



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA


ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial
y Diseño Industrial

Optimización del sistema propulsivo de pila de combustible
de hidrógeno de un dron según los requerimientos de la
misión

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

AUTOR/A: Rodriguez Rabanal, Alejandro

Tutor/a: López Juárez, Marcos

Cotutor/a: García-Cuevas González, Luis Miguel

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

RESUMEN

En este trabajo se pretende realizar un estudio de optimización de un dron mediante pila de combustible de hidrógeno para diferentes misiones propuestas. Para ello, se ha realizado un estudio que comprenda una base teórica importante y una optimización de la tecnología adecuada a las características. Primero de todo, se ha evaluado el empleo del hidrógeno en la tecnología propuesta, comentando sus ventajas y obstáculos a solventar en cuanto al almacenamiento y transporte. Luego, se ha explicado el funcionamiento de la pila de combustible, las distintas variedades y su viabilidad tecnológica, comparando cada una de las opciones disponibles para posteriormente escoger aquella tecnología que mejor se adapte a los requerimientos de optimización y a su viabilidad de aplicación a misiones de este tipo.

Tras los fundamentos teóricos, se ha continuado con el estudio en sí, explicando primero la metodología que se ha llevado a cabo en el mismo, además de conocer adecuadamente cada una de las misiones propuestas (vigilancia forestal, vigilancia marítima y transporte médico). Cada una de estas tres misiones disponen de condiciones iniciales diferentes, representando situaciones diferentes que requieren de soluciones propulsivas que difieren entre ellas. En el caso de la misión de transporte médico, tiene lugar entre Madrid y Mallorca, y necesita emplear la condición de vuelo de máximo alcance para lograr cumplir los requerimientos de la misión. Por otra parte, las misiones de vigilancia marítima y forestal requieren de la condición de máxima autonomía para su cumplimiento. Esto se debe a que ambas misiones necesitan cumplir el mínimo combustible manteniendo el nivel de vuelo propuesto a la velocidad mínima posible. La diferencia entre ambas radica en que la misión de vigilancia forestal se realiza en Asturias, por lo que el perfil del terreno es montañoso, mientras que la misión de vigilancia marítima se ejecuta en el Estrecho de Gibraltar, siempre por encima del mar, por lo que el perfil del terreno es simple.

Luego, se han expuesto los resultados obtenidos al respecto, analizando cada una de las misiones por separado para posteriormente compararlas y observar su aplicabilidad en la industria. Cabe destacar, entre todos los resultados conseguidos tras la realización de las simulaciones, que para la misión de transporte médico se consigue una pila de combustible de 40 kW de potencia con un consumo de 3.86 kg de hidrógeno, para la misión de vigilancia forestal se obtiene una pila de 80 kW y 5.35 kg de hidrógeno necesario. Por otra parte, para la misión de vigilancia marítima se dispone de una pila de combustible de 40 kW y 3.81 kg de hidrógeno consumido. Por último, se han expuesto las principales conclusiones obtenidas del estudio de optimización, enlazando con los objetivos propuestos en los primeros apartados y conseguir cerrar el trabajo de la manera más adecuada posible. Finalmente, se han descrito una serie de estudios futuros derivados de la realización de este estudio.

Palabras clave: Aeronáutica, Hidrógeno, Pila combustible, Optimización, Misión, UAV.

ABSTRACT

This work aims to carry out an optimization study of a drone using a hydrogen fuel cell for different proposed missions. To this end, a study has been carried out that includes an important theoretical base and an optimization of the technology to the study characteristics. First of all, the use of hydrogen in the proposed technology has been evaluated, commenting on its advantages and obstacles to be solved in terms of storage and transportation. Then, the operation of the fuel cell, the different varieties and their technological feasibility have been explained, comparing each of the available options to subsequently choose the technology that best adapts to the optimization requirements and its feasibility of application to this type of missions.

After the theoretical foundations, we continued with the study itself, first explaining the methodology that has been carried out in it, in addition to adequately knowing each of the proposed missions (forest surveillance, maritime surveillance and medical transport). Each of these three missions have different initial conditions, representing different situations that require propulsive solutions that differ between them. In the case of the medical transport mission, it takes place between Madrid and Mallorca, and needs to use the maximum range flight condition to meet the mission requirements. On the other hand, maritime and forest surveillance missions require the condition of maximum autonomy for their fulfillment. This is because both missions need to meet the minimum fuel requirement while maintaining the proposed flight level at the minimum possible speed. The difference between the two is that the forest surveillance mission is carried out in Asturias, so the terrain profile is mountainous, while the maritime surveillance mission is carried out in the Strait of Gibraltar, always above the sea, so that the terrain profile is simple.

Then, the results obtained in this regard have been presented, analyzing each of the missions separately to later compare them and observe their applicability in the industry. It is worth highlighting, among all the results achieved after carrying out the simulations, that for the medical transport mission a fuel cell of 80 kW power is achieved with a consumption of 4 kg of hydrogen, for the forest surveillance mission it is obtained an 80 kW battery and 5.39 kg of hydrogen required. On the other hand, for the maritime surveillance mission there is a 40 kW fuel cell and 3.88 kg of hydrogen consumed. Finally, the main conclusions obtained from the optimization study have been presented, linking with the objectives proposed in the first sections and closing the work in the most appropriate way possible. Finally, a series of future studies derived from carrying out this study have been described.

Keywords: Aeronautics, Hydrogen, Fuel cell, Optimization, Mission, UAV.

RESUM

En este treball es pretén realitzar un estudi d'optimització d'un dron mitjançant pila de combustible d'hidrogen per a diferents missions proposades. Per a això, s'ha realitzat un estudi que comprega una base teòrica important i una optimització de la tecnologia adequada a les característiques. Primer de tot, s'ha avaluat l'ús de l'hidrogen en la tecnologia proposada, comentant els seus avantatges i obstacles a solucionar quant a l'emmagatzematge i transport. Després, s'ha explicat el funcionament de la pila de combustible, les diferents varietats i la seua viabilitat tecnològica, comparant cadascuna de les opcions disponibles per a posteriorment triar aquella tecnologia que millor s'adapte als requeriments d'optimització i a la seua viabilitat d'aplicació a missions d'este tipus.

Després dels fonaments teòrics, s'ha continuat amb l'estudi en si, explicant primer la metodologia que s'ha dut a terme en este, a més de conèixer adequadament cadascuna de les missions proposades (vigilància forestal, vigilància marítima i transport mèdic). Cadascuna d'estes tres missions disposen de condicions inicials diferents, representant situacions diferents que requerixen de solucions propulsives que diferixen entre elles. En el cas de la missió de transport mèdic, té lloc entre Madrid i Mallorca, i necessita emprar la condició de vol de màxim abast per a aconseguir complir els requeriments de la missió. D'altra banda, les missions de vigilància marítima i forestal requerixen de la condició de màxima autonomia per al seu compliment. Això es deu al fet que totes dues missions necessiten complir el mínim combustible mantenint el nivell de vol proposat a la velocitat mínima possible. La diferència entre ambdues radica en el fet que la missió de vigilància forestal es realitza a Astúries, per la qual cosa el perfil del terreny és muntanyenc, mentres que la missió de vigilància marítima s'executa en l'Estret de Gibraltar, sempre per damunt de la mar, per la qual cosa el perfil del terreny és simple.

Després, s'han exposat els resultats obtinguts sobre aquest tema, analitzant cadascuna de les missions per separat per a posteriorment comparar-les i observar la seua aplicabilitat en la indústria. Cal destacar, entre tots els resultats aconseguits després de la realització de les simulacions, que per a la missió de transport mèdic s'aconsegueix una pila de combustible de 40 kW de potència amb un consum de 3.86 kg d'hidrogen, per a la missió de vigilància forestal s'obté una pila de 80 kW i 5.35 kg d'hidrogen necessari. D'altra banda, per a la missió de vigilància marítima es disposa d'una pila de combustible de 40 kW i 3.81 kg d'hidrogen consumit. Finalment, s'han exposat les principals conclusions obtingudes de l'estudi d'optimització, enllaçant amb els objectius proposats en els primers apartats i aconseguir tancar el treball de la manera més adequada possible. Finalment, s'han descrit una sèrie d'estudis futurs derivats de la realització d'este estudi.

Paraules clau: Aeronàutica, Hidrogen, Pila de combustible, Optimització, Missió, UAV.

Índice general

1	INTRODUCCIÓN	11
1.1.	Contexto actual	12
1.2.	Justificación del trabajo	14
1.3.	Objetivos	14
1.4.	Estructura del documento	15
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	17
2.1.	El hidrógeno	17
2.2.	El hidrógeno como vector energético	18
2.3.	Principios básicos de la pila de combustible	34
2.4.	Tecnologías de pila de combustible	41
2.5.	Comparación entre las distintas tecnologías de pilas de combustible estudiadas	67
2.6.	Uso de pilas de combustible en UAM/drones	69
3	METODOLOGÍA	72
3.1.	Introducción al estudio	72
3.2.	Diagrama de flujo	73
3.3.	Pila de combustible elegida	77
3.4.	Modelo de pila de combustible empleado	78
3.5.	Modelo de la aeronave	79
3.6.	Misiones a realizar	81
4	OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS	88
4.1.	Análisis individual de las misiones propuestas	89
4.2.	Comparativa y aplicabilidad a la industria	107
5	Conclusiones	110
6	Líneas futuras	112
7	Presupuesto	114
7.1.	Tiempo invertido	114
7.2.	Costes de equipamiento	115
7.3.	Costes energéticos	116
7.4.	Costes laborales	116
7.5.	Costes totales	117
8	Pliego de condiciones	118
	REFERENCIAS	120

Índice de figuras

1.1. Previsiones de empleo de hidrógeno en las próximas décadas [7]	14
2.1. Reformado del hidrógeno <i>Fuente: [12]</i>	18
2.2. Gasificación de la biomasa y sus productos obtenidos <i>Fuente: [16]</i>	20
2.3. Electrólisis para la obtención del hidrógeno <i>Fuente: [16]</i>	21
2.4. Gráfica comparativa de los diferentes métodos de obtención del hidrógeno. <i>Fuente: [21]</i>	25
2.5. Margen de operación del hidrógeno. <i>Fuente: [22]</i>	26
2.6. Margen de operación del hidrógeno. <i>Fuente: [16]</i>	27
2.7. Aumento de presión en función del metal utilizado <i>Fuente: [27]</i>	29
2.8. Comparación de los métodos de almacenamiento de hidrógeno en función de la densidad y el porcentaje en peso de hidrógeno <i>Fuente: [16]</i>	31
2.9. Comparación de la pila de combustible con máquinas térmicas. <i>Fuente: [16]</i>	34
2.10. Comparación de la pila de combustible con máquinas térmicas. <i>Fuente: [33]</i>	35
2.11. Stack de celdas de combustible a partir de placas bipolares. <i>Fuente: [29]</i>	36
2.12. Representación de los canales de placas bipolares. <i>Fuente: [39]</i>	37
2.13. Representación de un conjunto de celdas de combustible mediante geometría tubular. <i>Fuente: [29]</i>	38
2.14. Estructura de un blower de una pila de combustible. <i>Fuente: [29]</i>	39
2.15. Cuadro explicativo de los distintos tipos de pilas de combustible. <i>Fuente: [27]</i>	41
2.16. Cuadro explicativo de los distintos tipos de pilas de combustible. <i>Fuente: [27]</i>	42
2.17. Funcionamiento de una pila de combustible tipo PEMFC. <i>Fuente: [52]</i>	43
2.18. Estructura del PTFE o teflón. <i>Fuente: [54]</i>	44
2.19. Representación detallada de las partículas de polvo de carbono con las de platino adheridas. <i>Fuente: [27]</i>	45
2.20. Pila de combustible utilizada en la misión espacial Apollo por la NASA. <i>Fuente: [52]</i>	46
2.21. Gráfico comparativo temperatura-presión en las pilas AFC. <i>Fuente: [60]</i>	47
2.22. Estructura y funcionamiento simplificado de una pila de combustible alcalina. <i>Fuente: [62]</i>	48
2.23. Estructura de una pila alcalina con combustible disuelto. <i>Fuente: [27]</i>	49
2.24. Estructura de una pila de combustible de metanol directo. <i>Fuente: [65]</i>	50
2.25. Estructura de una pila de combustible de ácido fosfórico (PAFC). <i>Fuente: [69]</i>	54
2.26. Estructura de una placa bipolar con los canales dispuestos en una única dirección. <i>Fuente: [27]</i>	56
2.27. Estructura simplificada de una pila MCFC. <i>Fuente: [62]</i>	58
2.28. Equilibrio de los electrodos porosos junto con el electrolito. <i>Fuente: [27]</i>	59
2.29. Estructura y funcionamiento básico de una pila de combustible SOFC. <i>Fuente: [81]</i>	61
2.30. Configuración tubular de una pila SOFC. <i>Fuente: [29]</i>	63

2.31. Ejemplo de una pila SOFC de geometría plana. <i>Fuente: [27]</i>	63
2.32. Estructura simplificada de una pila de combustible biológica. <i>Fuente: [87]</i>	65
2.33. Esquema del funcionamiento de una pila redox. <i>Fuente: [89]</i>	66
2.34. Dron DS30W de Doosan Mobility Innovation. <i>Fuente: [92]</i>	69
2.35. Dron de la Universidad de Maryland. <i>Fuente: [93]</i>	70
3.1. Ejemplo de dron con sistema propulsivo de hidrógeno. <i>Fuente: [97]</i>	72
3.2. Diagrama de flujo general del estudio de optimización. <i>Fuente: Elaboración propia</i>	74
3.3. Diagrama de flujo del simulador de las misiones. <i>Fuente: Elaboración propia</i> . .	75
3.4. Diagrama de flujo de las misiones y condiciones. <i>Fuente: Elaboración propia</i> . .	76
3.5. Modelo aplicado del sistema de pila de combustible. <i>Fuente: [98]</i>	78
3.6. Imagen del ATLANTE en vuelo. <i>Fuente: [100]</i>	80
3.7. Trayectoria de la misión de transporte médico entre Madrid y Mallorca.	82
3.8. Perfil del terreno a lo largo del recorrido de la misión.	82
3.9. Perfil del vuelo para la misión de transporte médico.	83
3.10. Misión de vigilancia forestal.	84
3.11. Perfil del terreno para la misión de vigilancia forestal.	84
3.12. Perfil de vuelo para la misión de vigilancia forestal.	85
3.13. Recorrido de la misión de vigilancia marítima.	86
3.14. Perfil del terreno para la misión de vigilancia marítima.	86
3.15. Perfil de vuelo constante para la misión de vigilancia marítima.	87
4.1. Mapa de soluciones MTOM de la misión de transporte médico.	94
4.2. Mapa de soluciones para la masa de hidrógeno por cada 100 km de la misión de transporte médico.	94
4.3. Mapa de soluciones MTOM de la misión de vigilancia forestal.	99
4.4. Mapa de soluciones de masa de hidrógeno por cada 100 km de la misión de vigi- lancia forestal.	100
4.5. Mapa de soluciones MTOM de la misión de vigilancia marítima.	106
4.6. Mapa de soluciones de masa de hidrógeno por cada 100 km de la misión de vigi- lancia marítima.	106

Índice de cuadros

2.1. Comparativa entre los distintos tipos de pilas de combustible principales.	68
4.1. Resultados obtenidos de la misión de transporte médico.	89
4.2. Optimización de la masa de hidrógeno para la misión de transporte médico.	91
4.3. Segundos resultados obtenidos de la misión de transporte médico.	91
4.4. Optimización de la masa de hidrógeno para la misión de transporte médico en el segundo caso.	92
4.5. MTOM de menor a mayor para la misión de transporte médico.	93
4.6. Resultados obtenidos de la misión de vigilancia forestal.	95
4.7. Optimización de la masa de hidrógeno para la misión de vigilancia forestal.	97
4.8. Segundos resultados para la misión de vigilancia forestal.	97
4.9. Optimización de la masa de hidrógeno para la misión de vigilancia forestal en el segundo caso.	98
4.10. MTOM ordenados para la misión de vigilancia forestal.	99
4.11. Resultados obtenidos de la misión de vigilancia marítima.	101
4.12. Optimización de la masa de hidrógeno para la misión de vigilancia marítima.	102
4.13. Segundos resultados para la misión de vigilancia marítima.	103
4.14. Optimización de la masa de hidrógeno para la misión de vigilancia marítima en el segundo caso.	104
4.15. MTOM ordenados para la misión de vigilancia marítima.	105
7.1. Tiempo invertido en el proyecto.	115
7.2. Costes de equipamiento y licencias.	116
7.3. Costes energéticos.	116
7.4. Costes laborales.	117
7.5. Presupuesto final.	117

LISTADO DE ACRÓNIMOS

AFC Alkaline Fuel Cell

BOE Boletín Oficial del Estado

BOP Balance Of Plant

DC Direct Current

DMFC Direct Methanol Fuel Cell

FCS Fuel Cell System

GOLIAT Ground Operations of Liquid Hydrogen Aircraft

INTA Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial

IVA Impuesto de Valor Añadido

MCFC Molten Carbonate Fuel Cell

MOF Compuestos de coordinación microporosos

MTBE Éter metil tert-butílico

MTOM Maximum Take Off Mass

NASA Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio

PAFC Phosphoric Acid Fuel Cell

PEMFC Proton Exchange Membrane Fuel Cell

PTFE Politetrafluoroetileno

SOFC Solid Oxide Fuel Cell

SPFC Solid Polymer Fuel Cell

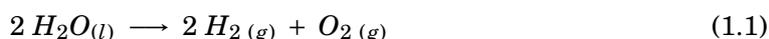
UAV Unnamed Aerial Vehicle

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Muchas voces consideran que el hidrógeno todavía se trata de una alternativa a los combustibles fósiles tradicionales que no está muy desarrollada, a pesar de que se conocen estudios en los que se confirma que las pilas de combustible fueron descubiertas ya en el siglo XIX. Sin embargo, cabe destacar que las primeras investigaciones y desarrollos no comenzaron en esencia hasta la entrada del siglo XX.

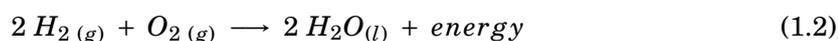
En el año 1800, dos científicos ingleses, *William Nicholson* y *Anthony Carlisle* descubrieron la electrólisis, un modo de poder emplear electricidad a partir de la descomposición del agua en oxígeno e hidrógeno de acuerdo con la siguiente expresión [1]:



Michael Faraday, en el año 1832, a través de una serie de experimentos, redactó las dos leyes fundamentales de la electrólisis, las cuales son:

1. La masa de una sustancia producida en un electrodo durante la propia electrólisis es proporcional a la cantidad de electricidad transferida en ese electrodo.
2. El número de Faraday de una carga eléctrica necesarios para descargar un mol de una sustancia en un electrodo es equivalente a la cantidad de cargas elementales en exceso existentes en ese ion.

Apenas habían pasado siete años (1839), cuando *William R. Grove*, avanzó en la dirección opuesta y rompió con todo lo descifrado hasta la fecha. Cogiendo dos electrodos de platino y teniendo un extremo de cada uno bañados en ácido sulfúrico y el otro borde de cada uno de ellos sellados por separado en sus respectivos recipientes con oxígeno e hidrógeno dentro, *William Grove* descubrió que existía un flujo constante entre los electrodos. Además, gracias al agua contenida en los depósitos, pudo observar como el nivel de ésta subía en ambos tubos de platino a medida que la corriente fluía. Entonces, combinando varios tubos de platino como los dispuestos en el experimento en un circuito en serie, *Grove* inventó lo que él mismo bautizó como la ‘batería de gas’, es decir, la celda de combustible [2]. Por ello, se puede considerar a *William R. Grove* como el padre de las celdas de combustible, y su máxima contribución la podemos ver en la modificación sufrida en la siguiente ecuación química:



Más adelante, en el año 1889, *Ludwig Mond* y *Carl Langer* crearon una batería propulsada con gas usando derivados del carbón y la nombraron 'Mond-gas', la cual alcanzaba los 6 amperios por pie cuadrado a 0,73 voltios, con electrodos de platino laminar y perforado. Este artefacto le fue otorgado el nombre de celda de combustible por ellos mismos. Cuatro años después, en 1893, *Friedrich Wilhelm Ostwald*, fue capaz de ampliar los conocimientos existentes en aquella época acerca del funcionamiento de las celdas de combustible ya que, a través de la realización de una serie de experimentos, determinó las conexiones entre distintos componentes en la celda de combustible: electrodos, electrolito, cationes, aniones, y agentes reductores y oxidantes. Esto resultó ser un gran logro, debido a que *William R. Grove* había descubierto que existía un punto en el que electrodos, gas y electrolito conectaban entre sí, pero sin llegar a descifrar por qué ocurría este fenómeno. En cambio, *Ostwald*, fue capaz de resolver el puzzle que en su día fue comenzado pero que no había sido finalizado. Además, con su labor de investigación sobre la química de las celdas de combustible, se pudo disponer de importantes avances que fueron usados por investigadores en los siguientes años [3].

Francis Thomas Bacon (1904-1992), fue quien desarrolló la primera celda de combustible de hidrógeno-oxígeno práctica, la cual convertía aire y combustible directamente en electricidad por medio de procesos electroquímicos. En 1939, construyó una celda que usaba electrodos de níquel y era capaz de operar a 206,84 bares. A lo largo de la Segunda Guerra Mundial, *Francis Bacon* trabajó en la adaptación de la celda de combustible para poder emplearse en los submarinos de la Armada Británica. A pesar de los costes, gracias a la fiabilidad y veracidad de sus pilas de combustible consiguió captar la atención de la compañía Pratt & Whitney, con la que trabajó para la construcción de las celdas de combustible de la nave espacial Apollo [4].

Gracias a todos estos avances efectuados a lo largo del siglo pasado, es factible considerar al hidrógeno como una alternativa a los combustibles fósiles tradicionales y a la electrificación, pudiendo explicar el contexto actual adecuadamente, observando cómo se encuentra esta tecnología en el presente y sus hojas de ruta para poder convertirse en una alternativa real.

1.1. Contexto actual

El hidrógeno se está ganando una gran reputación como alternativa a los combustibles fósiles tradicionales y también a su gran rival en la lucha para conseguir energía limpias, renovables y viables, la electrificación mediante baterías, debido a que se trata de una variante limpia que no genera emisiones contaminantes, siendo totalmente neutral climáticamente hablando.

Para contextualizar al hidrógeno de la manera más adecuada posible, se requiere explicar la actualidad de esta tecnología desde tres puntos de vista diferentes: Socialmente, políticamente y tecnológicamente. En cuanto a la sociedad, el hidrógeno se considera como una alternativa lejana a la realidad y lejana a ser una gran alternativa.

En el contexto político, la Unión Europea ha desarrollado programas como el *Pacto Verde Europeo*, que incluye en su previsión de desarrollo la aprobación de varias estrategias y mecanismos de financiación para la promoción y el desarrollo de la cadena de valor del hidrógeno renovable [5]. Tal es así, que dentro de este pacto se encuentra la *Estrategia Eu-*

ropea del Hidrógeno, donde se tiene como objetivo conseguir un hidrógeno limpio y eficiente que sea capaz de reducir en gran medida las emisiones contaminantes producidas por la Unión Europea. Para lograr dicho objetivo, se requiere hacer frente a una serie de problemas y necesidades, como son la normativa, el desarrollo de la propia tecnología, acuerdos con otros países interesados, la infraestructura, el mercado y las inversiones necesarias para garantizar su viabilidad [5].

Para lograr que el hidrógeno se convierta en un vector energético de especial relevancia, la Unión Europea ha dividido su desarrollo en tres fases:

- *2020-2024*: Capacidad de producción de hasta 1 millón de toneladas de hidrógeno verde dentro de la Unión Europea, así como conseguir llevar a cabo la construcción de hasta 6 GW de electrolizadores.
- *2025-2030*: Aumento de producción de hidrógeno verde hasta las 10 millones de toneladas, además de implementar 40 GW de electrolizadores en los países europeos.
- *2030-2050*: Capacidad de que el hidrógeno se establezca para su comercialización a gran escala y conseguir la descarbonización de todos aquellos sectores que por costes o tecnología requieran del hidrógeno para conseguir reducir las emisiones contaminantes.

Por otro lado, en cuanto al contexto tecnológico actual, se trata de una alternativa a los combustibles fósiles tradicionales en continuo desarrollo, que ha logrado importantes avances en las últimas décadas, en especial para ciertos propósitos como la producción de electricidad o la mejora de las emisiones en industrias de elevada contaminación. En lo que respecta al sector aeronáutico, actualmente no existe ninguna aeronave comercial que funcione mediante hidrógeno como combustible principal, a pesar de que se están realizando estudios para la aplicación del hidrógeno mediante pilas de combustible para propulsar aeronaves. Un ejemplo al respecto es el proyecto GOLIAT de Airbus [6], con el objetivo de demostrar la capacidad del hidrógeno líquido para llevar a cabo operaciones de aviación y repostaje eficientemente.

Por último, para conseguir obtener una perspectiva adecuada del contexto en el que se enmarca el hidrógeno, cabe destacar algunos retos presentes actualmente y de futuro:

- El reto principal para lograr que el hidrógeno se convierta en una alternativa viable es garantizar su seguridad en funcionamiento, especialmente cuando se encuentra en estado gaseoso.
- Otro reto relevante, ya mencionado anteriormente, es la expansión del mismo para producirse a gran escala y poder trasladarlo a todos los sectores que requieran de dicha tecnología.

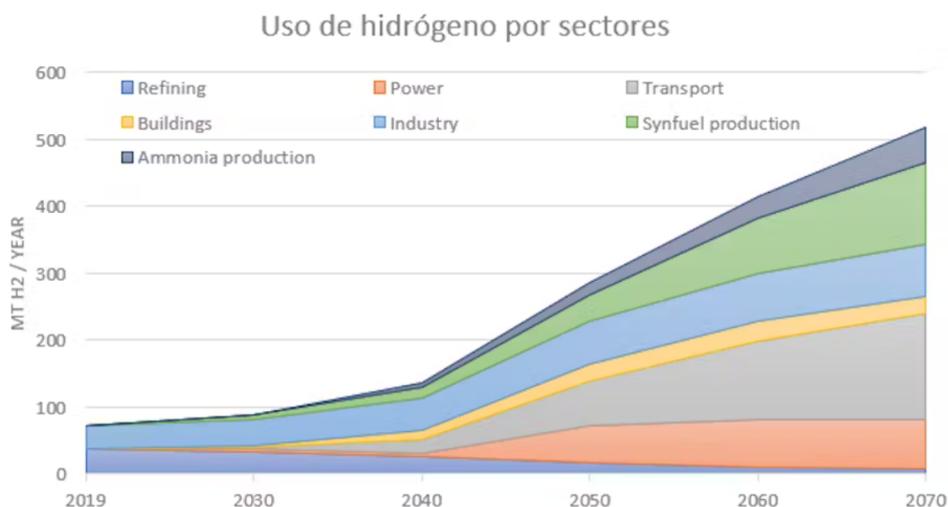


Figura 1.1: Previsiones de empleo de hidrógeno en las próximas décadas [7]

- En cuanto a las pilas de combustible, uno de los principales retos es conseguir eficiencias relevantes, además de consumos de hidrógeno reducidos, para poder garantizar que el sector del transporte (automoción, aviación, etc) considere como alternativa a esta tecnología.

1.2. Justificación del trabajo

Una vez explicado convenientemente el contexto actual en el que se posiciona el hidrógeno, surge una cuestión relevante: ¿En qué posición se puede enmarcar el estudio de optimización que se va a exponer a continuación?

Para aclarar a esta pregunta, gran parte de las respuestas se pueden obtener posteriormente en el estudio (ver Capítulos 3 y 4), si bien se puede considerar que este estudio se ha realizado teniendo en cuenta las grandes posibilidades de introducción de esta tecnología para sectores como son la vigilancia marítima y forestal y el transporte médico, ya que mediante el empleo de drones que funcionen con hidrógeno verde se pueden llevar a cabo estas tareas sin necesidad del empleo de otros vehículos contaminantes o de mucho menor alcance. Tal es así, que mediante el estudio de optimización realizado se procederá a comprobar la viabilidad de dicha alternativa, para poder confirmar de que el hidrógeno en estos sectores se puede consolidar como una variable capaz de llevar a cabo dichas misiones.

1.3. Objetivos

Una vez se ha justificado la relevancia del estudio a realizar, es de relevancia presentar el que será el objetivo principal del trabajo: Identificar el sistema propulsivo óptimo basado en la pila de combustible de hidrógeno para un dron de ala fija y diferentes misiones tipo. A partir de este objetivo, se establecen una serie de objetivos secundarios para conseguir cumplir dicho objetivo principal:

- Generar un sistema de propulsión lo más eficiente posible para conseguir la viabilidad de esta tecnología.
- Realizar una comparativa entre varias misiones diferentes para comprobar que se trata de un sistema propulsor viable en este tipo de trabajos.
- Determinar el consumo y la masa de hidrógeno necesaria para llevar a cabo cada una de las misiones planteadas en función de la capacidad de la batería y la potencia de la pila de combustible.

1.4. Estructura del documento

Por último pero no menos importante, en este apartado se persigue la explicación de cada uno de los apartados que se sucederán a continuación, para luego poder desarrollar adecuadamente cada uno de ellos:

- *2 Fundamentos teóricos:* Este capítulo trata de llevar a cabo una explicación adecuada y detallada de la base teórica necesaria para la posterior realización del estudio de la manera más fundamentada posible. En él, primero se explicará el hidrógeno como vector energético, para luego continuar con los principios básicos de las pilas de combustible y las diferentes tecnologías existentes en la actualidad. Todo ello para terminar con un pequeño apartado relacionado con la realización de una comparativa adecuada entre las diferentes tecnologías expuestas previamente.
- *2.1 El hidrógeno:* En este apartado se explicará qué es el hidrógeno, introduciendo este elemento en materia para luego poder explicar adecuadamente los apartados posteriores.
- *2.2 El hidrógeno como impulsor energético:* Tras haber expuesto correctamente el hidrógeno en sí, en el presente apartado se tratará de explicar sus métodos de obtención y las maneras de almacenamiento existentes actualmente. Esto se realiza con el propósito de conocer más adecuadamente la tecnología existente, para luego poder analizar correctamente los resultados obtenidos del estudio de optimización del dron.
- *2.3 Principios básicos de la pila de combustible:* Expuesto adecuadamente el hidrógeno como impulsor energético, en el presente apartado se persigue conocer las bases del funcionamiento de las pilas de combustible, además de qué partes se componen y el balance de planta al respecto de esta tecnología.
- *2.4 Tecnologías de pila de combustible:* Tras describir qué es esta tecnología y su funcionamiento, en este apartado se persigue explicar y analizar cada uno de los diferentes tipos de pila de combustible aplicables a la industria existentes en la actualidad.
- *2.5 Comparación entre las distintas tecnologías de pilas de combustible estudiadas:* Tras explicar los diferentes tipos de pilas de combustible existentes, para finalizar los fundamentos teóricos se realiza una breve comparación entre todas las tecnologías, para así poder observar sus ventajas e inconvenientes, su aplicabilidad en la industria, etc.
- *3 Metodología:* Este capítulo se puede considerar como el más importante del estudio, ya que en él tendrá lugar la explicación detallada del estudio realizado, paso por paso y con las elecciones efectuadas en materia de la tecnología aplicada. Además, se

expondrán las diferentes misiones propuestas, definiéndolas y detallando todas sus características relevantes.

- *3.1 Introducción al estudio:* En este pequeño apartado previo se explicará el estudio en sí, para posteriormente poder continuar adecuadamente con el mismo.
- *3.2 Diagrama de flujo:* Terminados los fundamentos teóricos, en el siguiente capítulo se explica la metodología del estudio de optimización, empezando por un diagrama de flujo. En él se explicará cómo se ha hecho exactamente el estudio paso por paso, con el objetivo fundamental de facilitar el seguimiento del estudio desde este preciso instante.
- *3.3 Pila de combustible elegida:* En el apartado 2.4 se explicaron todas las tecnologías de pila de combustible existentes en la actualidad. Esto se realiza así ya que se persigue que este apartado se pueda responder la pila de combustible elegida para el estudio, considerando sus ventajas que hacen que sea la pila óptima para ello.
- *3.4 Modelo de pila de combustible empleado:* En este apartado se introduce el modelo de la pila de combustible en el simulador, necesario para el correcto funcionamiento del estudio de optimización posterior.
- *3.5 Modelo de la aeronave:* En este apartado se define la aeronave que se va a utilizar en el estudio, además de realizar una breve descripción de su modelo aerodinámico.
- *3.6 Misiones a realizar:* En este apartado se presentan las tres misiones propuestas para el estudio de optimización, explicando cómo son y los requerimientos de cada una de ellas.
- *4.1 Análisis individual de las misiones propuestas:* Tras haber explicado los fundamentos teóricos del estudio y la metodología llevada a cabo, en este apartado se exponen los resultados obtenidos para cada una de las misiones de forma individual.
- *4.2 Comparativa y aplicabilidad a la industria:* Una vez se conocen los principales resultados de las tres misiones efectuadas y analizados correctamente, en este apartado se trata de comparar las misiones y observar su aplicabilidad en la industria, de forma que se pueda disponer la viabilidad de aplicación y ver cuáles serían las misiones propicias a la introducción de esta tecnología.
- *5 Conclusiones:* Una vez se ha finalizado el análisis de los resultados obtenidos del estudio de optimización del dron para las tres misiones propuestas, con su debida comparación y las posibilidades de aplicación en la industria, en este apartado se exponen las conclusiones obtenidas al respecto, respondiendo a los objetivos expuestos en el Apartado 1.3.
- *6 Estudios futuros:* Para finalizar adecuadamente el estudio, se exponen las posibilidades existentes a raíz del estudio realizado, destacando cómo se podría llevar a cabo y las herramientas necesarias para ello.

Capítulo 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. El hidrógeno

Como bien es sabido, el hidrógeno es el elemento más común y abundante en el universo (en la Tierra, el agua que consumimos está formada por una serie de elementos, donde hay alrededor de un 11% de hidrógeno. En cambio, en el universo entero, hay en torno a un 75% de hidrógeno [8]). Por lo general, este elemento destaca porque no es tóxico, pero sí inodoro, incoloro, inflamable y ligero. A pesar de todo, su ligereza le impide permanecer en nuestra atmósfera por sí sólo, pero sí que lo podemos encontrar en compuestos orgánicos o, como ya se comentó anteriormente, en el agua, donde reacciona con el oxígeno para así poder conformar uno de los compuestos más importantes de nuestro planeta. Además, gracias a esta reacción también se desprende energía.

Si se compara al hidrógeno con otros combustibles fósiles, se puede observar que la energía desprendida es mucho menor, pero a su vez se producen menores cantidades de combustible a partir de hidrógeno que con combustibles fósiles tradicionales, llegando a establecer que 1 kilogramo de hidrógeno equivale a 2,78 kilogramos de gasolina, 2,8 kilogramos de gasoil y 3 kilogramos de gas natural [9]. En cambio, sabemos que el hidrógeno es complicado de encontrar en la naturaleza y su formación puede resultar mucho más cara que la de combustibles fósiles como los citados anteriormente.

Para producir hidrógeno, el proceso más común es la electrólisis, pero existen otros métodos como pueden ser el reformado de vapor, la utilización de biomasa, la fotólisis (usando como energía la radiación solar), etc. Todos ellos serán explicados con posterioridad para su mejor comprensión. A pesar de que en el mundo se están produciendo alrededor de 50 millones de toneladas de hidrógeno, muy poco porcentaje se aprovecha para la generación de energía. De hecho, la mayoría de su producción se utiliza para la producción de amoníaco para fertilizantes, o en grandes refinerías, plantas de metanol y de otros tipos de compuestos químicos, etc.

Uno de los grandes problemas relacionados con el hidrógeno actualmente consiste en su almacenamiento. Existen muchas formas de almacenar el hidrógeno (explicadas más adelante), pero todas son muy complicadas y son necesarias mejoras relevantes en este aspecto, sobre todo en cuanto a la eficiencia. De igual manera, el transporte del hidrógeno se realiza convencionalmente mediante tuberías, camiones o barcos, todos ellos utilizando métodos de almacenamiento que no son muy eficientes con el hidrógeno.

2.2. El hidrógeno como vector energético

Supuestamente, cualquier sustancia capaz de ser suministrada continuamente como si se tratase de un fluido y que pueda ser oxidada químicamente, puede ser quemada de forma galvánica como combustible de las pilas de combustible en el ánodo. Además, si la sustancia puede ir a una velocidad adecuada en el cátodo, cumpliría con los requisitos necesarios [10]. Por ello, actualmente se utiliza el hidrógeno como combustibles de las pilas, ya que es altamente inflamable y se puede obtener de una forma más o menos sencilla a partir de la electrólisis o métodos similares.

Ahora bien, el hidrógeno es un elemento que tiene una gran capacidad para formar compuestos, y generalmente se encuentra como molécula doble. Otro detalle del hidrógeno es que no lo podemos encontrar libremente expuesto en la naturaleza. Por ello, no lo podemos considerar como un combustible, es un vector energético, ya que es un producto que ha sido previamente extraído de algún otro compuesto y que puede almacenar energía y liberarla de forma controlada (del mismo modo, también podemos considerar como impulsores energéticos al agua o el calor).

Entonces, para poder analizar el hidrógeno como vector energético, se requiere observar los métodos de obtención del mismo, además de su almacenamiento y los distintos métodos para ello.

