

Informe

Diseño de un vehículo eléctrico híbrido con pila de combustible

Asignatura

Vehículos híbridos y eléctricos

2019

Miembros del equipo de trabajo

Federico Perdomo

Marcos Martínez

Yuanlu Li



Índice

1. Introducción	3
2. Requerimientos de potencia	4
3. Diseño	5
3.1 Disposición	5
3.2 Motor eléctrico	6
3.3 Batería	7
3.4 Pila de combustible	9
3.5 Almacenamiento de hidrógeno	12
4. Estrategias de control	12
5. Bibliografía	14

1. Introducción

Es conocida la situación comprometedoras en la que se encuentran los vehículos de combustión interna. Se presenta un escenario global caracterizado por una escasez de recursos cada vez más limitante y una creciente demanda de energía, en particular en el sector de transporte. Esto compromete el uso vehicular de los combustibles convencionales, derivados de petróleo [1], [2]. Además, su combustión ocasiona la emisión de gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global, y a su vez a la contaminación del aire a través de liberación de material particulado. Desde ya un tiempo, han logrado y se continúan desarrollando avances en el automovilismo en relación al sistema de propulsión de este, recurriendo a varias alternativas energéticas.

En este contexto los vehículos eléctricos e híbridos cobran particular importancia. Un vehículo híbrido es aquel que “posee al menos dos sistemas de almacenamiento de energía y al menos dos convertidores de energía” [1]. El vehículo híbrido más clásico utiliza combustibles fósiles y baterías para almacenar energía, el cual puede poseer diversas ventajas por sobre un vehículo propulsado exclusivamente por un motor de combustión interna, desde el punto de vista energético (punto de funcionamiento óptimo del motor, frenado regenerativo, posibilidad de utilizar energía eléctrica de la red, entre otras). Sin embargo, el concepto de vehículo híbrido es más amplio e involucra también a los vehículos basados en el uso de hidrógeno.

El hidrógeno es una de las fuentes de energía alternativa a los combustibles fósiles más prometedoras. El mismo no está asociado a emisiones de anhídrido carbónico a la atmósfera, ya que al oxidarse produce solamente agua. Su uso extendido permitiría disminuir la huella de carbono atmosférico, lo que ha generado que en los últimos años se desarrolle el concepto de “economía del hidrógeno” para estudiar esta posibilidad [3]. Gran parte de la demanda de hidrógeno actual es cubierta con procesos como el reformado, de fluidos derivados del petróleo. Sin embargo, se tiene como alternativa más renovable la producción de hidrógeno a partir de agua mediante la electrolisis (si bien no es la única opción que se estudia), por lo que desde un punto de vista ambiental, la operación con hidrógeno reduciría ampliamente las implicancias negativas en el medio ambiente.

La utilización de vehículos propulsados por hidrógeno se ha estudiado ya desde hace varias décadas, relacionado al desarrollo de las pilas de combustible, capaces de transformar la energía química del hidrógeno en corriente eléctrica. Los vehículos de pila de combustible no tienen los problemas de autonomía que presentan los vehículos puramente eléctricos (asociados a las grandes limitaciones que imponen el peso y coste de las baterías). Además, no necesitan de grandes tiempos de recarga.

El primer vehículo propulsado por una pila de combustible se construyó en 1966 [1] y hoy en día continuamente se desarrollan nuevos modelos y se ofrecen comercialmente. La consolidación de esta tecnología como un medio de transporte importante depende en gran medida de las capacidades de producción de hidrógeno. Hoy en día el coste de producir hidrógeno limpio es alrededor de 3 veces más alto que el de refinar petróleo [2]. Hasta junio de 2018, se han vendido alrededor de 6500 vehículos de pila de combustible a consumidores. Tres mil de ellos se entregaron en California, donde se encuentra la mayor red existente de estaciones de recarga de hidrógeno. Otra de las facetas limitantes del uso del hidrógeno es su almacenamiento, dado que debido a su baja densidad, requiere de métodos como compresión, enfriamiento (o una combinación de ambas), o almacenamiento en fase sólida.

2. Requerimientos de potencia

Para el cálculo de la potencia de tracción utilizado en el dimensionamiento se calcularon tres potencias según diferentes condiciones en las que pueda estar el vehículo:

Potencia en la aceleración:

$$P_{acel} = \frac{m\gamma_m}{2t_a}(v_f^2 + v_b^2) + \frac{2}{3}mgf_r v_f + \frac{1}{5}\rho_a C_x A_f v_f^3$$

Donde se consideraron los siguientes datos:

Peso en vacío	4134	lb
Peso de un pasajero	90	kg
Cantidad pasajeros	4	-
Peso total	2235	kg
fr (coeficiente de rodadura)	0.01	
Cx (coeficiente aerodinámico)	0.3	
Densidad aire	1.225	kg/m3
Altura total auto	58.2	in
Ancho total auto	73.9	in
Área total	2.77	m2
Área frontal/Área total	83	%
Área frontal	2.30	m2

Donde el peso vacío del auto y el área son correspondientes al auto Honda FCX Clarity, el cual es un auto a pila de combustible. Del mismo vehículo, se sabe que la relación de transmisión es de 9,333. Utilizando esta relación de transmisión para el cálculo de un parámetro involucrado en el cálculo de potencia:

$$\gamma_m \approx 1,04 + 0,0025\xi^2$$

Por lo que el parámetro que toma en cuenta la rotación de los demás elementos (aparte de las ruedas) es de 1,3.

