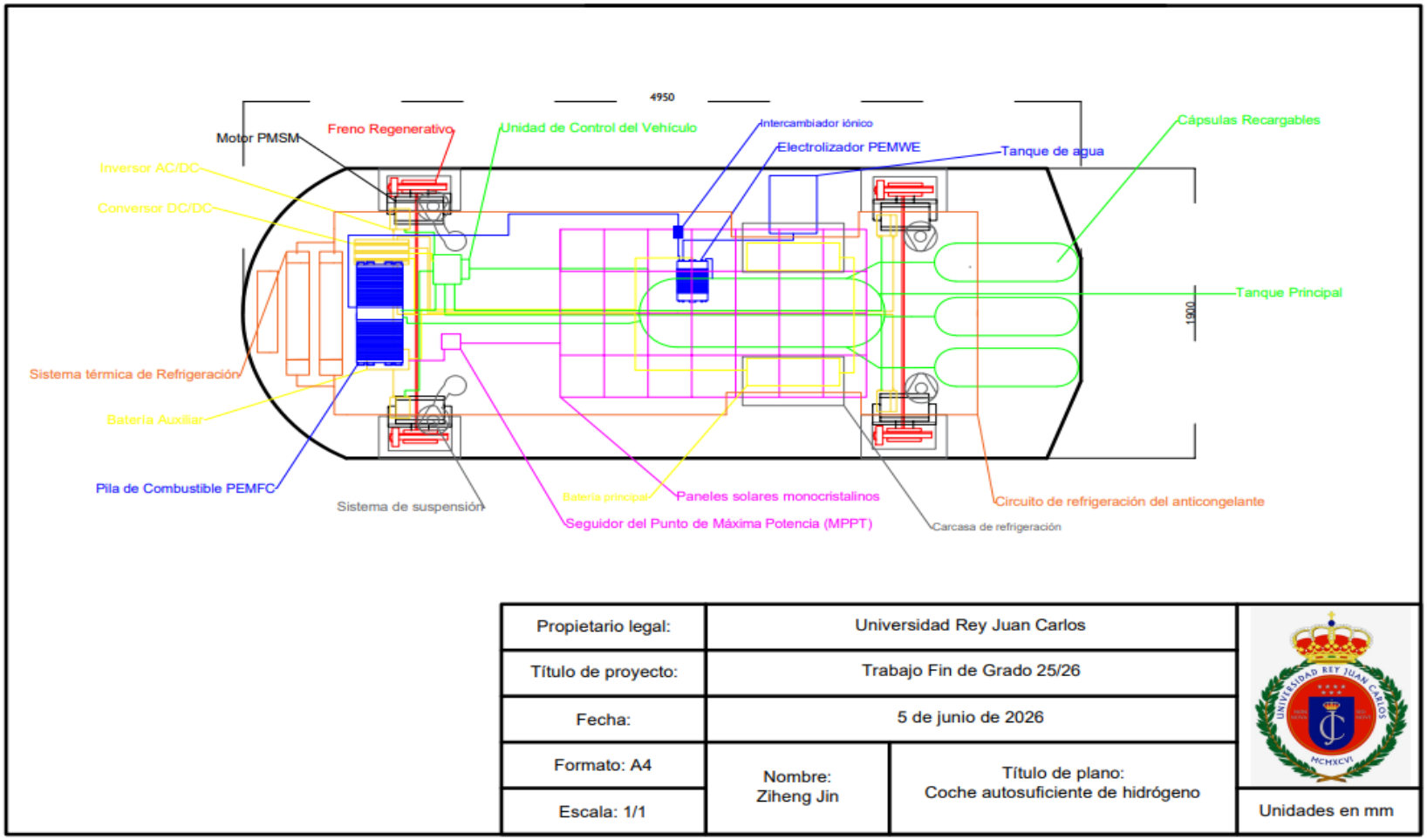
[69] Root. (2025, May 9). ¿Hay diferentes tipos de baterías de litio?? GYCX SOLAR. https://gycxsolar.com/es/are-there-different-types-of-lithium-batteries/