MÉTODOS DE OBTENCIÓN DEL HIDRÓGENO

A partir de combustibles fósiles:

Actualmente, estos tipos de obtención del hidrógeno son los más económicos y utilizados en la industria, debido a que se realizan a partir de materias cuyas extracciones han sido muy perfeccionadas desde el siglo pasado, lo que ha permitido un ahorro de costes considerable.

Para obtener hidrógeno empleando el carbón, se pone en contacto a éste con vapor de agua a temperaturas que rondan los 1000°C. Este contacto da como lugar monóxido de carbono e hidrógeno, como se indica en la siguiente reacción química [11]:



Otra forma de obtener hidrógeno a partir de combustibles fósiles es utilizando gas natural en la reacción, ya que está compuesto mayoritariamente por metano (entre un 80 y un 90%). Esto se realiza a través de un proceso como el que se muestra en la figura 2.1:

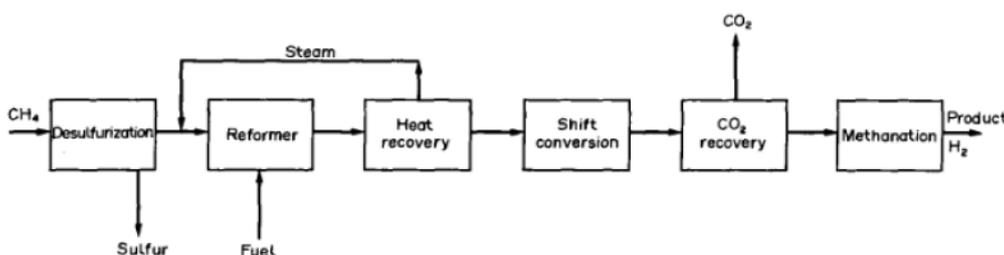


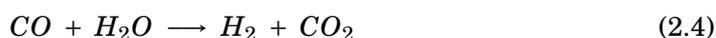
Figura 2.1: Reformado del hidrógeno Fuente: [12]

En esencia, es un reformado de vapor de metano, donde primero se realiza una extracción del sulfuro de hidrógeno que pueda contener el gas natural, para así poder evitar que se formen compuestos de azufre en la pila de combustible empleada con el hidrógeno obtenido. Para ello, normalmente se emplea el óxido de zinc:

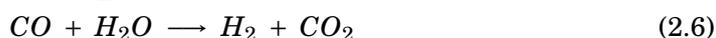
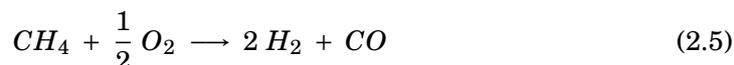


Una vez hemos eliminado los restos de azufre que puedan ser perjudiciales, ahora se puede hacer el reformado con diferentes sustancias para separar el hidrógeno:

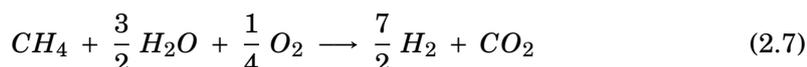
- *Reformado con agua:* Básicamente, con el metano, se hace una reacción endotérmica a unos 760-925°C, consiguiendo eficiencias superiores al 80%. Luego, también podemos obtener hidrógeno usando catalizadores de cobre o zinc, reaccionando con el monóxido de carbono (CO) de la primera reacción química [13]:



- *Oxidación parcial:* Reacción exotérmica donde se produce una combustión incompleta del metano, a temperaturas elevadas de entre 1300-1500°C [14] (como se puede observar, al igual que en el caso anterior, se puede aprovechar el monóxido de carbono producido en la reacción para seguir obteniendo hidrógeno con otra reacción posterior):



- *Reformado autotérmico:* Con él se consigue optimizar la energía utilizada y se puede mejorar la cantidad de hidrógeno producido, consiguiendo una eficiencia térmica de entre el 60 y el 75% [14]; todo ello a través de una reacción química como la siguiente:



- *Reformado con dióxido de carbono:* Igual que con agua, se trata de una reacción endotérmica a alta temperatura, pero con la cual se consume dióxido de carbono:



- *Descomposición del metano:* Aquí, a través de un condensador regenerativo que elimina las impurezas del oxígeno, el metano es descompuesto directamente en carbono (el cual se puede aprovechar para la fabricación de fibras de carbono) e hidrógeno. Para ello, se requieren altas temperaturas (alrededor de 500°C [15]):



A pesar de todo, la obtención del hidrógeno mediante combustibles fósiles no es ni renovable ni limpia, ya que se está emitiendo dióxido de carbono a la atmósfera; si bien es cierto recalcar que el reformado con metano es uno de los procesos más eficientes y con menor emisión de gases contaminantes para obtener electricidad, siendo una forma de conseguir hidrógeno más limpia que directamente a través de combustibles fósiles como el carbón o el gas natural.

A partir de biomasa:

La biomasa es el conjunto de materia orgánica viva o muerta del entorno y que, sin poder considerarse un combustible fósil debido a su permanencia fuera del ciclo natural del carbono por mucho tiempo, el ser humano ha utilizado desde tiempos prehistóricos.

Actualmente, esta forma de energía representa el 90% del total del consumo de biomasa en los países en vías de desarrollo, sobremanera por su facilidad de obtención y abundancia en estos territorios. Además, una gran ventaja respecto a los combustibles fósiles es que el dióxido de carbono emitido durante la producción de energía a partir de biomasa no representa ningún aporte de este gas a la atmósfera, ya que ese CO_2 ya fue consumido por la vegetación en su proceso de la fotosíntesis en otro momento anterior.

Para la obtención de hidrógeno, la biomasa puede resultar ser una gran fuente. Esto se puede conseguir a través de métodos directos como la gasificación, o a partir de biocombustibles. La gasificación es el procedimiento mayormente empleado, pero la cantidad de hidrógeno producida es baja. Por otro lado, mediante biocombustibles se puede conseguir una mayor cantidad de hidrógeno, pero es necesario un procesado previo de la biomasa para su obtención [16].

- *Gasificación de biomasa:* Existen dos métodos muy empleados: la gasificación directa y la pirólisis. Este último consiste en calentar la biomasa muy rápidamente en ausencia de oxígeno hasta temperaturas de entre 400 y 600°C. Por otro lado, en la gasificación la biomasa es calentada junto con aire y vapor de agua. En ambos procesos, se obtendrá hidrógeno, metano, monóxido y dióxido de carbono, y una pequeña porción de alquitrán, brea o carbón de forma líquida-sólida. Además, la biomasa se puede utilizar como fuente de biocombustibles. Todo lo dicho anteriormente se puede observar con mejor perspectiva en la figura 2.2:

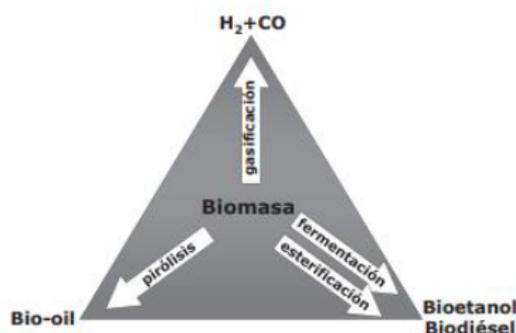
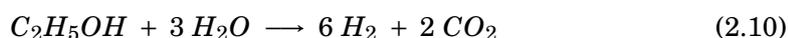


Figura 2.2: Gasificación de la biomasa y sus productos obtenidos *Fuente: [16]*

- *Reformado de bioetanol:* Este elemento es una mezcla de etanol y agua que se pueda reformar calentándolo en presencia de un catalizador, consiguiendo producir una corriente rica en hidrógeno. Para verlo mejor, obtenemos su reacción química:



A pesar de que se pueda considerar al bioetanol como un procedimiento muy eficiente a la hora de obtener hidrógeno, este compuesto debe conseguirse previamente mediante una fermentación de azúcares obtenidos de las propias cañas de azúcar, perjudicando al proceso en su conjunto ya que, un aumento de la demanda del azúcar

puede provocar una subida general en los precios del mismo, ya que se estarán destinando tierras de cultivos tradicionales en los países en vías de desarrollo a procesos energéticos.

A partir de la electrólisis del agua:

En este caso, lo que sucede es un proceso inverso al de una pila de combustible, en las cuales el objetivo es producir electricidad. Ahora, para la electrólisis, gracias a la electricidad como fuente, lo que se pretende es dividir las moléculas de agua para obtener oxígeno e hidrógeno por separado. Ahora bien, este proceso resulta caro, ya que necesitamos la electricidad para su funcionamiento, aunque se puede mejorar si ésta proviene de fuentes de energía renovables, las cuales tienen un problema fundamental: no son constantes, por lo que su energía no se puede aprovechar de forma continua como sí que sucede con la energía obtenida mediante combustibles fósiles. A pesar de este problema, si se consiguiese emplear la energía en los momentos en los que la demanda de electricidad sea baja, se conseguiría una gran reducción del coste de obtención de hidrógeno mediante la electrólisis.

Para la electrólisis no se emplea agua pura, sino que se le añaden bases, como pueden ser el hidróxido de sodio (NaOH), o el hidróxido de potasio (KOH), consiguiendo un aumento del pH del agua y, a mayores, creando un medio alcalino. Para ello, se emplea un dispositivo conocido como electrolizador alcalino, el cual trabaja a potenciales del orden de 1,8-2,2 V, temperaturas de 80°C, con densidades de corriente de aproximadamente $0,4 \text{ A} \cdot \text{cm}^2$. De esta manera se consigue obtener un litro de hidrógeno consumiendo 0,3 kWh de electricidad, todo ello con eficiencias del orden del 60-80% [15].

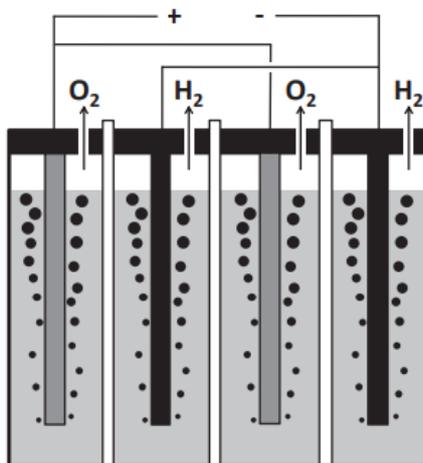


Figura 2.3: Electrólisis para la obtención del hidrógeno *Fuente: [16]*

Además de los electrolizadores alcalinos, hay otros tipos de ellos que se pueden emplear en la obtención del hidrógeno. Un modelo son los electrolizadores con membranas de intercambio de protones [16]. En este caso, se puede conseguir hidrógeno con una pureza del 99,9999%, con mayores eficiencias que con los electrolizadores alcalinos (entre un 80 y un 90%). Por otro lado, también están los electrolizadores que utilizan el vapor de agua a 700-1000°C para efectuar la electrólisis, reduciendo el coste, ya que el empleo de energía térmica es mucho más barato que el de energía eléctrica (reduciendo el coste de obtención del hidrógeno a partir de la electrólisis entre un 30 y un 40%) [16].

Entonces, se puede observar que, si se emplean fuentes de energía renovables para la obtención del hidrógeno usando la electricidad como medio para realizar la electrólisis, el proceso podrá ser limpio y renovable, cosa que no sucederá si la fuente proviene de combustibles fósiles tradicionales.

A partir de la radiación solar:

Este método no está muy extendido, y está basado en la producción de hidrógeno exponiendo el agua a la radiación del Sol. Para su funcionamiento, se requiere del uso de fotocatalizadores de óxido de tungsteno (WO_3) o de óxido de titanio (TiO_2), donde, al incidir un fotón sobre estos, se produce una reacción de oxidación que rompe la molécula de agua y origina electrones, todo ello debido a su comportamiento como semiconductor.

Esta tecnología tiene un gran margen de mejora, debido a que actualmente se dedica a aprovecharse de las zonas ultravioletas del espectro de luz, que sólo representan un 4% de la luz solar, provocando que este método no resulte muy eficiente; pero si se consiguiesen desarrollar fotocatalizadores capaces de absorber el espectro visible de luz, el cual representa el 50%, se convertiría rápidamente en un procedimiento de obtención de hidrógeno a tener en cuenta porque, además de esto, es un método que no implica la utilización de fuentes de energía convencionales, sino que se aprovecharía del Sol, fuente inagotable de energía en este planeta, y ello implicaría que el empleo de fotocatalizadores sea un método limpio y renovable [17].

A partir de la energía solar térmica:

A pesar de que la fuente de energía es la misma que para el procedimiento anterior, en este caso, para producir hidrógeno, lo que se hace es romper la molécula del agua por efecto del calor, mediante la termólisis (en este caso ya no se utiliza la energía solar en sí, si no el calor que produce la misma). Mediante estudios previos en los que se determinó que era necesario romper los enlaces del agua a temperaturas del orden de 2700°C [18], se observó que estas temperaturas tan altas sólo se pueden soportar mediante el empleo de hornos solares con materiales que sean altamente refractarios, como el óxido de circonio o el grafito.

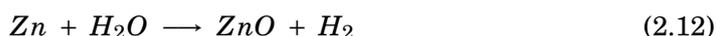
En este método, el horno solar o concentrador se encarga de absorber toda la radiación solar sobre una gran superficie, para después concentrarla en un volumen mucho más pequeño utilizando procedimientos ópticos especiales para ello. Luego, para que no se puedan formar combinaciones altamente explosivas, se debe separar el hidrógeno del oxígeno a la salida del concentrador con la mayor brevedad posible, empleando para ello una serie de membranas metálicas dispuestas a la salida del horno solar.

A pesar de que es un método totalmente limpio y renovable, actualmente no existe la tecnología necesaria para soportar temperaturas tan altas y poder concentrarlas en un mismo punto, ya que es un procedimiento que requiere de una gran seguridad para poder ser efectuado, debido a su alta peligrosidad en el momento de separación del hidrógeno con el oxígeno, como se comentó con anterioridad.

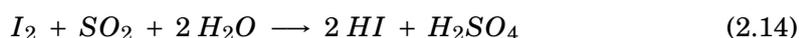
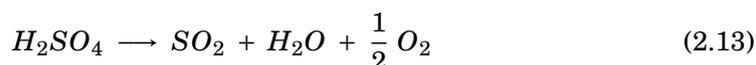
A partir de ciclos termoquímicos (energía nuclear):

Tanto en centrales nucleares como en las termosolares y termoeléctricas (las cuales pueden llegar a funcionar a temperaturas de 1000°C), hay una parte de la energía de estas que se puede aprovechar para la obtención de hidrógeno, ya que estas grandes cantidades de calor se pueden emplear para realizar ciclos termoquímicos que originen reacciones químicas, consiguiendo separar el hidrógeno del oxígeno a temperaturas mucho más bajas que mediante la termólisis del agua. Algunos de los ciclos en fase de investigación son los siguientes:

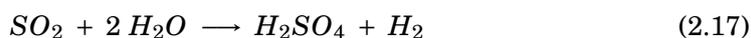
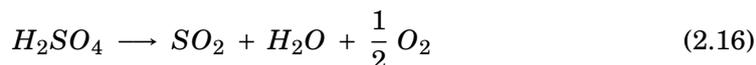
- *Reacciones enlazadas*, reduciendo mediante el calor residual de las centrales un óxido inorgánico, para luego regenerarlo mediante la oxidación con agua y, de esta forma, obtener hidrógeno. En estas dos reacciones, la primera tiene lugar a una temperatura de alrededor de 2000°C, mientras que la segunda reacción sucede a unos 425°C. Aquí, la ventaja fundamental es que el hidrógeno y el oxígeno no se forman en una misma reacción, por lo que no existen problemas para la separación como sí que había en la termólisis. Estas dos reacciones enlazadas se pueden realizar con distintos elementos, como podría ser el zinc:



- *Ciclo azufre-yodo*: En él se realizan tres reacciones enlazadas, con comportamientos distintos entre ellas. La primera es una reacción endotérmica que ocurre a una temperatura de 850°C. Luego, hay una reacción exotérmica a 120°C donde se regenera el ácido sulfúrico y se forma yoduro de hidrógeno en presencia de agua. La tercera reacción es la regeneración del yodo a partir de la descomposición del yoduro de hidrógeno formado con anterioridad a unos 450°C, obteniendo el hidrógeno que se buscaba (en este ciclo se obtienen rendimientos superiores, del orden del 57%) [16]:

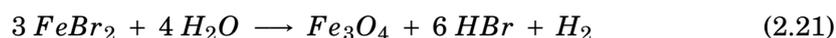
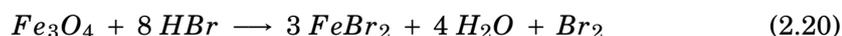
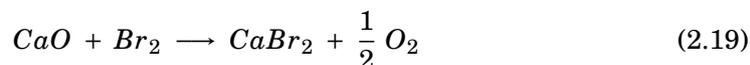
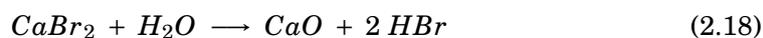


- *Ciclo híbrido de Westinghouse*: Es una variante del anterior, que consiste en sustituir la segunda y tercera reacción por una sola entre el óxido de azufre y el agua, regenerando ácido sulfúrico. Este proceso surgió al observar que en la última etapa del ciclo azufre-yodo se observó una complicación a la hora de evitar la formación de SO₃, teniendo que aumentar la temperatura de la reacción hasta los 1100°C:

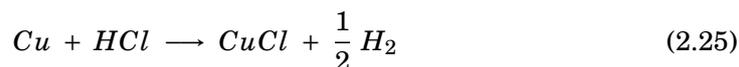
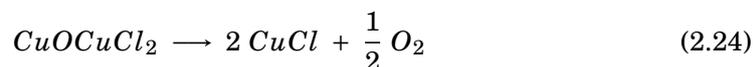
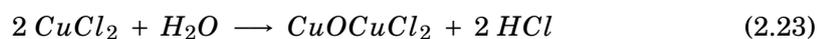


- *Ciclo UT-3*: Desarrollado en la Universidad de Tokio, consta de cuatro reacciones enlazadas. En la primera, que se realiza a unos 760°C, el bromuro de calcio pasa a ser óxido de calcio y bromuro de hidrógeno mediante el empleo de agua. En la segunda reacción, se oxida el óxido de calcio con bromo para poder regenerar el bromuro de calcio (a unos 572°C). Luego, en la tercera fase, se reacciona el bromuro de hidrógeno

con óxido de hierro a 220°C. regenerando el bromo. Por último, el bromuro de hierro reacciona con el agua para liberar hidrógeno (a una temperatura de alrededor de 560°C). Este ciclo tiene un rendimiento aproximado de entre el 49 y el 53% [19]:



- *Ciclo cobre-cloro:* En este caso, el ciclo también tiene cuatro reacciones, a temperaturas de 100, 300, 450 y 425°C. Este método destaca por poder ser aprovechado para la obtención de hidrógeno en centrales nucleares cuyo funcionamiento sea a baja temperatura (con un rendimiento global entorno al 49%) [20]:



Otros métodos:

Existen muchos otros procedimientos alternativos a los expuestos anteriormente, aunque en su mayoría se encuentran en fase de investigación y experimentación, ya que tienen rendimientos muy bajos. Por ejemplo, existen métodos mediante bacterias que pueden llegar a ser muy interesantes, destacando el de la fermentación sin luz con substratos ricos en azúcares por medio de algas y bacterias anaerobias, las cuales se pueden fermentar y conseguir hidrógeno para su posterior utilización en pilas de combustible:



Aunque tienen costes muy bajos, estos procedimientos tienen rendimientos muy bajos (del orden del 7% [16]). Además de estos métodos, existen otros como son la plasmólisis del agua (separación de las moléculas de agua empleando descargas eléctricas, consiguiendo obtener hidrógeno al separarlo del oxígeno), la radiólisis (se trata de una descomposición del agua empleando la radioactividad), o la utilización de insectos. A pesar de ello, de momento son métodos con rendimientos muy bajos, pero como su coste es muy bajo con relación a otras tecnologías, en el futuro pueden llegar ser procedimientos muy interesantes para la obtención del hidrógeno de manera limpia y renovable, evitando con ello el empleo de los combustibles fósiles tradicionales (gas natural, carbón, etc).

Comparativa entre tecnologías

Como hemos ido comentando en los distintos apartados de esta sección, existen distintos métodos para la obtención del hidrógeno, algunos de los cuales son limpios y renovables, otros tienen bajo coste, algunos emplean combustibles tradicionales. Para poder compararlos, vamos a emplear la figura 2.4:

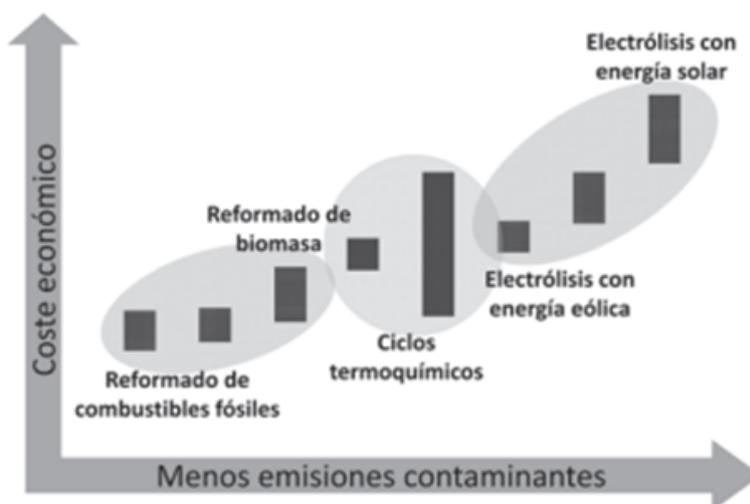


Figura 2.4: Gráfica comparativa de los diferentes métodos de obtención del hidrógeno. Fuente: [21]

En esta gráfica comparativa, se pretende realizar una exposición de los distintos tipos de procedimientos de obtención del hidrógeno teniendo en cuenta las emisiones contaminantes y el coste económico.

Como se puede observar, los métodos más económicos son los reformados de combustibles fósiles, pero a cambio son los más contaminantes. Por el otro lado, se puede constatar que la electrólisis a partir de energía solar es la opción menos contaminante, pero también es la que más costes conlleva.

Entonces, a la hora de escoger el procedimiento de obtención del hidrógeno, será necesario observar las ventajas e inconvenientes que representan cada una de las distintas opciones disponibles y, en función de los objetivos que se persigan, escoger la opción más adecuada.

Para concluir, teniendo en cuenta que el propósito de este texto es la explicación y estudio de las pilas de combustible, esto será un factor muy relevante, debido a que si estamos ante una forma de propulsión alternativa y cuyo objetivo es que sea sostenible, es lógico pensar que la obtención del hidrógeno mediante combustibles fósiles tradicionales tiene que representar sólo una ínfima parte del total, ya que si no este tipo de alternativa no significaría un gran cambio respecto a los métodos convencionales.

ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO

Uno de los grandes inconvenientes a la hora de producir hidrógeno es su almacenaje, ya que este punto, tanto en combustibles fósiles como en otros alternativos, siempre ha sido un apartado delicado. Si bien es cierto que combustibles como el gas natural o el petróleo disponen de métodos de transporte y almacenamiento muy desarrollados y eficientes, las infraestructuras para el almacenaje y transporte del hidrógeno no están muy evolucionadas. Además, para el uso de este elemento en las pilas de combustible, el almacenamiento será un punto clave y obligatorio si se quiere utilizar el hidrógeno.

En aplicaciones estacionarias, es factible que no haya una necesidad de almacenamiento imperiosa en las pilas de combustible que funcionen a temperaturas elevadas (con métodos como los explicados en la obtención del hidrógeno), pero para aplicaciones que requieran de objetos en movimiento (como automóviles o aeronaves), el almacenamiento se vuelve una necesidad imperiosa, ya sea del propio hidrógeno o de los elementos de los que se pueda obtener (como son el etanol, el metano, ...).

Entonces, para el almacenamiento de hidrógeno, existen tres métodos principales: depósitos o tanques de alta presión, el almacenaje de las sustancias de las que se obtiene el hidrógeno, o la absorción o enlace del portador adecuado. Aquí, podemos observar que los tanques a alta presión corresponden a alternativas de almacenamiento a gran escala, mientras que las otras dos opciones se emplean más para almacenar las cantidades suficientes para alimentar vehículos. De aquí surge el principal problema, que básicamente radia en la peligrosidad de almacenamiento del hidrógeno, el cual resulta bastante más peligroso que los combustibles tradicionales u otras alternativas.

Además, otro de los grandes problemas existentes es el pequeño margen de operación para mantener el hidrógeno en estado líquido, lo que representa un gran inconveniente a la hora de su almacenamiento y transporte. Esto último lo podemos observar en la figura 2.5:

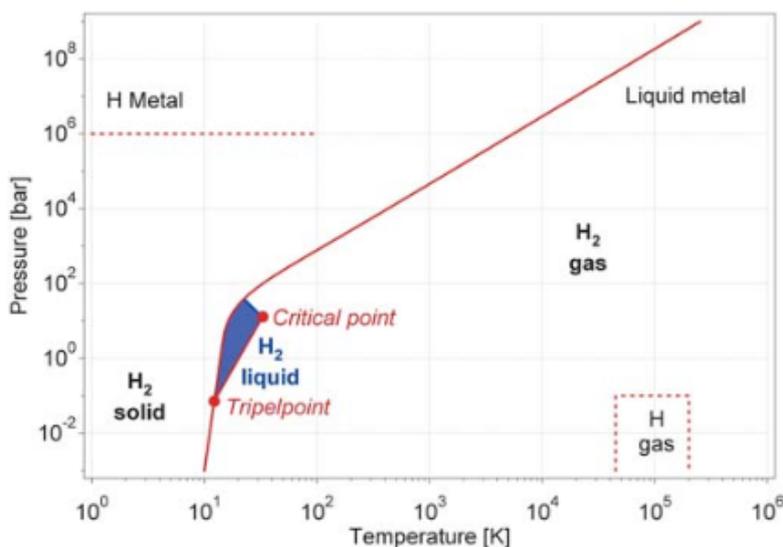


Figura 2.5: Margen de operación del hidrógeno. Fuente: [22]

Como se puede apreciar, el hidrógeno sólo existe en estado líquido entre la línea de separación entre el hidrógeno sólido y el gaseoso, el punto triple y el punto crítico. Fuera de esa región, el hidrógeno podrá estar en estado gaseoso o sólido, pero no líquido, que es como normalmente se quiere conservar en las infraestructuras de almacenamiento para su posterior utilización. A continuación, se van a exponer los principales métodos de almacenamiento del hidrógeno, explicando qué son y en qué consisten:

Compresión:

Una de las maneras más sencillas de almacenar hidrógeno es por compresión gracias a su densidad tan baja, permitiendo mayores cantidades de hidrógeno para un mismo volumen a medida que le aumentamos la presión (si el depósito tiene una presión de 200 bares, podrá almacenar 240 veces más que a presión atmosférica. Si tuviese 700 bares, hasta 490 veces superior [23]). Además, cabe destacar que tanto la compresión como la licuefacción (explicada posteriormente) son las dos formas de almacenaje más estudiadas y desarrolladas, utilizándose en la gran parte de exhibiciones y eventos de vehículos propulsados por hidrógeno.

Aunque sea una tecnología cuyo desarrollo está bastante avanzado, hay que tener en cuenta dos factores: se necesitan depósitos capaces de soportar presiones muy altas, y la energía que se emplea en la compresión del hidrógeno no se aprovecha, no se vuelve a utilizar después en la combustión o en la transformación del hidrógeno en una pila de combustible.

Actualmente, el hidrógeno se suele comprimir en depósitos de pistón con juntas de grafito. En la práctica, estos depósitos pueden llegar a ser muy pesados, a pesar de que se sabe que hace unos años se empleaban el aluminio o el acero para fabricar los depósitos (mucho más pesados todavía). En estos depósitos de pistón, para comprimir 1 kilogramo de hidrógeno hasta los 200 bares se requieren 15 MJ de energía. Con estos datos, la energía que se habría invertido para la compresión correspondería entre un 12,5-16,6% de la energía total, pudiendo llegar a porcentajes mucho más elevados (30-40%) [22].

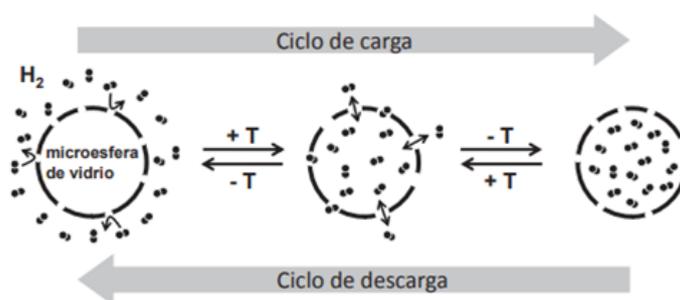


Figura 2.6: Margen de operación del hidrógeno. Fuente: [16]

Por ello, actualmente existe una tecnología alternativa e innovadora a partir de depósitos de microesferas de vidrio, las cuales son esferas huecas de 0,5 milímetros de diámetro y milésimas de milímetro de grosor. El funcionamiento básico de las microesferas es que se calientan, provocando que los poros de las paredes se expandan y dejen pasar al hidrógeno al interior para almacenarlo. Luego, las esferas se enfrían, impidiendo que el hidrógeno pueda escapar. Este método corresponde una gran ventaja en comparación con los materia-

les tradicionales, ya que supone menor peso del depósito, mayor resistencia mecánica (0,3 GPa), y resulta ser un almacenamiento mucho más seguro [24]. Para poder observar mejor el funcionamiento de la carga y descarga de las microesferas de vidrio (Figura 2.6):

Con las microesferas, se puede llegar a almacenar porcentajes en peso de hidrógeno de entre 17-21%. A pesar de sus beneficios, presenta varios inconvenientes. Uno de ellos es que la difusión del hidrógeno por los poros es lenta, y puede tardar días en completarse. Otra desventaja es la poca conducción del calor, lo que implica una lenta recuperación del hidrógeno contenido en su interior.

Licuefacción:

En la compresión, el hidrógeno es almacenado en estado gaseoso, mientras que en la licuefacción se almacena en estado líquido. El principal problema es que se requieren temperaturas muy bajas, de $-252,8^{\circ}\text{C}$, pero permitiendo almacenar hasta 860 veces más energía que si el hidrógeno se encontrase a presión atmosférica.

Para realizar la licuefacción, primero hay que comprimir el hidrógeno, luego se enfría a -71°C empleando nitrógeno líquido, y luego hay que realizar una expansión muy rápida para bajar la temperatura y conseguir licuar el hidrógeno. Debido al complejo procedimiento de licuefacción, los depósitos de almacenamiento de hidrógeno en estado líquido tienen que disponer de válvulas de alivio para evitar excesos de presión por la vaporización del hidrógeno líquido, por las cuales habrá pérdidas continuas de hidrógeno, del orden del 0,5% en depósitos grandes y de incluso el 3% diario en depósitos de menor tamaño. Es por eso por lo que el almacenamiento y especialmente la fabricación de hidrógeno por licuefacción sólo es rentable si se obtienen varias toneladas de este elemento al día.

Como se puede observar a partir de lo expuesto, la energía que se requiere para la licuefacción será mayor que para la compresión del hidrógeno, ya que, en este caso, para conseguir licuar 1 kilogramo de hidrógeno se necesitan más de 30 MJ. Esto puede llegar a provocar que hasta la mitad de la energía se pierda para licuar el hidrógeno [25].

En cuanto a los depósitos, estos están fabricados por dos capas de acero separadas por un aislante muy fino hecho a partir de hojas de aluminio y de fibra de vidrio en vacío (a unos 10-6 milibares).

Gracias a la compresión y la licuefacción y su almacenamiento, se puede transportar el hidrógeno en grandes cantidades por medios terrestres y marítimos tradicionales (camiones, barcos, tuberías, ...). Además, se puede emplear el hidrógeno líquido para la propulsión de vehículos con alternativas propulsivas sostenibles, pero siempre teniendo en cuenta la peligrosidad que conlleva el almacenamiento del hidrógeno por estos métodos. Por ello, actualmente se están investigando nuevas formas de almacenaje del hidrógeno que puedan suplir a las convencionales.

Hidruros metálicos:

Es posible que una de las formas más seguras de almacenar hidrógeno sea empleando para ello este método, el cual fue ya descubierto e investigado en 1886, cuando se observó que una lámina de paladio podía retener hidrógeno desde 245°C hasta temperatura ambiente.

Entonces, el concepto fundamental para este procedimiento de almacenaje de hidrógeno es poder confinar el metal (ya sea paladio u otro tipo distinto que sea apto para la correcta ejecución del método) dentro del tanque y, mediante una válvula, introducir el hidrógeno hasta conseguir que se forme el hidruro de metal. Este método puede llegar a niveles en los que se pueda contener más hidrógeno por unidad de volumen que licuando el hidrógeno. Por ejemplo, empleando paladio, 100 gramos de este metal ocupan unos 8 cm^3 , pero pueden almacenar a presión atmosférica hasta 7 litros de hidrógeno.

A continuación, en la figura 2.7 se adjunta una gráfica en la que se puede constatar que el aumento de presión (MPa), en función del metal utilizado, puede generar una mayor absorción de hidrógeno, pudiendo formar el hidruro necesario (como con el paladio, por ejemplo) [26]:

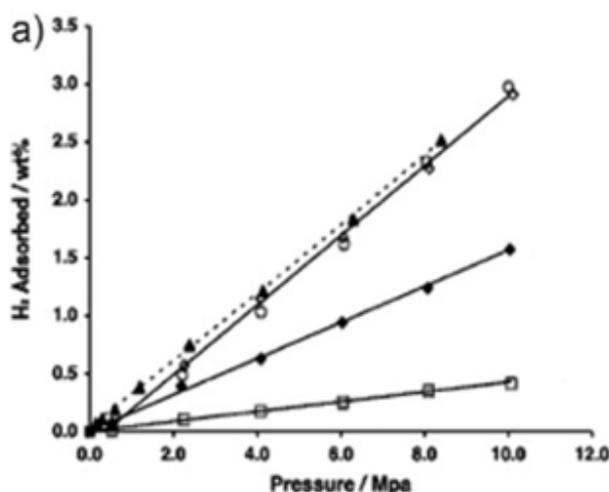


Figura 2.7: Aumento de presión en función del metal utilizado Fuente: [27]

A pesar de sus ventajas, existen una serie de problemas que en la actualidad todavía no han sido solucionados. Primero, los metales son mucho más pesados que otros tipos de elementos. Esto implicaría demasiado peso si se quisiera emplear el hidrógeno y este tipo de almacenamiento en aplicaciones móviles como automóviles o aeronaves, por lo que será necesaria una reducción significativa del peso en términos de eficiencia y seguridad. Otro inconveniente es que el paladio es escaso y caro, provocando que el empleo de esta tecnología para el almacenamiento de hidrógeno no sea rentable.

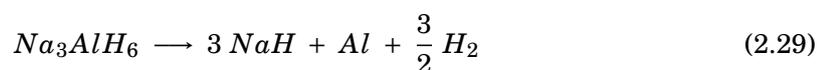
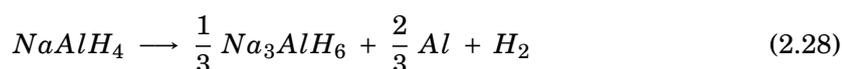
Para conseguir paliar estos problemas, actualmente se están investigando alternativas al paladio, entre las que se encuentran las aleaciones de hierro y titanio, zirconio y magnesio, . . . Con ellas, lo que se pretende es, además de una reducción en el peso, conseguir que sean capaces de formar hidruros, soportar varios ciclos de cargas y descargas, y que sean estables frente a agentes como la humedad.

Hidruros no metálicos:

De los distintos métodos de almacenamiento expuestos hasta el momento, el que se realiza empleando hidruros metálicos representa la manera más interesante y segura al mismo tiempo, pero tiene el problema del peso elevado, provocando que el hidrógeno almacenado esté limitado a un 2% en peso como máximo.

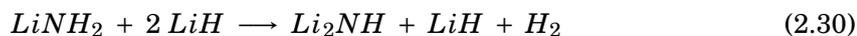
Por ello, últimamente se han ido desarrollando formas de almacenaje del hidrógeno empleando elementos que sean más ligeros que los metales, y que a la vez sean capaces de enlazarse con el hidrógeno para poder almacenarlo posteriormente (en este caso se conseguiría mediante enlaces covalentes o iónicos). Además, este tipo de materiales harían que fuera posible retener mayor hidrogeno por unidad de peso, pero tienen el inconveniente de que a veces los procesos de carga son irreversibles, implicando que los procesos de recarga sean muy complicados.

Un ejemplo de hidruro no metálico es el alanato de sodio ($NaAlH_4$), el cual puede dar hidrógeno reversible con un 5,6% en peso a 200°C cuando se añade titanio en pequeñas cantidades. Para obtener hidrógeno con este procedimiento, se producen dos reacciones químicas. Primeramente, el alanato de sodio se transforma en Na_3AlH_6 , aluminio e hidrógeno (3,7% en peso). Luego, se separa el Na_3AlH_6 en hidruro de sodio, aluminio e hidrógeno (1,9% en peso a mayores). Las reacciones químicas quedarían de la siguiente manera:



Si se descompusiera también el hidruro de sodio (NaH), se obtendría más hidrógeno, llegando al 7,4% en peso, pero esto provocaría una reacción totalmente irreversible que perdería el sentido a la hora de almacenar el hidrógeno.