A su vez, el coeficiente de rodadura fue estimado por ser un valor típico. La velocidad final considerada fue de 100 km/h con un tiempo de aceleración de 14 s, valores que fueron solicitados en el diseño. Para el cálculo de la velocidad base, se consideró un valor de X (relación entre la velocidad base y la máxima) de 4, este valor fue considerado un valor razonable y luego realizando un análisis de sensibilidad se determinó que no tuvo mayor relevancia dicha relación en el dimensionamiento del sistema propulsor ni del

almacenamiento. Utilizando la relación presentada anteriormente, se tiene como resultado una potencia de tracción en aceleración de 92,13 kW.

Potencia a velocidad máxima:

$$P_{v_{max}} = \left(mgf_r + \frac{1}{2} \rho_a C_x A_f v_{max}^2 \right) v_{max}$$

La velocidad máxima considerada fue de 120 km/h y realizando el cálculo, la potencia de tracción resulta un valor de 22,98 kW

Potencia en pendiente:

$$P_{pend} = \left(mgf_r \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a C_x A_f v^2 + mg \sin(\alpha) \right) v$$

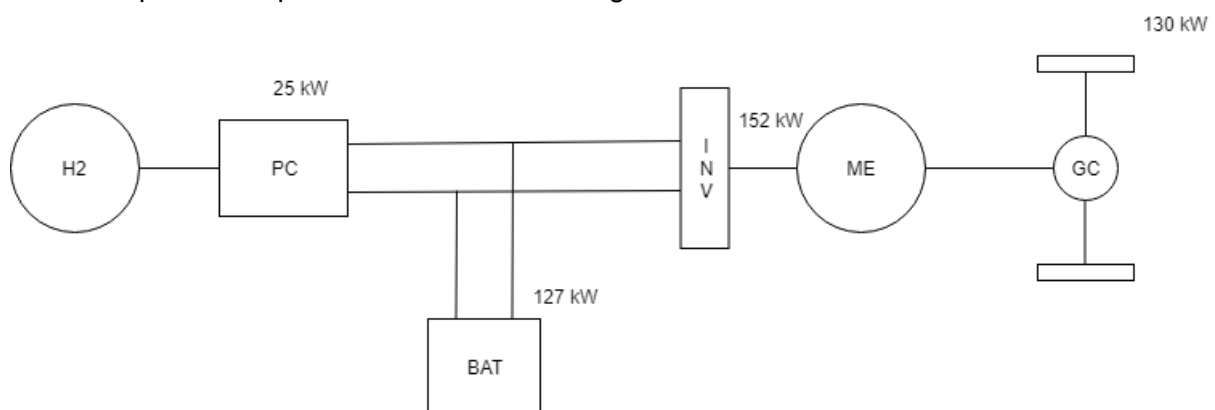
Para el cálculo se considero una pendiente de 20 ° con una velocidad de 60 km/h resultando en una potencia demandada de 130,25 kW. Esta potencia será la utilizada para el dimensionamiento del vehículo al ser la mayor de las potencias calculadas.

De este análisis se desprende que la potencia de tracción a usar para el dimensionamiento es de 130 kW, donde en relación con el vehículo Honda Clarity, el cual consta de una potencia en el motor eléctrico de 130 kW (174 HP), se considera un valor razonable.

3. Diseño

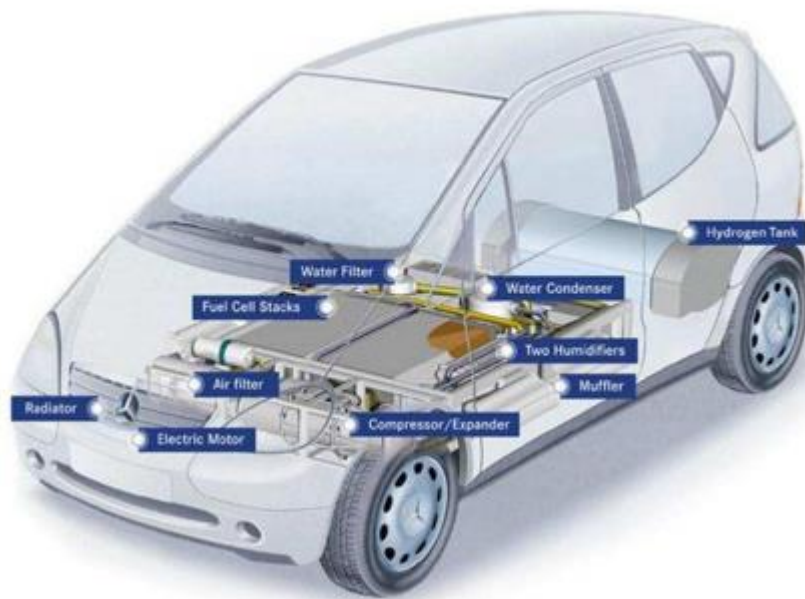
3.1 Disposición

Un diagrama simple que contiene la información calculada para el diseño de forma resumida para cada parte del vehículo es el siguiente:



Donde PC simboliza la pila de combustible, BAT es el stack de baterías, INV es un inversor (que se consideró en principio de rendimiento unitario), ME motor eléctrico, GC grupo cónico

A modo de ejemplo de disposición del vehículo se presenta la siguiente figura:



3.2 Motor eléctrico

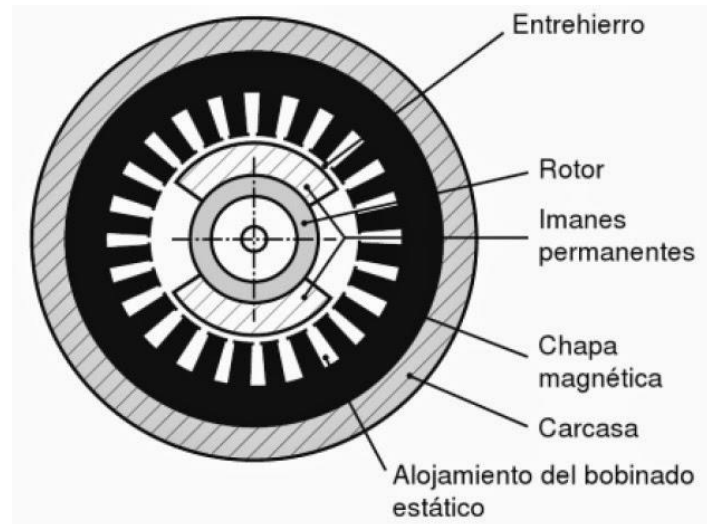
Un motor eléctrico tradicional consta de dos partes: una fija (estator) y una móvil (rotor). Existen diversas tecnologías en la cual es posible mediante la utilización de energía eléctrica conseguir energía mecánica como motores DC o de inducción, sin embargo en una aplicación tecnológica más reciente están los motores sincrónicos de imanes permanentes.

Los imanes permanentes son materiales que, sin presentar campo magnético de forma natural, al ser imantados pueden generar su campo magnético de forma persistente. En la actualidad estos imanes son de gran importancia en su aplicación en los motores eléctricos sincrónicos. Estos tipos de motores tienen en el rotor los imanes permanentes y bobinas fijas en el estator por las cuales circula corriente creando un campo magnético. Con el fin de crear un campo magnético variable, para lograr hacer girar el rotor, la corriente que circula por las bobinas es variable en forma de onda rectangular (en el caso de motores sin escobilla DC) o en forma sinusoidal (en caso de motores sin escobilla AC).

El término “síncrono” es debido a que la velocidad del rotor y la velocidad del campo magnético del estator son iguales. El motor síncrono de imanes permanentes presenta varias ventajas sobre el convencional motor de inducción como ser tener menos pérdidas joule en el rotor al tener mayor energía magnética.

Desde el punto de vista de la configuración de los imanes permanentes en el rotor se pueden encontrar dos: superficiales (imanes adheridos al exterior del rotor) o interiores (imanes en el cuerpo del rotor), siendo ambos diseños aptos para su uso vehicular con distintas ventajas y

cuidados cada uno. El diseño de imanes superficiales ocupa un volumen menor en conjunto, y las pérdidas se reducen debido a la cercanía de los imanes con el estator. Sin embargo, presentan mayor coste, dificultades de montaje y limitaciones en su velocidad. El diseño de imanes interiores requiere un montaje mas complejo y costoso, pero permite reducir mucho el espacio entre estator y rotor, lo que no son necesarios imanes de alta energía. Es especialmente adecuado para prestaciones que impliquen velocidades muy altas.



Motor de imanes permanentes con diseño de imanes superficiales (fuente: [4])

El arranque en un motor síncrono es complejo. Existen tres estrategias a modo de solucionar la problemática del arranque: reducción de velocidad del campo magnético a hasta un valor bajo, el uso de un motor primario externo o el uso de devanados de amortiguamiento.

Debido a las diversas ventajas que presenta un motor síncrono AC de imanes permanentes, y a su vez a que existen soluciones para los problemas en el arranque, se escoge usar este motor para el diseño del vehículo híbrido [5], [6].

3.3 Batería

Entre las baterías de posible uso para vehículos híbridos y eléctricos se encuentran las de plomo ácido, níquel-cadmio, níquel-hidruro metálico, litio-Ion, litio-ferrofosfato y polímero de litio.