[70] Santos, A. (2023, December 13). ¿Qué es el coeficiente aerodinámico y cómo se calcula? Tecvolución. https://tecvolucion.com/que-es-el-coeficiente-aerodinamico-y-como-se-calcula/

[71] Calcular y optimizar la resistencia a la rodadura de un neumático. (2024, June 12). Carretillas-elevadoras-electricas.com. https://www.carretillas-elevadoras-electricas.com/calcular-optimizar-la-resistencia-la-rodadura-de-un-neumatico-n-22-es

[72] km77.com. (2025 5). Motores de flujo axial. Técnica al detalle de una tecnología con mucho potencial real. Dailymotion.com. https://www.dailymotion.com/video/x9jh

ANEXO I Plano Principal del Vehículo



Propietario legal:	Universidad Rey Juan Carlos		
Título de proyecto:	Trabajo Fin de Grado 25/26		
Fecha:	5 de junio de 2026		
Formato: A4	Nombre: Ziheng Jin	Título de plano: Coche autosuficiente de hidrógeno	
Escala: 1/1			Unidades en mm

ANEXO II Lista de los materiales y su precio

Nivel 0	Nivel 1	Nivel 2	Coste Unitario (€)	Precio total (€)	Peso Unitario (kg)	Peso total (kg)
Vehículo Híbrido Lazo Cerrado de Hidrógeno (1u)	Sistema de Propulsión eléctrica (1u)	Motor PMSM de Flujo Axial (4u)	1.850	7.400	52,2	208,8
		Inversor de Carburo de silicio (4u)	800	3.200	4,8	19,2
		Cableado Blindado de Alta tensión (1u)	600	300	32	32
	Planta de Potencia Química (1u)	Stack de Pila de Combustible de 440 celdas (1u)	7.050	7.050	52	52
		Compresor de Aire y Bombas de Recirculación (1u)	1.800	1.800	35	35
	Sistema de Almacenamiento de Hidrógeno de 700 bares (1u)	Tanque Principal Estructural Tipo IV 5 kg (1u)	4.200	4.200	96	96
		Cápsula Modular Intercambiable Tipo IV 1 kg (3u)	2.400	7.200	19	57
		Reguladores de Presión de doble etapa y Válvulas TPRRD	900	1.800	16	32
	Producción de potencia química y lazo térmico (1u)	Stack electrolizador 80 celdas (1u)	2300	2.300	22,25	22,25
		Intercambiador de calor y circuito de lazo térmico (1u)	1800	1.800	25	25
		Filtro de intercambio iónico (2u)	150	300	3	6
	Sistema de almacenamiento eléctrico (1u)	Batería tipo Pouch de configuración 120S2P (1u)	2.100	2.100	38,2	38,2
		Sistema de Gestión de Batería (1u)	500	500	10	10
	Sistema de Generación Fotovoltaica Integrada (1u)	Panel Solar tipo IBC (1u)	120	120	20,80	20,8
		Regulador MPPT (1u)	130	130	2	2
	Electrónica de Control y Potencia (1u)	Convertidor DC-DC elevador (1u)	525	525	14	14
		Convertidor DC-DC reductor (1u)	525	525	14	14
		Unidad de Control del Vehículo (1u)	8.00	800	5	5
	Partes externas (1u)	Chasis monocasco de aluminio (1u)	8.500	8.500	580	580
		Conjunto de suspensión y dirección (1u)	1.200	1.200	250	250
		Llanta de aleación ligera (4u)	150	600	12	44
		Neumático delantero 255/50R19 (2u)	200	400	14	27
		Neumático trasero 285/45R19 (2u)	200	400	16	27
		Pinzas de freno (4u)	50	200	1,9	6
		Discos de freno de aluminio ligero AMC (4u)	250	1.000	15	32
		Total	-	54.350	-	1673,25

ANEXO II Especificaciones de las placas solares

Maysun Solar

IBC Technology
1/2 Cut
Full Black 425-460W

MS(425-460)BC-54HB
Mono IBC 182mm 108 Cells

Advanced Solar Technology

Better Appearance
Without the visual impact of the welding strips on the front-side, the pure beauty of the solar cells is perfectly presented.