Otra opción es utilizar el hidruro de litio (LiH) junto con la amida de litio ($LiNH_2$), pudiendo conseguir de manera reversible hasta un 10,4% de hidrógeno en peso. Para lograrlo, se reacciona la amida con el hidruro, obteniendo imida de litio (Li_2NH) e hidrógeno. Luego, se reacciona la imida con el hidruro, consiguiendo nitruro de litio (Li_3N) y aún más hidrógeno (a temperaturas altas del orden de los 400°C):



Actualmente, los compuestos de boro también están siendo investigados como alternativa a los hidruros metálicos. Por ejemplo, el tetrahidruroborato de sodio ($NaBH_4$), junto con un catalizador de rutenio y alta temperatura, es capaz de obtener hidrógeno para su posterior almacenamiento. Otro podría ser el borazano (NH_3BH_3), que es capaz de desprender hasta un 15% en peso de hidrógeno. También se está investigando el empleo del tetrahidruroborato de litio ($LiBH_4$), el cual puede llegar a contener hasta un 18% en peso de hidrógeno, pero en este caso se requieren temperaturas de unos 650°C y presiones muy altas, del entorno de los 150 bares o más. Por último, también existe el desarrollo del hidruro mixto de litio y berilio ($Li_3Be_2H_7$), que, a pesar de su toxicidad, puede llegar a obtener hasta un 8% en peso de hidrógeno a temperaturas mucho más asumibles que con otros métodos (alrededor de 150°C) [16].

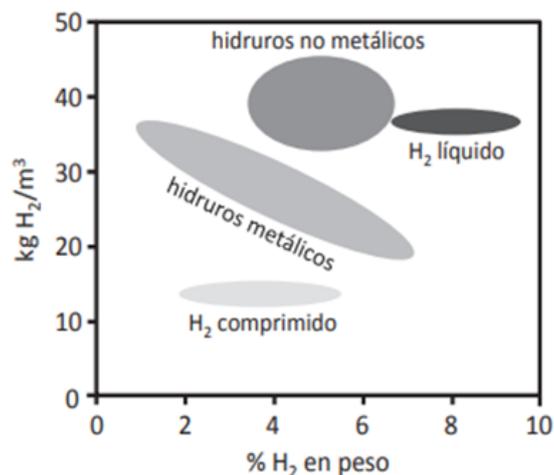


Figura 2.8: Comparación de los métodos de almacenamiento de hidrógeno en función de la densidad y el porcentaje en peso de hidrógeno *Fuente: [16]*

Como se puede observar en la figura adjunta, la gráfica representa distintos métodos para el posterior almacenamiento del hidrógeno, relacionando para ello la densidad en función del porcentaje en peso del hidrógeno, y representando las distintas regiones donde se encontrarían los diferentes procedimientos existentes. El método que se puede considerar como ideal será aquel que disponga de densidades elevadas y que sea reversible, seguro y económico; de ahí que métodos como la licuefacción del hidrógeno, aunque tengan una elevada densidad y alto porcentaje en peso del hidrógeno, al ser un método caro y no muy seguro, no interesa tanto como podrían interesar otros métodos. Además, también destaca la mayor densidad de los hidruros no metálicos en comparación con los hidruros metálicos y que, teniendo porcentajes en peso de hidrógeno con diferencias no muy significativas, pero como los hidruros no metálicos pueden ser irreversibles, dependerá la elección del método en lo que se quiera conseguir, ya que los hidruros metálicos sí son reversibles, pero el uso de metales implica un aumento de peso significativo, con el encarecimiento del proceso y del almacenamiento del hidrógeno que ello conlleva.

Mediante estructuras porosas:

Además de todos los métodos explicados con anterioridad, también se puede almacenar hidrógeno empleando diferentes tipos de estructuras porosas, ya que tienen una gran área activa gracias a los poros de las estructuras, permitiendo un mayor almacenamiento de hidrógeno.

Para ello, los elementos más comunes son los materiales carbonosos como el carbón activo, las nanofibras de grafito y los nanotubos de carbono. Por regla general, la absorción de hidrógeno de estos materiales sólo ocurre mediante fuerzas electrostáticas entre los átomos de carbono e hidrógeno, siendo una interacción débil que no va a afectar a las estructuras de los materiales y permite que la carga y descarga del hidrógeno sea sencilla, rápida y totalmente reversible, siendo la cantidad de hidrógeno absorbido función de la presión.

Actualmente este tipo de métodos se encuentran en fase de investigación, donde se cree que el porcentaje en peso de hidrógeno obtenido puede oscilar entre el 1 y el 10%. Como se puede constatar, el porcentaje en peso puede ser muy bajo, y esto podría deberse a la propia

estructura de los nanotubos de carbono, pero también se han desarrollado nanotubos a los que se les ha adherido metales para mejorar los resultados y no se han obtenido resultados determinantes, por lo que actualmente no existe ningún consenso en el empleo de estas estructuras en el almacenamiento del hidrógeno como alternativa a los otros métodos.

Por último, cabe destacar que existen otro tipo de estructuras porosas que se pueden utilizar para las labores de almacenamiento de hidrógeno, como son los compuestos de coordinación microporosos (MOF), los cuales son sólidos con mezcla de iones y separadores orgánicos que permiten la creación de huecos donde se puede almacenar hidrógeno fácilmente. Para ello, existen distintos métodos, los cuales proporcionarán distintos volúmenes en función del procedimiento. Algunos de ellos son la presión uniaxial, el revestimiento (coating), el temple, la extrusión, el granulado, etc [28].

Generación a bordo:

Hasta este momento, se han explicado varios métodos de almacenamiento del hidrógeno, cada uno de los cuales tienen sus ventajas e inconvenientes. Se sabe que la compresión del hidrógeno es sencilla, pero la cantidad de hidrógeno que se puede almacenar es baja; en el caso de la licuefacción, a pesar de conseguir mayores cantidades de hidrógeno, se necesita mucha más energía para conseguir realizar el procedimiento, implicando mayor riesgo y precio. En cuanto a las estructuras porosas, la absorción es muy poco eficiente, y el empleo de hidruros metálicos sólo es capaz de almacenar cantidades pequeñas de hidrógeno, además del aumento de peso relacionado con el uso de metales. Por último, también se ha explicado la utilización de hidruros no metálicos, los cuales permiten mayores porcentajes en peso del hidrógeno, pero tienen problemas de irreversibilidad.

Entonces, para paliar en cierto modo esta serie de problemas que representan los métodos expuestos, existe una idea totalmente alternativa y diferente al resto en la distribución y almacenamiento de hidrógeno en cantidades industriales. Para ello, lo que se pretende es que el hidrógeno demandado se genere allí donde sea necesario mediante un elemento o compuesto que sea fácil y seguro de transportar. Normalmente, este sustrato será un líquido en condiciones estandarizadas que contenga la mayor cantidad de hidrógeno que sea posible. De esta manera, desplazaríamos completamente el inconveniente del almacenamiento del hidrógeno, ya que producir hidrógeno 'a bordo' resulta una alternativa muy ventajosa, la cual podría aprovechar los sistemas de distribución de combustibles tradicionales (como es la gasolina, junto con sus depósitos y tuberías). A pesar de todo esto, el mayor problema radicaría en la generación del hidrógeno a bordo del vehículo, lo que implicaría un gran reto tecnológico.

A la hora de escoger el sustrato más adecuado, destacan el metanol, el etanol y los combustibles sintéticos obtenidos a partir de procesos renovables como la biomasa, ya que todos ellos contienen una gran cantidad de hidrógeno en peso (entre el 13 y el 17%), pudiendo generar hidrógeno a partir de procesos de obtención como el reformado (explicado en detalle anteriormente). Otra opción podría ser el amoníaco, pero al ser tóxico representa un gran inconveniente en cuanto al transporte de este compuesto, además de que su síntesis industrial es cara y complicada de llevar a cabo.

Además de estos sustratos, también son una opción interesante los cicloalcanos líquidos (ciclohexano, teralina, decalina o metilciclohexano), ya que se puede desprender el hidrógeno de ellos muy rápido con catalizadores de platino a 210-350°C, consiguiendo producir

hidrógeno con relativa facilidad y temperaturas asequibles. Además, los cicloalquenos que resulten de esta reacción pueden ser reciclados fácilmente. Entonces, el problema fundamental del empleo de los cicloalcanos en la generación a bordo de hidrógeno radica en que estos sustratos necesitan un intercambio frecuente del depósito.

Entonces, visualizando todas las alternativas disponibles, las más interesantes son las que obtienen hidrógeno a partir del reformado de líquidos, pero tienen un inconveniente fundamental en el momento de generar hidrógeno a bordo. Este problema es que los catalizadores o reformadores requieren respuesta rápida en los vehículos, ya que la mayor parte de los catalizadores necesitan un tiempo de acondicionamiento antes de su uso, y en ciclos de encendido y apagado como en los vehículos terrestres representa un gran punto en contra de partida. Para poder solucionar esto, se necesita diseñar catalizadores con dispersión de la fase activa y una buena transferencia de masas, que puedan trabajar en movimiento y en presencia de vibraciones, a distintas temperaturas exteriores y que sean estables.

Actualmente, se puede destacar que en las fábricas se emplean catalizadores que se adhieren a las paredes de sustratos estables térmica y mecánicamente, con una gran cantidad de canales en paralelo. Además, también se usan en los vehículos terrestres de combustión y en el tratamiento de gases en industria porque permiten mayor presión y menos problemas de obturación [29].

2.3. Principios básicos de la pila de combustible

Una vez se ha explicado nítidamente qué es el hidrógeno, sus características, y sus beneficios e inconvenientes a la hora de su empleo como energía alternativa sostenible y limpia, y que se ha dilucidado sus formas de obtención y almacenamiento para poder ser utilizado posteriormente de forma adecuada, como el hidrógeno es una de las bases de las pilas de combustible, en el siguiente apartado se va a tratar el funcionamiento de una pila de combustible, con los diferentes tipos y sus condiciones de operación.

Entonces, una pila de combustible es un dispositivo que es capaz de transformar la energía química obtenida a través de un combustible directamente en energía eléctrica. Esto representa una gran ventaja respecto a las máquinas térmicas, las cuales necesitan transformar la energía química en energía térmica, lo que provoca luego un paso a energía mecánica para con ello conseguir la energía eléctrica que se está persiguiendo [30].

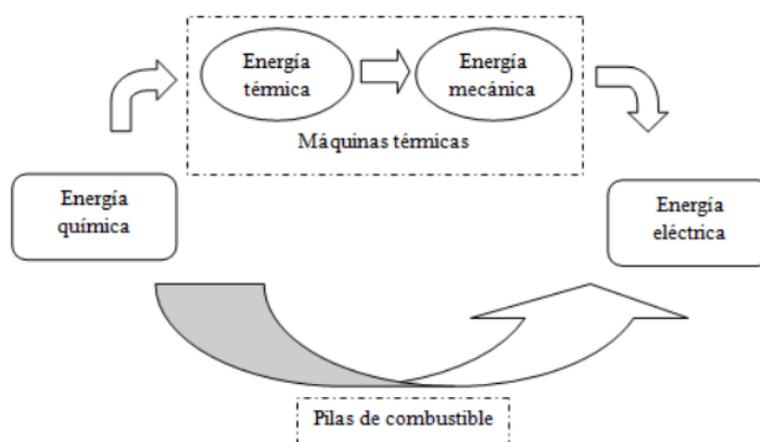


Figura 2.9: Comparación de la pila de combustible con máquinas térmicas. Fuente: [16]

Gracias a ello, se puede apreciar otra gran ventaja de la pila de combustible: su gran eficiencia en la transformación a energía eléctrica, ya que sus únicos límites que podría tener están relacionados con los principios de la termodinámica. En cambio, las máquinas térmicas se encuentran bastante más limitadas por el ciclo de Carnot que realizan en su funcionamiento [31].

Centrándose más en el funcionamiento de una pila de combustible, como ya se ha explicado, la base es una transformación de la energía química en energía eléctrica. Para ello, se consigue mediante una reacción redox (reducción-oxidación), aprovechando el flujo de electrones para conseguir electricidad.

Este dispositivo electroquímico está compuesto por el cátodo y el ánodo, donde el cátodo es la parte positiva que se encuentra en contacto con la parte oxidante de la reacción, y el ánodo es el electrodo negativo con el agente reductor, donde ambos se encuentran separados por el electrolito (que funciona como una membrana de división entre ambas partes), el cual solamente deja fluir a los iones, que son átomos que ya han perdido o ganado electrones. Entonces, con ello conseguimos la generación de electricidad en corriente continua deseada, sin desechar residuos contaminantes al entorno, ya que sólo producirá agua y calor, como se puede observar en la figura 2.10 [32]:

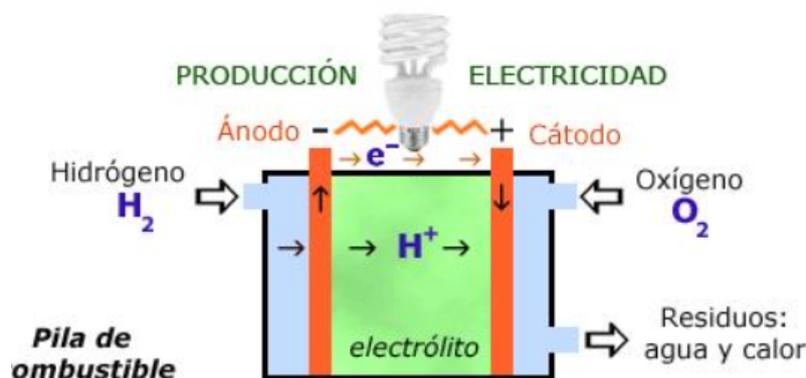


Figura 2.10: Comparación de la pila de combustible con máquinas térmicas. Fuente: [33]

Entonces, se suceden dos semirreacciones en una pila de combustible en el ánodo (Ecuación 2.32) y en el cátodo (Ecuación 2.33) [34]:



Juntando ambas reacciones, obtenemos el residuo, que será el agua:



Cabe destacar que en las reacciones expuestas anteriormente pueden variar en función del tipo de pila de combustible empleada, ya que el movimiento de iones puede darse también de ánodo a cátodo, no sólo de cátodo a ánodo, todo ello dependiendo del tipo de electrolito y reactivos utilizados.

En cuanto al funcionamiento específico de una pila de combustible, dentro de la celda lo que suceden son dos reacciones al mismo tiempo, es decir, se oxida el combustible en el ánodo, liberando electrones que otorgarán trabajo útil posteriormente y protones que atravesarán la membrana o electrolito hasta llegar al otro electrodo; la otra reacción tiene lugar en el cátodo, donde se reduce el oxidante, y, lo que se ha producido en esta parte del electrodo adquirirá los electrones pasando a formar una especie neutra, la cual variará en función del tipo de pila de combustible y de la materia prima empleadas [35].

STACK O CONJUNTO DE CELDAS

Uno de los grandes inconvenientes de las pilas de combustible es que las corrientes eléctricas producidas en las mismas eran muy pequeñas, del orden de 0,7 V. Esto se debe principalmente a la poca área existente de contacto entre los reactivos, electrodo y electrolito, y la larga distancia entre electrodos, provocando grandes pérdidas de energía.

Para solucionar esto, en la actualidad se ha optado por recurrir a la conexión en serie de varias celdas, con el fin de aumentar la capacidad del conjunto (al cual se le llama generalmente stack [36]). A continuación, veremos los dos tipos de geometría existentes en el apilamiento de celdas de combustible:

Geometría simple o plana

El método más sencillo en principio a la hora de conectar las celdas en serie para conseguir un stack radicaría en enlazar el extremo del ánodo de una celda con el cátodo de la siguiente, y así sucesivamente [37]. El problema de este procedimiento es que los electrones tienen que fluir sobre la superficie del electrodo hasta el punto de conexión entre celdas y, a pesar de que pueden llegar a ser muy buenos conductores, si cada celda se encuentra operando a 0,7 V [38], se puede observar que cualquier pérdida, por mínima que sea, resultará ser muy importante. Por ello, este método, que en apariencia pudiera ser muy sencillo y fácil de ejecutar, no se use en la industria actual.

Un método mucho más efectivo trata sobre el empleo de placas bipolares (del inglés *bipolar plate*, las cuales utilizan materiales como el grafito o aceros inoxidable). Gracias a esto, se consigue que las celdas estén conectadas a lo largo de toda la superficie de un cátodo y el ánodo de la siguiente celda. Además, al mismo tiempo las placas bipolares son capaces de suministrar oxígeno al cátodo y combustible gasificado al ánodo.

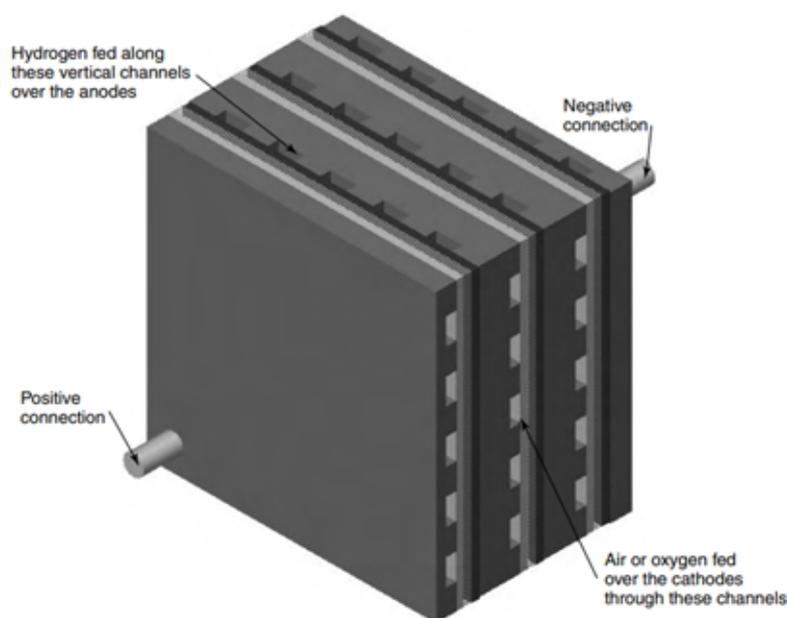


Figura 2.11: Stack de celdas de combustible a partir de placas bipolares. Fuente: [29]

De la figura 2.11 podemos destacar que las placas bipolares tienen canales por donde los gases pueden fluir por la superficie de los electrodos. Además, éstas se fabrican de tal modo que son capaces de contactar eléctricamente con las superficies de cada electrodo. En la figura 2.12 podremos observar con mayor detalle los canales o surcos de los que disponen las placas:

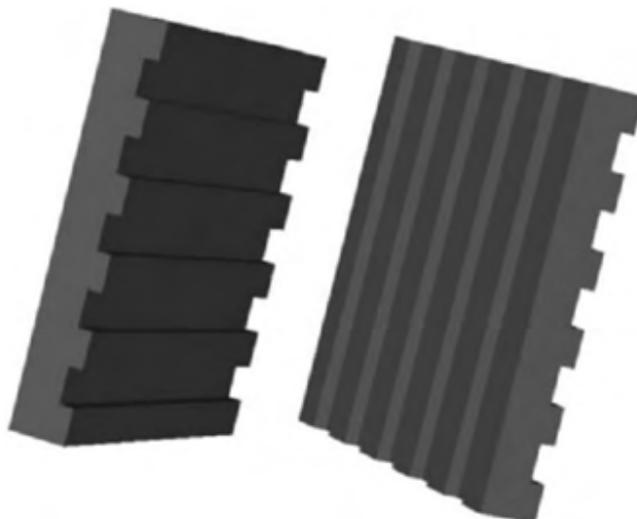


Figura 2.12: Representación de los canales de placas bipolares. Fuente: [39]

Por último, se puede resaltar de la figura 2.12 que dispone de canales verticales y horizontales. Esto se debe a que los canales verticales serán los encargados de distribuir el combustible (normalmente hidrógeno) sobre los ánodos, mientras que por los canales horizontales circulará el oxígeno requerido en los cátodos. Como resultado, se obtendrá un bloque sólido donde la corriente eléctrica circula de forma eficiente a través de las celdas, sin tener que ir por la superficie de un electrodo al siguiente como con el otro método más sencillo.

Sin embargo, hay que tener en cuenta una serie de factores acerca del diseño de un stack con placas bipolares. Uno de ellos es la necesidad de optimización de la circulación de la corriente eléctrica, donde los puntos de contacto deberán ser lo más grandes posible, pero esto mitigará la circulación de los gases sobre los electrodos. En cambio, si los puntos de contacto son pequeños, se optará por una mayor cantidad de los mismos, pero resultará en una mayor complejidad, mayor fragilidad y mayor gasto en fabricación. Idealmente, las placas bipolares se deberían construir lo más delgadas posible, con el fin de reducir las resistencias eléctricas que se puedan dar y para poder reducir el tamaño del stack, pero ello provocaría mayores dificultades a la hora de la circulación del combustible en las celdas. Entonces, de toda esta serie de detalles se podrá deducir la dificultad a la hora de realizar un stack de celdas de combustible y los costes que ello conlleva [40].

Geometría tubular

En este método, los componentes del conjunto de la celda de combustible no tienen forma plana, sino que recurren a la tubular, de tal manera que forman algo similar a una tubería hueca por dentro, con varias capas (cátodo, electrolito, ánodo, ...) que suelen estar dispuestas de la misma forma: cátodo en el interior (donde dentro de él circulará el aire), electrolito de separación de ambos, y ánodo en la parte exterior en contacto con el combustible.

Con respecto a este tipo de geometría, como la entrada de los reactivos es efectuada por un solo punto, el sellado de los componentes es mucho más favorable. Esto se debe a que este tipo de stacks funcionan como una probeta, donde el aire será calentado después de la entrada en el tubo. Por otro lado, tienen dificultades para alcanzar altas densidades de po-

tencia y hay un gran camino a recorrer a través de los tubos, el cual afectará negativamente a la corriente eléctrica. Para paliar este efecto se disponen en serie una gran cantidad de tubos, de tal manera que la corriente encontrará el camino más corto y así reducir las largas distancias resultantes de la utilización de este tipo de geometría [41].

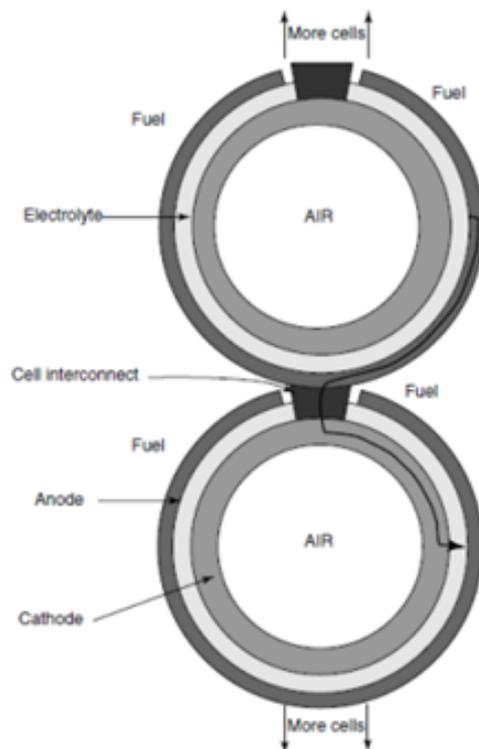


Figura 2.13: Representación de un conjunto de celdas de combustible mediante geometría tubular. Fuente: [29]

BALANCE DE PLANTA

Una vez se ha explicado más concretamente a la pila de combustible y sus partes fundamentales, también hay que considerar al resto de sistemas auxiliares necesarios para el correcto funcionamiento de ésta. De facto, al conjunto que engloba a estos sistemas se le denomina balance de planta (BOP, balance of plant), el cual constituirá la otra gran unidad en una pila de combustible, además del stack [42].

Si bien las pilas de combustible dependen del tipo que sean, del combustible que utilicen y del uso que se dará a la energía eléctrica que se obtenga de ellas, la mayor parte de las pilas de combustible contienen los siguientes elementos y procedimientos:

Obtención y tratamiento del combustible

Como bien se ha comentado en apartados previos, se necesita preparar el hidrógeno antes de introducirlo en la pila de combustible. Para ello, la preparación transcurre desde la obtención del hidrógeno a partir de los distintos procedimientos existentes y la eliminación de impurezas de una forma u otra en función de los requerimientos del tipo de pila empleado. A mayores también será de vital importancia que el combustible llegue en condiciones adecuadas al ánodo, por lo que el empleo de eyectores o compresores será fundamental [43].

Sopladores

Otro de los elementos requeridos en el sistema del BOP son los sopladores (blowers en inglés), los cuales serán los encargados de transportar el aire a donde corresponda, es decir, al cátodo.

A veces, este suministro se realiza con compresores en vez de sopladores, todo dependerá de la configuración del stack, el cual dictará la presión que se necesitará para que el aire llegue en condiciones óptimas al cátodo [44].

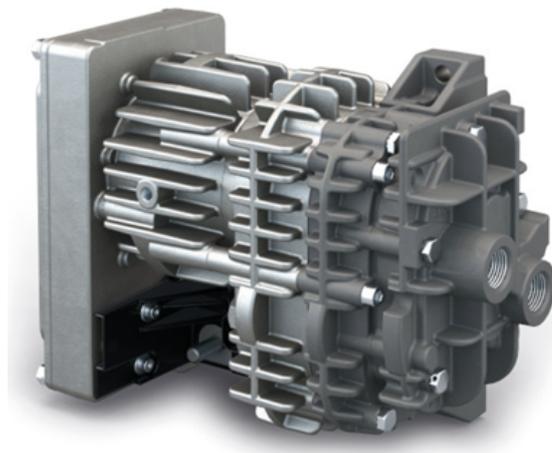


Figura 2.14: Estructura de un blower de una pila de combustible. Fuente: [29]

Ventiladores

Como la reacción que se produce en una pila de combustible es exotérmica, el control de la temperatura será obligatorio para vigilar y contrarrestar los posibles calentamientos que se puedan producir en el interior del stack, con el consecuente deterioro que ello produciría.

Para ello, se emplean ventiladores que son activados por un sistema de control a base de termostatos, construyendo un sistema que conseguirá producir la presión de aire requerida para el funcionamiento correcto de la pila, y que también se utilizará en caso de emergencia como sistema de refrigeración si se supera la temperatura límite de operación [45].

Gestión del agua

Como consecuencia de la reacción redox que ocurre en la pila de combustible se formará agua, la cual debe ser correctamente evacuada para no dificultar la obtención de electricidad en la pila.

Sin embargo, no existe un método en específico para la gestión y control del agua resultante, ya que ello depende del tipo de pila de combustible que se esté empleando. Ello se debe a que existen pilas que funcionan a altas temperaturas, donde el agua se encontrará en estado gaseoso, y otros tipos que trabajen a menores temperaturas sí que podrán aprovechar el agua obtenida en el proceso para humedecer la membrana y retrasar su deterioro.

Convertidores de potencia

Estos convertidores son requeridos debido a que la corriente directa (DC) no suele ser la forma más usual de obtención de electricidad en las pilas de combustible debido a las pequeñas fluctuaciones que pueden ocurrir en el proceso, por lo que la presencia de un acondicionamiento de la potencia será necesaria. Además, otra de las causas por la cual se necesitarán utilizar convertidores es por las fluctuaciones que se producen en la demanda de energía de la pila y por las variaciones de los flujos del reactivo.

Para poder minimizar esta serie de problemas existentes, se emplean convertidores DC/DC, los cuales son capaces de transformar la energía para tener un voltaje constante y continuo que luego se podrá aprovechar para adaptarlo al consumo [46].

Otros sistemas

A veces, junto con los compresores, se emplean intercoolers (intercambiadores de calor), los cuales realizan la misma función que si se utilizasen en un motor de combustión interna tradicional, pero siendo aplicados a los compresores que se usan en las pilas de combustible.

Por supuesto, el empleo de motores eléctricos va a estar siempre íntimamente ligado a las pilas de combustible, los cuales se utilizarán para impulsar a bombas, ventiladores o compresores.

A mayores, las pilas de combustible pueden disponer de válvulas de control, reguladores de presión o controladores para la correcta coordinación de las distintas partes del sistema (aquí cabe destacar la importante labor de los controladores, ya que deberán lidiar con el arranque y encendido de la pila, el cual es un proceso muy complejo de llevar a cabo, especialmente en pilas de combustible que funcionen a altas temperaturas) [27].

2.4. Tecnologías de pila de combustible

Obviando problemas prácticos a la hora de su fabricación como pueden ser el coste la propia fabricación o los costes de los materiales, se pueden apreciar dos problemas fundamentales con las pilas de combustible:

- El hidrógeno no es un combustible directo, es decir, necesitamos realizar algún proceso químico para su obtención y posterior empleo.
- Las pilas de combustible tienen tasas de reacción lentas, lo que conlleva a bajas potencias y corrientes [47].

Entonces, para solucionar estos inconvenientes, se ha investigado alrededor de distintos tipos de pilas, los cuales se suelen diferenciar por el electrolito empleado (como es lógico, pueden existir otras diferencias importantes entre las diferentes variedades). De hecho, en la actualidad existen seis tipos principales de pilas de combustible que se pueden considerar como sistemas viables para el futuro. Para concretar, se expone la figura 2.15, en la que se puede observar una tabla con las diferentes variantes y sus características y aplicaciones principales:

Fuel cell type	Mobile ion	Operating temperature	Applications and notes
Alkaline (AFC)	OH^-	50–200°C	Used in space vehicles, e.g. Apollo, Shuttle.
Proton exchange membrane (PEMFC)	H^+	30–100°C	Vehicles and mobile applications, and for lower power CHP systems
Direct methanol (DMFC)	H^+	20–90°C	Suitable for portable electronic systems of low power, running for long times
Phosphoric acid (PAFC)	H^+	~220°C	Large numbers of 200-kW CHP systems in use.
Molten carbonate (MCFC)	CO_3^{2-}	~650°C	Suitable for medium- to large-scale CHP systems, up to MW capacity
Solid oxide (SOFC)	O^{2-}	500–1000°C	Suitable for all sizes of CHP systems, 2 kW to multi-MW.

Figura 2.15: Cuadro explicativo de los distintos tipos de pilas de combustible. *Fuente:* [27]

Como se puede observar, cada variedad diferente destaca por unas características u otras (por el ion empleado para el paso de un electrodo a otro o por la temperatura de operación), y todos ellos serán detalladamente explicados en los siguientes apartados.

PILA DE COMBUSTIBLE DE INTERCAMBIO DE PROTONES (PEMFC)

También llamada pila de combustible de polímero sólido (SPFC), la pila de combustible de intercambio de protones fue desarrollada por primera vez en la década de 1960 por General Electric en los Estados Unidos como aplicación al sector espacial y a la NASA en particular para sus misiones con vehículos espaciales [48].

En este tipo de pilas, el electrolito es un polímero conductor de iones (típicamente fluorotileno), rodeado a cada lado por electrodos catalizadores porosos. De esta manera, el

conjunto de la celda de combustible (ánodo, electrolito y cátodo) se convierte en uno sólo, muy delgado y ligero como se puede apreciar en la figura 2.16:

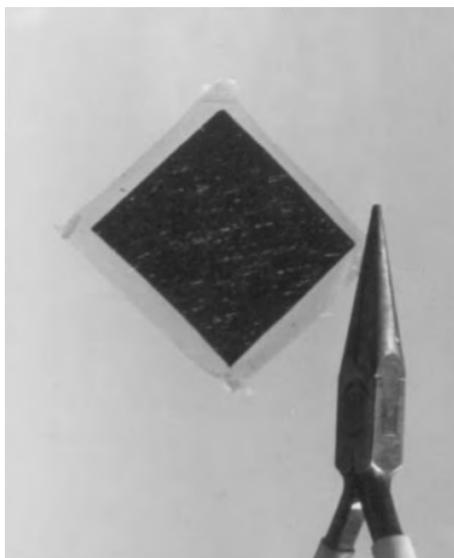


Figura 2.16: Cuadro explicativo de los distintos tipos de pilas de combustible. *Fuente: [27]*

Luego, esta especie de membrana es conectada en serie mediante el empleo de placas bipolares, formando la propia pila de combustible PEMFC. En esta pila, el ion empleado es un ion o protón de H^+ , por lo que la base operativa de la pila es prácticamente igual que las pilas de combustible de electrolito ácido [49].

El electrolito funciona a bajas temperaturas, permitiendo arranques rápidos de la pila. Además, la delgadez de las celdas permite una gran compacidad de las pilas PEMFC; pueden trabajar en cualquier orientación y no poseen problemas de fluidos corrosivos. Todo esto es de vital importancia y hace que las pilas de combustible de intercambio de protones resulten muy recomendables para su utilización en vehículos y otras aplicaciones que requieran de movimiento para su operación normal.

Las primeras versiones de las pilas PEMFC tenían vidas muy cortas (del orden de 500 horas [27]), las cuales fueron incrementadas cuando se incorporó un nuevo tipo de electrolito denominado Nafion, el cual se sigue empleando en la actualidad. Sin embargo, graves problemáticas como la distribución del agua generada en el electrolito propiciaron que estas pilas no fueran fabricadas en serie, además de por los altos costes que representaban en sus primeras etapas (en la década de 1960, se necesitaban 28 miligramos de platino por cada centímetro cuadrado de electrodo, mientras que ahora sólo 0,2 miligramos [50]).

En la actualidad, los desarrollos realizados en los últimos años han conseguido densidades mínimas, reduciendo de igual manera el empleo de platino alrededor de 100 veces menos. Estos avances han propiciado una gran reducción en el coste de la potencia por cada kilovatio y un gran aumento de la potencia [50].

Si nos centramos más en detalle en el funcionamiento de las pilas de combustible PEMFC, hay dos aspectos principales a tener en cuenta: la estructura de los electrodos y el electrolito empleado. Entonces, se puede observar que la forma constructiva más habitual

es la de stacks planos (con placas bipolares).

En el ánodo, el contacto existente entre hidrógeno y el catalizador de platino facilita la separación de las moléculas de hidrógeno en dos protones H^+ y dos electrones, donde los iones o protones se dirigirán al cátodo a través de la membrana, y los electrones lo harán por el circuito externo, juntándose en el cátodo con el oxígeno, originando agua y corriente eléctrica como productos, donde el agua se tiene que gestionar de la forma adecuada (como ya se ha comentado con anterioridad), y la corriente eléctrica será aprovechada para impulsar al vehículo o para otras aplicaciones que requieran de esta energía. A continuación, se puede observar la figura 2.17, que resume el funcionamiento de una pila de combustible PEMFC, y justo debajo se pueden apreciar las reacciones producidas en estas pilas (Ecuaciones 2.35, 2.36 y 2.37) [51]:

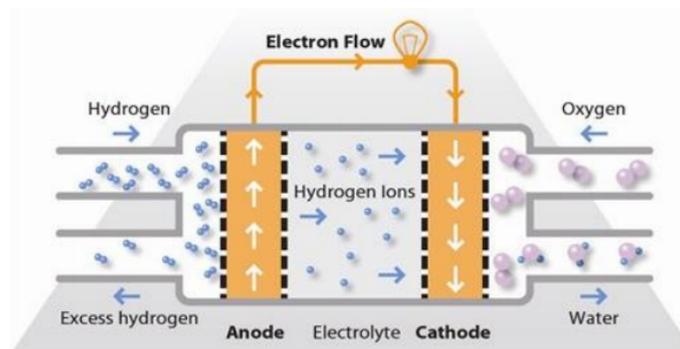
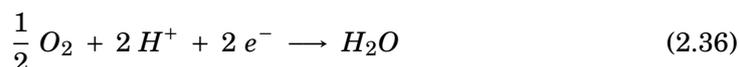


Figura 2.17: Funcionamiento de una pila de combustible tipo PEMFC. Fuente: [52]

- Ánodo:



- Cátodo:



- Reacción global:



Por el tipo de electrolito empleado (explicado en más detalle posteriormente), estas pilas de combustible son capaces de operar a temperaturas bajas (de entre 30 y 100°C, siendo usual que se encuentren a 80°C [53]), facilitando las tareas de sellado y montaje de los distintos componentes.

Electrolito

La fabricación de un electrolito a partir de fluoroetileno comienza con la construcción de la propia estructura molecular de etileno, donde luego se sustituye el hidrógeno por flúor, realizando el proceso conocido como perfluoronización. De hecho, se llega a un polímero modificado conocido como PTFE (politetrafluoroetileno) o teflón, uno de los materiales compuestos más importantes en el desarrollo de las pilas de combustible, el cual tiene la siguiente estructura [27]:

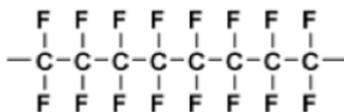


Figura 2.18: Estructura del PTFE o teflón. Fuente: [54]

El PTFE destaca por su durabilidad y su resistencia frente a agentes químicos; es fuertemente hidrófobo, lo que permite el trasvase de agua fuera del electrodo con mayor facilidad. Sin embargo, para la fabricación de un electrolito se necesita ir un paso más allá. Al polímero PTFE básico hay que tratarlo con azufre, creando bisulfito (HSO_3), representando un proceso químico ampliamente utilizado en la industria. Luego, este elemento es depositado, produciendo un ion SO_3 negativo, generando la estructura del electrolito (la cual también es conocida como ionómero debido al proceso descrito).