La batería litio-ferrofosfato (LFP o LiFePO_4) tiene las siguientes ventajas [7]:

Buena seguridad:

El enlace P-O en el cristal de fosfato de hierro y litio es estable y difícil de romper. Incluso a altas temperaturas o sobrecargas, no se colapsa como la estructura de óxido de cobalto de litio ni forma una sustancia oxidante fuerte. Incluso si la batería está dañada por dentro o por fuera (fuego, cortocircuito), la acupuntura, el impacto, el calor del horno, la extrusión, etc., no incinerarán ni explotarán; tiene muy buena seguridad. A 800 °C, todavía funciona normalmente.

Larga vida útil:

Bajo una temperatura de trabajo de 25 °C y la velocidad de carga y descarga de 0.5C, la batería de fosfato de litio y hierro tiene una vida útil de más de 6,000 veces. Si se usa una velocidad de descarga menor (aproximadamente 0.3C), su vida será más larga, hasta 10,000 veces. Por supuesto, la batería de fosfato de hierro y litio también puede cumplir con cargas y descargas a gran velocidad, con el fin de satisfacer la demanda actual de vehículos de nueva energía y almacenamiento de energía a gran escala. No hay daños después de una descarga excesiva a 0 V. Después de la carga normal, el rendimiento de la batería se puede restaurar.

Rentabilidad integral:

Batería de fosfato de hierro y litio de seguridad integral y protección del medio ambiente [excluyendo metales pesados y metales raros (las baterías Ni-MH necesitan metales raros), no tóxico (certificación SGS aprobada), sin contaminación, en línea con las regulaciones europeas RoHS, es una batería verde absoluta], Profundidad de descarga del DOD (hasta 100%), larga vida útil y otros factores, lo que lo hace muy rentable.

Se diseña con batería LiFePO₄.

Se usa la batería LiFePO₄ 32700 como cada celda:

Capacidad: 6.5 Ah

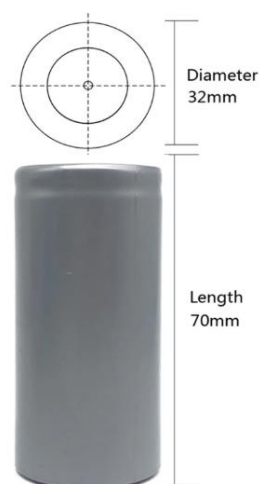
Corriente máxima descarga: 10C

Voltaje de trabajo: 3.2 V (voltaje límite: 2.0-3.65 V)

Energía: 20.464 Wh

Potencia específica: 144.95 W/h

Vida media: 2000 ciclos



Dimensiones de una batería LiFePo₄ 32700. Fuente: [8]

Arreglo

Un módulo LFP de 12.8V consiste 4 celdas en serie.



Para la diferencia de potencial 350V, se requiere utilizar 27 módulos en serie.

La potencia nominal de las baterías se determina:

$$P_{BAT} = \frac{P_{acel}}{\eta_{ME}} - P_{PC}$$

Resulta que la potencia de las baterías deben ser 90kW. Sabiendo la diferencia de potencial será 350V, se obtiene la corriente máxima es 257.2A. Además, sabiendo la corriente máxima de la serie de módulos es 65A(10C), se puede calcular que se necesita dividir la corriente en paralelo en 4 módulos (en total: 27 x 4 =108 módulos).

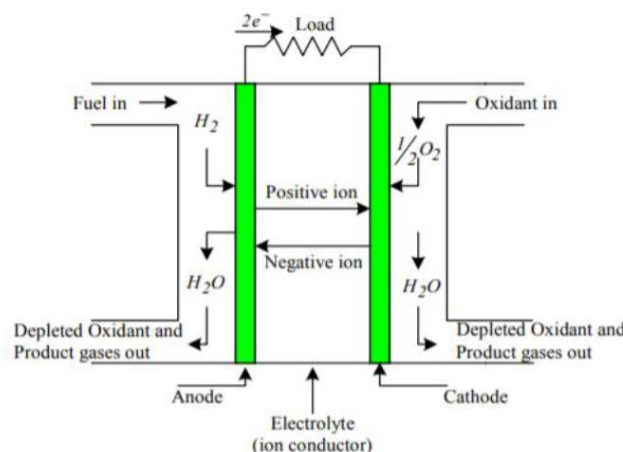
La energía total de las baterías es 8.8kWh, lo cual ofrece una autonomía puramente eléctrica de 39.5km.

3.4 Pila de combustible

La pila de combustible es un dispositivo capaz de generar electricidad a partir de energía química, proveniente del flujo continuo de un combustible y un oxidante. Existen varios tipos de pila de combustible. Generalmente se clasifican según el combustible utilizado (hidrógeno, metanol, gas natural, entre otros) y según el electrolito de la celda.

Una pila puede estar formada por una o más celdas, cada una con idéntico funcionamiento. La celda de combustible es una celda galvánica, debido a que genera una corriente eléctrica espontáneamente. Los componentes esenciales de una celda son sus electrodos, el electrolito, las entradas de combustible y oxidante, y las salidas de los productos de reacción. En el electrodo negativo (ánodo) se da la oxidación del combustible, liberando electrones que son consumidos en el electrodo positivo (cátodo), donde se da la reducción del oxidante. El electrolito (que puede ser sólido o líquido) debe permitir la transferencia de iones, lo cual permite cerrar el circuito.