High Power Generation Efficiency
There is no metal welding strips on the front-side of the module. The power generation area of the front-side increases by 2.5%.

No Light Pollution
The light reflectivity of the module is only 1.7% due to no welding strip technology on the front-side. It reduces light pollution to the environment and neighbors.

No Hot Spot Effect When be Blocked
Using unique all back contact technology, the the positive and negative metal electrodes flow normally on the back-side when be blocked, reducing the risk of hot spots.

Long Warranty of 25 Years
The encapsulating materials use TPE backsheet, which is covered with PVF (Tedlar) film and use improved EPE film, ensuring service life of 25 years.

Better Performance in Low Light Scenes
No shield of metal electrodes on the front-side enables a spectral absorption range of 300nm-1200nm, which extends the working time. The maximum power generation gain is 2.01%.

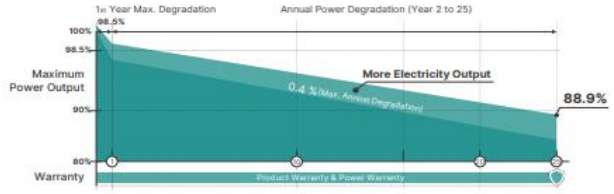
TÜV · CE · IEC · ISO

23.50%
Maximum Efficiency

0 ~ +5W
Positive Power Tolerance

25 Years
Product Warranty

25 Years
Power Warranty



Maysun Solar

Electrical Data(STC)

Test Conditions	STC	STC	STC	STC	STC	STC	STC	STC
Peak Power Watts-P_{max} (Wp)*	425	430	435	440	445	450	455	460
Power Tolerance-P_{max} (W)	0 ~ +5							
Maximum Power Voltage-V_{mp} (V)	32.96	33.16	33.36	33.56	33.76	33.96	34.16	34.26
Maximum Power Current-I_{mp} (A)	12.91	12.98	13.05	13.12	13.19	13.27	13.36	13.43
Open Circuit Voltage-V_{oc} (V)	39.23	39.43	39.63	39.83	40.03	40.23	40.43	40.63
Short Circuit Current-I_{sc} (A)	13.94	14.01	14.08	14.15	14.23	14.31	14.39	14.46
Module Efficiency η m (%)	21.80	22.00	22.30	22.50	22.80	23.00	23.30	23.50

* STC: Air Mass AM1.5, Irradiance at 1000W/m², Cell Temperature 25°C / Measuring tolerance: ±3%.

Electrical Data(NOCT)

Test Conditions	NOCT	NOCT	NOCT	NOCT	NOCT	NOCT	NOCT	NOCT
Peak Power Watts-P_{max} (Wp)*	317	321	325	329	333	337	341	345
Power Tolerance-P_{max} (W)	0 ~ +5							
Maximum Power Voltage-V_{mp} (V)	30.08	30.26	30.44	30.62	30.81	30.99	31.17	31.35
Maximum Power Current-I_{mp} (A)	10.54	10.61	10.68	10.75	10.82	10.88	10.94	11.01
Open Circuit Voltage-V_{oc} (V)	36.83	37.02	37.21	37.40	37.58	37.77	37.79	37.98
Short Circuit Current-I_{sc} (A)	11.25	11.31	11.37	11.43	11.49	11.55	11.61	11.67
Module Efficiency η m (%)	21.80	22.00	22.30	22.50	22.80	23.00	23.30	23.50

* NOCT: Irradiance at 800W/m²,Cell Temperature 20°C, Wind Speed 1m/s / Measuring tolerance: ±3%.

Mechanical Data

Solar Cells	Monocrystalline
Cell Orientation	108 cells
Module Dimensions	1722mm × 1134mm × 30mm
Weight	20.80kg
Front Glass	3.2mm, High Transmission, AR Coated Heat Strengthened Glass
Encapsulant material	EVA
Backsheet	White
Frame	30mm, Black, Anodized Aluminium Alloy
J-Box	IP 68 Rated(3 Bypass Diodes)
Cables	Photovoltaic Technology Cable 4.0mm² Portrait: N 1200mm / P 1200mm Length Can be Customized
Connector	MC4 Compatible

* Please refer to regional datasheet for specific connector.