Por lo tanto, el resultado de la presencia de estos iones de SO_3 negativos junto con los iones de H^+ provocan una atracción mutua entre los iones positivos y negativos en cada una de las moléculas. Entonces, las cadenas laterales de moléculas tienden a agruparse alrededor de la estructura del material. Todo ello conlleva un problema principal: la creación de agua, que puede llegar a aumentar el peso del orden de un 50 % más [55].

Entonces, desde el punto de vista del uso de este tipo de electrolitos, el Nafion destaca en una serie de parámetros:

- Alta resistencia química.
- Mecánicamente fuertes, permitiendo películas muy delgadas de este material.
- Son ácidas.
- Pueden absorber grandes cantidades de agua.
- Si se encuentran bien hidratadas, los iones positivos pueden moverse libremente por el material, siendo buenos conductores de protones.

Electrodos

El mejor catalizador tanto para el ánodo como para el cátodo es el platino, el cual representa uno de los costes más importantes en las pilas de combustible PEMFC. El platino se encuentra en pequeñas partículas en la superficie de partículas más grandes de polvo de carbono (donde el XC72 es el tipo más común empleado). El resultado viene a ser como el de la figura 2.19:

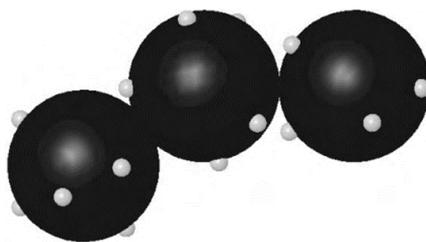


Figura 2.19: Representación detallada de las partículas de polvo de carbono con las de platino adheridas. *Fuente: [27]*

En estas partículas, el platino se encuentra muy dividido y repartido, lo que permite que una amplia proporción de la superficie estará en contacto con los reactivos. Luego, hay dos alternativas empleadas en el siguiente paso relacionado con los electrodos.

Uno de ellos es el método de los electrodos separados, donde el catalizador de polvo de carbono es modificado hacia un material poroso y conductor, al cual a veces también se le añade PTFE, ya que éste puede expulsar el agua a la superficie para que sea evaporada. Además, para proveer al electrodo de su estructura mecánica básica, el carbono se suele difundir con gas en el catalizador, por lo que a este método también se le puede denominar el método de difusión de gas. Con esto y modificando el electrodo en cada lado de una pieza de membrana de electrolito tendríamos el método completado.

En cuanto al otro método, en él su función principal es construir el electrodo directamente en el electrolito. Aquí, en vez de construir el electrodo en la membrana, el platino y el carbono son directamente enviados al electrolito. El catalizador, que suele ser mezclado con PTFE, es aplicado en el electrolito mediante métodos de laminado o fumigado [56].

PILA DE COMBUSTIBLE ALCALINA (AFC)

Las pilas de combustible alcalinas fueron descritas por primera vez a comienzos del siglo XX, pero no fue hasta las décadas de 1940 y 1950 cuando comenzaron a verse como una alternativa propulsiva viable, hasta el punto de llevar al hombre a la Luna con las misiones Apollo de la NASA. Gracias a este éxito y a su demostración de gran potencia en comparación con las pilas PEMFC de aquellos años, se comenzó a investigar y mejorar más en profundidad las pilas AFC en las décadas siguientes (1960-1970), llegando a realizarse experimentos en tractores, coches, equipamientos de navegación de navíos [57], etc.

A pesar de que la campaña de las pilas alcalinas estaba siendo todo un éxito, poco a poco se fue observando algunas dificultades, como son los costes, la fiabilidad, la complejidad de uso o la seguridad. Toda esta serie de inconvenientes, junto con la creencia de que las pilas AFC no iban a ser capaces de proporcionar las mismas características que otras alternativas propulsivas hicieron que la investigación y desarrollo de estas se viese muy mermada.

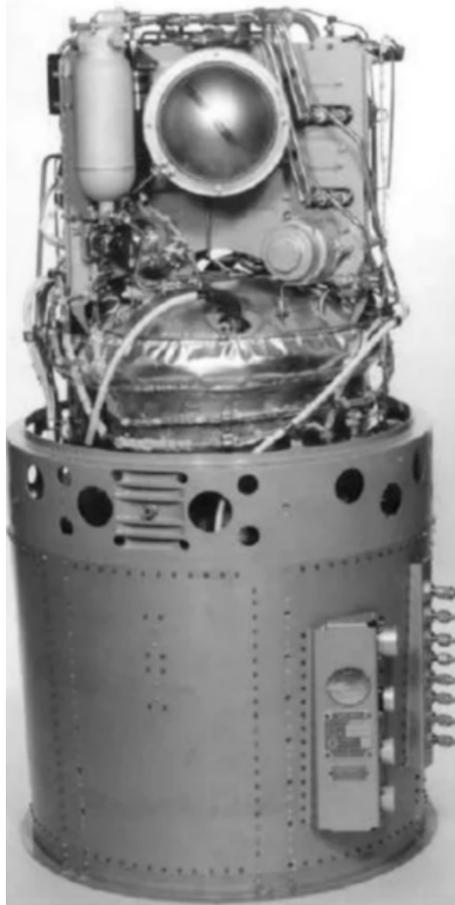


Figura 2.20: Pila de combustible utilizada en la misión espacial Apollo por la NASA. *Fuente:* [52]

Incluso teniendo en cuenta los inconvenientes y su decreciente protagonismo hasta el punto de existir pocas empresas que investiguen o fabriquen en la actualidad pilas alcalinas, tienen algunas ventajas que las diferencian del resto de tipos de pilas de combustible. La primera es que las pilas AFC producen menor exceso de voltaje en el cátodo que aquellas con electrolitos a base de ácido, permitiendo operaciones de en torno a 0,875 V [58], voltajes asiduamente mayores que en las pilas PEMFC, por ejemplo.

Otra ventaja radica en los costes del sistema, ya que existen pocos estándares químicos más baratos que el empleado en este tipo de pilas (hidróxido de potasio), por lo que se puede corroborar que son las pilas de combustible de coste más bajo. Además, los electrodos (sobre todo el cátodo), se pueden fabricar de metales no preciosos y sin el empleo de materiales excesivamente exóticos y escasos, permitiendo la elaboración de cátodos de muy bajo coste.

Por último, cabe considerar que las pilas AFC son sistemas mucho menos complejos que los sistemas de pilas PEMFC, ya que por ejemplo la gestión del agua es un problema considerablemente menor y que es mucho más fácil de resolver que en otros tipos de pilas de combustible.

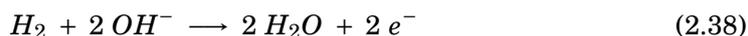
Funcionamiento y características

Estas pilas emplean como electrolito normalmente al hidróxido de potasio (KOH), debido a su buena conductividad eléctrica. Entonces, esto implica que los gases que sean suministrados al sistema AFC no pueden contener dióxido de carbono, debido a que ello provocaría que hubiese carbonatos que precipitasen en los huecos de los electrodos, con el riesgo que implicaría [59].

No requieren de catalizadores porque la velocidad de reducción del oxígeno es muy rápida, y en el cátodo el elemento que se suele utilizar es el níquel; por el contrario, en el ánodo se requiere el empleo de platino como en las pilas PEMFC.

Al igual que ocurre en las pilas de intercambio de protones (PEMFC), el hidrógeno se separa de los electrones y protones, pero en este caso solamente los electrones alcanzan el cátodo, consiguiendo energía eléctrica. El oxígeno que entra en el cátodo es dividido en iones que atraviesan el electrolito hacia el ánodo, juntándose con los protones que habían permanecido ahí de la reacción anterior y generando agua. Entonces, las reacciones producidas serían las expuestas en las Ecuaciones 2.38, 2.39 y 2.40:

- Ánodo:



- Cátodo:



- Reacción global:



Para concretar un poco más en el funcionamiento de la pila alcalina, se sabe que pueden trabajar a temperaturas de entre 50 y 200°C [27], donde mayores temperaturas implican mayores presiones del sistema.

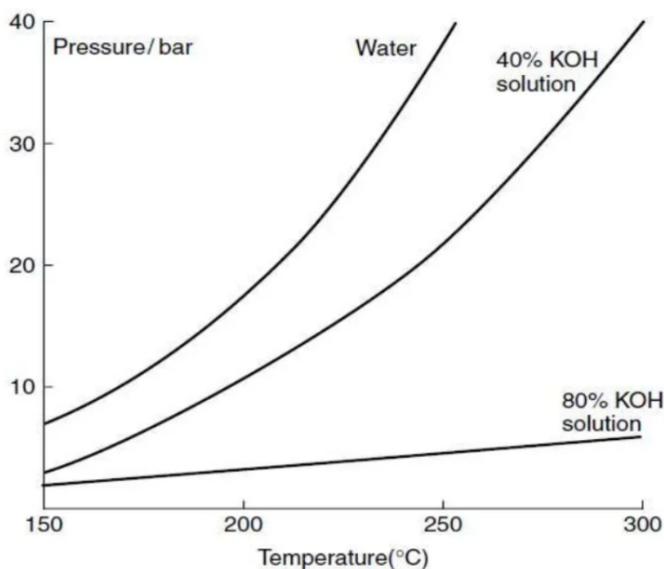


Figura 2.21: Gráfico comparativo temperatura-presión en las pilas AFC. Fuente: [60]

También hay que considerar la condensación en la disolución del electrolito, pudiendo llegar a estar entre un 35-40% a bajas temperaturas, pero alcanzando porcentajes en torno al 85% en peso a temperaturas elevadas. Además, este tipo de pilas de combustible pueden alcanzar eficiencias del 70%, siendo las más eficientes entre los distintos tipos de pilas de combustible a estudiar. Entonces, una figura que puede visualizar de la mejor manera posible el funcionamiento y estructura de una pila de combustible alcalina es la 2.22 [61]:

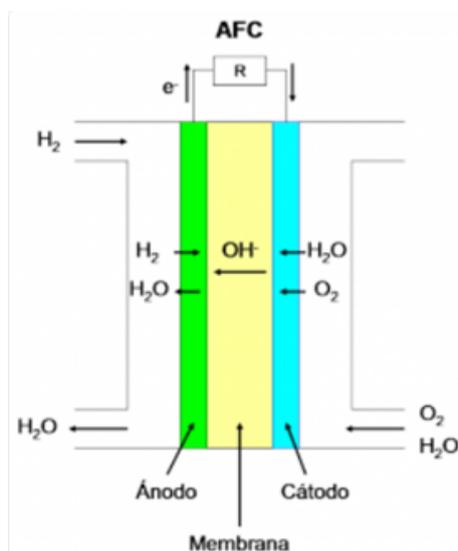


Figura 2.22: Estructura y funcionamiento simplificado de una pila de combustible alcalina.
Fuente: [62]

Tipos de pilas AFC

Existen tres tipos de pilas de combustible alcalinas:

1. *Electrolito móvil*: En ellas, la solución de hidróxido de potasio es bombeada a lo largo de la pila de combustible. Luego, el hidrógeno en circulación es entregado al ánodo, donde más tarde se producirá el agua como residuo de la reacción. El hidrógeno luego evaporará el agua, y éste proviene de un cilindro de gas comprimido, consiguiendo la circulación por el sistema mediante eyectores o bombas, en función del tipo de sistema.

La ventaja principal de las pilas alcalinas de electrolito móvil es que el propio electrolito puede ser desechado y reemplazado de tiempo en tiempo, lo cual además será necesario para el correcto funcionamiento de la pila AFC. En cambio, tiene alguna desventaja, como la necesidad de equipamiento extra para su operación adecuada, o la mayor dificultad que se obtiene a la hora de diseñar un sistema que pueda funcionar en cualquier orientación [58].

2. *Electrolito estático*: En este caso, la solución de hidróxido de potasio está incorporada en un material matriz con excelente porosidad, fuerza y resistencia a la corrosión, pero ello implica menor seguridad si se quiere utilizar este tipo de sistemas en el público en general.

Para el funcionamiento, el cátodo necesita oxígeno puro. Luego, el hidrógeno circula por él y el resto de los pasos son iguales que en las pilas de electrolito móvil. Una

característica particular es que el agua residual puede ser empleada para beber o cocinar. También es necesario la adición de un sistema de refrigeración, cuya configuración depende del método que se quiera seguir.

Una de las grandes ventajas de este sistema es que el electrolito no requiere de bombeo, permitiendo una mayor sencillez de fabricación de la pila y mayor facilidad para que trabaje correctamente en cualquier orientación. En cambio, el problema de gestión del agua es muy parecido al de las pilas de combustible PEMFC, aunque es mucho menos grave, ya que la solución de hidróxido de sodio permite un menor crecimiento de la cantidad de agua que si se emplease agua pura, por lo que el ratio de evaporación de este tipo de sistemas será muy inferior [59].

3. *Con combustible disuelto*: Aunque su uso no es específicamente bueno para sistemas de altas potencias, es el tipo de pila de combustible más sencillo de fabricar, corroborando la afirmación de la sencillez de las pilas de alcalinas. De hecho, este tipo de pilas AFC ha sido históricamente empleado en demostraciones y otros eventos similares. Estas pilas se estructuran como en la figura 2.23:

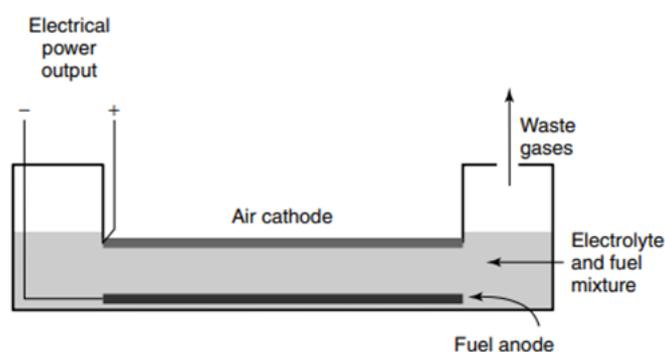


Figura 2.23: Estructura de una pila alcalina con combustible disuelto. Fuente: [27]

Como se puede atisbar, el electrolito es la solución de hidróxido de sodio con un combustible disuelto mezclado como puede ser la hidracina. Luego, tenemos un ánodo de combustible que utiliza como catalizador al platino. Además, el combustible también está en contacto con el cátodo. Esto hace que el problema del combustible sea mucho más severo (debido al platino), aunque en este caso no es muy significativo, ya que no se emplea platino como catalizador en el cátodo, por lo que la capacidad de reacción del combustible en el cátodo es muy baja.

La hidracina es el combustible preferido, ya que es capaz de disociarse con hidrógeno y nitrógeno en un electrodo de la pila de combustible. Entonces, el hidrógeno reacciona de forma rutinaria, produciendo la energía eléctrica de igual manera que en los otros tipos de pilas de combustible alcalinas. El gran problema de este tipo de sistemas, a pesar de su sencillez, bajo coste, compacidad y facilidad de reabastecimiento del combustible es la propia hidracina, la cual es tóxica y explosiva, por lo que no es recomendable un uso extendido de la misma por su escasa seguridad [27].

PILA DE COMBUSTIBLE DE METANOL (DMFC)

Como se explicó en el desarrollo previo de almacenamiento y obtención del hidrógeno, este elemento tiene alta densidad energética, lo que provoca que su almacenamiento sea muy complicado, más aún si se quiere emplear en aplicaciones móviles como vehículos terrestres o aéreos.

Entonces, una alternativa muy interesante es la de la utilización del metanol directamente como combustible, resolviendo todos los problemas relacionados con el hidrógeno. Además, el metanol es un combustible líquido que se encuentra ampliamente disponible y con muy bajo coste, con una densidad energética semejante a la gasolina. Entonces, si se empleara el metanol en las pilas de combustible de forma directa, el peso resultante de cualquier tipo de pila se vería reducido de forma significativa [63].

La densidad energética neta del metanol es mucho más elevada que cualquier otra opción disponible actualmente que sea viable económicamente, siendo ésta la principal ventaja del empleo del metanol en las pilas de combustible. Otras ventajas importantes pueden ser la simplicidad del sistema o la facilidad de repostaje del metanol en comparación con el hidrógeno. Por último, uno de los aspectos clave es la seguridad del combustible, el cual tiene tantas incógnitas y peligrosidades como el hidrógeno, por lo que esa cuestión no sería un agravante para su utilización en el mercado global.

El problema más preocupante de las pilas DMFC es que el procedimiento de reacciones en el ánodo ocurre de manera mucho más lenta que en otros tipos de pilas, debido a que la oxidación del metanol es un proceso mucho más complejo, que requiere de mayor tiempo para que se complete. Esto implica que las pilas de combustible tipo DMFC tengan mucha menor potencia que otros sistemas que emplean hidrógeno en su funcionamiento. Otro gran problema es el crossover del combustible a zonas que no debería llegar. Esto se debe a que la base de funcionamiento de este tipo de pilas es como en las PEMFC, donde hay una membrana de intercambio de protones. Entonces, se absorbe metanol, mezclándose rápidamente con agua y alcanzando el cátodo, lo que implica en peores rendimientos de las pilas DMFC [64].

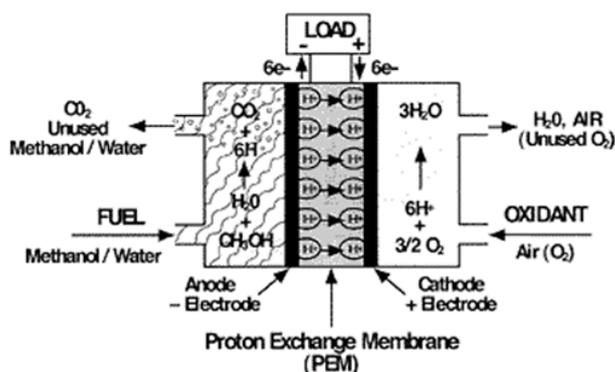


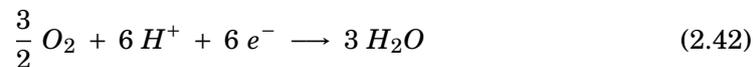
Figura 2.24: Estructura de una pila de combustible de metanol directo. Fuente: [65]

Las reacciones que se producirían en una pila DMFC son las siguientes:

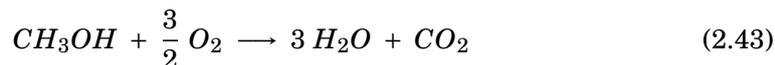
- Ánodo:



- Cátodo:



- Reacción global:



En este tipo de pilas de combustible, su temperatura de operación oscila entre los 20 y los 90°C de forma ideal, aunque realmente llegan a temperaturas entre 60 y 130°C, las cuales son mayores que en las pilas PEMFC. Además, en las pilas DMFC se emplean concentraciones de metanol entre el 2 y el 4%, por lo que no pueden conseguir potencias elevadas [52].

El problema del crossover

En las pilas DMFC, ya se ha explicado que se emplean membranas de intercambio de protones como en las PEMFC, ya que el uso de electrolitos alcalinos conllevaría a la formación inevitable de carbonatos, los cuales siempre se quieren evitar.

El mayor inconveniente del uso de electrolitos PEM es el crossover del metanol. La razón de que suceda este fenómeno de forma tan severa es que el metanol se mezcla muy rápido con agua, extendiéndose por el agua. Esto hace que el metanol llegue al cátodo, el cual dispone de un catalizador de platino, lo que provoca una rápida oxidación en el cátodo. Además, esto no sólo implica un malgasto de combustible, sino que también conllevará una reducción del voltaje de la celda.

Por lo tanto, con el objetivo de reducir este agravante en las pilas DMFC, existen cuatro métodos experimentales que los diseñadores han conseguido:

1. El catalizador del ánodo se hace que sea lo más activo posible, atendiendo a un coste razonable. Esto resulta en que el metanol reaccione de forma adecuada en el ánodo, evitando en gran medida que el combustible se difunda por el electrolito y llegue al cátodo.
2. La inyección de combustible en el ánodo ocurre de forma controlada, por lo que cuando haya baja corriente no habrá exceso de metanol. Como es lógico, mientras menor sea la concentración de combustible en el ánodo, menor cantidad atravesará el electrolito llegando al cátodo.
3. Empleo de electrolitos más viscosos que los empleados normalmente, con lo que se conseguiría mitigar cualquier efecto de crossover, pero se producirá un incremento de la resistencia de la celda. Entonces, se necesitará un compromiso, el cual siempre será que el electrolito sea más denso que en las pilas de combustible a partir del hidrógeno. Tal es así, que la densidad rondará 0,15-0,20 mm^3 , mientras que en las pilas PEMFC será de 0,05-0,10 mm^3 .

4. Si además de la consideración de la densidad del electrolito, añadimos la revisión de la composición de este, es obvio que también tendrá un efecto positivo. Entonces, mejorando los materiales utilizados en el ánodo, podemos reducir el trasvase de metanol de un electrodo al otro y mejorar el rendimiento de las pilas DMFC.

Además, también existen otros métodos de reducción del crossover de metanol que se encuentran en fases más primitivas del desarrollo, pero que en un futuro no muy lejano también podrían ser aplicables con éxito:

- Empleo de catalizadores que no sean de platino en el cátodo, lo que permitiría que se parase la reacción del cátodo y se eliminaría la caída de voltaje. Sin embargo, existen una serie de inconvenientes con este método. El primero es que los catalizadores que no promuevan la oxidación les costará mucho más esfuerzo la reacción del oxígeno con los iones positivos en el cátodo, provocando que no existiese un aumento del rendimiento de las pilas DMFC. Otro problema es que, al no finiquitar completamente el problema del crossover, existirá una cierta cantidad de platino que será malgastada debido a su evaporación. Por lo tanto, a pesar de ser una solución interesante, no es completa y necesita más investigación para ser viable.
- El uso de una película en el electrolito que sea porosa con los protones, pero no con el metanol. Entonces, si se encontrase el material adecuado para este propósito, se habría resuelto el problema.
- Desarrollar membranas de intercambio de protones más conductoras, permitiendo membranas más densas, y reduciendo el crossover de metanol [27].

Producción de metanol

El metanol se produce en grandes cantidades anualmente, pero casi la mitad de este es empleado en la fabricación de formaldehído, y alrededor de un 20% es usado en la producción del MTBE. Por el contrario, tan sólo una pequeña cantidad del metanol se emplea como combustible. Este combustible puede ser producido a través de casi cualquier combustible hidrocarbonado, como el gas natural. El primer paso para su obtención es muy sencillo, reaccionando con vapor. Esto produce una mezcla de hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono, los cuales reaccionan para formar metanol. Para ello, hay dos posibles reacciones [66]:



Ambas reacciones resultan en un menor número de moles de sustancia, ayudados por altas presiones. De hecho, la reacción sucede casi de inmediato, con un catalizador apropiado de alta presión, pero nunca a presiones excesivas.

Gracias a que el metanol es un compuesto muy utilizado en la industria, su fabricación se ha visto envuelta en grandes investigaciones y desarrollos hasta conseguir un proceso lo más eficiente posible. Además, aunque la mayor parte del metanol es obtenida a partir de gas natural, existe un porcentaje del mismo que se consigue usando biomasa, con lo que se puede deducir que es un compuesto que permite ser usado como combustible que puede llegar a ser suficientemente sostenible como para emplearse como alternativa propulsiva interesante en el futuro más próximo.

Por último, cabe considerar el proceso de almacenamiento del metanol. Como ya se ha comentado anteriormente, este compuesto reacciona muy rápido con el agua, mezclándose y oxidando el cátodo de las pilas de combustible. Tal magnitud tiene este inconveniente, que a la hora de almacenarlo se necesita excesiva precaución con la mezcla de agua, evitándose en la medida de lo posible, debido a que se podrían oxidar los tanques de almacenamiento construidos a partir de aceros ordinarios. Es por eso por lo que el empleo de vidrio o de aceros inoxidable puede ser una solución de almacenaje. Otro problema a tener en cuenta es que el metanol es un buen disolvente, por lo que el empleo de ciertos plásticos puede no ser recomendado en ciertas ocasiones.

Entonces, a la hora de almacenar grandes cantidades de metanol, se requieren medidas especiales en términos de ventilación y seguridad contra incendios, debido a su peligrosidad en estos apartados. De hecho, los tanques de almacenamiento de metanol tienen que ser diseñados de tal forma que sea casi imposible sacar el metanol, a no ser que sea para conectarlo directamente a un sistema DMFC [27] [66].

PILA DE COMBUSTIBLE DE ÁCIDO FOSFÓRICO (PAFC)

En esencia, las pilas PAFC trabajan de igual manera que las pilas PEMFC, ya que tanto ánodo como cátodo reaccionan igual a como lo harían en pilas de intercambio de protones. La mayor diferencia existente es que el electrolito, aunque también funcione como un conductor de protones, no está formado por una membrana de intercambio de protones, sino que en las pilas PAFC el electrolito es un ácido inorgánico, normalmente ácido fosfórico, que será el encargado de conducir los protones de ánodo a cátodo. Por lo demás, las reacciones electroquímicas tienen lugar en catalizadores con carbono, donde el platino se encuentra impregnado, al igual que como se ha explicado anteriormente en la sección de las pilas de combustible PEMFC [67].

La utilización de ácido fosfórico como electrolito proviene de que éste es el único ácido inorgánico común con la suficiente estabilidad térmica, química y electroquímica, y con baja volatilidad, como para ser capaz de funcionar como electrolito en una pila de combustible. Además, posee valores de conductividad de iones elevados a temperaturas también elevadas (entre 160 y 220°C [68]), lo cual implica que otros ácidos comunes como el sulfúrico o el clorhídrico no sean capaces de soportar esas temperaturas con un cierto grado de estabilidad y seguridad frente a la volatilidad. Entonces, con el ácido fosfórico funcionando como electrolito, rellena una matriz porosa capaz de resistir al PTFE y al carburo de silicio.

En este tipo de pilas (Figura 2.25), el combustible empleado es el hidrógeno (como en las pilas PEMFC), siendo destacable que la presencia de partículas de monóxido de carbono no es de gran relevancia porque las temperaturas de operación de las pilas PAFC prohíben al CO la obstaculización del electrodo (como sí que puede ocurrir en otros tipos de pilas, como las PEMFC). Además, el dióxido de carbono (CO_2) que se forma en la reacción no presenta ninguna problemática añadida, ya que el empleo de ácido fosfórico como electrolito consigue evitar la formación de carbonatos que puedan ser perjudiciales para el correcto funcionamiento de las pilas PAFC.

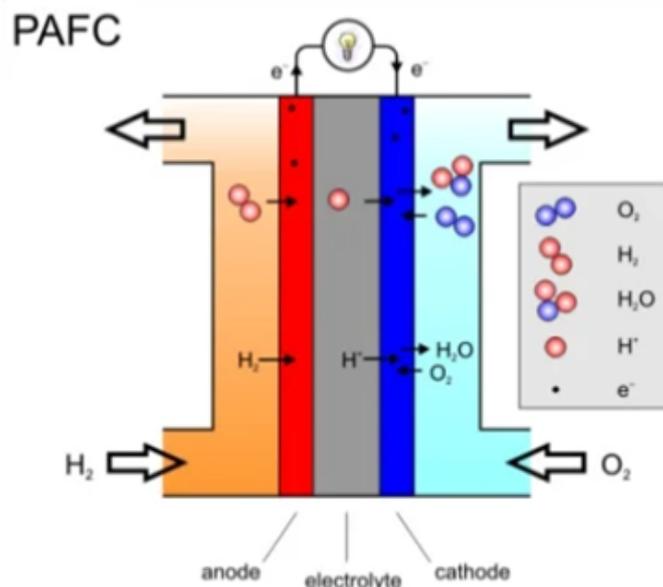


Figura 2.25: Estructura de una pila de combustible de ácido fosfórico (PAFC). Fuente: [69]

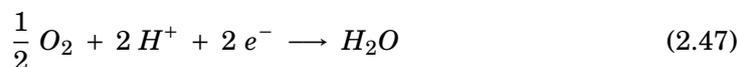
Como el ácido fosfórico que se emplea suele ser 100% puro, para evitar llegar al punto de congelación (el cual se encuentra en 42°C), se opta por mantener la temperatura de trabajo de la pila siempre por encima. Aunque la presión de vapor en este caso es baja, las altas temperaturas de operación provocan una pérdida inevitable de ácido a lo largo del tiempo, la cual variará en función de las condiciones a las que funcione la pila. Por ello, será necesario un control del nivel de ácido fosfórico en la pila, rellenando cuando sea necesario o teniendo una reserva suficiente en la matriz antes del comienzo de la puesta en marcha de la misma durante su vida proyectada [27].

Ahora bien, las reacciones que se producen en una pila de combustible de ácido fosfórico son las siguientes [70]:

- Ánodo:



- Cátodo:



- Reacción global:



Como se puede observar de las reacciones químicas expuestas anteriormente, en el ánodo se produce la oxidación del hidrógeno, generando electrones que proporcionarán la energía eléctrica, e iones positivos (protones) H^+ . Luego, los protones circulan por el electrolito de ácido fosfórico líquido, llegando al cátodo, donde estos protones, junto con los electrones y oxígeno que entra en el cátodo, reaccionan para formar agua.

En las pilas PAFC, al funcionar en medios ácidos, la reducción de oxígeno en el cátodo sucede un poco más lenta que en las pilas de medio básico (como por ejemplo las PEMFC), implicando una mejora en la fabricación de los catalizadores de platino, ya que el ácido fosfórico favorece la corrosión del cátodo y recogiendo partículas de platino, menguando la capacidad de los catalizadores.

A pesar de esta serie de inconvenientes, las pilas de combustible de ácido fosfórico se han convertido en las primeras pilas en fabricarse a gran escala, ya que son capaces de proporcionar grandes potencias por períodos de tiempo prolongados (200 kW durante cuarenta mil horas), consiguiendo eficiencias del 40%, que, aunque sea menor que la eficiencia en pilas alcalinas, siguen siendo eficiencias aceptables para el desarrollo existente en las pilas de combustible en la actualidad [71].

Electrodos y catalizadores

Como en las pilas PEMFC, se emplean electrodos de difusión de gas, donde el platino se utiliza como electrocatalizador. Luego, el carbono está bordeado por PTFE (con un 30 o 50% en peso [27]), formando una estructura soporte del electrodo. De hecho, el carbono tiene una serie de funciones importantes:

- Dispersar al catalizador de platino para asegurar una buena utilización del propio catalizador.
- Proveer de poros en el electrodo para conseguir la máxima difusión de gas al catalizador y a la superficie del electrodo y del electrolito por partes iguales.
- Incrementar la conductividad eléctrica del catalizador.

Al igual que ha sucedido en las pilas con membrana de intercambio de protones, la dispersión del platino por el carbono ha permitido una notable reducción del empleo de este metal.

El uso de PTFE sobre los bordes de las partículas de carbono formando una estructura totalmente integral y porosa, la cual está soportada en un sustrato de carbono poroso. Este sustrato sirve como soporte para la capa del electrocatalizador, adicionalmente actuando como acumulador de corriente. Entonces, los sustratos de apoyo de carbono tienen una porosidad de alrededor del 90%, la cual se ha visto reducida al 60% con la introducción de un 40% en peso de PTFE [72].

Stack

Básicamente, consiste en una disposición de placa bipolar con ranuras (al igual que sucede en las pilas PEMFC), el ánodo, la matriz del electrolito, y por último el cátodo. Como es de esperar, las placas bipolares sirven como separación de las diferentes celdas de combustible y como conexión de las mismas en serie, además de proporcionando el suministro de gas necesario al ánodo y al cátodo, respectivamente. En una pila de ácido fosfórico común, existen alrededor de unas cincuenta celdas de combustible en serie para conseguir obtener el nivel de voltaje requerido para su uso.

Al principio, las placas bipolares que se empleaban en este tipo de pilas consistían en una única pieza de grafito acanalada. Aquí surgía un inconveniente: El encarecimiento en el precio debido a las máquinas que realizaban los canales, ya que es un método de fabricación muy complejo y caro en la industria. Actualmente, los nuevos métodos de fabricación y los nuevos diseños de placas bipolares han permitido un abaratamiento de estas placas. En las placas bipolares multicomponente, una placa delgada de carbono sirve para separar los reactivos en cada celda del stack, además de utilizar placas porosas con canales para dirigir el flujo de los gases por las celdas empleadas. Esto es conocido como construcción de sustrato acanalado, la cual tiene una serie de ventajas importantes [73]:

- Las superficies planas entre la capa catalizadora y el sustrato permiten una mejor y más uniforme distribución del gas por el electrodo.
- Como los canales están dispuestos en una única dirección, el proceso de fabricación es mucho más directo y sencillo.
- El ácido fosfórico puede ser almacenado en el sustrato, ampliando la durabilidad de la pila de combustible.

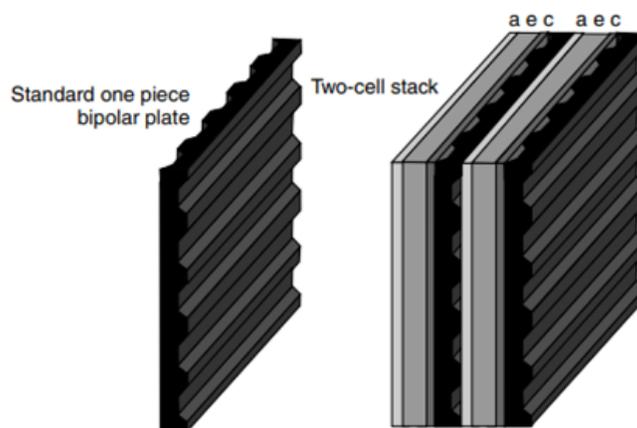


Figura 2.26: Estructura de una placa bipolar con los canales dispuestos en una única dirección. *Fuente: [27]*

Como se puede observar en la figura anterior, la placa bipolar está dispuesta de tal forma que suponga un gran ahorro en la fabricación de las mismas, empleando para ello los canales en una sola dirección. Además, en la imagen de la derecha se puede apreciar cómo quedarían empaquetadas dos unidades de stack de una pila de combustible de ácido fosfórico, de igual forma que se ha explicado con anterioridad.

Por último, es de especial interés comentar la refrigeración de los stacks de las pilas PAFC, pudiendo emplear tanto líquidos como gases para refrigerar tanto los canales como las zonas clave de la celda de combustible, y normalmente se realiza cada cinco celdas. El empleo de refrigerantes líquidos permite un mejor funcionamiento de la expulsión de calor en la operación de la pila, pero requieren de sistemas más complejos. En cambio, al emplear gas se consigue una mayor simplicidad, fiabilidad y bajo coste. De entre ambos métodos, actualmente la refrigeración líquida es la más empleada [72].

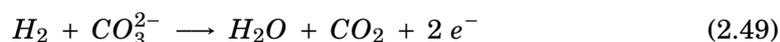
PILA DE COMBUSTIBLE DE CARBONATO FUNDIDO (MCFC)

En este tipo de pilas, el electrolito es una mezcla fundida de metales carbonatados como litio y sodio o litio y potasio, embebidos en una matriz cerámica de alúmina de litio ($LiAlO_2$); todo ello operando a temperaturas elevadas (alrededor de 650°C) donde los carbonatos alcalinos forman una sal fundida conductora, con iones carbonatos (CO_3^{2-}) que otorgan la conducción iónica [58].

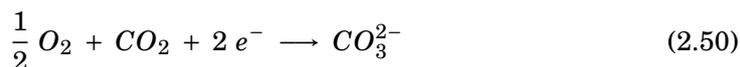
Para el correcto funcionamiento de las pilas MCFC, es necesario proporcionar dióxido de carbono al cátodo además del oxígeno, el cual será transformado en los iones carbonatados, que luego conseguirán transferir estos iones entre ánodo y cátodo. En el ánodo, los iones carbonatados vuelven a ser dióxido de carbono. Entonces, en estas pilas de combustible se produce una transferencia neta de dióxido de carbono del cátodo al ánodo, donde un mol del mismo es transportado al ánodo junto con dos moles de electrones.

Resumiendo, las reacciones químicas producidas en ambos electrodos son [74]:

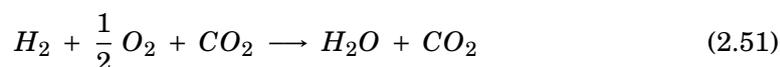
▪ Ánodo:



▪ Cátodo:



▪ Reacción global:



En las reacciones expuestas con anterioridad, se puede apreciar la necesidad de utilizar dióxido de carbono en el cátodo y de expulsarlo en el ánodo, por lo que en la reacción global se verá reflejada esta necesidad con este compuesto. Además, al reaccionar el hidrógeno con el ion de carbonato se generará como residuo agua, la cual habrá que gestionar posteriormente (en estas pilas será más sencillo por las altas temperaturas de operación).

Normalmente, el dióxido de carbono generado en los ánodos es reciclado a los cátodos para consumirlo (como ya se dijo en el párrafo anterior). Esto puede ser considerado una desventaja y complicación adicional, pero puede ser resuelto fácilmente, añadiendo un aparato quemador que convierte cualquier resto sin emplear de hidrógeno o combustible gaseoso en agua y dióxido de carbono. Luego, los gases de escape del quemador son mezclados con aire fresco e introducidos en el interior del cátodo. Entonces, este proceso es igual de complejo que en el resto de las pilas de combustible que operan a altas temperaturas, ya que el proceso también sirve para precalentar el aire que reacciona, quemar el combustible que no se utilice, y permitir el empleo del calor malgastado para su uso al final del ciclo u otros propósitos.