Las pilas de combustible se diferencian de las baterías en que las primeras no almacenan energía, sino que solo la transforman. Por lo tanto, el tamaño de la pila de combustible de un vehículo no estará relacionado con su autonomía, sino con la potencia que es capaz de suministrar a partir de hidrógeno.



Esquema de una celda de combustible de hidrógeno en funcionamiento. Fuente: [2]

Los diferentes tipos de celda de combustible que existen tienen características considerablemente distintas, y no muchas son aptas para su aplicación en vehículos. Entre las que consumen hidrógeno como combustible, se destacan las Pilas de Combustible de Óxido Sólido (SOFC), las de Ácido Fosfórico (PAFC), las de Membrana Polimérica (PEMFC) y las Alcalinas (AFC), nombrándose en todos estos casos según el electrolito utilizado.

Estas varían en propiedades tales como su densidad de potencia, su rendimiento, su temperatura de operación, su tiempo de respuesta y el nivel de pureza necesario para el combustible. Las pilas que funcionan a temperaturas elevadas son capaces de tolerar impurezas mayores, pero tienen otros inconvenientes. En particular, necesitan un mayor tiempo de arranque para alcanzar la temperatura de operación.

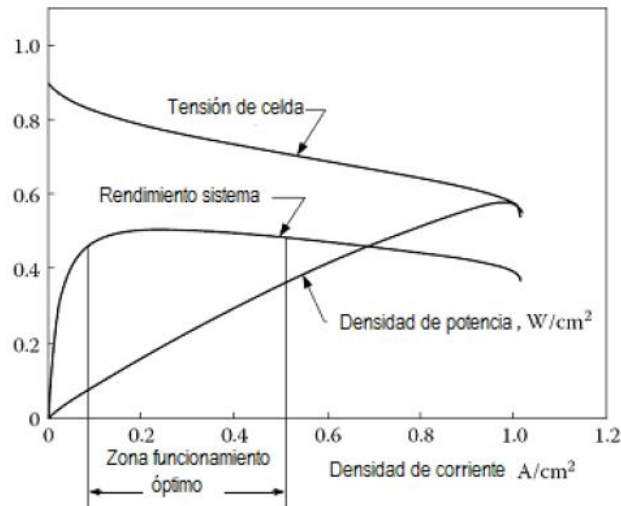
Las Pilas de Combustible de Membrana Polimérica (PEMFC) son las más utilizadas para aplicaciones vehiculares. En sus electrodos se dan las siguientes semirreacciones:

Su electrolito sólido está hecho de una membrana polimérica, capaz de permitir la difusión de protones (iones H^+) desde el ánodo hacia el cátodo. Químicamente, la membrana es un copolímero de ácido perfluorosulfónico (PFSA) y politetrafluoroetileno (PTFE, Teflón). La composición está patentada comercialmente bajo el nombre de Nafion, propiedad de la empresa Chemours (antes DuPont) [9]. Los catalizadores utilizados para formar los electrodos utilizan aleaciones de platino con rutenio, soportados sobre una matriz de carbono. Funcionan a una temperatura baja (alrededor de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$), lo cual permite tiempos de arranque cortos. Para temperaturas por encima de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, los tiempos de arranque (para llegar a la máxima potencia) pueden ser tan bajos como 15 s. Otras características deseables son su buen rendimiento y su alta densidad de potencia. Como desventajas, son propensas al envenenamiento con CO (por lo que el hidrógeno suministrado debe ser de alta pureza) y que requieren enfriamiento. Las PEMFC requieren de una humidificación cuidada de la membrana, ya que tanto niveles muy bajos como demasiado altos pueden ocasionar problemas de funcionamiento de la pila.

La máxima tensión que puede generar una celda está dada por el potencial de circuito abierto de la misma, cuyo valor teórico ronda los 1,2 V, sin embargo, las celdas reales presentan un potencial menor, cercano a los 0,9 V [10]. En funcionamiento, la tensión otorgada por la celda disminuye aún más debido a los sobrepotenciales asociados al pasaje de corriente. Existen distintos sobrepotenciales:

- Sobrepotencial de activación (asociado a la transferencia de carga en los electrodos)
- Sobrepotencial óhmico (asociado a la resistencia de la celda)
- Sobrepotencial de transporte de masa, asociado al transporte de los reactivos hacia las superficies de los catalizadores de cada electrodo.

La curva que relaciona la tensión de la celda con la densidad de corriente se denomina curva de polarización. En ella se observa como baja la tensión a medida que el pasaje de corriente genera mayores sobrepotenciales. Asociada a ella está la curva de potencia. La misma es creciente hasta llegar a la zona de sobrepotenciales de transporte de masa, donde una caída abrupta de la tensión de celda provoca una disminución de la potencia otorgada.