Temperature Ratings

NOCT(Nominal Operating Cell Temperature)	45°C (±2°C)
Temperature Coefficient of P_{MAX}	-0.29% / °C
Temperature Coefficient of V_{OC}	-0.23% / °C
Temperature Coefficient of I_{SC}	0.05% / °C

* Do not connect fuse in combiner box with two or more strings in parallel connection.

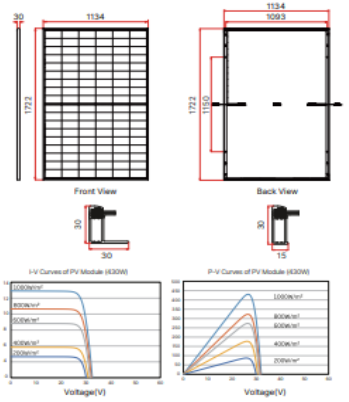
Application Environment

Operational Temperature	-40 ~ +85°C
Maximum System Voltage	1500VDC(IEC)
Max Series Fuse Rating	25A
Mechanical Performance	P 5400Pa / N 2400Pa

Packaging Configureation

Modules Per Pallet: 36 Pieces
Modules Per 40' Container: 936 Pieces

Dimensions of PV Module (mm)



Warranty

25 Years Product Warranty
25 Years Power Warranty
1.5% First Year Degradation
0.4% Annual Power Degradation

* Please refer to product warranty for details.

Caution: Read safety and installation instructions before using the product.® 2024 Maysun Solar All rights reserved.
Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.
Website: www.maysunsolar.com

ANEXO III Especificaciones de los tanques de hidrógeno

Infrastructure & mobility

Hydrogen high-pressure Type 4 cylinders

Nominal working pressure (15°C)		Outside diameter	Overall length	Cylinder weight	Water volume	Hydrogen capacity	Weight ratio (hydrogen weight/ cylinder weight)	Approval
Reference	Bar	mm	mm	kg	L	kg	%	
Distribution and other storage								
H2-25-503X2342	250	503	2,342	93	350	6.3	6.7	TPED
H2-25-693X2692	250	693	2,692	161	748	13.6	8.4	ABS/US DOT
H2-25-693X5690	250	693	5,690	347	1,745	31.8	9.2	ABS/US DOT
H2-30-509X2342	300	509	2,342	111	350	7.4	6.6	TPED
H2-31-503X2342	318	503	2,342	93	350	7.8	8.3	TPED
H2-38-509X2342	381	509	2,342	111	350	9.0	8.0	TPED
H2-50-520X2357	500	541	2,357	177	335	10.6	5.9	TPED
H2-95-515X2783	950	515	2,783	365	254	12.4	3.4	PED/US DOT
Mobility								
H2-35-431X2114	350	431	2,114	67	194	4.7	7.1	EC79/HGV2
H2-35-430X3202	350	430	3,202	101	312	7.5	7.4	EC79/HGV2
H2-35-450X2130	350	450	2,130	68	231	5.6	8.3	R-134 planned
H2-35-450X3230	350	450	3,230	103	366	8.8	8.5	R-134 planned
H2-35-450X3630	350	450	3,630	116	415	9.9	8.6	R-134 planned
H2-35-509X2344	350	509	2,344	111	350	8.4	7.6	EC79
H2-70-332X921	700	332	921	33	36	1.4	4.2	EC79
H2-70-368X878	700	368	878	37	53.4	2.1	5.8	EC79/R-134
H2-70-440X1050	700	440	1,050	59	76	3.1	5.3	R-134/HGV2
H2-70-530X2154	700	530	2,154	188	244	9.8	5.2	EC79/HGV2
H2-70-610X2060	700	610	2,060	208	360	14.5	7.0	R-134 & HGV2
H2-70-705X2078	700	705	2,078	264	458	18.4	7.0	HGV2

This list summarizes frequently built units, other sizes may also be available. Minimum quantities may apply. Availability might be limited. Please contact us for more information. Specifications are subject to change without notice.