Otra alternativa al método anterior con menor popularidad es la de emplear algún tipo de instrumento, como una membrana separadora, que separa el dióxido de carbono del gas de salida del ánodo y lo introduce en el gas de entrada del cátodo [27]. La gran ventaja de este procedimiento es que cualquier parte de combustible gaseoso sin utilizar se puede reciclar para emplearlo en otras operaciones. Por último, cabe destacar que hay otra opción a ambos métodos, que no es más que suministrar el dióxido de carbono a partir de un

dispositivo externo, lo cual es interesante en el caso de disponer de un suministro de este gas disponible.

En cuanto a los materiales empleados como catalizadores en los electrodos, como la pila MCFC opera a temperaturas bastante elevadas, por lo que el níquel en el ánodo, y el óxido de níquel en el cátodo pueden ser los mejores catalizadores a la hora de realizar las dos reacciones electroquímicas necesarias. Ello hace que metales como el platino no sean requeridos. Otra gran diferencia con el resto de las pilas es la capacidad que tienen para convertir directamente monóxido de carbono en combustibles de hidrocarburos reformados.

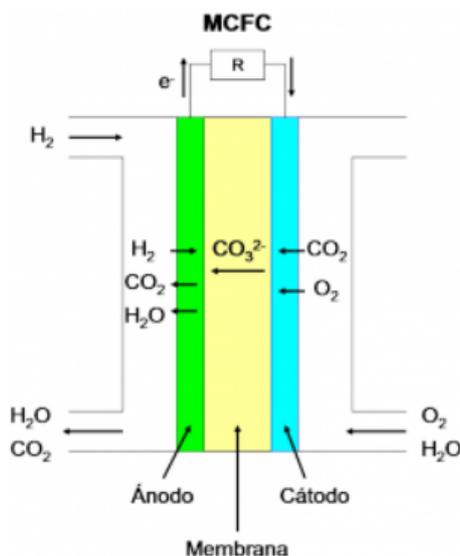


Figura 2.27: Estructura simplificada de una pila MCFC. Fuente: [62]

Estas pilas de combustible, al operar a altas temperaturas, permiten que el proceso de reformado interno pueda ser realizado en ellas, siendo un punto fuerte a favor. En el reformado interno, el vapor es añadido al combustible gaseoso antes de entrar en el stack de la pila. Una vez dentro, el vapor y el combustible reaccionan con la presencia de un catalizador adecuado de acuerdo con las reacciones expuestas en la página anterior. Por último, el calor para las reacciones de reformado endotérmicas es suministrado por las reacciones electroquímicas de la celda de combustible [75].

Todo lo explicado anteriormente implica que las altas temperaturas ofrecen la oportunidad de conseguir sistemas con gran eficiencia y flexibilidad en el empleo de los combustibles disponibles en comparación con las pilas de baja temperatura. Sin embargo, estas temperaturas también ocasionan problemas de estabilidad ante la corrosión y duración de los componentes, sobremanera en el ambiente tan agresivo existente en el electrolito de carbonato fundido, que al final es lo que diferencia a estas pilas del resto de tipos explicados.

Implicaciones del empleo de carbonatos fundidos

Las pilas MCFC son similares a las PAFC en el sentido de que ambas emplean electrolitos líquidos introducidos en una matriz porosa. En las pilas PAFC, el uso de PTFE como mantenedor de la estructura y estabilidad de la matriz, pero en las MCFC no existen materiales disponibles que sean lo suficientemente estables para emplearlos a las temperaturas requeridas. Por lo tanto, se necesita encontrar otro tipo de aproximación para conseguir la

estabilidad de la interfaz del combustible y el electrolito en electrodos porosos. Coordinando adecuadamente los diámetros de los poros en los electrodos con los poros de la matriz del electrolito, la cual contiene los más pequeños, se establece una distribución como la descrita en la figura 2.28:

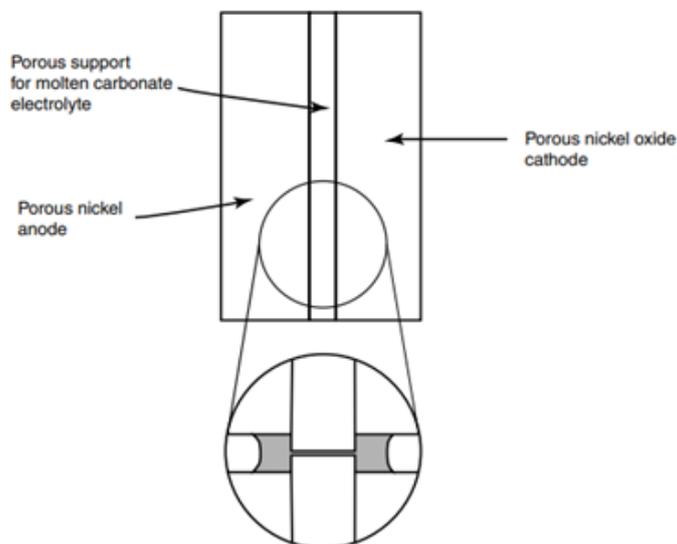


Figura 2.28: Equilibrio de los electrodos porosos junto con el electrolito. *Fuente: [27]*

Esta disposición permite a la matriz del electrolito permanecer totalmente completa de los carbonatos fundidos, mientras que los electrodos son parcialmente completados, dependiendo de la distribución del tamaño de los poros. Por supuesto, el electrolito tiene los poros más pequeños, por lo que se rellenará en su totalidad. Por el contrario, los poros de electrodo más grandes serán sólo parcialmente rellenos. Entonces, un correcto mantenimiento y gestión del electrolito es clave para conseguir la distribución óptima del mismo, ya que influirá ampliamente en la necesidad de conseguir gran rendimiento y durabilidad con las pilas MCFC (esta particularidad es específica de este tipo de pilas de combustible, donde pueden surgir procesos no deseados a solventar a la hora de realizar este procedimiento) [76].

Influencia de la temperatura

Una de las características ya comentada durante varias ocasiones a lo largo de la explicación de las pilas MCFC es la elevada temperatura a la que funcionan. Es por ello por lo que, gracias a estas temperaturas, además del empleo de níquel en los electrodos, se puede conseguir hacer funcionar correctamente a estas pilas con gas natural como combustible, donde el níquel actúa como catalizador, reformando este combustible y consiguiendo proporcionar dióxido de carbono e hidrógeno.

De todos modos, este empleo como catalizador del níquel puede hacer que sea soluble en el cátodo cuando actúa como óxido, transformándose en carbonatos fundidos por las altas temperaturas, que puede llegar a provocar una difusión de los iones de níquel positivos hacia el ánodo, pudiendo llegar a obstruir ambos electrodos y degradando el cátodo. Para reducir al máximo la aparición de este fenómeno, se puede optar por añadir junto al níquel cantidades pequeñas de calcio, bario o estroncio al electrolito, o también emplear cátodos

alternativos como el óxido de cobalto y litio ($LiCoO_2$), el cual dispone de una velocidad de disolución más pequeña [77].

Otro gran factor a tener en cuenta respecto a las altas temperaturas de operación de las pilas MCFC es la posibilidad existente de cogenerar electricidad mediante turbinas auxiliares que aprovechen los gases calientes que son desechados por la pila de combustible, aprovechando estos y obteniendo rendimientos mayores, pasando del 60 al 85% en aplicaciones de entre 50 KW y 5MW [27]. Además, el empleo de electrolito líquido implica que este tipo de pilas sean interesantes para su introducción en aplicaciones estacionarias, pero no en aplicaciones móviles como vehículos terrestres o aéreos.

Por último, cabe considerar que la gestión del agua será menos relevante que en otras pilas como las PEMFC, ya que las temperaturas altas permiten que ésta se encuentre en estado gaseoso y sea más fácil su gestión y expulsión de la pila, no como en las PEMFC, donde el agua líquida requiere de una crítica gestión de la misma para conseguir un correcto funcionamiento.

PILA DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO (SOFC)

Las pilas de combustible SOFC se diferencian del resto de pilas en que son dispositivos completamente sólidos, con un material cerámico conductor de iones como electrolito, por lo que representan un concepto más sencillo que el resto de los sistemas de celdas de combustible descritos anteriormente, ya que solamente existen dos fases en su proceso de funcionamiento: sólida y gaseosa. Los problemas que surgían en las pilas PAFC y MCFC sobre la gestión del electrolito no suceden y las altas temperaturas implican que no será necesario el empleo de electrocatalizadores a base de metales preciosos. Además, al igual que en las MCFC, tanto el hidrógeno como el monóxido de carbono pueden funcionar como combustibles de este tipo de pilas.

Las pilas SOFC son muy parecidas a las MCFC en el hecho de que el ion negativo es transferido del cátodo al ánodo por el electrolito, formando agua en el ánodo también. Hasta hace poco tiempo, las pilas SOFC estaban basadas en la fabricación de un electrolito de zirconio estabilizado mediante un pequeño porcentaje de óxido de itrio (Y_2O_3). A partir de los 800°C, el zirconio se vuelve conductor de los iones negativos de oxígeno, consiguiendo que estas pilas de combustible trabajen a temperaturas que rondan los 800-1100°C. Esto representa el mayor reto de temperatura de entre todos los tipos de pilas, que presentará dificultades a la hora de su fabricación y durabilidad, pero ventajas a la hora de realizar ciclos combinados [78].

El ánodo de las pilas SOFC suele estar fabricado con cermet de zirconio (el cermet es una mezcla de material cerámico y metal), donde el componente metálico es el níquel, escogido respecto de otros metales por su elevada conductividad eléctrica y estabilidad en reducciones químicas y altas temperaturas. Además, la presencia del níquel representa una gran ventaja, ya que puede ser empleado como catalizador de reformados internos, donde existe la posibilidad de llevar a cabo reformados internos directamente en el ánodo.

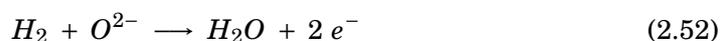
Por otro lado, el material del cátodo representa un gran reto en este tipo de pilas. Al principio del desarrollo, se optó por el empleo de metales preciosos, pero poco a poco se fue viniendo a bajo por los altos costes que implicaban. Actualmente, la mayoría de estos cátodos están hechos por óxidos electrónicamente conductores, o por una mezcla de éstos y

cerámicos conductores de iones, siendo el material más común en los cátodos el estroncio dopado con manganeso de lantano [79].

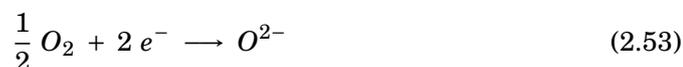
Una gran ventaja de las pilas SOFC respecto de las MCFC es que no requieren del reciclado del dióxido de carbono, simplificando el sistema. La no presencia de dióxido de carbono en el cátodo significa una simplificación del mismo, al no reaccionar con los elementos que se encuentran en el cátodo en la operación rutinaria de la pila. En cambio, una gran desventaja es que tiene peores eficiencias que las MCFC, pero pueden ser operadas a densidades de corriente mucho más elevadas (superiores a los 1000 mA cm^{-2} [27]).

En cuanto al funcionamiento específico, las reacciones químicas que se producen en las pilas SOFC son las siguientes [80]:

- Ánodo:



- Cátodo:



- Reacción global:



Como se puede comprobar, mediante la utilización de hidrógeno puro en el ánodo y junto con el ion negativo de oxígeno se forma agua y los electrones que luego sirven para generar el trabajo útil de la pila de combustible. Antes, en el cátodo se hace reaccionar el oxígeno para formar los iones negativos de oxígeno con los electrones. Todo ello hace ver que la reacción global quedará de tal forma que, con el empleo de hidrógeno y oxígeno se obtiene agua como producto residual, que se gestionará adecuadamente en los siguientes pasos del funcionamiento de la pila SOFC. A continuación, se puede corroborar el funcionamiento y estructura de la pila en la figura 2.29:

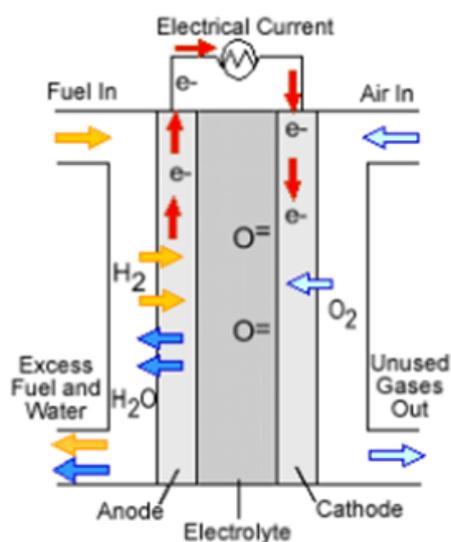


Figura 2.29: Estructura y funcionamiento básico de una pila de combustible SOFC. Fuente: [81]

Un detalle muy importante es que el electrolito no sea conductor de electrones durante la operación de la pila, especialmente mientras se transfieren los iones del cátodo al ánodo, porque puede tener lugar una pérdida de corriente que no sirva como trabajo eléctrico posterior, perdiendo parte del trabajo útil.

Las altas temperaturas de funcionamiento de las pilas SOFC exigen que haya un aporte de energía continuado que, en un principio, puede suponer una reducción de la eficiencia energética de este tipo de pilas, las cuales reaccionan exotérmicamente y son capaces de liberar grandes cantidades de calor. Esto permite la utilización de dispositivos auxiliares que se aprovechen de los gases de salida que también están a alta temperatura para mover turbinas externas, mejorando la eficiencia de las pilas SOFC hasta porcentajes mayores del 90%, consiguiendo rendimientos nunca antes vistos en otros tipos de pilas de combustible en cuanto a la generación de electricidad. Además, otra gran ventaja de las elevadas temperaturas de operación es la posibilidad de emplear combustibles como el gas natural en vez de hidrógeno, ya que, como en las pilas MCFC, se puede descomponer en hidrógeno y dióxido de carbono y poder continuar correctamente con el funcionamiento de la pila de combustible sin ningún tipo de inconveniente adicional [82].

Como estas pilas trabajan a temperaturas muy elevadas, un aspecto crítico de las mismas es que sus componentes tienen que estar desarrollados y preparados para aguantar ciclos térmicos durante todos los ciclos de encendido y apagado. Entonces, si los materiales y las juntas de unión no soportan estos ciclos, se pueden generar fisuras que hagan escapar al gas y la pila dejaría de funcionar. Es por ello por lo que las pilas SOFC son empleadas en aplicaciones que no requieran de movimiento, ya que la movilidad puede provocar vibraciones y oscilaciones que terminen en fisuras y deterioros prematuros de la pila que no puede soportar para su correcta operación.

Geometría de una pila SOFC

Estas pilas de combustible, a diferencia de la mayoría de los otros tipos, disponen de la oportunidad de conformarse de dos maneras diferentes:

1. *Geometría tubular*: Inicialmente, el diseño original empleaba un tubo soporte de zirconio poroso con calcio estabilizante, de entre 1 y 2 mm de grosor sobre el cual se depositaban los ánodos cilíndricos. Luego, se introducía el electrolito y, por último, el otro electrodo se depositaba en la parte superior del ánodo. Más adelante, el proceso fue revertido, siendo el cátodo el que se encontraba en el exterior, siendo la geometría empleada durante años. El problema de este tipo de geometría siempre ha sido los altos costes de fabricación y la baja densidad de potencia que proporcionaba. Actualmente, el tubo de soporte de zirconio se ha eliminado de la geometría, siendo fabricados mediante materiales de electrodos de aire, resultando en soportes de aire de electrodos donde el electrolito es depositado, seguido de plasma esparcido en el ánodo, conformando la geometría de la figura 2.30. Además, cabe destacar que los tubos suelen encontrarse en serie y paralelo, en stacks de 24 tubos, lo que supone una mejora de la eficiencia, ya que la conexión existente entre tubos permite una menor pérdida de gases calientes que pueden ser aprovechados por otros tubos [83].

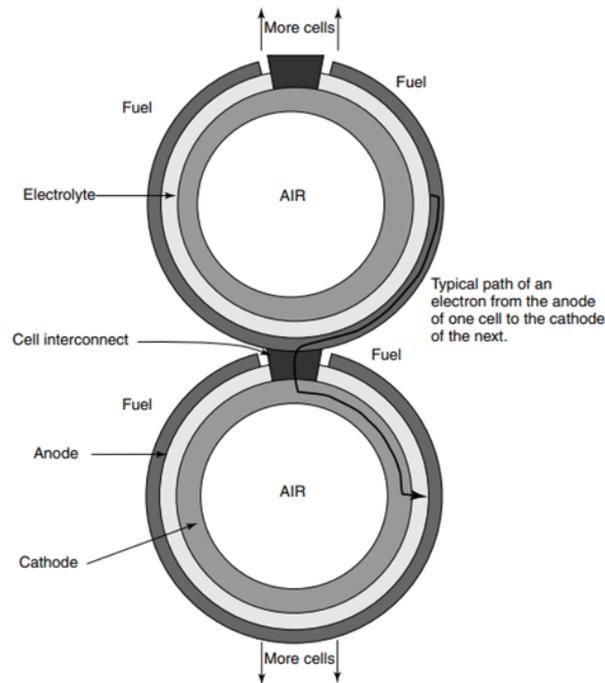


Figura 2.30: Configuración tubular de una pila SOFC. Fuente: [29]

2. *Geometría plana*: El otro gran formato de las pilas SOFC es la geometría plana, la cual ha seguido siendo desarrollada por su parecido respecto al resto de tipos de pilas de combustible, las cuales emplean casi todas este tipo de geometría.

En ellas, la placa bipolar plana permite conectar simplemente en serie las celdas entre ellas, sin tener el largo camino de corriente existente en la geometría tubular, por lo que habrá menores pérdidas de corriente. Ello conllevará a un rendimiento superior del conjunto de celdas y mayores densidades de potencia. Además, requieren de métodos de fabricación mucho más económicos que en la geometría tubular.

Por otro lado, una de las mayores desventajas que pueden tener las pilas SOFC de geometría plana es la necesidad de un buen sellado de las distintas celdas, donde los selladores más compresivos son difíciles de obtener, teniendo que desarrollar cerámicos cristalinos con el objetivo de mejorar la temperatura que soporta el sellado. Además, adicionalmente al sellado, las interfaces entre las diferentes celdas tienden a causar degradación mecánica, por lo que la robustez térmica es fundamental [84].

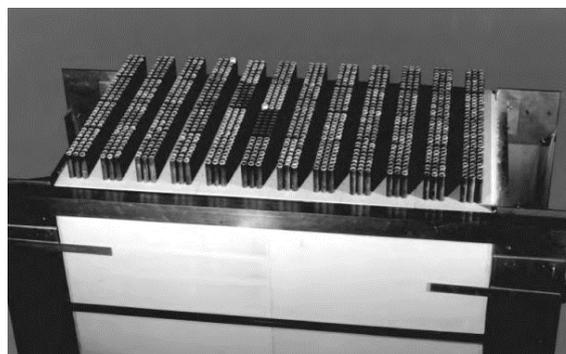


Figura 2.31: Ejemplo de una pila SOFC de geometría plana. Fuente: [27]

Sin embargo, a pesar de los beneficios obvios que manejan este tipo de geometrías, sobre todo en términos de densidad de potencia y eficiencia en comparación con el diseño tubular, muchas organizaciones han abandonado las investigaciones y los desarrollos de la geometría plana debido a los problemas endémicos que acarrea consigo, como son los ciclos térmicos, los cuales son un gran problema en las pilas SOFC planas, o las tensiones que han de soportar, ya que el zirconio sólo puede soportar una pequeña parte, teniendo que lidiar con un problema de base fundamental. Además, el problema del estrés térmico y la complejidad a la hora de fabricar componentes muy delgados han supuesto grandes obstáculos en el desarrollo de las pilas de geometría plana (hasta hace poco tiempo sólo se fabricaban en tamaños superiores a 5x5 cm [27], ya que la tecnología existente no permitía una mejora y reducción del grosor de los componentes, ya que ello conllevaría una reducción de los costes al existir un gran ahorro en materiales y en el propio peso de la pila de combustible).

OTROS TIPOS DE PILA DE COMBUSTIBLE

Hasta este momento se han estado describiendo en detalle los principales tipos de pila de combustible existentes, pero hay una serie de variedades de pilas que son mencionadas de vez en cuando en ciertos medios e investigaciones científicas, siendo algunas consideradas pilas de combustible sin serlo realmente.

De las explicaciones previas se sabe que una pila de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía proporcionada por un combustible en energía eléctrica de forma continuada, siempre y cuando los reactivos sean suministrados a los electrodos. En ellas, ni los electrodos ni el electrolito son consumidos por la operación de la pila. Si bien es cierto que estos componentes se van degradando con el paso del tiempo en operación, nunca van a llegar a ser consumidos en su totalidad. Es por este motivo por el que alguno de los tipos que se van a presentar a continuación han sido llamados pilas de combustible, pero con este detalle a considerar.

Pilas de combustible biológicas

Uno de los tipos más innovadores e interesantes en el futuro es el de la pila de combustible biológica. En ellas, se emplean combustibles orgánicos, como el metanol o el etanol. Sin embargo, el aspecto distintivo para nombrarlas como 'biológicas' recae sobre las enzimas, empleadas en sustitución de los catalizadores convencionales como el platino y que serán capaces de promover las reacciones químicas en el electrodo [85].

Además, estas pilas derivan de combustibles orgánicos que derivan de la naturaleza, por lo que el componente ecológico es evidente. A pesar de todo, este tipo de pilas no están ni lo más remotamente próximas a futuras aplicaciones comerciales, por lo que no pueden ser muy consideradas como un tipo principal de pila de combustible.

En ellas, lo más destacable que las distingue de métodos biológicos es la producción de hidrógeno, donde el ánodo se encargaría de este procedimiento mediante una bacteria o algún otro tipo de materia orgánica similar, y donde luego ese hidrógeno será empleado en una celda de combustible convencional, reaccionando en el cátodo y formando agua y energía eléctrica como productos de las reacciones químicas ocurridas en ánodo y cátodo [86].

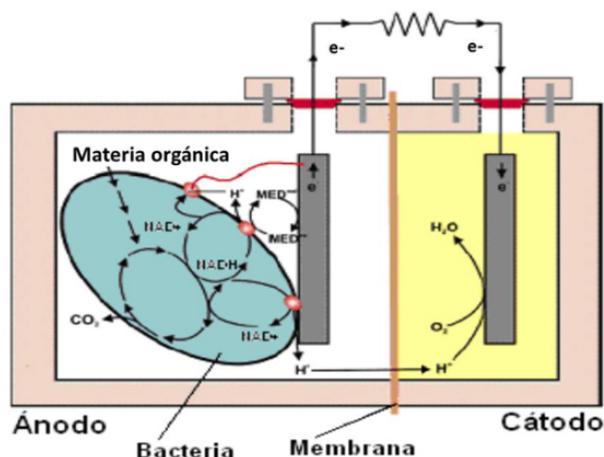
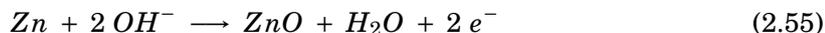


Figura 2.32: Estructura simplificada de una pila de combustible biológica. Fuente: [87]

Pilas de combustible de metal/aire

En este tipo de pilas, las más comunes son las baterías de zinc/aire, aunque aluminio/aire y magnesio/aire son otros tipos de pilas que han sido fabricadas comercialmente. De todas formas, la base de funcionamiento para todos estos tipos es la misma, llegando a denominarse pilas de combustible de zinc.

En el electrodo negativo, el metal reacciona con el electrolito alcalino para formar el hidróxido u óxido de metal. Esto se puede ver, por ejemplo, para el caso más conocido, el zinc [27]:



Los electrones generados circularán por el circuito eléctrico externo hasta el cátodo de aire donde se dispondrán a reaccionar con el agua y el oxígeno para generar más iones de hidróxido (la reacción del cátodo es idéntica a la de las pilas de combustible AFC). Luego, el óxido o hidróxido del metal se supone que debe permanecer disuelto en el electrolito.

Estas pilas destacan por su buena densidad energética, las cuales son muy utilizadas en aplicaciones que requieran grandes tiempos de operación a corrientes bajas, como en audífonos. Existen compañías que están estudiando la posibilidad de desarrollar pilas más grandes de este tipo para ser empleadas en coches eléctricos. Esto es porque se pueden rellenar añadiendo más metal al ánodo, y de ahí proviene que a veces se las considere como pilas de combustible. En cambio, como tanto ánodo y electrolito tienen que ser reemplazados porque son consumidos, no se las puede considerar como tal, sino como baterías recargables [88].

Pilas de combustible regeneradoras

Estas pilas, también conocidas como pilas redox, los reactivos son eliminados de los electrodos durante la carga y son almacenados en tanques, lo que permite grandes capacidades en este tipo de pilas. Luego, serán descargadas devolviendo los reactivos al electrodo.

Uno de los factores por el que a veces se las considera como pilas de combustible es por la necesidad del empleo de químicos en los electrodos durante la operación [89].

Como se puede prever, las pilas redox son usadas para conseguir baterías recargables de muy alta capacidad, además de para compensar picos de demanda en el mercado eléctrico. Para su fabricación, se emplean varios tipos de elementos y compuestos químicos, como las basadas en vanadio o zinc y bromo.

Los principios de operación de este tipo de pilas serían como los que se describen a continuación. Cuando se encuentra totalmente cargada, una solución de sulfuro de sodio en agua es alimentada al electrodo negativo, y otra de tribromuro de sodio al electrodo positivo. Luego, los electrones fluirán por el circuito externo, y los iones de sodio atravesarán la membrana hasta el electrodo positivo. Por último, mientras el sistema se descarga, el sulfuro de sodio se va transformando gradualmente en polisulfuro de sodio, y el tribromuro de sodio pasará a bromuro de sodio. Para poder comprenderlo mejor, las reacciones químicas se pueden apreciar a continuación en las ecuaciones 2.56 y 2.57 [27]:

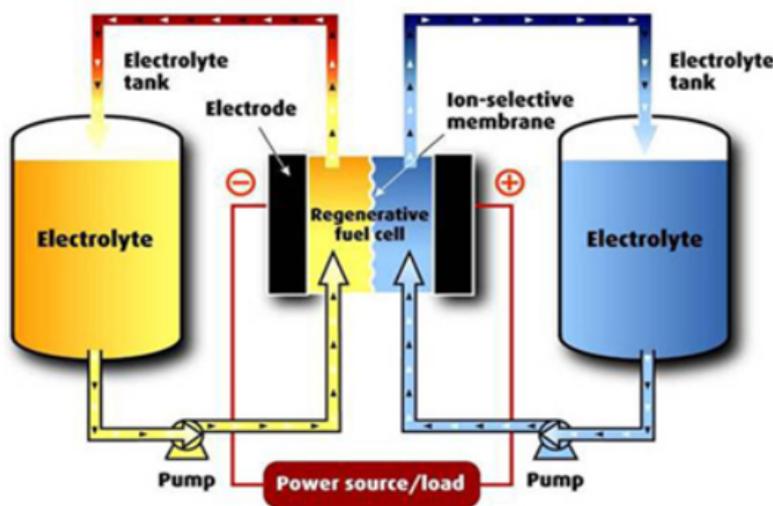
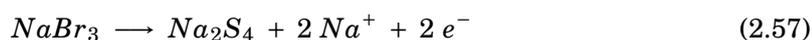
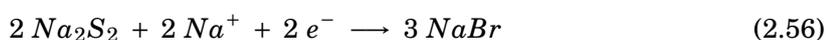


Figura 2.33: Esquema del funcionamiento de una pila redox. Fuente: [89]

Uno de los principios más razonables para considerar a este tipo de pilas como pilas de combustible puede ser que los electrodos son simplemente superficies donde ocurren las reacciones sin ser consumidos, además de estar alimentados por un líquido que contiene energía. Sin embargo, el electrolito cambia durante la operación, por lo que el sistema no puede estar trabajando indefinidamente. Además, no se emplean combustibles en el electrolito nunca, por lo que esto puede convertirse en el principal argumento para no considerar a las pilas redox como pilas de combustible como los otros tipos que se estudiaron en detalle previamente.

2.5. Comparación entre las distintas tecnologías de pilas de combustible estudiadas

A lo largo de este apartado del trabajo se han ido explicando con detenimiento cada uno de los tipos de pilas de combustible más desarrollados en la actualidad, los cuales han permitido que existan tal cantidad de variedades que puedan ser capaces de satisfacer cada una de las necesidades energéticas requeridas actualmente.

Existen pilas de combustible que operan a regímenes de temperaturas elevados (SOFC, MCFC, PAFC), las cuales son muy útiles en aplicaciones estacionarias concretas, como la generación de electricidad para entornos controlados y que no sean de gran escala, como son edificios públicos determinados o comunidades de vecinos de no muy gran tamaño. Luego, también hay pilas de baja temperatura (AFC, PEMFC, DMFC), que son las más propicias para la alimentación de aplicaciones móviles, como son los vehículos eléctricos, o incluso para dispositivos electrónicos como ordenadores o televisores.

Una vez hecha esta separación en dos grupos tan diferenciados, cabe destacar que todos los tipos de pilas de combustible pueden ser empleados en sistemas de alimentación ininterrumpida ante posibles caídas de la red eléctrica, o en la generación eléctrica de casas y pisos. Además, dependiendo del tipo de pila y de los residuos que genere, se pueden aprovechar estos para aprovechar el calor residual de las mismas en sistemas de calefacción o agua caliente, mejorando la eficiencia de las pilas.

Las distintas clases de combustibles utilizados también son un factor a tener en cuenta entre las distintas tecnologías existentes, ya que habrá algunas que no podrán tener altos contenidos en monóxido de carbono, mientras que las que trabajan a altas temperaturas no tendrán ningún problema en admitir grandes cantidades de este compuesto. Por otro lado, el aire será siempre empleado en el cátodo de todos los tipos de pilas de combustible, ya que la concentración de monóxido de carbono en él es menor del 0,01 %, por lo que no resulta perjudicial en las pilas de combustible que operan a regímenes de temperatura bajos, donde el platino se puede ver afectado por el exceso de monóxido de carbono en el electrodo.

También hay que tener en cuenta el material utilizado en la fabricación de cada tipo de pila, donde las que emplean el platino como principal catalizador verán incrementado el precio final debido al alto coste de este metal precioso. De entre todos los tipos de pilas de combustible principales, actualmente las pilas AFC son las más baratas de fabricar, ya que utilizan poca cantidad de platino y su electrolito es muy barato, el cual está hecho de hidróxido de metal alcalino. En cuanto al resto de pilas, las MCFC y SOFC resultarán más baratas que las PEMFC, DMFC y PAFC, porque no necesitan emplear catalizadores de platino para su correcto funcionamiento, pero sí que requerirán de la presencia de materiales que sean capaces de soportar las altas temperaturas de operación a las que trabajan estos tipos de pilas de combustible. Por el otro lado, las pilas que requieren de catalizadores de platino (PEMFC, DMFC y PAFC) resultarán más caras de fabricar como se ha explicado en numerosas ocasiones.

Por último, otro aspecto a tener en cuenta entre los distintos tipos de pilas de combustible es la dirección de la conducción de los iones, es decir, si los iones circulan del ánodo al cátodo o a la inversa. Por lo explicado con anterioridad, las pilas PEMFC, DMFC y PAFC transfieren los iones de la reacción de ánodo a cátodo, mientras que las pilas AFC, SOFC y

MCFC realizan el sentido contrario, de cátodo a ánodo.

Entonces, a modo de comparar las distintas alternativas de pilas de combustible existentes en la actualidad, se ha elaborado una tabla donde aparecen los seis tipos de pilas y sus características más destacadas, como son el tipo de electrolito, ánodo y cátodo, el combustible utilizado, el tipo de catalizador, la potencia y temperatura de trabajo, sus aplicaciones principales o el ion que reacciona entre electrodos para su correcto funcionamiento, entre algunas de sus características más generales:

Tipos de pilas	PEMFC	AFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Ánodo	Carbono con platino	Carbono con platino	carbono con platino	Carbono con platino	Níquel	Cermet
Cátodo	Carbono con platino	Níquel	Carbono con platino	Carbono con platino	Óxido de níquel	Estroncio
Electrolito	Polímero en membrana	KOH	Membrana polimérica	Ácido inorgánico	Metales de carbonato	Zirconio
Catalizador	Platino	No	Platino	Carbono	Níquel	Níquel
Combustible	Hidrógeno	Hidrógeno	Metanol	Hidrógeno	Hidrógeno	Hidrógeno
Ion	H^+	OH^-	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
Conducción de los iones	Ánodo a cátodo	Cátodo a ánodo	Ánodo a cátodo	Ánodo a cátodo	Cátodo a ánodo	Cátodo a ánodo
Geometría	Plana	Plana	Plana	Plana	Plana	Tubular o plana
Temperatura de trabajo	Entre 30 y 100°C	Entre 50 y 200°C	Entre 20 y 90°C	Sobre 220°C	Sobre 650°C	Entre 500 y 1000°C
Cogeneración	A alta temperatura	No	No	Sí	Sí	Sí
Aplicaciones	Vehículos o aparatos electrónicos	vehículos espaciales	Vehículos o aparatos electrónicos	Generación en sistemas estacionarios	Generación en sistemas estacionarios	Sistemas estacionarios y vehículos

Cuadro 2.1: Comparativa entre los distintos tipos de pilas de combustible principales.

Como se puede apreciar en la tabla 2.1, cada una de las tecnologías de pila de combustible estudiadas previamente dispone de sus ventajas e inconvenientes. Para el estudio de optimización será imprescindible seleccionar una de estas tecnologías, explicando las principales razones al respecto de la elección efectuada (todo ello se encuentra explicado en detalle en el Apartado 3.3).

2.6. Uso de pilas de combustible en UAM/drones

Actualmente, la mayoría de los vehículos aéreos no tripulados (UAVs por sus siglas en inglés) se alimentan mediante baterías eléctricas debido al mayor desarrollo existente de estas y por ser la alternativa más empleada en este sector. Esto se debe a que el empleo de motores de combustión o turbinas de gas para vehículos de pequeño tamaño representa eficiencias muy inferiores en comparación con las baterías que sí que se emplean en ellos [90].

Sin embargo, es abiertamente conocido que las baterías tienen baja eficiencia y baja densidad energética, lo cual conlleva a aumentos de peso significativos en el momento en que se desee vehículos aéreos no tripulados para mayores tiempos de vuelo o mayores distancias.

Es por ello por lo que la pila de combustible se ha visto como una alternativa a las baterías existentes en la actualidad. Hoy en día, las baterías tienen precios inferiores a las pilas, siendo del orden de la mitad de precio. Por otro lado, el incremento en el peso de las baterías en vuelos más largos se ha observado como un factor limitante en esta tecnología; por el contrario, el empleo de pilas de combustible en este tipo de vehículos supondría la exclusión de este dilema, ya que las pilas de combustible son capaces de proporcionar tiempos de vuelo mucho mayores debido a su mayor autonomía por el empleo de tanques de hidrógeno, reduciendo los problemas de carga de las baterías y los obstáculos de transporte de la electricidad necesaria [90].

Existen varios proyectos realizados al respecto, entre los que sobresale el de *Doosan Mobility Innovation*, el cual destacó por tratarse de un dron alimentado por una pila de combustible de 2.600 W, capaz de transportar material sanitario en regiones amplias o en prefecturas como las de Corea del Sur. Tal es así, que este dron fue empleado en el reparto de hasta 15.000 mascarillas durante la pandemia del COVID-19 en el año 2020 a los habitantes de tres islas remotas del país [91]. Para lograr este propósito, requería de 8 motores con un peso máximo de 25 kg aproximadamente.



Figura 2.34: Dron DS30W de Doosan Mobility Innovation. Fuente: [92]

Otro proyecto interesante relacionado con el empleo de drones con fines humanitarios es el que se está llevando a cabo en la Universidad de Maryland, en el que el objetivo principal es el transporte de órganos para pacientes que necesiten transplantes. Este proyecto actualmente emplea una batería de litio que le permite realizar vuelos de hasta 5 minutos [93]. De aquí se observa cómo introduciendo una pila de combustible de hidrógeno con su respectivo depósito de almacenamiento se puede aumentar la autonomía de vuelo exponencialmente, consiguiendo transportar los órganos distancias mucho más elevadas, mejorando la calidad del servicio y abriendo este sector a interconexiones entre clínicas y hospitales de la misma región, contribuyendo positivamente con las labores humanitarias propuestas.

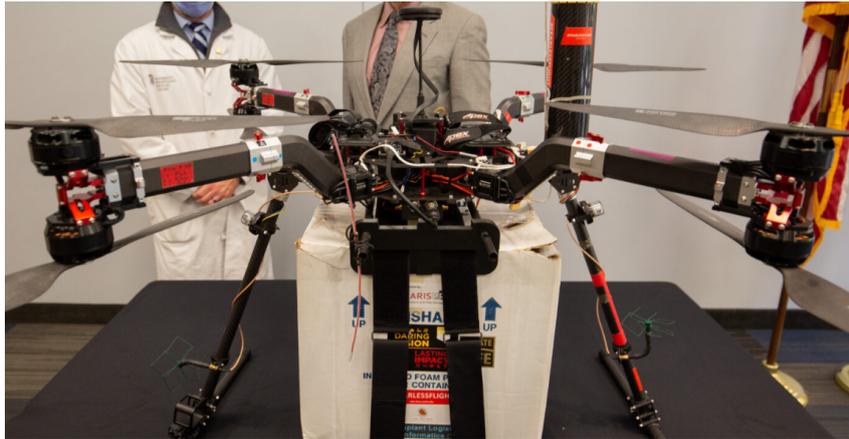


Figura 2.35: Dron de la Universidad de Maryland. Fuente: [93]

Por último, también se puede destacar el estudio realizado por el INTA (Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial), en el que destacan las diferentes maneras de introducir una pila de combustible de hidrógeno en UAVs, donde destacan el empleo de esta tecnología en misiones que requieren potencias no muy elevadas pero que requieran de gran autonomía y/o alcance, donde este tipo de drones serían capaces de superar tanto a pequeños motores de combustión tradicionales como a las baterías de litio. Además, se destaca el reducido impacto medioambiental que supone el empleo de esta tecnología en comparación con las otras dos expuestas previamente [94].