Curvas de tensión de celda, potencia y rendimiento del sistema según la densidad de corriente. Fuente: [1]

Otras curvas de interés son las curvas de eficiencia de la celda y del sistema. La curva de eficiencia de la celda relaciona el voltaje entregado con el máximo teórico (sin sobrepotenciales). La curva de eficiencia del sistema toma en cuenta también pérdidas de energía debidas a otros componentes asociados a la celda de combustible, por ejemplo la energía consumida por el compresor. La zona de mayor eficiencia se da lejos del punto de mayor potencia entregada, donde la eficiencia puede estar por encima del 50% (ref. [11]).

Para el vehículo que se diseña, se decide utilizar una Pila de Combustible de Membrana Polimérica. La misma se dimensiona para poder entregar una potencia de 25 kW (suficiente para conducir a velocidad crucero) a una densidad de corriente de 0,5 A por cm² de superficie activa, de modo de trabajar en la zona de funcionamiento óptimo de la pila. Se espera una tensión en funcionamiento de alrededor de 0,7 V por celda [11]. El stack se compondrá de 500 celdas, de modo que se espera que logre entregar 350 V en sus condiciones de diseño.

Para lograr la potencia deseada, la corriente debe ser de 72 A, por lo que las celdas deben poseer cada una 144 cm² de área activa. Basado en estos números, el peso total de la pila se estima en 60 kg y sus dimensiones aproximadas en 75x15x20 cm.



Stack EC200-192, de la referencia [11], más pequeño pero de diseño similar al que se propone en el presente informe.

3.5 Almacenamiento de hidrógeno

Con el fin de alimentar a la celda de combustible con hidrogeno, surgen dos alternativas: generarlo in-situ o tenerlo almacenado. Esquemas en donde se genera in-situ se han planteado, por ejemplo donde se poseía un reformador en el mismo vehículo, sin embargo lo más reportado es respecto a la alternativa de almacenamiento.

Los diferentes tipos de almacenamiento se muestran en la siguiente tabla en donde se resaltan las ventajas y los problemas asociados a cada uno:

Category	Type	Advantages	Issues
Gas storage	Compressed hydrogen	High efficiency, convenient, mature technology.	Expensive cylinder and the immature technology of fast filling.
Liquid storage	Liquid hydrogen	High liquid density and storage efficiency.	Large consume of energy and time, low temperature.
Carbon nanotubes	Gaseous hydrogen	Highly porous structure and particular interaction between carbon atoms and gas molecules.	Immature technology and hydrogen capacity depends on many factors.
Chemical storage (metal hydride)	MgH ₂ CaH ₂ NaH	High safety, high purity of hydrogen, good reversible cycle performance, large volume of hydrogen density.	Absorbing impurities, reducing the hydrogen capacity and the lifetime of tank.
Physical storage (metal organic framework)	Porous coordination network	Highly porous, high uptake of H ₂ and specific surface areas.	Hydrogen storage temperature is far below operating temperature.

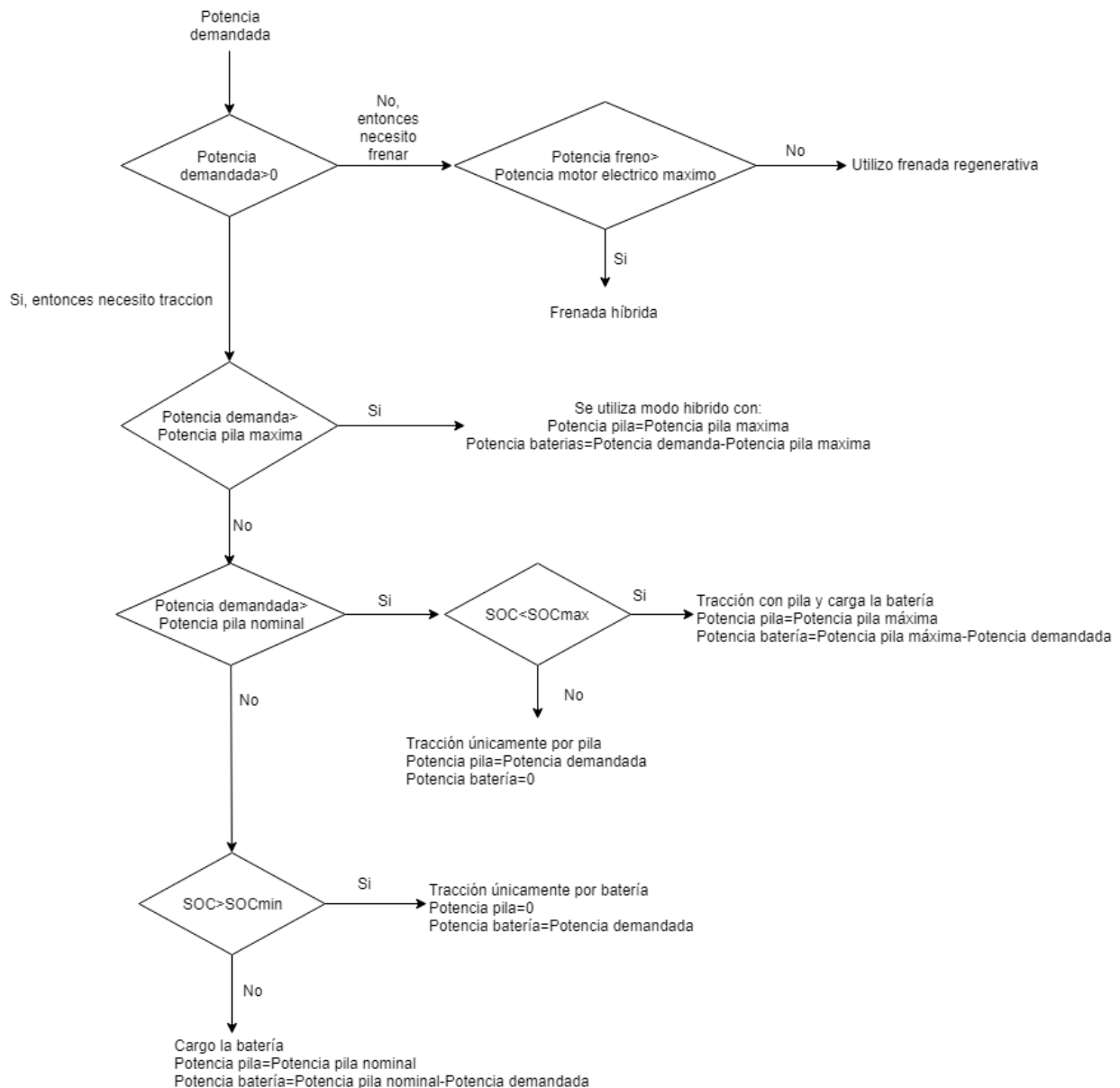
Fuente: [12]