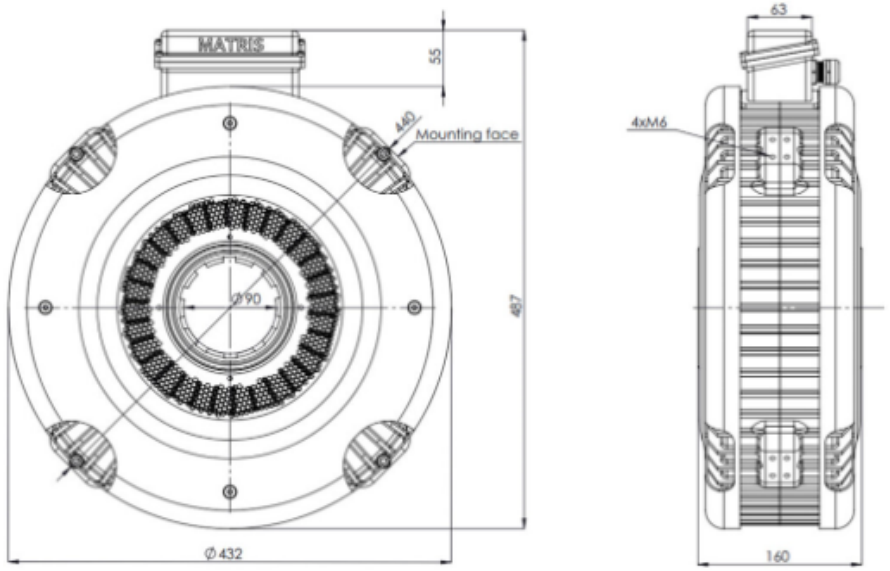
Rev. 04/2024

HEXAGON PURUS

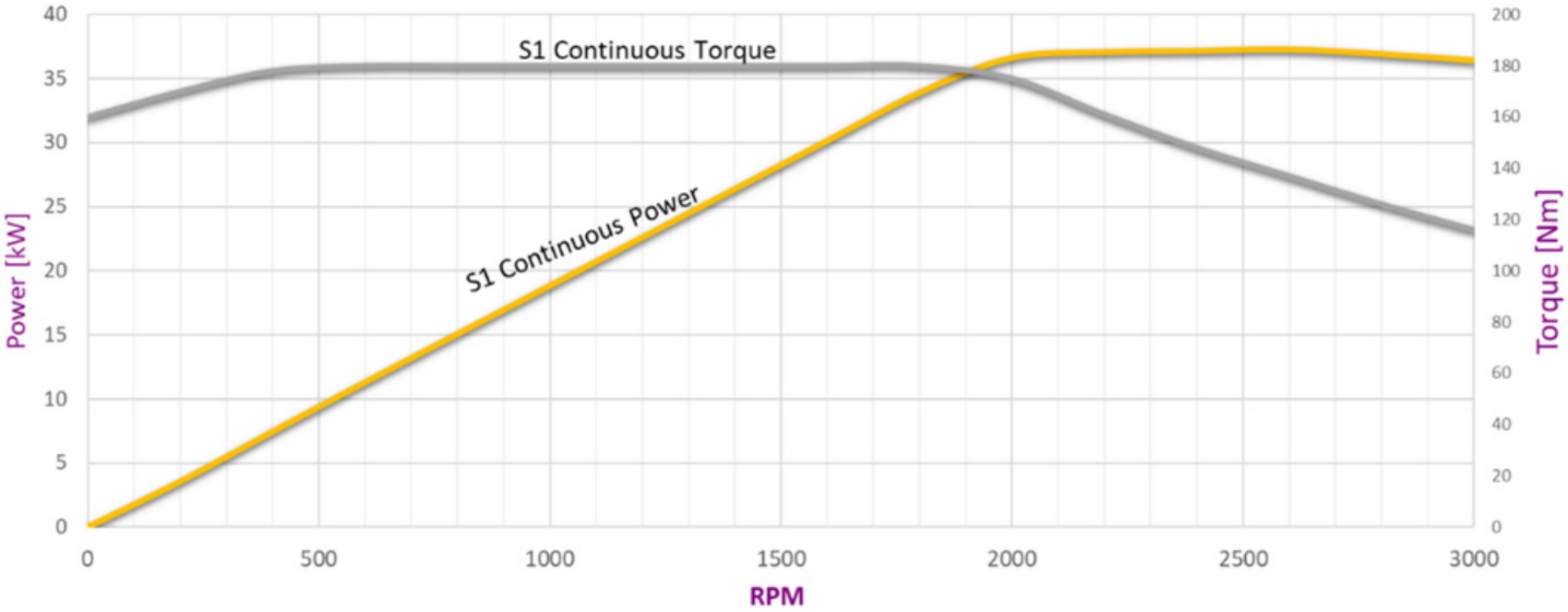
ANEXO IV Especificaciones del motor eléctrico