Entonces, a continuación se va a presentar el estudio de optimización de un dron con pila de combustible para tres misiones propuestas, con el objetivo de visualizar correctamente las posibilidades de aplicación en la industria actual, permitiendo explorar áreas que a día de hoy no se han tenido en cuenta para el empleo de drones a partir de hidrógeno, como son la vigilancia forestal y marítima, e incluyendo de igual manera otra misión de transporte médico para comparar también diferentes tipos de misiones. Gracias a este estudio se conseguirá entonces una visión más adecuada de la aplicación de este tipo de drones en determinados sectores en los que pueden llegar a ser de gran utilidad, permitiendo la expansión de esta tecnología y la reducción de las emisiones contaminantes.

Además, un detalle de gran relevancia que no se ha comentado anteriormente es que, como se puede corroborar al respecto de los diferentes ejemplos de estudios y proyectos dispuestos en este apartado, todos ellos se refieren a drones que emplean pilas de combustible, pero todos son ligeros. Esto conlleva que existe un vacío evidente de exploración para drones de ala fija de mayores pesos, entorno a los 500-800 kg. Es por ello que en este estudio se va a focalizar en el análisis de misiones con drones de estas características, con el fin de estudiar una parte que todavía se encuentra sin explorar e investigar adecuadamente.

Por último, destacar a su vez que el estudio que se ha llevado a cabo en este documento se trata de una continuación de estudios previos realizados por el departamento de Motores Térmicos de la Universitat Politècnica de Valencia, en los cuales ya se dispuso toda la base teórica para la correcta realización del simulador del estudio y demás cuestiones al respecto, añadiendo en el presente estudio la optimización de diferentes misiones en base a estos estudios previos [95] [96].

Capítulo 3

METODOLOGÍA

3.1. Introducción al estudio

En el presente estudio se pretende realizar una optimización del sistema de pila de combustible de hidrógeno para un dron que se supone ejecuta tres misiones propuestas para comprobar que la optimización del sistema propulsivo puede funcionar para cualquiera de estas tres misiones.



Figura 3.1: Ejemplo de dron con sistema propulsivo de hidrógeno. *Fuente: [97]*

Para la correcta ejecución del mismo, en el siguiente apartado se pretende exponer el diagrama de flujos adecuado, con el que poder exponer paso por paso lo que se ha realizado en el estudio. A grandes rasgos, mediante la herramienta MATLAB y Simulink se ha desarrollado un programa de simulaciones que es capaz de obtener el mejor sistema de pila de combustible posible en función de las características de la misión. Por ejemplo, para una misión de vigilancia forestal el objetivo principal debería ser conseguir la máxima autonomía con la menor cantidad de combustible posible para unas características de la misión y del sistema propulsivo dadas. Entonces, mediante la adecuación del simulador a estas características es posible realizar las iteraciones oportunas hasta conseguir una masa de combustible optimizada para cumplir con los requerimientos de la misión.

Entonces, como se ha dicho previamente, a partir de este programa de simulación mediante MATLAB y Simulink se consiguen optimizar las tres misiones propuestas (transporte médico, vigilancia forestal y vigilancia marítima), para diferentes potencias del sistema de pila de combustible, con números de celdas en paralelo variables para conseguir mejores consumos, mayores alcances o autonomías. Una vez se tienen todos los resultados obtenidos tras haber realizado iteraciones para todos los casos posibles en los que se pudiese converger hacia una solución, el siguiente propósito es el análisis de los resultados de estas simulaciones para las misiones propuestas. Para ello, se analizan los resultados por separado de cada una de ellas, para posteriormente compararlas y observar su aplicabilidad en la industria actual. Sin embargo, antes de llegar a tal punto, en los siguientes apartados se va a exponer la metodología del estudio más detalladamente, justificando cada uno de los pasos realizados, las decisiones tomadas y explicando cómo funciona cada una de las tres misiones a optimizar.

3.2. Diagrama de flujo

Tras introducir al estudio de optimización que se va a efectuar, en el presente apartado se persigue la explicación del desarrollo de todo lo que respecta al trabajo, desde el inicio con la base teórica adecuada hasta la redacción del presente documento. Por lo tanto, a continuación se presentan tanto los diagramas de flujo elaborados para la adecuada comprensión del estudio como las herramientas empleadas para su correcta ejecución.

DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL

Primero de todo, se necesita conocer cuál es el flujo general realizado en el estudio, desde el comienzo hasta el punto actual de redacción de la memoria requerida (ver Figura 3.2). Para comenzar adecuadamente el estudio en cuestión el primer paso a realizar debe ser el de la *base teórica*, donde el objetivo primordial es conseguir establecer en el autor unos *fundamentos teóricos* adecuados para la correcta realización posterior. Para ello, además de investigar acerca de toda la teoría sobre el hidrógeno y las pilas de combustible, resulta de especial relevancia conocer los posibles *trabajos previos* realizados al respecto, con el objetivo de poder gestionar la información adecuadamente y realizar un estudio más adecuado en función de lo observado. Por otro lado, la base teórica no se puede completar sin la *elección de las misiones* que se van a analizar en el estudio, ya que también forman una parte esencial de la base teórica necesaria.

La *metodología a aplicar* puede establecerse con claridad una vez se conoce la base teórica que puede ser trasladada al estudio. En ella, se debe concretar una correcta *explicación del funcionamiento del estudio*, persiguiendo que ésta pueda servir de eje central para los posteriores apartados de la metodología en cuestión y del resto del estudio. Tras la introducción, otro apartado que cobra gran importancia es la elección del *tipo de tecnología empleada* de pila de combustible, ya que a partir de ella el estudio podrá ser ejecutado debidamente. Por último, se deben definir las misiones propuestas con el fin de aclarar el significado y sentido de cada una, de tal manera que luego se pueda asegurar un estudio de optimización adecuado a los objetivos del trabajo.

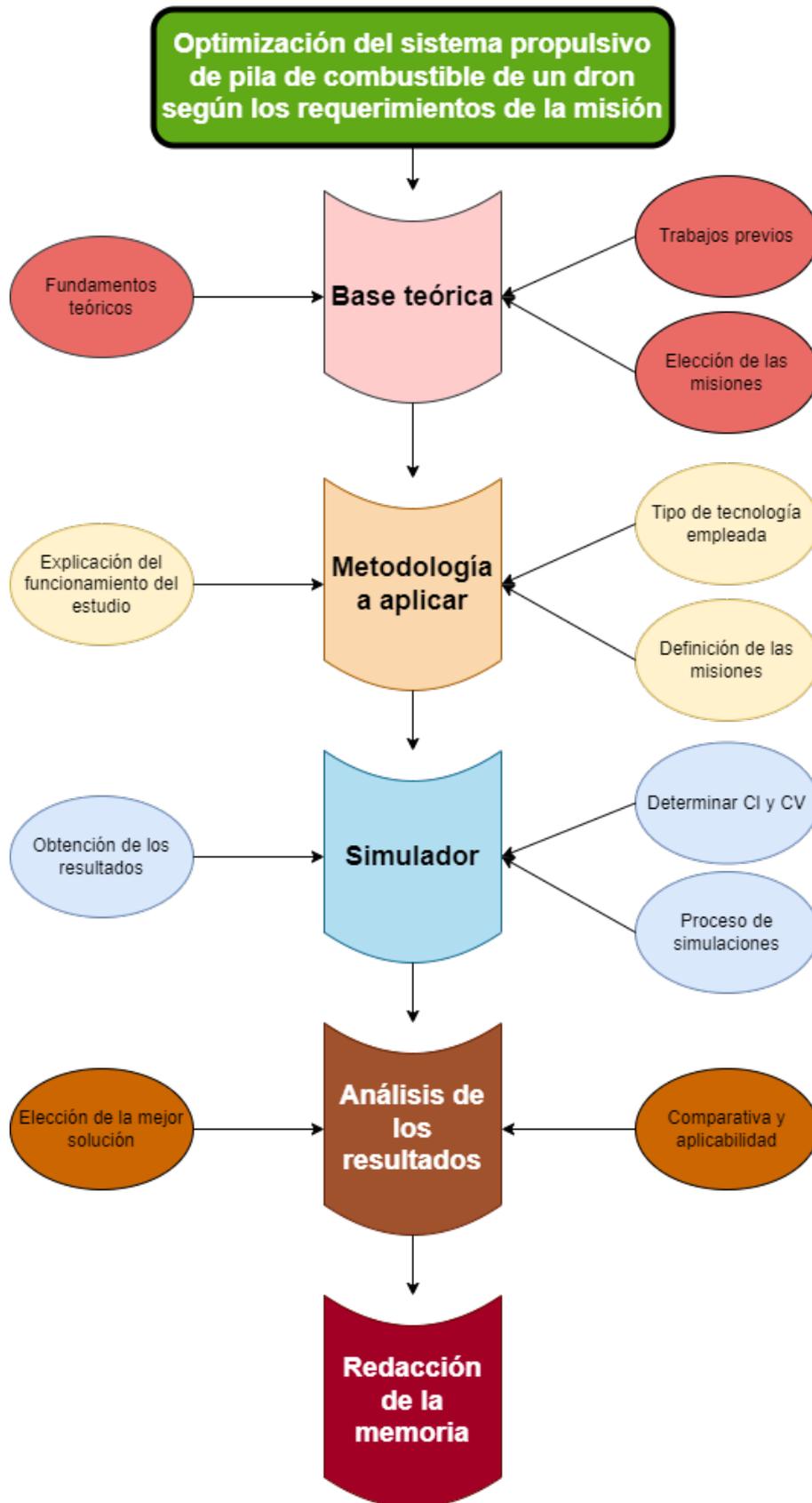


Figura 3.2: Diagrama de flujo general del estudio de optimización. Fuente: *Elaboración propia*

Al terminar de establecer la metodología del estudio, el siguiente paso fundamental es la realización de las optimizaciones de las misiones mediante el *simulador* programado para ello. Este se explica en mayor profundidad en el Apartado 3.2, aunque principalmente se trata de *determinar las condiciones iniciales y de vuelo* en función de la misión estudiada, para poder realizar el *proceso de simulaciones* adecuadamente hasta conseguir *obtener los resultados perseguidos*. Para finalizar el estudio de optimización, se deben *analizar los resultados* conseguidos, especificando la *mejor solución* para cada una de las misiones propuestas y realizando una *comparativa* de las mismas, observando además su *aplicabilidad* a la industria actual. Todo ello con el objetivo de realizar la *redacción de la memoria* ajustada al estudio efectuado.

DIAGRAMA DE FLUJO DEL SIMULADOR

Analizando en detalle el tercer paso del estudio, se ha establecido el siguiente diagrama de flujo al respecto del simulador del estudio de optimización:

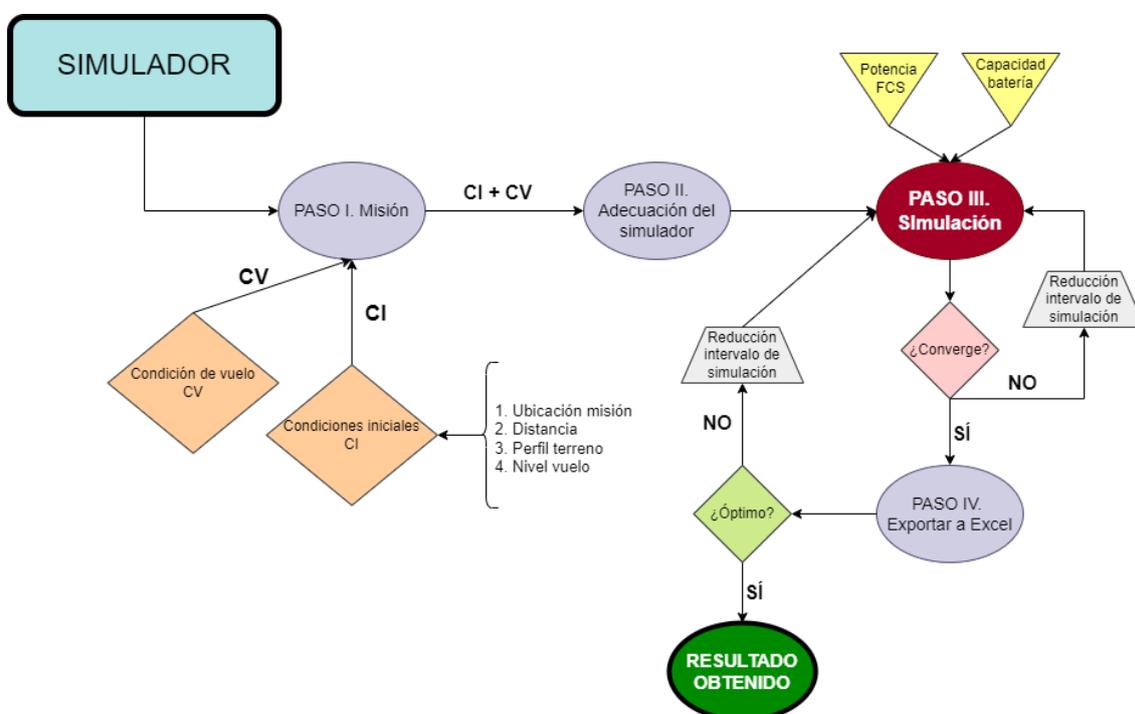


Figura 3.3: Diagrama de flujo del simulador de las misiones. Fuente: *Elaboración propia*

En el simulador del estudio, el primer paso a realizar es la *misión*, es decir, escoger la misión que se va a optimizar, estableciendo las *condiciones de vuelo* y las *condiciones iniciales* (entre las que se encuentran tanto la ubicación de la misión como el nivel de vuelo, el perfil del terreno, la distancia a recorrer, etc.). Este primer paso se explica en mayor detalle en el Apartado 3.2, donde se elabora un breve diagrama de flujo explicativo al respecto. Por lo tanto, conocida la misión a simular, el siguiente paso debe ser la *adecuación del simulador* a las condiciones impuestas, modificando todo aquello que sea necesario para poder simular adecuadamente.

El paso más importante es la realización de las *simulaciones*, en el cual el objetivo a perseguir es la *obtención de los resultados* pertinentes, que deben a su vez encontrarse lo más

optimizados posible. Para ello, se realizan las simulaciones adecuadas para cada una de las combinaciones de potencia del sistema propulsivo y celdas dispuestas en paralelo existentes, donde hasta que no converja la solución se continúa iterando y realizando simulaciones. Una vez se ha logrado que converja cada combinación, se exportan los resultados de masa de hidrógeno consumida y MTOM (Maximum Take Off Mass) a un Excel. Por último, para conseguir los resultados optimizados, se debe observar cada combinación y comprobarlo. Para ello, se modifica el código y se procede a iterar hasta lograr la masa de hidrógeno consumida más optimizada disponible, finalizando la etapa del simulador.

DIAGRAMA DE FLUJO DE LAS MISIONES

El tercer diagrama de flujo a realizar está ligado al primer paso del simulador: la misión. En él (ver Figura 3.4), se puede observar cómo se establece una condición de vuelo entre máximo alcance y máxima autonomía (explicado con detenimiento en el Apartado 3.6). Una vez ha sido escogida la condición de vuelo a aplicar, cada una de las tres misiones propuestas dispone de una de estas dos alternativas. En ellas, aparte de esta condición, también deben establecerse las condiciones iniciales necesarias para la correcta realización de las simulaciones.

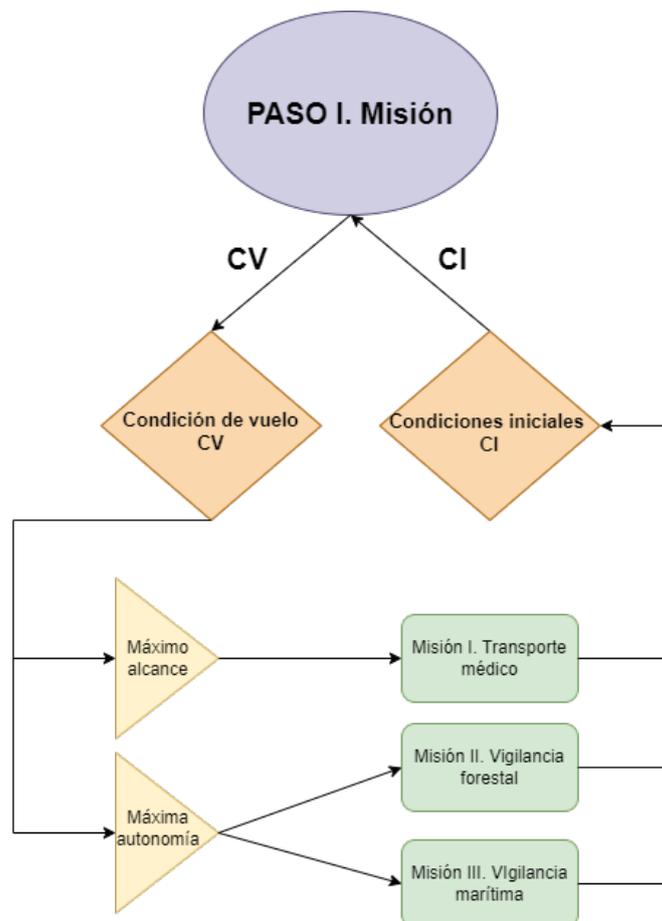


Figura 3.4: Diagrama de flujo de las misiones y condiciones. Fuente: *Elaboración propia*

HERRAMIENTAS

Los diagramas de flujos previos persiguen que cualquier persona ajena al estudio sea capaz de entender qué se pretende hacer y cómo conseguirlo, pero no tienen en cuenta las herramientas empleadas para la realización del propio estudio. Estas son las siguientes:

- *MATLAB-Simulink*: La principal herramienta del estudio, donde se encuentra el simulador de las misiones. Bajo esta aplicación se programa el simulador y se realizan las optimizaciones pertinentes para cada una de las tres misiones propuestas.
- *Microsoft Excel*: La segunda herramienta fundamental, con la que se realizan los apartados relativos a generar las condiciones iniciales para aplicar en MATLAB, además de la posterior recogida de los resultados obtenidos y elaboración de las gráficas y comparativas pertinentes al respecto.
- *Overleaf*: Se trata de una aplicación empleada para la elaboración de documentos similar a Microsoft Word, pero con mejoras significativas de funcionamiento y control de diferentes apartados, la cual ha sido empleada para la realización de esta memoria.
- *Google Maps y Google Earth*: Ambas se tratan de herramientas gratuitas proporcionadas por Google, mediante las cuales se realizaron los perfiles del terreno para cada una de las misiones propuestas en el estudio.

3.3. Pila de combustible elegida

Tras haber explicado paso a paso todos los apartados y subapartados acerca del estudio y su funcionamiento, además de presentar sus herramientas, el paso previo a la exposición de cada una de las tres misiones propuestas trata sobre justificar la tecnología de pila de combustible elegida para la optimización del dron. Esta se ha dispuesto para las tres misiones con el propósito de facilitar la posterior comparación entre ellas, ya que de lo contrario, una comparación entre diferentes misiones, con diferentes trayectos y diferentes tipos de tecnología resultaría excesivamente complicado de llevar a cabo, además de que no tendría gran relevancia el análisis conjunto, aportando solamente el análisis de los resultados individualmente. Por ello, se ha escogido un tipo de pila de combustible en específico.

Como se ha ido desarrollando a lo largo del trabajo, existen varios tipos diferentes de pilas de combustible, cada uno con sus ventajas e inconvenientes, pero no todos pueden funcionar en aplicaciones móviles de esta índole, ya que la propulsión de una aeronave requiere gran potencia y una excelente estabilidad para que puedan operar correctamente, debido a las vibraciones existentes en vuelo, los cambios repentinos de altura y la gran necesidad de potencia en determinadas ocasiones como es el despegue o ciertas maniobras evasivas de emergencia.

Entonces, teniendo en cuenta las características y propiedades necesarias para este tipo de aplicaciones, se ha decidido eliminar de la ecuación a las pilas PAFC y MCFC, las cuales son grandes alternativas en la generación de electricidad en sistemas estacionarios, pero que destacan por la existencia de un mayor número de inconvenientes que ventajas, por lo que ambos tipos no serán considerados.

Entre el resto de las alternativas disponibles, si bien es cierto que todas pueden ser empleadas en sistemas propulsivos móviles, no todos son igual de óptimos en su funciona-

miento y en la estabilidad requerida para ello. De los cuatro tipos de pilas de combustible (PEMFC, AFC, DMFC y SOFC), probablemente la mejor de ellas es el tipo PEMFC, ya que tiene la posibilidad de propulsar a aeronaves y, además de ello, se puede conseguir una gran estabilidad a la hora de la operación normal de esta en un sistema propulsivo. Además, opera a bajas temperaturas en comparación con otras alternativas (las pilas SOFC funcionan a temperaturas de entre 500 y 1000°C, mientras que las PEMFC a unos 30-100°C). Otra gran ventaja de las pilas PEMFC es lo avanzada que se encuentra la tecnología en la actualidad, lo que facilita en gran medida su introducción para este tipo de aplicaciones móviles, permitiendo su introducción directamente sin necesidad de grandes desarrollos de la tecnología para su inclusión en el dron, ya que se dispone de modelos de pila PEMFC lo suficientemente avanzados para poder operar en el momento en que se requiera.

Por último, aunque las pilas de combustible alcalinas (AFC) pueden ser otra gran alternativa, estas son mucho más ventajosas en aplicaciones de sistemas híbridos en vehículos espaciales. Entonces, en definitiva, se ha escogido la variante de la pila de combustible tipo PEMFC para realizar el estudio de optimización del dron y sus tres misiones propuestas, con el fin de disponer de la mayor cantidad de datos posible sobre sus características técnicas y demás propiedades.

3.4. Modelo de pila de combustible empleado

Conociendo la tecnología de pila de combustible elegida para el estudio, en este apartado se requiere realizar una explicación del modelo de pila de combustible. Para ello, se ha decidido emplear un modelo dinámico válido, en el que la pila de combustible comprenda además todos los componentes y partes del balance de planta (ver Apartado 2.3), junto con el stack de la propia pila de combustible. Todo esto queda representado adecuadamente mediante la siguiente figura:

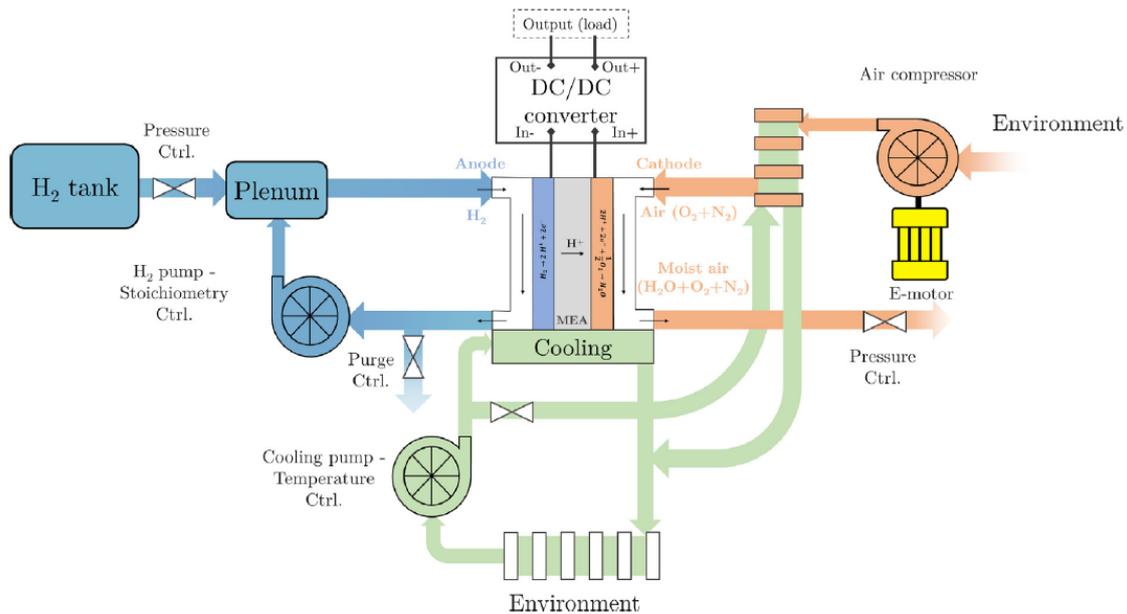


Figura 3.5: Modelo aplicado del sistema de pila de combustible. Fuente: [98]

Como se puede apreciar, el sistema se divide en tres zonas donde se agrupan los principales componentes. Estas tres zonas se dividen en grupos de colores, representando al ánodo de color azul, al cátodo en rojo y a los circuitos de enfriamiento en verde, a modo de separar de alguna manera cada región del sistema propulsivo. En lo que respecta al modelo de stack de pila de combustible en sí, este se puede dividir en dos zonas: las placas bipolares (estudiadas para cada tecnología de pila de combustible, ver Apartado 2.4) y el MEA (Membrane Electrode Assembly), donde las placas bipolares han sido modeladas como canales de flujo mediante la herramienta MATLAB [98].

Por otro lado, cabe destacar que el modelado del balance de planta se ha realizado mediante componentes en 1D con la herramienta MATLAB. Entre muchos detalles a mencionar, cabe destacar que este modelo también se basa en la Figura XXX, donde el ánodo y el cátodo están formados a partir de componentes de aire húmedo, para los que se ha requerido de cálculos psicrométricos del agua al resolver el problema de conservación para llevar en cuenta aquel vapor de agua que se puede formar para temperaturas inferiores a la evaporación del agua como tal [98].

En cuanto a la plataforma de simulación empleada, se ha establecido mediante la aplicación Simulink de la herramienta MATLAB un modelo que se basa en la sensibilidad de la masa a los cambios efectuados a lo largo de todo el simulador, donde la plataforma de simulación cruza los mapas de eficiencia aerodinámica de la aeronave con mapas del sistema propulsivo para escoger la velocidad óptima en la misión en cada momento, ajustándose lo máximo posible a la realidad y permitiendo un consumo de hidrógeno lo más reducido posible gracias a lo dinámico de la velocidad y de todo el entorno operativo del simulador[98].

Resumiendo, se trata de un modelo ajustado y detallado que consigue aplicar los fundamentos teóricos expuestos, el cual es empleado para realizar de la manera más precisa y realista posible el estudio de optimización de las diferentes misiones propuestas.

3.5. Modelo de la aeronave

Antes de explicar cada una de las misiones propuestas y después de haber analizado el modelo de pila de combustible empleado en el programa de simulación, se debe explicar brevemente cuál va a ser la aeronave utilizada para el estudio de optimización.

La aeronave empleada para el estudio es similar a un dron de ala fija, el cual se diferencia del resto de UAVs en que tiene forma de aeronave convencional, esto es, es capaz de realizar vuelos estables y continuados mediante dos alas fijas, siendo capaz a su vez de alcanzar velocidades considerablemente elevadas para lo que es un dron. Además, estos drones destacan respecto del resto por su gran aerodinámica que les permite tener una gran eficiencia, también disponen de grandes capacidades de realizar largos recorridos y poseen una excelente capacidad de carga, lo que les hace muy útiles para misiones de transporte médico o de vigilancia, es decir, son modelos de aeronave perfectamente válidos para realizar las misiones propuestas satisfactoriamente.

En este caso en particular, se ha decidido basarse en el UAV ATLANTE (Avión Táctico de Largo Alcance No Tripulado Español), el cual se ha desarrollado por Airbus Defence and Space con el objetivo de salvaguardar las fronteras marítimas de la Unión Europea contra el terrorismo, la piratería, el narcotráfico o la inmigración ilegal, consiguiendo desarrollar

este UAV para las misiones de vigilancia llevadas a cabo en este tipo de entornos (la misión de vigilancia marítima se realiza con este objetivo). Además, también es posible el empleo de esta aeronave en otras aplicaciones, ya sea la vigilancia forestal o el transporte médico de equipamiento en áreas de difícil acceso [99].



Figura 3.6: Imagen del ATLANTE en vuelo. Fuente: [100]

Por supuesto, para implementar dicha aeronave en el simulador, es necesario conocer algunos de los parámetros más relevantes al respecto [99]:

- Longitud: 5.74 m.
- Altura total: 1.85 m.
- Envergadura: 8 m.
- MTOW: 570 kg.
- Carga de pago máxima (MPL): 100 kg.

Por otra parte, para la implementación de un dron de estas características en el simulador, se debe modelar adecuadamente. Entonces, mediante el empleo de la siguiente ecuación permite su implementación correctamente:

$$C_D = C_{D,0} + k_1 C_L + k_2 C_L^2 \quad (3.1)$$

Donde C_D representa al coeficiente de resistencia, $C_{D,0}$ es el coeficiente de resistencia parásito, k_1 y k_2 son factores requeridos para la fórmula y C_L es el coeficiente de sustentación. Entonces, en base a esta ecuación, se puede representar adecuadamente en el simulador el modelo aerodinámico de la aeronave, permitiendo escoger un ángulo de ataque para cada situación a lo largo de la misión [96].

3.6. Misiones a realizar

Por último, como ya se ha mencionado en anteriores ocasiones, antes de mostrar los resultados obtenidos a través del estudio de optimización realizado, se necesitan conocer las tres misiones propuestas para la correcta ejecución del análisis. A pesar de que se trata de un suceso de especial relevancia en este documento, antes de comenzar con el análisis es preciso considerar ciertas bases teóricas requeridas para que todo el estudio pueda ser realizado debidamente. Primero de todo, existen dos definiciones que son obligatorias de recordar a partir de este instante:

- *Máxima autonomía:* Se produce cuando se está ahorrando el máximo de combustible posible para cierto nivel de vuelo, con el objetivo de llegar a la potencia requerida mediante la menor cantidad de flujo de combustible necesaria. Esto no quiere decir que se alcancen las mayores distancias, como se podrá observar a lo largo del estudio de cada misión.
- *Máximo alcance:* En este caso el dron consigue mantenerse en este punto cuando la relación entre el flujo de combustible, el cual está directamente relacionado con la potencia que se requiere, y la velocidad, resulta ser la mayor de las velocidades posibles para cierto nivel de vuelo. Tal es así que, a pesar de consumir más cantidad de combustible, en función del tipo de operación puede ser más interesante este tipo de condición que la de máxima autonomía, incluso llegando a mayores distancias a pesar del mayor consumo.

Una vez han sido definidas correctamente ambos tipos de condición, cabe destacar que estos serán tenidos en cuenta para cada una de las tres misiones ya que, en función del tipo de misión y los objetivos a conseguir, puede interesar una condición u otra, como veremos a partir de este preciso instante. Cuando se propone cierta misión, para alcanzar las mayores distancias posibles en la misma se puede pensar que lo más lógico es realizar dicha misión siempre en condición de máxima autonomía, consumiendo la menor cantidad de combustible posible manteniendo el nivel de vuelo requerido; sin embargo, esto no siempre resulta ser lo más óptimo, ya que existen ciertos tipos de misión en los que el dron alcanzará mayores longitudes consumiendo mayores cantidades de combustible, pero siendo más eficiente en el conjunto global de la misión. Es en estos casos donde la condición de máximo alcance consigue superar a la de máxima autonomía. En este estudio en concreto, a continuación se podrá esclarecer en qué tipo de misión se va a emplear la condición de máximo alcance, mientras que en las dos restantes coincidirán en la utilización de la condición de máxima autonomía.

A continuación se exponen cada una de las tres misiones que se han propuesto optimizar y analizar en el estudio que se está llevando a cabo en este documento, donde posteriormente se realizará una comparación entre las diferentes misiones y su aplicabilidad en la industria actual, además de la viabilidad de la introducción de la pila de combustible de hidrógeno en misiones de estas características.

MISIÓN DE TRANSPORTE MÉDICO

En esta primera misión realizada se persigue la optimización del sistema propulsivo del dron a través de la reducción de la capacidad de combustible hasta el mínimo necesario para conseguir llevar a cabo dicha misión satisfactoriamente. Esta primera misión tiene lugar en territorio español (como cada una de las tres), concretamente entre Madrid y Mallorca (ver Figura 3.7). En ella, se requiere cubrir cierta distancia en el menor tiempo posible, es decir, a la mayor velocidad posible pero consumiendo la menor cantidad de combustible.

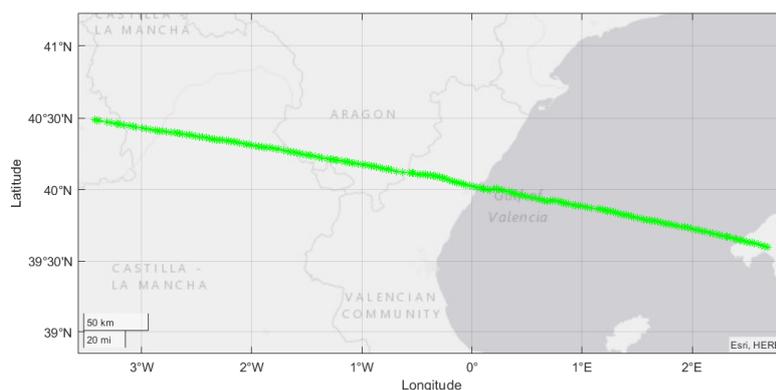


Figura 3.7: Trayectoria de la misión de transporte médico entre Madrid y Mallorca.

Una pregunta esencial que surge a raíz de las definiciones previas en este apartado es la siguiente: ¿Qué condición de vuelo es la más óptima en este caso? Gracias a todo lo explicado con anterioridad, se puede deducir que la condición de máximo alcance es la opción más favorable entre las dos. Esto es así porque el objetivo principal es cubrir una distancia (en este caso de 533 km) empleando la cantidad de combustible justa y consiguiendo la mayor de las velocidades posibles para la altitud de vuelo requerida. Por ello, es relativamente sencillo llegar a la conclusión de que la condición de máximo alcance será capaz de cubrir las necesidades específicas de esta misión. En esta misión, el perfil del terreno que se atraviesa entre dichas localidades resulta ser de gran significancia, debido a la variación existente entre todas las regiones atravesadas por el dron en su recorrido. En la figura 3.8 se puede apreciar lo comentado, donde se atraviesan áreas con relieve elevado, zonas costeras, parte de la misión sobre el Mar Mediterráneo, para luego entrar en la propia isla de Mallorca.

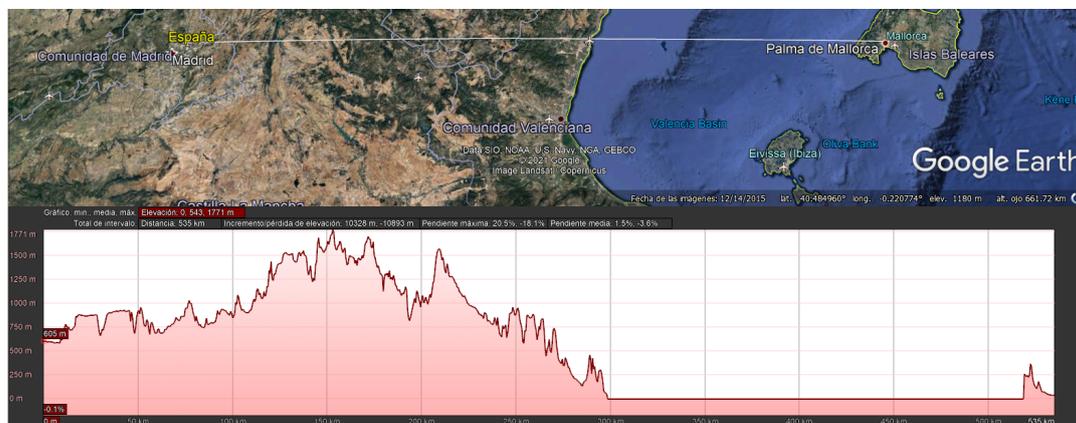


Figura 3.8: Perfil del terreno a lo largo del recorrido de la misión.

En parte debido al relieve de la Península Ibérica y demás, y en parte debido a la condición de máximo alcance impuesta para la ejecución de la misión, se requiere para su cumplimiento que el nivel de vuelo sea variable, con el objetivo de conseguir la situación óptima para cada región atravesada en la misión, obteniendo la mayor velocidad posible consumiendo la menor cantidad de hidrógeno posible. Esto se puede ver más detalladamente en la siguiente figura:



Figura 3.9: Perfil del vuelo para la misión de transporte médico.

Como se puede observar, el nivel de vuelo varía a lo largo de la misión, pasando de un nivel de vuelo inicial tras el despegue de Madrid de 1000 metros sobre el nivel del mar, aumentando hasta los 2000 metros, donde se mantiene constante hasta comenzar un descenso continuado hasta los 850 metros, para posteriormente mantenerse nuevamente constante hasta el aterrizaje en Mallorca. Con ello, se logra el objetivo de máxima velocidad para mínimo consumo de combustible posible, cubriendo la distancia de la misión a través de la condición de máximo alcance.