Sin embargo, el almacenamiento de gas comprimido es más popular debido a su simplicidad técnica, alta confiabilidad, eficiencia aceptable y disponibilidad. Debido a esto último, el almacenamiento elegido es como gas comprimido en cilindros presurizados.

Aproximadamente, y asumiendo una eficiencia de la celda de combustible del 50%, se requiere una masa utilizable de hidrógeno de 5,6 kg para lograr una autonomía de 300 millas (482 km) [13]. El volumen requerido en cilindros para almacenar esta masa de hidrógeno dependerá de la presión de almacenamiento. Las presiones estándar utilizadas para esta aplicación son 350 o 700 bar, lo cual otorga una capacidad volumétrica de 18 o 28 g/L respectivamente. En caso de haya estaciones de carga disponibles de 700 bar, esta sería la mejor opción en cuanto a términos volumétricos. En esas condiciones, el tamaño del tanque sería de 182 L para almacenar 5,1 kg de H₂ (440 km de autonomía).

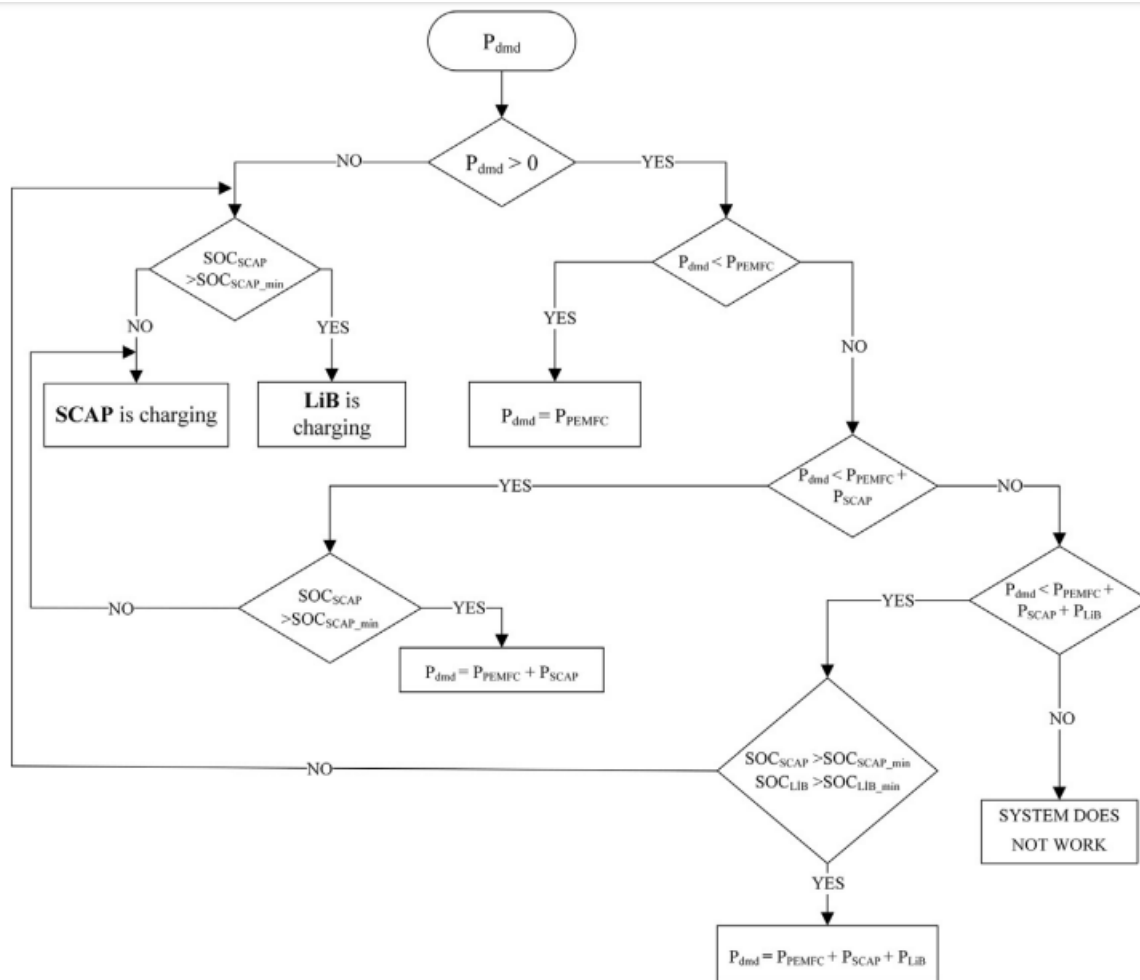
4. Estrategias de control

La estrategia de control escogida es tipo “Termostato” en donde el estado de carga de la batería se mantiene entre dos valores fijados: un SOCmin y un SOCmax. Un esquema clásico de control es el que se presenta en la siguiente figura:



En donde la lectura del diagrama de control se inicia con una entrada de información respecto a si la potencia demandada es mayor o menor a cero, es decir si se busca acelerar o frenar el vehículo. De necesitar acelerar el auto, y si no es suficiente la potencia que otorga la pila de combustible, se recurrirá a la batería para poder cumplir con los requerimientos de potencia. Si alcanza con la potencia de la pila de combustible para cubrir la potencia demandada, entonces se estará en condiciones de cargar la batería de si existe la necesidad o si la potencia demandada es baja y se tiene un estado de carga admisible en la batería, entonces se cubrirá la potencia demandada con la batería únicamente.

Este esquema de control es el utilizado por distintas referencias como la que se presenta en la siguiente figura, el cual es de un vehículo con supercapacitores (SCAP) y baterías de litio (LiB). Esquema con el mismo fundamento o con el mismo “espíritu” de control.



Esquema de control para un vehículo híbrido de pila de combustible. Fuente: [14]