Especificaciones del motor de flujo axial*

ESPECIFICACIÓN	VALOR
DIMENSIONES BÁSICAS	
Diámetro de montaje	450 mm
Longitud	180 mm
Peso	52,4 kg
RENDIMIENTO	
Rango de velocidad	0–3000 RPM
Potencia nominal (S1)	37 kW
Par nominal	180 Nm
Aislamiento	Clase térmica H
Eficiencia máxima	98,2%
Refrigeración	Autoventilado (IC 411)
N.º de polos	5
Sensor de posición	Encoder integrado RM44
Protección contra la entrada	IP 65



Todas las especificaciones están sujetas a cambios sin previo aviso. Versión: 1.0



Los datos presentados se basan en pruebas rigurosas del motor y dependen de la configuración del motor, los ciclos de conducción, las condiciones térmicas y el rendimiento del controlador. Para obtener más información, póngase en contacto con nuestro equipo de soporte en info@matris.eu.

*Los datos aquí presentados corresponden a un motor eléctrico de 37 kW, lo cual no limita nuestra oferta. Para necesidades específicas de aplicación, contáctenos en info@matris.eu.

ANEXO V Ficha técnica del vehículo

Consumos y emisiones

Consumo	
Consumo de hidrógeno (kg/100 km)	0,533
Almacenamiento	
Número de depósitos de hidrógeno	3
Capacidad combinada de los depósitos de hidrógeno	8 kg
Número del tanque principal	1
Capacidad del tanque principal	5 kg
Número de cápsulas intercambiables	3
Capacidad de cápsulas intercambiables	0,5 kg
Emisiones	
Emisiones CO_2 combinado (g/km)	0
Monóxido de Carbono, CO (mg/km)	0
Hidrocarburos, THC (mg/km)	0
Hidrocarburos, NMHC (mg/km)	0
Óxidos nitrosos, NOx (mg/km)	0
Partículas PM (mg/km)	0

Motor eléctrico

Tipo	Motor síncrono de imanes permanentes
Cantidad	4
Potencia máxima (kW)	148 kW (200x CV)
Par máximo por eje (Nm/RPM)	150 (600 total)

Batería del sistema

Tipo	Iones de Litio NMC
Configuración	120S2P
Módulos de la batería	120
Voltaje Nominal (V)	444
Capacidad de la batería (Ah)	12

Pila de combustible

Tipo	Membrana de Intercambio Iónico
Potencia Nominal (kW)	83,16
Voltaje Nominal (V)	396
Dimensionamiento (cm)	22 X 69,6 X 22

Electrolizador

Tipo	Membrana de Intercambio Iónico de electrólisis de agua
Potencia Nominal (kW)	14,33
Voltaje Nominal (V)	132,8
Dimensionamiento (cm)	12 X 21,6 X 12

Prestaciones

Velocidad máxima (km/h)	232,46
Tiempo 0-100 km/h (s)	6,04
Autonomía media (km)	1500
Coeficiente aerodinámico de penetración	0,3

ANEXO VI Especificaciones

Peso

Peso en vacío (kg)	1674,25

Frenos

Frenos delanteros	Discos ventilados con pinzas de 4 pistones
Frenos traseros	Discos ventilados con pinzas de 4 pistones

Transmisión

Caja de cambios	Automática
Ruedas motrices	Cada rueda opera independientemente

Neumáticos y llantas

Eje delantero	255/50R19
Eje trasero	285/45R19