MISIÓN DE VIGILANCIA FORESTAL

Segunda misión a optimizar del estudio, en la que también se requiere escoger el tipo de condición de vuelo a establecer para conseguir optimizar la misión y poder ser comparado posteriormente con las otras dos misiones realizadas. En este caso, como se trata de un vuelo del dron de vigilancia forestal, el objetivo ya no es conseguir recorrer cierta distancia en el menor tiempo posible (como en el caso de la Misión de Transporte Médico), sino que en este caso se pretende permanecer en vuelo la mayor cantidad de tiempo posible empleando para ello el menor consumo de combustible posible para un nivel de vuelo y condiciones requeridos. Por lo tanto, se ha escogido la condición de máxima autonomía para la realización y optimización de la misión, en la que mediante el estudio de optimización adecuado se ha conseguido reducir la cantidad de combustible almacenada en el tanque de hidrógeno del dron para dicha misión.

En este caso, se trata de una misión de vigilancia forestal en el Principado de Asturias, donde se realiza una ruta circular alrededor de la Comunidad (ver Figura 3.10). En este caso, no se pretende cubrir toda la expedición en el menor tiempo posible, sino a la mínima velocidad posible para un nivel de vuelo determinado y constante.

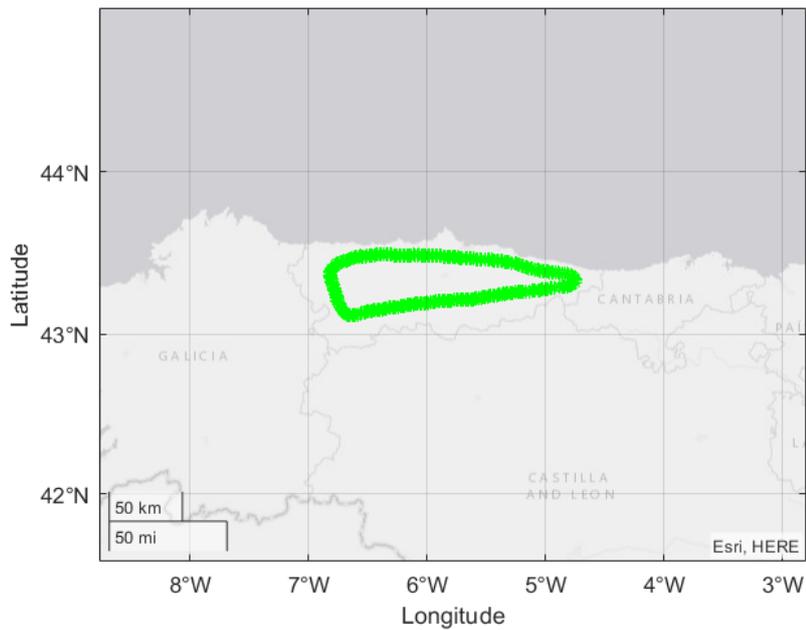


Figura 3.10: Misión de vigilancia forestal.

En esta misión el perfil del terreno también es variable, aunque ello no repercute en el nivel de vuelo, el cual debe ser siempre constante. Esto puede repercutir en otros factores, pero nunca en la altitud de vuelo requerida para la condición de máxima autonomía. Este perfil se puede observar a continuación:

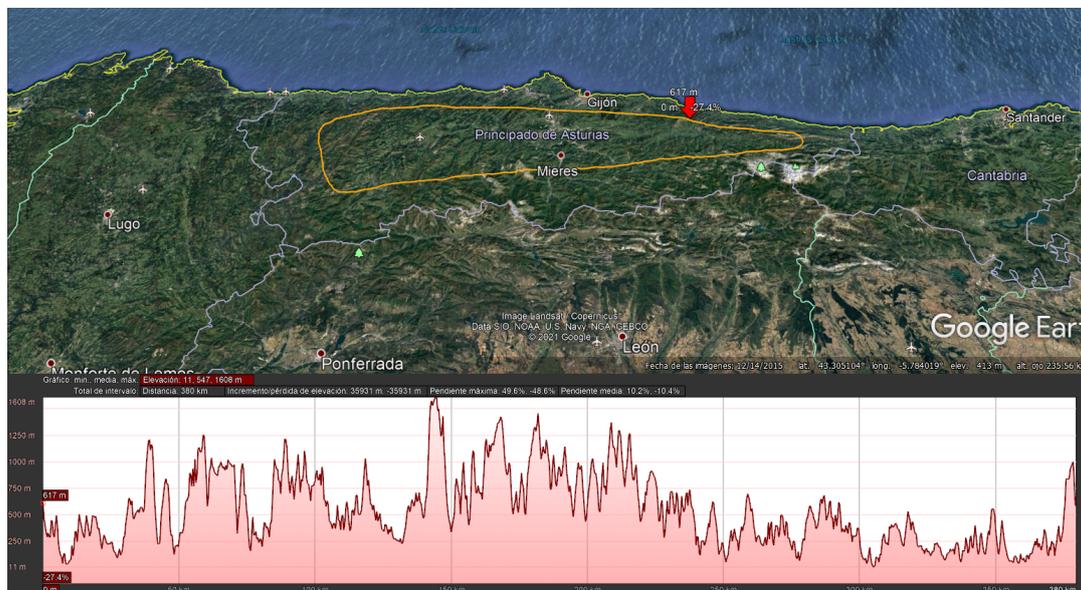


Figura 3.11: Perfil del terreno para la misión de vigilancia forestal.

Por otro lado, a destacar de esta última figura la flecha roja en el recorrido de la misión, que viene a ser el lugar de origen y finalización de la misma. Por otro lado, cabe destacar que la distancia recorrida en la misión es de 663.6 km, a una altitud de vuelo constante de 3000 metros sobre el nivel del mar (Ver figura 3.12):

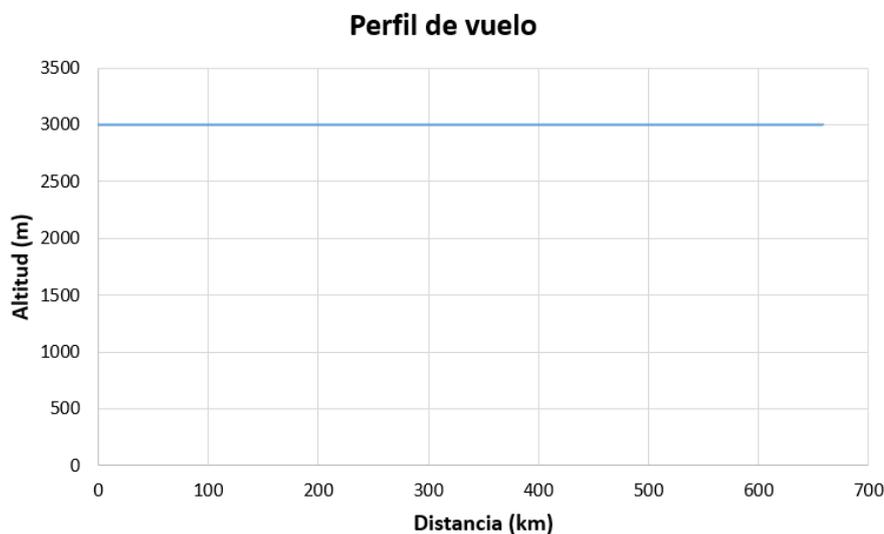


Figura 3.12: Perfil de vuelo para la misión de vigilancia forestal.

Como se puede comprobar, el nivel de vuelo se mantiene constante durante todo el recorrido de la misión, exceptuando el despegue y el aterrizaje, los cuales no se han tenido en cuenta para representar la gráfica anterior, ya que el objetivo principal era asegurar la correcta visualización del perfil de vuelo constante de la misión de vigilancia forestal mediante la condición de máxima autonomía.

MISIÓN DE VIGILANCIA MARÍTIMA

Por último, se dispone de la misión de vigilancia marítima, la cual es similar en condiciones a la de vigilancia forestal, ya que se va a considerar con la condición de máxima autonomía. El razonamiento radica en que se trata de una misión en la que se tiene como objetivo cubrir una región, en este caso el Estrecho de Gibraltar, donde se pretende vigilar el flujo migratorio y toda operación ilegal que se sucede en esta zona del mundo. Para ello, el requerimiento básico para la correcta ejecución de la misión por parte del dron es su capacidad de volar a una altura constante a la menor velocidad posible, cubriendo el espacio que se muestra en la Figura 3.13:

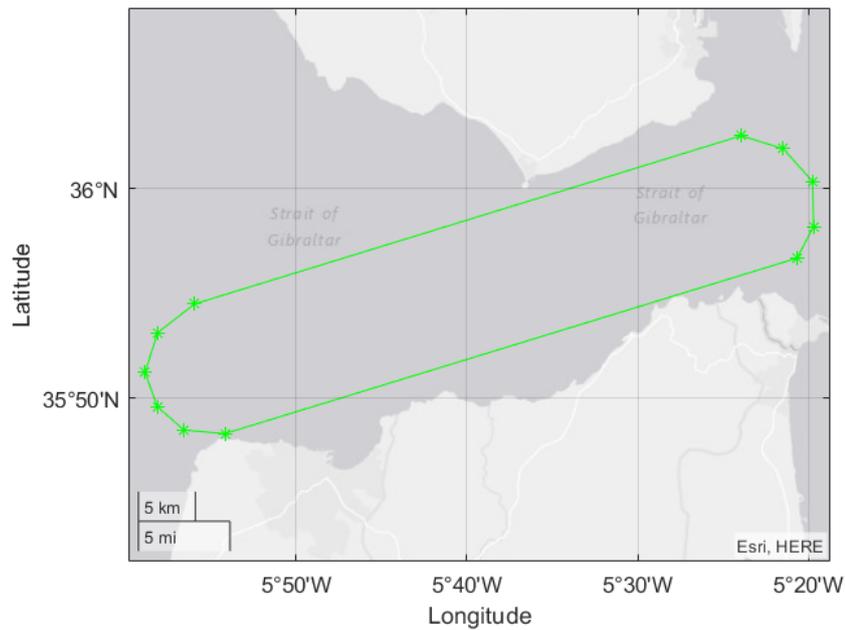


Figura 3.13: Recorrido de la misión de vigilancia marítima.

A diferencia de la misión de vigilancia forestal, en la que el perfil del terreno del Principado de Asturias es muy variable debido a su orografía tan pronunciada, en este caso se trata de un perfil de terreno constante. Esto se debe a que la misión tiene lugar sobre el mar en su totalidad, por lo que no existirá variación alguna en el perfil del terreno (ver Figura 3.14). Por otro lado, se debe dar a conocer que la misión recorre una distancia de 668.7 km a una altitud constante de 500 metros sobre el nivel del mar. Esto conllevará a una situación equivalente a la de la misión de vigilancia forestal, donde el nivel de vuelo se debe de mantener constante a lo largo de toda la misión. En este caso, la diferencia radica en que como el perfil del terreno es constante (ver Figura 3.15), las condiciones de vuelo no deben de fluctuar en exceso en lo que al perfil del terreno se refiere.

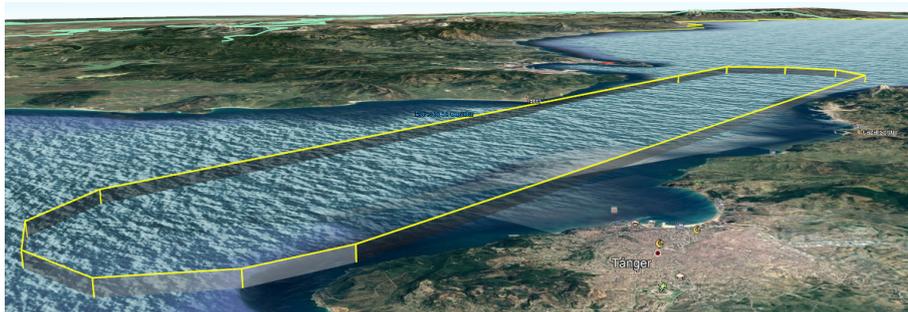


Figura 3.14: Perfil del terreno para la misión de vigilancia marítima.

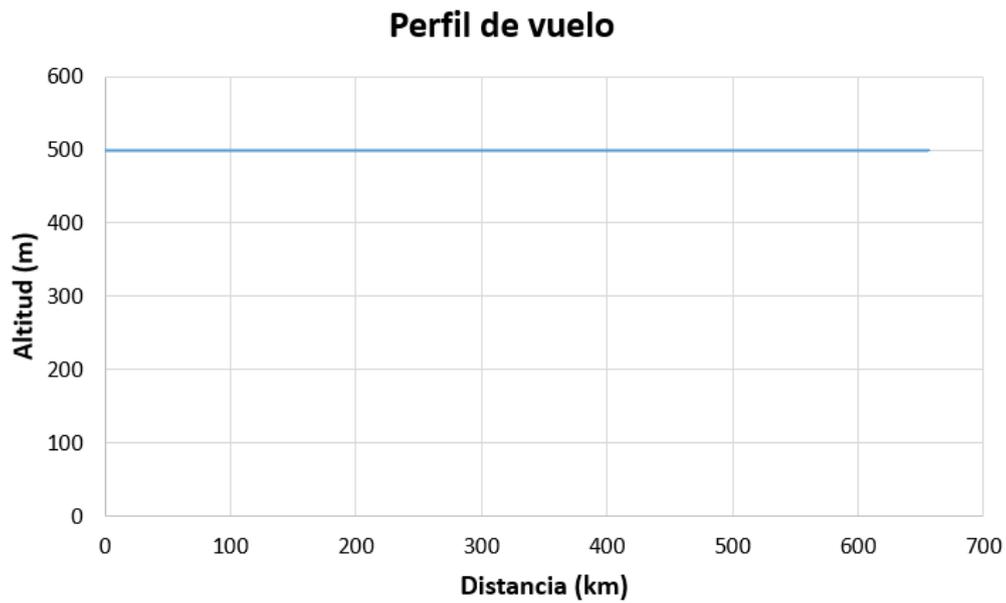


Figura 3.15: Perfil de vuelo constante para la misión de vigilancia marítima.

Como se puede comprobar en la Figura 3.15, el nivel de vuelo permanece constante a lo largo de todo el recorrido, exceptuando otra vez el despegue y el aterrizaje. Además, de la Figura 3.14 se puede observar la región de la misión mediante la herramienta Google Earth, donde se puede asegurar que la totalidad de la misión se realiza en zonas marítimas en el Estrecho de Gibraltar.

Con esto, se puede concluir la presentación de las tres misiones propuestas, las cuales dos son de máxima autonomía (vigilancia forestal y vigilancia marítima) y una de ellas es de máximo alcance (transporte médico). Una vez expuestas, en el siguiente apartado se realiza un análisis de los resultados obtenidos mediante el estudio de optimización realizado para cada una de las misiones.

Capítulo 4

OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS

A lo largo del trabajo se han expuesto los fundamentos teóricos necesarios al respecto del estudio, desde los conceptos básicos sobre el hidrógeno hasta la realización de comparativas entre los diferentes tipos de tecnologías de pilas de combustible y su aplicación en drones como el correspondiente a este documento. Posteriormente, se ha desarrollado todo lo relacionado a la metodología, es decir, los pasos previos a la presentación de los resultados obtenidos, objeto de estudio en este momento. Entonces, a continuación se exponen los resultados del estudio de optimización de introducción de la pila de combustible de hidrógeno en un dron para las tres misiones propuestas, analizando todo aquello que sea conveniente en cada misión de forma individual, para posteriormente desarrollar una comparativa entre las misiones y observar su aplicabilidad a la industria actual.

Antes de mostrar los resultados obtenidos, es conveniente aclarar que las tres misiones han sido optimizadas para el mismo modelo de pila de combustible, con las mismas variables, es decir, aplicando las distintas potencias del sistema propulsivo escogidas (40, 60, 80, 100 y/o 120 kW) y variando de la misma manera la capacidad de la batería (2.41, 7.24, 12.06, 16.88, 24.12 y/o 31.36). Además, se han realizado simulaciones con diferentes pesos totales (MTOM), con el objetivo de desechar aquellas soluciones que impliquen grandes cantidades de peso y de hidrógeno para cumplir los objetivos de las diferentes misiones. Por último pero no por ello menos relevante, cabe mencionar que cada una de las misiones se ha optimizado para calcular de forma iterativa la masa del tanque de hidrógeno, el cual dispone de hidrógeno gaseoso comprimido a 700 bares de presión.

4.1. Análisis individual de las misiones propuestas

MISIÓN DE TRANSPORTE MÉDICO

La primera misión que se ha decidido implementar en el programa ha sido la de transporte médico de Madrid a Mallorca. Para ello, como ya se ha comentado previamente, se debe tener en cuenta que la condición de vuelo para este caso en específico es máximo alcance, es decir, consumir la mínima cantidad de hidrógeno a la mayor velocidad posible para las características del vuelo dadas. Todo ello fue explicado con anterioridad en la Metodología del documento (ver Capítulo 3), por lo que a partir de este momento el objetivo es exponer los resultados más destacados al respecto de las optimizaciones efectuadas.

En primer lugar, en la siguiente tabla se muestran las masas de hidrógeno iniciales y tras la optimización de la misma. Todo ello para cada potencia y capacidad de batería disponible, combinándose entre sí:

Potencia FCS (kW)	Capacidad batería (kWh)	Masa H_2 inicial (kg)	Masa H_2 óptima (kg)	MTOM (kg)
40	7,24	4,56	3,86	559,2
	12,06	4,56	3,84	587,8
	16,88	4,56	3,86	616,6
	24,12	4,56	3,90	659,9
	31,36	4,56	3,95	703,2
60	2,41	4,56	3,93	561,6
	7,24	4,56	3,88	590,2
	12,06	4,56	3,89	618,9
	16,88	4,56	3,90	650,9
	24,12	4,56	3,93	690,8
	31,36	4,56	3,98	734,2
80	2,41	4,56	3,98	595,5
	7,24	4,56	3,98	621,4
	12,06	4,56	3,99	650,1
	16,88	4,56	4,01	678,9
	24,12	4,56	4,05	722,2
	31,36	4,56	4,14	765,7
100	2,41	4,56	4,08	626,3
	7,24	4,56	4,10	652,7
	12,06	4,56	4,12	681,5
	16,88	4,56	4,15	710,4
	24,12	4,56	4,20	753,7
	31,36	4,56	4,30	797,3
120	2,41	4,56	4,23	655,4
	7,24	4,56	4,24	684,2
	12,06	4,56	4,26	713,0
	16,88	4,56	4,30	741,9
	24,12	4,56	4,39	785,4
	31,36	4,56	4,43	828,7

Cuadro 4.1: Resultados obtenidos de la misión de transporte médico.

De la tabla precedente se pueden obtener diferentes conclusiones al respecto. Primero de todo, para una potencia del sistema propulsivo de 40 kW y 2.41 kWh de capacidad de batería no se dispone de solución debido a que el simulador de optimización no converge en este caso, por lo que dicha opción no se tiene en cuenta para el análisis de los resultados. Para el resto de resultados, una de las principales conclusiones es el aumento de hidrógeno necesario a medida que aumenta la capacidad de batería propuesta. Esto es lógico debido que aumentar la capacidad de la batería siempre implica un aumento de peso. Por otro lado, mientras mayor potencia se disponga, mayor es el consumo global de hidrógeno. Esto es así porque, a mayor potencia de la pila de combustible, más cantidad de hidrógeno se requiere para lograr los objetivos de distancia preestablecidos en la misión.

Otro de los aspectos clave que se pueden sonsacar resulta ser que, por ejemplo, para una potencia de 80 kW y 2.41 kWh de capacidad de batería, se obtienen menor consumo de hidrógeno que para una potencia de 60 kW y 31.36 kWh de capacidad de batería. Esto sucede debido a la mayor necesidad de aporte de hidrógeno requerido por la pila de combustible al disponer de una mayor capacidad de la batería, además de por el aumento de peso provocado por la adición de la misma al sistema de pila de combustible.

Por otro lado, cabe mencionar que al aumentar la potencia de la pila de combustible aumenta el peso pero también la eficiencia de la misma porque opera a menores densidades de corriente, de entre esos dos efectos (si aumenta el consumo de hidrógeno al aumentar la potencia de la pila de combustible) es más significativo el incremento de la masa de la aeronave, cosa que no pasa en vehículos de carretera (donde es más importante el incremento en eficiencia). A mayores, al aumentar la capacidad de la batería se reduce la tasa de descarga de la batería para una potencia dada, por lo que aumenta su eficiencia y la cantidad de energía que no tienes que dar en forma de hidrógeno, pero al mismo tiempo aumenta el peso de la aeronave. De nuevo si aumenta el consumo de hidrógeno con la capacidad de la batería lo que es más significativo es el aumento del peso, suceso especialmente relevante para este análisis de resultados (esto será aplicable a las tres misiones propuestas).

Entonces, todo lo comentado anteriormente debe considerarse de especial relevancia para el momento de escoger la pila de combustible que mejor se adapte a las condiciones de la misión establecida. Antes de escoger la misma, en la tabla 4.1 se han expuesto los valores de masa tras converger la solución y después de optimizar al máximo posible el tanque de combustible. Para ello, se parte de la base de que, tras converger en una solución válida por primera vez, para esta misión se obtiene una capacidad del tanque de hidrógeno de 4.56 kg. Entonces, para optimizar dicha capacidad y cumplir la misión con la menor cantidad de combustible almacenada y llenando dicho tanque al 100%, se ha procedido a iterar la solución convergida tantas veces como fuese necesario, hasta obtener el valor de masa óptima de la tabla 4.1.

La optimización se puede observar de la siguiente manera: estableciendo una media de hidrógeno consumido para cada potencia de pila de combustible simulada, se compara con la masa inicial, observando cómo ha mejorado la solución al ser optimizada (ver tabla 4.2):

Potencia FCS (kW)	Masa H_2 Inicial (kg)	Media Masa Optimizada (kg)	Cambio en la Masa de H_2 (%)
40	4,56	3,88	-14,9%
60	4,56	3,92	-14,0%
80	4,56	4,03	-11,7%
100	4,56	4,16	-8,8%
120	4,56	4,31	-5,5%

Cuadro 4.2: Optimización de la masa de hidrógeno para la misión de transporte médico.

Como se puede apreciar en la tabla 4.2, en esta misión, para las condiciones establecidas, se consigue optimizar la cantidad de hidrógeno requerida para conseguir alcanzar la distancia de la misión adecuadamente. Además, se puede observar cómo las potencias más reducidas, en concreto la de 40 kW, son capaces de conseguir mayores porcentajes de optimización de la pila de combustible, en comparación con una pila de 120 kW, que es capaz de reducir la cantidad de hidrógeno necesaria, pero en menor medida. Esto también resultará ser otro factor a tener en cuenta para escoger la pila de combustible más adecuada para la condición de máximo alcance de la misión.

Por otro lado, como se había comentado en la presentación previa del presente capítulo, se han elaborado 4 sesiones diferentes, con el objetivo de conseguir la mejor optimización posible. Entre ellas, tres de las misiones disponían de las mismas condiciones, pero en cada una se propusieron diferentes potencias de pila de combustible. Por el contrario, para la última misión se cambiaron las condiciones iniciales, aumentando los pesos globales del dron, con el objetivo de observar qué sucede al respecto. Resumiendo, los resultados obtenidos son los que se muestran a continuación:

Potencia FCS (kW)	Capacidad batería (kWh)	Masa H_2 inicial (kg)	Masa H_2 óptima (kg)	MTOM (kg)
100	2,41	4,56	4,53	687,5
	7,24	4,56	4,56	716,8
	12,06	4,56	4,59	746,1
	16,88	4,56	4,67	776,3
	24,12	4,56	4,71	820,1
	31,36	4,56	4,79	864,6
120	2,41	4,56	4,68	721,1
	7,24	4,56	4,72	750,6
	12,06	4,56	4,80	780,7
	16,88	4,56	4,82	809,6
	24,12	4,56	4,89	854,2
	31,36	4,56	4,99	899,0

Cuadro 4.3: Segundos resultados obtenidos de la misión de transporte médico.

En este caso, se puede observar cómo siempre se necesita un aumento del tanque para conseguir cumplir con la distancia objetivo de la misión, debido al mayor peso del conjunto del dron. Por lo tanto, ello conlleva mayores consumos de combustible. Además, al optimizar, se obtienen consumos de combustible aún mayores, debido a que se necesita aumentar el hidrógeno disponible para conseguir cubrir la distancia objetivo. Entonces, esto quiere decir que para drones con mayor peso la misión no resulte en optimizaciones adecuadas ni nada por el estilo, conllevando a que estos resultados no se han tenido en cuenta para escoger la pila de combustible adecuada para las características de la misión de transporte médico. Además, esto puede comprobarse realizando el mismo análisis que anteriormente; esto es, observando la optimización conseguida para cada potencia simulada:

Potencia FCS (kW)	Masa H_2 Inicial (kg)	Media Masa Optimizada (kg)	Cambio en la Masa de H_2 (%)
100	4,56	4,64	1,8%
120	4,56	4,82	5,7%

Cuadro 4.4: Optimización de la masa de hidrógeno para la misión de transporte médico en el segundo caso.

Como se puede corroborar de la tabla previa 4.4, al optimizar la primera solución convergida sucede que no se consigue reducir la cantidad de hidrógeno consumida para completar la misión, sino todo lo contrario, es obligatorio un aumento del tanque de hidrógeno para llevar a cabo la misión. Por lo tanto, como además de ello se necesitan mayores cantidades de hidrógeno, estos resultados no se tienen en cuenta posteriormente.

Se han expuesto todos los resultados obtenidos del estudio de optimización de la pila de combustible para la misión de transporte médico. Ahora bien, el paso definitivo a realizar es la elección del sistema propulsivo adecuado a las características de la misión. Para ello, se ha decidido elaborar la tabla 4.5, en la que se han ordenado todas las opciones posibles en función del MTOM (Maximum Take Off Mass), para posteriormente analizar qué opción de todas las disponibles escoger:

Potencia FCS (kW)	Capacidad batería (kWh)	Masa H_2 óptima (kg)	MTOM (kg)
40	7,24	3,86	559,2
60	2,41	3,93	561,6
40	12,06	3,84	587,8
60	7,24	3,88	590,2
80	2,41	3,98	595,5
40	16,88	3,86	616,6
60	12,06	3,89	618,9
80	7,24	3,98	621,4
100	2,41	4,08	626,3
80	12,06	3,99	650,1
60	16,88	3,90	650,9
100	7,24	4,10	652,7
120	2,41	4,23	655,4
40	24,12	3,90	659,9
80	16,88	4,01	678,9
100	12,06	4,12	681,5
120	7,24	4,24	684,2
60	24,12	3,93	690,8
40	31,36	3,95	703,2
100	16,88	4,15	710,4
120	12,06	4,26	713,0
80	24,12	4,05	722,2
60	31,36	3,98	734,2
120	16,88	4,30	741,9
100	24,12	4,20	753,7
80	31,36	4,14	765,7
120	24,12	4,39	785,4
100	31,36	4,30	797,3
120	31,36	4,43	828,7

Cuadro 4.5: MTOM de menor a mayor para la misión de transporte médico.

De la tabla 4.5 se puede destacar la gran diferencia existente entre el menor peso y el mayor, de 268.5 kg. Como es lógico, para casi cualquier misión de transporte médico, aunque con mayores potencias se pueden conseguir mayores velocidades, también se obtienen consumos de hidrógeno considerablemente más elevados, por lo que es necesario encontrar un compromiso entre ambos. Como se puede comprobar en la tabla 4.5, las potencias menores consiguen MTOM más bajos, ya que el sistema propulsivo es de menor peso al requerir menor potencia. Además, incluir menor capacidad de batería también implica una reducción del MTOM, por lo que también es otro factor decisivo para escoger la opción adecuada. Por otro lado, se ha de tener en cuenta que un menor MTOM no tiene por qué implicar un menor consumo. Ello depende a su vez de la potencia y de la capacidad de la batería, es decir, para una potencia de 40 kW y 16.88 kWh de capacidad de batería se obtiene menor consumo pero mayor MTOM que para una potencia de 60 kW y 2.41 kWh de capacidad de

batería. Tal es así que se debe tener en cuenta que la selección de la solución óptima no debe realizarse sólo en base al consumo de hidrógeno, ya que la batería también aporta potencia y eso implicaría realizar un sesgo hacia diseños con mayor tamaño de la batería; por eso se ha decidido emplear el criterio de menor MTOM para la selección. Para poder asentar de la mejor forma estos resultados, se puede realizar un mapa que represente estos en función de la capacidad de la batería, la potencia de la pila de combustible y el MTOM (ver Figura 4.1), y otro mapa en base al consumo de hidrógeno por cada 100 km (en este caso ver figura 4.2):

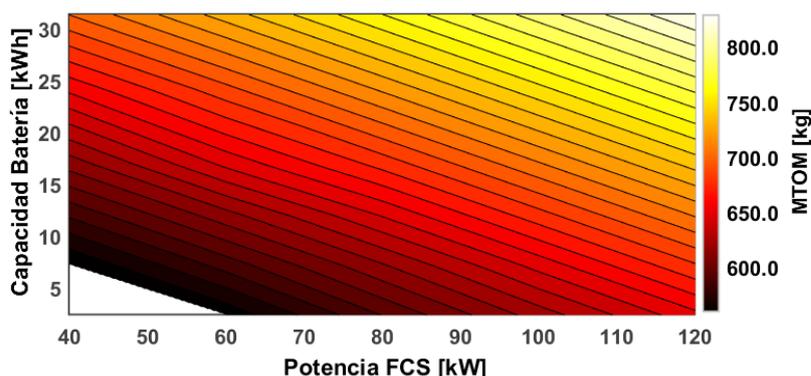


Figura 4.1: Mapa de soluciones MTOM de la misión de transporte médico.

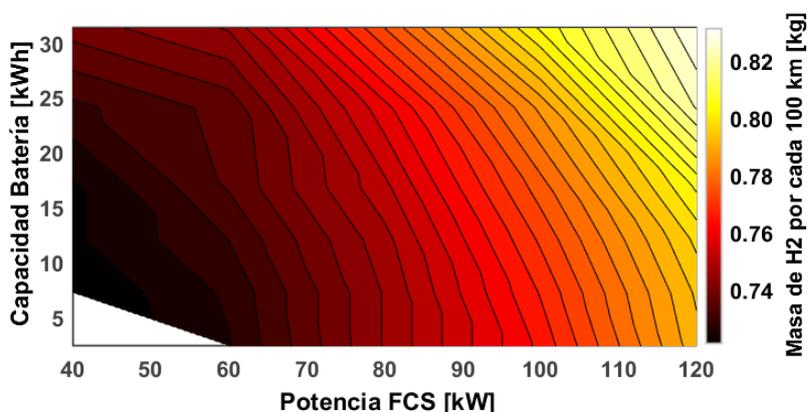


Figura 4.2: Mapa de soluciones para la masa de hidrógeno por cada 100 km de la misión de transporte médico.

Resumiendo todo lo que se ha expuesto del análisis de los resultados de la misión de transporte médico, y destacando que dicha misión se realiza bajo la condición de máximo alcance, se ha optado por la solución de menor consumo de hidrógeno y que cumpla con los requerimientos de la misión. Entonces, dicha solución podría ser la aplicación de un sistema propulsivo de 40 kW de potencia y 7.24 kWh de capacidad de batería, el cual conlleva una masa de hidrógeno consumido de 3.86 kg y una MTOM de 559.2 kg. A pesar de esta selección, es cierto que en este caso, como se aplica la condición de máximo alcance, existe la posibilidad de seleccionar otro sistema propulsivo que incremente la potencia de la pila de combustible, permitiendo velocidades más elevadas con un consumo más elevado en condiciones de vuelo óptimas. Sin embargo, con el fin de seguir el mismo criterio que para el resto de misiones, se ha decidido seleccionar dicha solución expuesta.

MISIÓN DE VIGILANCIA FORESTAL

La segunda misión que se ha propuesto incluir en el estudio de optimización ha sido la de vigilancia forestal en el Principado de Asturias. Para ello, como ya se ha comentado en la Metodología de cada una de las misiones propuestas (ver Capítulo 3), se debe tener en cuenta que la condición de vuelo para este caso en específico es máxima autonomía, es decir, consumir la mínima cantidad de hidrógeno para unas condiciones de nivel de vuelo requeridas y para una distancia concreta, logrando mantener dicho nivel bajo cualquier circunstancia. Todo ello fue explicado con anterioridad en la Metodología del documento, por lo que a partir de este momento el objetivo es exponer los resultados más destacados al respecto de las optimizaciones efectuadas para esta segunda misión. Primero de todo, en la tabla 4.6 se exponen las masas de hidrógeno iniciales y tras la correspondiente optimización de cada una de ellas. Además, todo ello para cada potencia y capacidad de batería disponibles, combinándose entre sí, obteniendo los siguientes resultados:

Potencia FCS (kW)	Capacidad batería (kWh)	Masa H_2 inicial (kg)	Masa H_2 óptima (kg)	MTOM (kg)
40	<i>16,88</i>	5,83	5,56	625,1
	<i>24,12</i>	5,83	5,93	670,1
	<i>31,36</i>	5,83	6,32	715,1
60	<i>16,88</i>	5,83	5,65	656,4
	<i>24,12</i>	5,83	5,89	700,6
	<i>31,36</i>	5,83	6,08	744,7
80	<i>2,41</i>	5,83	5,35	599,5
	<i>7,24</i>	5,83	5,60	629,4
	<i>12,06</i>	5,83	5,78	659,0
	<i>16,88</i>	5,83	5,93	688,5
	<i>24,12</i>	5,83	6,10	732,4
	<i>31,36</i>	5,83	6,28	776,4
100	<i>2,41</i>	5,83	5,63	631,7
	<i>7,24</i>	5,83	5,81	661,3
	<i>12,06</i>	5,83	6,00	690,9
	<i>16,88</i>	5,83	6,13	720,3
	<i>24,12</i>	5,83	6,33	764,4
	<i>31,36</i>	5,83	6,52	808,4
120	<i>2,41</i>	5,83	5,86	663,6
	<i>7,24</i>	5,83	6,06	693,3
	<i>12,06</i>	5,83	6,19	722,6
	<i>16,88</i>	5,83	6,31	752,0
	<i>24,12</i>	5,83	6,53	796,1
	<i>31,36</i>	5,83	6,77	840,4

Cuadro 4.6: Resultados obtenidos de la misión de vigilancia forestal.

De la tabla 4.6 se pueden destacar diferentes aspectos relevantes. Lo primero de todo es que en esta misión se dispone de soluciones convergidas para casi todas las potencias y capacidades de batería simuladas, con sus respectivas combinaciones. Tal es así, que para las potencias de 40 y 60 kW no se dispone de soluciones convergidas para las 2.42, 7.24 y 12.06 kWh de capacidad de batería.

Por otro lado, se destaca cómo se aumenta el hidrógeno a medida que se aumenta la potencia de la pila de combustible (para la misma capacidad de batería). Como anteriormente en la primera misión, es lógico y razonable pensar que si se aumenta la capacidad de la batería aumentará el peso del conjunto. Por último, destacar que mayor potencia implica un mayor consumo de manera general del hidrógeno, ya que aumentar la potencia siempre implica aumentar la necesidad de consumo de hidrógeno por parte del sistema propulsivo. Sin embargo, al contrario de la misión previa, en este caso no todas las soluciones convergidas consiguen masas de hidrógeno consumidas menores a la capacidad del tanque, sino que existen muchas soluciones que necesiten un tanque de mayor capacidad de hidrógeno para cumplir con las características de la misión. Esto puede deberse al diferente perfil del terreno, ya que en este caso la misión se realiza sobre un terreno montañoso, mientras que en la misión de vigilancia marítima se realiza sobre el mar, con todo lo que ello conlleva en cuanto a la orografía del terreno.

De manera similar a como sucede en la misión de transporte médico, para una potencia de 80 kW y 2.41 kWh de capacidad de batería se obtiene un menor consumo de hidrógeno que para una potencia de 60 kW y 31.36 kWh de capacidad de batería. Tal es así que, para las condiciones actuales se logra menor consumo que incluso para una potencia de 40 kW y 31.36 kWh de capacidad de batería, suceso que en la primera misión no sucedía. A mayores, también se consiguen menores consumos que para una potencia de 60 kW y 16.88 o 24.12 kWh de capacidad de batería, respectivamente; es decir, se trata de la opción de menor consumo de hidrógeno entre las disponibles. Por otra parte, bajo la condición de máxima autonomía se pueden obtener conclusiones muy relevantes para el MTOM, el cual para la potencia y celdas descritas al principio de este párrafo se obtiene una MTOM de 599.5 kg, la menor de entre todos los casos existentes en esta misión.

Entonces, todo lo comentado anteriormente debe tenerse en cuenta para escoger la pila de combustible que mejor se adapte a las condiciones de la misión establecida. Antes de escoger la misma, en la tabla 4.6 se han expuesto los valores de masa tras converger la solución y después de optimizar al máximo posible el tanque de combustible. Para ello, se parte de la base de que, tras converger en una solución válida por primera vez, para esta misión en concreto se obtiene una capacidad del tanque de hidrógeno de 5.83 kg.

Para optimizar dicha capacidad y cumplir la misión con la menor cantidad de combustible almacenada y llenando dicho tanque al 100%, se ha procedido a iterar la solución convergida tantas veces como fuese necesario, hasta obtener el valor de masa óptima de la tabla 4.6. En esta ocasión, debe tenerse en cuenta que para muchos de los casos no se logra ninguna reducción en la optimización, sino que se aumenta la masa y el tanque.