5. Bibliografía

- [1] F. A. Izquierdo, J. P. Carriquiry, F. Arismendi, y J. M. López, «Diapositivas curso “Vehículos híbridos y eléctricos” 2019».
- [2] Y. Manoharan *et al.*, «Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Current Status and Future Prospect», *Applied Sciences*, vol. 9, n.º 11, p. 2296, jun. 2019.
- [3] U. Bossel y E. Baldur, «Energy and the Hydrogen Economy».
- [4] «Motor Brushless». [En línea]. Disponible en: <http://maquinaselectricasunam.blogspot.com/2015/05/motor-brushless.html>.
- [5] L. Blanco Rubio, «Diseño electromagnético de un motor síncrono de imanes permanentes para el accionamiento directo de la hélice de un barco», UPM, 2017.
- [6] «Beneficios de los motores sincrónicos de imanes permanentes». [En línea]. Disponible en: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=885>.
- [7] «电池储能技术小常识». [En línea]. Disponible en: http://www.bydenenergy.com/BYDEnergy/pages_ch/news/Battery-xiaochangshi.htm.
- [8] «VariCore 32700 LiFePO4 6500mAh». [En línea]. Disponible en: [https://lygte-info.dk/review/batteries2012/VariCore%2032700%20LiFePO4%206500mAh%20\(Gray\)%20UK.html](https://lygte-info.dk/review/batteries2012/VariCore%2032700%20LiFePO4%206500mAh%20(Gray)%20UK.html).
- [9] «Nafion N115, N117, N1110 Ion Exchange Materials Product Information (FuelCellStore)». [En línea]. Disponible en: <https://www.fuelcellstore.com/spec-sheets/chemours-nafion-115-117-1110-spec-sheet.pdf>.

- [10] «Why an Open Circuit Voltage of 1.23 V Cannot be Obtained». [En línea]. Disponible en: <https://www.h2fc-fair.com/hm17/images/forum/tf/2017-04-25-1140.pdf>.
- [11] P. Adcock, A. Kells, y C. Jackson, «PEM Fuel Cells for Road Vehicles». .
- [12] M. Li *et al.*, «Review on the research of hydrogen storage system fast refueling in fuel cell vehicle», *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, n.º 21, pp. 10677-10693, abr. 2019.
- [13] H. T. Hwang y A. Varma, «Hydrogen storage for fuel cell vehicles», *Current Opinion in Chemical Engineering*, vol. 5, pp. 42-48, ago. 2014.
- [14] K. Kaya y Y. Hames, «Two new control strategies: For hydrogen fuel saving and extend the life cycle in the hydrogen fuel cell vehicles», *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, n.º 34, pp. 18967-18980, jul. 2019.