Para realizar esta optimización, se establece una media de hidrógeno consumido para cada potencia de pila de combustible simulada, se compara con la masa inicial de hidrógeno, observando cómo ha mejorado la solución al ser optimizada (ver tabla 4.7), de manera idéntica a como se ha procedido en la misión de transporte médico:

Potencia FCS (kW)	Masa H_2 Inicial (kg)	Media Masa Optimizada (kg)	Cambio en la Masa de H_2 (%)
40	5,83	5,94	1,9%
60	5,83	5,87	0,7%
80	5,83	5,84	0,1%
100	5,83	6,08	4,1%
120	5,83	6,29	7,8%

Cuadro 4.7: Optimización de la masa de hidrógeno para la misión de vigilancia forestal.

En esta misión, como se puede destacar a partir de la tabla 4.7, para las condiciones establecidas, no se consigue nunca una reducción del hidrógeno consumido para ninguna de las potencias. Lo que es más grave, para las potencias de 100 y 120 kW se requieren porcentajes de aumento de la masa de hidrógeno elevados. Entonces, para este caso en particular, sí se tendrán en cuenta todas estas soluciones, a pesar de que no se traten de las condiciones ideales en comparación a la misión previas. Esto además resultará en un factor relevante para escoger la pila de combustible más adecuada para la misión de vigilancia forestal.

Tras exponer los resultados anteriores, como en la misión anterior, se han realizado 4 sesiones de simulación diferentes, de las cuales una de ellas dispone de características relativamente diferentes en cuanto al peso del conjunto. Esto supone cambios en los resultados obtenidos, ya que el cambio en las condiciones iniciales supondrá variaciones significativas de las optimizaciones realizadas para esta misión. Por lo tanto, estos resultados son los mostrados a continuación:

Potencia FCS (kW)	Capacidad batería (kWh)	Masa H_2 inicial (kg)	Masa H_2 óptima (kg)	MTOM (kg)
100	2,41	5,83	6,98	732,2
	7,24	5,83	6,84	740,3
	16,88	5,83	7,24	819,3
	24,12	5,83	7,56	871,7
	31,36	5,83	7,60	916,1
120	2,41	5,83	7,08	764,8
	7,24	5,83	7,26	796,6
	12,06	5,83	7,41	827,8
	16,88	5,83	7,61	860,2
	24,12	5,83	7,64	904,5
	31,36	5,83	7,92	951,9

Cuadro 4.8: Segundos resultados para la misión de vigilancia forestal.

En esta ocasión, de forma similar a como sucedía en las misión de transporte médico, el aumento de peso provoca mayores cantidades de hidrógeno necesarios para llevar a cabo la misión en cuestión. Además, en este caso en particular, tras realizar la optimización de cada una de las variantes disponibles, se puede observar un gran incremento en el hidrógeno necesario para la correcta ejecución de la misión, aspecto que denota que estos resultados no serán tenidos en cuenta para el momento de escoger la pila de combustible adecuada para la misión de vigilancia forestal. De hecho, en la tabla 4.9 se pueden ver los porcentajes de aumento de masa de hidrógeno respecto de la media de cada una de las potencias del sistema propulsivo que se disponen:

Potencia FCS (kW)	Masa H_2 Inicial (kg)	Media Masa Optimizada (kg)	Cambio en la Masa de H_2 (%)
100	5,83	7,25	24,3%
120	5,83	7,49	28,4%

Cuadro 4.9: Optimización de la masa de hidrógeno para la misión de vigilancia forestal en el segundo caso.

Como se puede comprobar en la tabla 4.9, en esta misión el aumento de peso provoca una mayor cantidad de hidrógeno necesario para conseguir ejecutar la misión, provocando porcentajes de aumento ostensiblemente mayores que en las misión de transporte médico. Ello conlleva a que los resultados adheridos a esta casuística no sean tenidos en cuenta posteriormente en la resolución de la pila de combustible escogida.

Entonces, tras haber expuesto todos los resultados obtenidos de esta segunda misión, finalmente se debe escoger el sistema propulsivo que mejor se adecúe a las características de la misión y sus condicionantes. Como bien es sabido, se ha impuesto la condición de máxima autonomía, por lo que se requiere una pila de combustible capaz de cumplir con los detalles técnicos de la misión, mientras que consuma la menor cantidad posible de hidrógeno. Para este propósito, se ha elaborado una comparativa entre todos los resultados disponibles, mediante una tabla (ver tabla 4.10). Otra forma de entender y comprender los resultados obtenidos es, como en la misión de transporte médico, a través de un mapa que sea capaz de representar adecuadamente los resultados. Para ello, en base a la potencia del sistema propulsivo, la capacidad de la batería y el MTOM, consiguiendo establecer el mapa en función de los resultados (ver figura 4.3), al igual que otro mapa en función de la masa de hidrógeno por cada 100 km (ver figura 4.4).

Potencia FCS (kW)	Capacidad batería (kWh)	Masa H_2 óptima (kg)	MTOM (kg)
80	2,41	5,35	599,5
40	16,88	5,56	625,1
80	7,24	5,60	629,4
100	2,41	5,63	631,7
60	16,88	5,65	656,4
80	12,06	5,78	659,0
100	7,24	5,81	661,3
120	2,41	5,86	663,6
40	24,12	5,93	670,1
80	16,88	5,93	688,5
100	12,06	6,00	690,9
120	7,24	6,06	693,3
60	24,12	5,89	700,6
40	31,36	6,32	715,1
100	16,88	6,13	720,3
120	12,06	6,19	722,6
80	24,12	6,10	732,4
60	31,36	6,08	744,7
120	16,88	6,31	752,0
100	24,12	6,33	764,4
80	31,36	6,28	776,4
120	24,12	6,53	796,1
100	31,36	6,52	808,4
120	31,36	6,77	840,4

Cuadro 4.10: MTOM ordenados para la misión de vigilancia forestal.

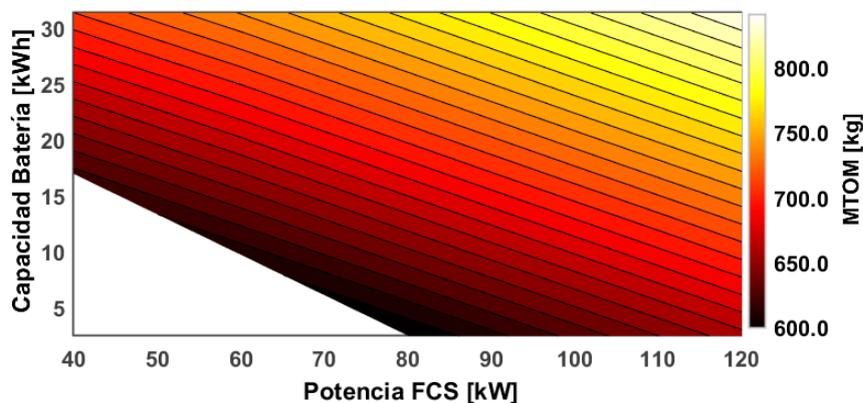


Figura 4.3: Mapa de soluciones MTOM de la misión de vigilancia forestal.

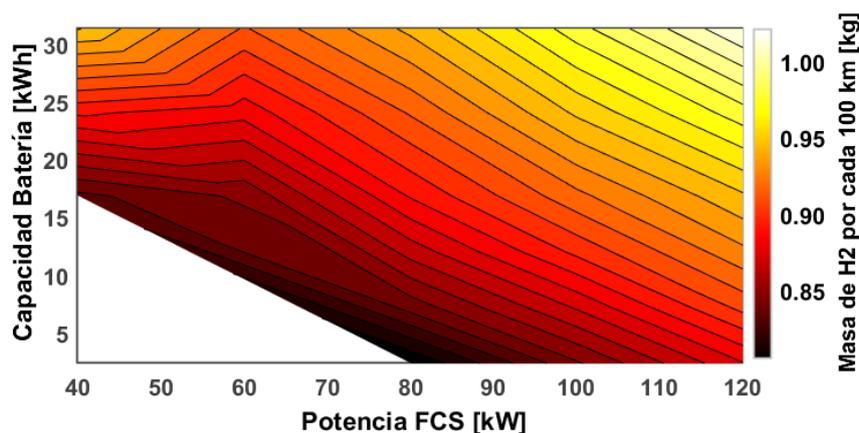


Figura 4.4: Mapa de soluciones de masa de hidrógeno por cada 100 km de la misión de vigilancia forestal.

En este caso, a diferencia de la misión de transporte médico, la potencia del sistema propulsivo influye relativamente más en cuanto a MTOM se refiere. Para esta segunda misión se ha impuesto la condición de máxima autonomía, por la cual el objetivo primordial es el cumplimiento de la misión consumiendo la menor cantidad de hidrógeno posible. Además, se debe tener en cuenta que la selección de la solución óptima no debe realizarse sólo en base al consumo de hidrógeno, ya que la batería también aporta potencia y eso implicaría realizar un sesgo hacia diseños con mayor tamaño de la batería; por eso se ha decidido emplear el criterio de menor MTOM para la selección. Por lo tanto, se puede concluir fácilmente en que la pila de combustible adecuada a la misión de vigilancia forestal es la que dispone de una potencia de 80 kW y 2.41 kWh de capacidad de batería, con un consumo de hidrógeno de 5.35 kg y un MTOM de 599.5 kg.

MISIÓN DE VIGILANCIA MARÍTIMA

Tras el análisis individual de las dos misiones previas, en este apartado se concluyen los resultados de cada misión con la tercera y última de las misiones propuestas, la de vigilancia marítima en el Estrecho de Gibraltar. Para su correcta representación de los resultados obtenidos tras el estudio pertinente, cabe destacar que la condición de vuelo impuesta ha sido la de máxima autonomía, es decir, consumir la menor cantidad de hidrógeno posible siendo capaz de cumplir con las condiciones de la misión establecidas, tanto distancia de la misma como mantenimiento de las condiciones de vuelo. Entonces, a partir de este instante se procederá a la exposición de los resultados más destacados al respecto de las iteraciones y correspondientes optimizaciones efectuadas para esta tercera misión.

Potencia FCS (kW)	Capacidad batería (kWh)	Masa H₂ inicial (kg)	Masa H₂ óptima (kg)	MTOM (kg)
40	2,41	5,62	3,81	530,6
	7,24	5,62	3,86	559,2
	12,06	5,62	3,94	588,4
	16,88	5,62	4,04	617,6
	24,12	5,62	4,29	661,9
	31,36	5,62	4,55	706,3
60	2,41	5,62	3,91	561,5
	7,24	5,62	3,97	590,9
	12,06	5,62	4,05	619,7
	16,88	5,62	4,19	649,1
	24,12	5,62	4,41	693,3
	31,36	5,62	4,66	737,6
80	2,41	5,62	4,07	593,1
	7,24	5,62	4,16	622,2
	12,06	5,62	4,29	651,6
	16,88	5,62	4,43	681,0
	24,12	5,62	4,65	725,2
	31,36	5,62	4,91	769,6
100	2,41	5,62	4,26	624,8
	7,24	5,62	4,40	654,2
	12,06	5,62	4,54	683,6
	16,88	5,62	4,68	713,1
	24,12	5,62	4,93	757,4
	31,36	5,62	5,20	801,8
120	2,41	5,62	4,54	657,0
	7,24	5,62	4,67	686,3
	12,06	5,62	4,80	715,7
	16,88	5,62	4,96	745,2
	24,12	5,62	5,22	789,6
	31,36	5,62	5,39	833,5

Cuadro 4.11: Resultados obtenidos de la misión de vigilancia marítima.

Gracias a la tabla 4.11 se pueden destacar diferentes aspectos al respecto. Para comenzar, en esta misión se dispone de soluciones convergidas para todas las potencias y capacidades de batería simuladas, con sus respectivas combinaciones. Por otro lado, se destaca como se aumenta el hidrógeno a medida que se aumenta la potencia de la pila de combustible (para la misma capacidad de batería). Como anteriormente en las dos primeras misiones, es lógico y razonable pensar que si se aumenta la capacidad de la batería aumentará el peso del conjunto. Por último, destacar que mayor potencia implica un mayor consumo de manera general del hidrógeno, ya que aumentar la potencia siempre implica aumentar la necesidad de consumo de hidrógeno por parte del sistema propulsivo.

De manera similar a como sucede en la misiones de transporte médico y vigilancia forestal, para una potencia de 80 kW y 2.41 kWh de capacidad de batería se obtiene un menor consumo de hidrógeno que para una potencia de 60 kW y 31.36 kWh de capacidad de batería. Tal es así que, para las condiciones actuales se logra menor consumo que incluso para una potencia de 40 kW y 31.36 kWh de capacidad de batería, suceso que en la primera misión no sucedía. A mayores, también se consiguen menores consumos que para una potencia de 60 kW y 16.88 o 24.12 kWh de capacidad de batería, respectivamente. Por otra parte, bajo la condición de máxima autonomía se pueden obtener conclusiones muy relevantes para el MTOM, el cual para la potencia y celdas descritas al principio de este párrafo se obtiene una MTOM de 593.1 kg, menor que en varios casos para menores potencias.

Entonces, todo lo comentado anteriormente debe considerarse de especial relevancia para el momento de escoger la pila de combustible que mejor se adapte a las condiciones de la misión establecida. Antes de escoger la misma, en la tabla 4.11 se han expuesto los valores de masa tras converger la solución y después de optimizar al máximo posible el tanque de combustible. Para ello, se parte de la base de que, tras converger en una solución válida por primera vez, para esta misión en concreto se obtiene una capacidad del tanque de hidrógeno de 5.62 kg. Entonces, para optimizar dicha capacidad y cumplir la misión con la menor cantidad de combustible almacenada y llenando dicho tanque al 100%, se ha procedido a iterar la solución convergida tantas veces como fuese necesario, hasta obtener el valor de masa óptima de la tabla 4.11.

La optimización se puede observar de la siguiente manera: estableciendo una media de hidrógeno consumido para cada potencia de pila de combustible simulada, se compara con la masa inicial, observando cómo ha mejorado la solución al ser optimizada (ver tabla 4.12), de manera idéntica a como se ha procedido en las dos misiones anteriores:

Potencia FCS (kW)	Masa H_2 Inicial (kg)	Media Masa Optimizada (kg)	Cambio en la Masa de H_2 (%)
40	5,62	4,08	-27,4%
60	5,62	4,20	-25,3%
80	5,62	4,42	-21,4%
100	5,62	4,67	-16,9%
120	5,62	4,93	-12,3%

Cuadro 4.12: Optimización de la masa de hidrógeno para la misión de vigilancia marítima.

Como se puede apreciar en la tabla 4.12, en esta misión, para las condiciones establecidas, se consigue optimizar la cantidad de hidrógeno requerida para conseguir alcanzar la distancia de la misión adecuadamente, de igual forma que para la misión de transporte médico. Además, se puede observar cómo las potencias más reducidas, en concreto la de 40 kW, son capaces de conseguir mayores porcentajes de optimización de la pila de combustible, en comparación con una pila de 120 kW, que es capaz de reducir la cantidad de hidrógeno necesaria, pero en menor medida. Tal es así, que en esta misión se puede observar cómo la optimización del sistema propulsivo se reduce a medida que se aumenta la potencia del mismo, perdiendo efectividad en el proceso. Esto también resultará ser otro factor a tener en cuenta para escoger la pila de combustible más adecuada para la condición de máximo alcance de la misión.

Por otro lado, como se había comentado en la presentación previa del presente capítulo, en este caso también se han elaborado 4 sesiones diferentes, con el objetivo de conseguir la mejor optimización posible de la misión de vigilancia marítima. Entre ellas, tres de las sesiones disponían de las mismas condiciones, pero en cada una se propusieron diferentes potencias de pila de combustible. Por el contrario, para la última sesión se cambiaron las condiciones iniciales, aumentando los pesos globales del dron, con el objetivo de observar qué sucede al respecto. Resumiendo, los resultados obtenidos son los que se muestran a continuación (esto se realiza del mismo modo a la misión de transporte médico):

Potencia FCS (kW)	Capacidad batería (kWh)	Masa H_2 inicial (kg)	Masa H_2 óptima (kg)	MTOM (kg)
100	2,41	5,62	5,04	697,3
	7,24	5,62	5,21	729,1
	12,06	5,62	5,41	761,4
	16,88	5,62	5,62	793,9
	24,12	5,62	5,80	840,2
	31,36	5,62	5,93	885,7
120	2,41	5,62	5,34	733,5
	7,24	5,62	5,54	765,8
	12,06	5,62	5,75	798,3
	16,88	5,62	5,88	829,3
	24,12	5,62	6,01	867,6
	31,36	5,62	6,15	910,7

Cuadro 4.13: Segundos resultados para la misión de vigilancia marítima.

Como se puede observar, para esta misión de vigilancia marítima sucede algo similar que en el caso de la misión de transporte médico y también que la de vigilancia forestal, es decir, que el aumento de peso provoca mayores consumos de hidrógeno respecto de las demás simulaciones efectuadas para menores pesos del conjunto del dron. Sin embargo, en este caso, debido a que la masa del tanque en la primera simulación convergida es bastante mayor que la cantidad óptima, sucede que se pueden obtener reducciones del consumo de hidrógeno tras iterar la primera solución. Esto no sucedía en las otras dos misiones y, a modo de demostración, se procede a exponer en la tabla 4.14 la reducción o aumento en el

peso en función de la potencia del sistema propulsivo, considerando la media de las masas para cada potencia:

Potencia FCS (kW)	Masa H_2 Inicial (kg)	Media Masa Optimizada (kg)	Cambio en la Masa de H_2 %
100	5,62	5,50	-2,1%
120	5,62	5,78	2,8%

Cuadro 4.14: Optimización de la masa de hidrógeno para la misión de vigilancia marítima en el segundo caso.

A pesar de estos resultados relativamente diferentes a las dos misiones precedentes, en los que para una potencia de 100 kW sí se logra una reducción de la masa de hidrógeno consumida (aunque para la potencia de 120 kW continúa necesitando un aumento del peso para cumplir las características de la misión); tampoco serán tenidos en cuenta en el proceso de elección de la mejor pila de combustible para el dron y las condiciones de máxima autonomía asociadas a la misión de vigilancia forestal.

Una vez se han expuesto todos los resultados obtenidos de las simulaciones para la tercera y última misión de las propuestas, el propósito final es la elección del sistema propulsivo que mejor se adapte a las características de la misión de vigilancia marítima, en la que se requiere una pila de combustible que sea capaz de consumir la menor cantidad de combustible para las condiciones de vuelo establecidas. Para ello, al igual que para las misiones de transporte médico y de vigilancia forestal, se ha optado por clasificar todas las soluciones disponibles en función del MTOM, analizando posteriormente la elección (a través de la tabla 4.15).

Otra forma de entender y comprender los resultados obtenidos es, como en las dos misiones previas, a través de un mapa que sea capaz de representar adecuadamente los resultados. Para ello, en base a la potencia del sistema propulsivo, la capacidad de la batería y el MTOM, consiguiendo establecer el mapa en función de los resultados (ver figura 4.5). Además, se ha realizado otro mapa de la masa de hidrógeno por cada 100 km para los resultados obtenidos (ver figura 4.6), con el fin de visualizar correctamente las tendencias:

Potencia FCS (kW)	Capacidad batería (kWh)	Masa H_2 óptima (kg)	MTOM (kg)
40	2,41	3,81	530,6
40	7,24	3,86	559,2
60	2,41	3,91	561,5
40	12,06	3,94	588,4
60	7,24	3,97	590,9
80	2,41	4,07	593,1
40	16,88	4,04	617,6
60	12,06	4,05	619,7
80	7,24	4,16	622,2
100	2,41	4,26	624,8
60	16,88	4,19	649,1
80	12,06	4,29	651,6
100	7,24	4,40	654,2
120	2,41	4,54	657,0
40	24,12	4,29	661,9
80	16,88	4,43	681,0
100	12,06	4,54	683,6
120	7,24	4,67	686,3
60	24,12	4,41	693,3
40	31,36	4,55	706,3
100	16,88	4,68	713,1
120	12,06	4,80	715,7
80	24,12	4,65	725,2
60	31,36	4,66	737,6
120	16,88	4,96	745,2
100	24,12	4,93	757,4
80	31,36	4,91	769,6
120	24,12	5,22	789,6
100	31,36	5,20	801,8
120	31,36	5,39	833,5

Cuadro 4.15: MTOM ordenados para la misión de vigilancia marítima.

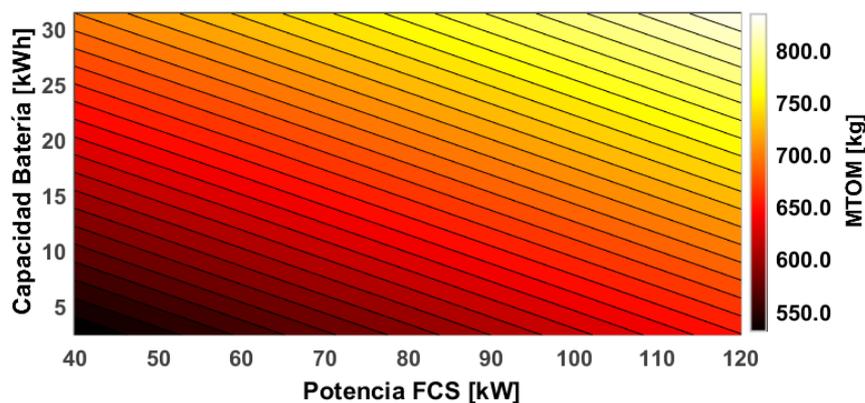


Figura 4.5: Mapa de soluciones MTOM de la misión de vigilancia marítima.

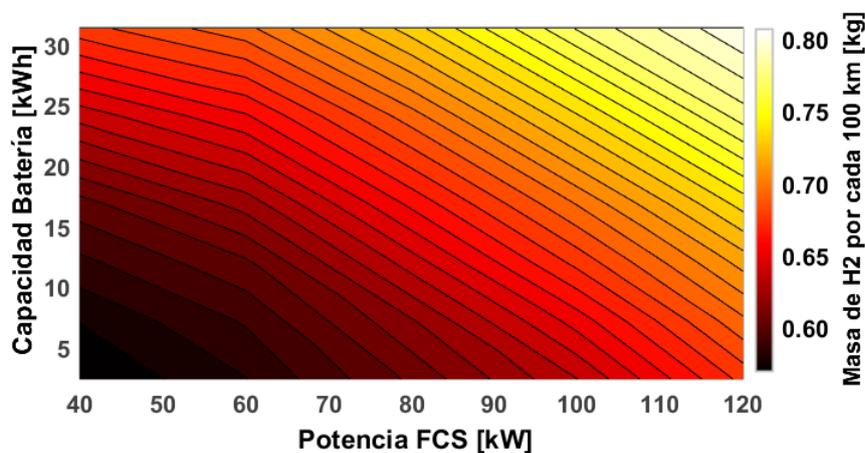


Figura 4.6: Mapa de soluciones de masa de hidrógeno por cada 100 km de la misión de vigilancia marítima.

En este caso, a diferencia de la misión de transporte médico, la potencia del sistema propulsivo tiene especial relevancia en cuanto a MTOM se refiere (al igual que en el caso de la misión de vigilancia forestal). Para esta tercera misión se ha impuesto la condición de máxima autonomía, por la cual el objetivo primordial es el cumplimiento de la misión consumiendo la menor cantidad de hidrógeno posible. Tal es así que se debe tener en cuenta que la selección de la solución óptima no debe realizarse sólo en base al consumo de hidrógeno, ya que la batería también aporta potencia y eso implicaría realizar un sesgo hacia diseños con mayor tamaño de la batería; por eso se ha decidido emplear el criterio de menor MTOM para la selección. Por lo tanto, se puede concluir fácilmente en que la pila de combustible adecuada a la misión de vigilancia marítima es la que dispone de una potencia de 40 kW y 2.41 kWh de capacidad de batería, con un consumo de hidrógeno de 3.81 kg y un MTOM de 530.6 kg.

4.2. Comparativa y aplicabilidad a la industria

Para finalizar adecuadamente el análisis de los resultados obtenidos del estudio de optimización de la pila de combustible para un dron en tres misiones propuestas, se debe realizar el presente apartado, comparando las tres misiones y sus sistemas propulsivos escogidos, y posteriormente observando sus posibilidades de aplicación en la industria actual.

Previo a la comparativa en sí, se requiere resumir cuál es el sistema propulsivo empleado por cada una de las tres misiones del estudio de optimización:

- **Misión de transporte médico:** Potencia de 40 kW , 7.24 kWh de capacidad de batería, 3.86 kg de masa de hidrógeno y MTOM de $559,2\text{ kg}$.
- **Misión de vigilancia forestal:** Potencia de 80 kW , 2.41 kWh de capacidad de batería, 5.35 kg de masa de hidrógeno y MTOM de $599,5\text{ kg}$.
- **Misión de vigilancia marítima:** Potencia de 40 kW , 2.41 kWh de capacidad de batería, 3.81 kg de masa de hidrógeno y MTOM de 530.6 kg .

Como se puede comprobar, cada misión estudiada dispone de soluciones tecnológicas diferentes en función de los requerimientos de la misión, por lo que su comparación no resulta sencilla. Sin embargo, sí que se pueden conseguir ciertas similitudes y diferencias comparables entre sí. De primera mano, las misiones de vigilancia marítima y vigilancia forestal requieren de la misma condición de máxima autonomía, por lo que ambas soluciones se encuentran orientadas a conseguir el menor consumo de combustible posible para las características de la misión, por lo que la diferencia entre ellas radica de las condiciones iniciales y la capacidad de converger del simulador en cada una de ellas. Tal es así, que para la misión de vigilancia marítima se logra el menor de los consumos de hidrógeno a pesar de ser la misión en la que se recorre una distancia superior.

Por otra parte, la mayor diferencia de la misión de transporte médico respecto de las otras dos misiones estudiadas se trata de la condición impuesta, ya que el objetivo primordial de la misión es conseguir recorrer la distancia requerida mediante la condición de máximo alcance, consumiendo el menor combustible a la mayor velocidad posible. Esto provoca que la elección de la pila de combustible adecuada influya tanto el consumo como la potencia del sistema propulsivo, aunque como se desea mantener el mismo criterio de elección del sistema propulsivo en las tres misiones, se obtiene menor potencia pero también bajo consumo pero teniendo en cuenta la distancia inferior a las otras dos misiones (ver Capítulo 3). Por el contrario, se logra alcanzar el objetivo de la misión adecuadamente con potencia inferior a la misión de vigilancia forestal, por lo que la elección de dicha solución queda adecuadamente justificada. Además, se obtienen consumos menores que para la misión de vigilancia forestal, por lo que además de cumplir la condición de máximo alcance consigue consumos de hidrógeno inferiores que para la misión de vigilancia forestal, eso sí, teniendo en cuenta la distancia recorrida en cada caso (533 km respecto de 663 km), que también debe ser tenido en cuenta en la comparación entre ambas soluciones.

Si se comparan las dos misiones de vigilancia, en las cuales se imponen la misma condición de máxima autonomía pero para condiciones de vuelo y regiones diferentes, se puede observar cómo la misión de vigilancia marítima logra consumos mucho más reducidos que

la de vigilancia forestal, ya que requiere de la mitad de potencia del sistema propulsivo (40 kW respecto de 80 kW) para cumplimentar la misión adecuadamente. Además, como ya se ha comentado previamente, se consigue reducir el combustible consumido respecto de la misión de vigilancia forestal en un 27.9%, lo que conlleva a su vez a una reducción del MTOM, ya que al emplear una pila de combustible de menor potencia y consumir menor cantidad de masa de hidrógeno la masa total del conjunto del dron también se reduce.

Por otra parte, es posible comparar el MTOM de cada una de las tres misiones propuestas, donde se puede apreciar cómo la misión de vigilancia forestal es la que obtiene un mayor peso entre las tres. Esto se debe a la necesidad de empleo de una pila de combustible de mayor potencia para cumplir satisfactoriamente con la condición de máxima autonomía, por lo que se aumenta el peso respecto de las otras dos misiones. Por el contrario, la misión cuyo MTOM resulta ser más liviano vuelve a ser la misión de vigilancia marítima, en la que su reducida potencia y consumo de hidrógeno le permite obtener un dron cuyo peso es inferior a las otras dos soluciones disponibles.

Por último, cabe considerar que la introducción de las soluciones de las misiones en otras no siempre se puede llevar a cabo. Por ejemplo, la misión de transporte médico dispone de una distancia de 533 km, mientras que las otras dos misiones cumplimentan su objetivo de distancia en aproximadamente 100 km más, por lo que su implementación en cualquiera de las dos misiones de vigilancia resultaría inviable técnicamente. Sin embargo, la solución dispuesta para la misión de vigilancia forestal sí que puede ser empleada para la de vigilancia marítima, debido a que el sistema propulsivo a emplear es más potente, por lo que, aunque no fuese la pila de combustible más apropiada para realizar la segunda misión, sí que podría emplearse en caso de necesidad. Por el contrario, debido a las características de la misión de vigilancia forestal, la solución utilizada en la de vigilancia marítima no podría ser empleada. Esto se debe a la incapacidad para mantener las condiciones de vuelo y potencia requeridos para llevar a cabo la totalidad de la misión.

Tras comparar las soluciones de pila de combustible de cada una de las tres misiones propuestas, otro punto importante que debe ser considerado es la aplicabilidad de dichas soluciones a la industria actual. Como bien es sabido, el principal impedimento de aplicación de esta tecnología en gran parte de la industria es la necesidad de mejora y avance de la tecnología, la cual necesita estar mucho más desarrollada si se quiere conseguir llegar a su implementación en toda industria que requiera reducir sus emisiones contaminantes a partir del hidrógeno.

De este último párrafo se puede obtener otra problemática: la introducción del hidrógeno verde. En la actualidad existe una gran parte del hidrógeno producido a través de procedimientos de obtención contaminantes (ver Apartado 2.2), por lo que si el objetivo de la implantación del hidrógeno en la industria actual radica en la eliminación de las emisiones contaminantes, la obtención del hidrógeno a partir de dichos procesos elimina gran parte de las ventajas que presenta esta novedosa tecnología. Esto también sucede por ejemplo con las baterías, cuyas emisiones en su proceso de producción son considerablemente elevadas, y en aplicaciones como los vehículos terrestres deja de compensar en parte por esta problemática. Por ello, si el objetivo es conseguir no producir emisiones contaminantes con tecnologías de este tipo, se necesita que el hidrógeno sea un hidrógeno verde, producido mediante métodos completamente libres de emisiones contaminantes, consiguiendo de esta manera el principal objetivo de aplicación de esta tecnología.

Por otro lado, otro de los problemas actuales de la introducción del hidrógeno en la industria actual son los elevados costes que supone su aplicación en su conjunto, ya que se trata de una tecnología cara. Por ejemplo, en cuanto a la aplicación del hidrógeno a un dron mediante una pila de combustible, se requiere una reducción del precio de las pilas en sí, además del hidrógeno, el cual en la actualidad ronda un precio de entre 3 y 10 € el kilogramo. Entonces, si se desea implementar la pila de combustible al dron y aplicarlo en los sectores estudiados en las tres misiones propuestas, el principal obstáculo a solventar es la reducción de los costes de introducción de la tecnología, ya que puede mejorar dichos sectores sustancialmente, reduciendo las emisiones contaminantes con tecnología plenamente capaz de realizar dichos cometidos sin ningún inconveniente.

Entonces, a pesar de que se trata de una tecnología que puede resultar muy útil de aplicar y con enormes ventajas, es necesario un desarrollo de la misma para poder ser empleada a gran escala, hasta alcanzar en un futuro los objetivos propuestos y necesarios para poder aplicar dicha tecnología del hidrógeno, libre de emisiones contaminantes y capaz de llevar a cabo misiones y requerimientos con iguales o superiores prestaciones que las soluciones convencionales.

Capítulo 5

Conclusiones

Durante el trabajo, se ha realizado un estudio de optimización de la pila de combustible de hidrógeno en un dron para la realización de tres misiones propuestas. Para ello, previamente se han expuesto los fundamentos teóricos, en los que se ha explicado qué es el hidrógeno, sus formas de obtención y almacenamiento, para luego poder desarrollar correctamente los principios básicos de la pila de combustible y las diferentes tecnologías disponibles al respecto. Una vez la base teórica fue descrita adecuadamente, en el siguiente capítulo se ha explicado la metodología del estudio, argumentando el por qué de su realización, qué se ha hecho paso a paso, las herramientas utilizadas, la pila de combustible elegida y las misiones propuestas. Tras esto, se han expuesto todos los resultados de cada una de las misiones, analizando con detalle cada una de ellas y realizando una comparativa posterior entre ellas, observando además su aplicabilidad a la industria actual.

Como bien es sabido, en la actualidad se introducen en la atmósfera excesivas emisiones contaminantes que radican en tecnologías convencionales que necesitan evolucionar en favor de nuevas opciones que reduzcan o eliminen dichas emisiones en el futuro. Para lograr este objetivo tan ambicioso, el hidrógeno, y en particular la pila de combustible, puede ser una gran alternativa, debido a que se trata de una tecnología libre de emisiones, capaz de obtener rendimientos interesantes que pueden ser trasladados a determinados sectores industriales.

El objetivo principal del estudio es la identificación del sistema propulsivo óptimo basado en pila de combustible de hidrógeno para un dron de ala fija en diferentes misiones objetivo. Esto se ha podido llevar a cabo satisfactoriamente donde, mediante el estudio de optimización realizado, se han obtenido varias soluciones para aplicar esta tecnología en determinados sectores. En este caso, el estudio se ha centrado en la aplicación de la tecnología para transporte médico y vigilancia marítima y forestal mediante el empleo de drones que sustituyan a los vehículos aéreos convencionales que realizan en la actualidad dichas tareas. En primer lugar, en la misión de transporte médico se ha obtenido una pila de combustible optimizado con una potencia de 40 kW y 7.24 kWh de capacidad de batería, la cual permite realizar dicha misión con un consumo de tan solo 3.86 kg de hidrógeno. En cuanto a las misiones de vigilancia forestal y marítima, tras realizar la optimización se obtuvieron sendas pilas de combustible de 80 kW y 2.41 kWh de capacidad de batería y de 40 kW y 2.41 kWh de capacidad de batería, respectivamente. Ambas soluciones consiguen consumos reducidos de hidrógeno; en este caso para la misión de vigilancia forestal se obtuvo un consumo de 5.35 kg, mientras que para la misión de vigilancia marítima se logró un consumo

de hidrógeno de 3.81 kg.

Gracias al estudio de optimización efectuado, el objetivo de generación de un sistema propulsivo lo más eficiente posible para conseguir la viabilidad de esta tecnología se ha consumado, ya que mediante la optimización de cada una de las misiones que se han propuesto se ha conseguido obtener el sistema propulsivo más eficiente posible, consumiendo el menor hidrógeno posible y siendo capaz de cumplir con los requerimientos de la misión.

Por otra parte, otro de los objetivos era la realización de una comparativa entre diferentes misiones para comprobar su viabilidad en este tipo de trabajos, confirmándose este hecho en base al reducido consumo de hidrógeno y su capacidad para llevar a cabo las misiones adecuadamente sin ningún tipo de inconveniente.

Por último, se ha requerido la determinación del consumo y la masa de hidrógeno necesaria para llevar a cabo cada una de las misiones planteadas en función de la capacidad de la batería y la potencia de la pila de combustible, llevándose a cabo correctamente mediante la optimización del sistema propulsivo llevada a cabo a través del simulador dispuesto para la realización de este trabajo.

En conclusión, si se consiguen los incrementos necesarios de desarrollo de la tecnología y se aplica correctamente en los sectores en los que se requiera, se puede reducir drásticamente las emisiones contaminantes producidas actualmente, favoreciendo a los ecosistemas y evitando provocar graves perjuicios futuros al medio ambiente, siendo además esta tecnología capaz de superar a otras que se encuentran en desarrollo actualmente y a las tecnologías convencionales empleadas en la actualidad.

Capítulo 6

Líneas futuras

Para concluir de la manera más adecuada el presente estudio realizado, se necesita realizar un pequeño análisis de los estudios futuros que se podrían efectuar a raíz de las optimizaciones ejecutadas a lo largo del estudio para las misiones propuestas. Para ello, la clave de todo reside en el desarrollo de la tecnología aplicada ya que, si se consigue optimizar en el futuro y se logra producir a gran escala, los costes derivados de la tecnología se reducirán en gran medida, tanto en lo que concierne a la pila de combustible como sistema propulsivo como al hidrógeno como vector energético.

Teniendo en cuenta todos los factores positivos y negativos, existen muchos estudios que están valorando cómo solventar ciertos inconvenientes, entre ellos el del transporte, ya que no existe una red hidrogenera de transporte, por lo que en un principio se debería de construir desde cero. Por ello, y con motivo de la problemática surgida recientemente en Europa debido a la invasión de Ucrania, una de las líneas de desarrollo está relacionada con la red de gaseoductos de la que se dispone en Europa. Entonces, si se emplease esta red para transportar hidrógeno, no sería necesaria la construcción de una red nueva, sino que sería necesario adaptarla para evitar que el hidrógeno se fugue, utilizando en este propósito una serie de líquidos especiales que impermeabilicen las paredes de los conductos, permitiendo una nula o ínfima pérdida del hidrógeno por el camino.

Un aspecto fundamental es la producción de hidrógeno, el cual ha aumentado exponencialmente, pero que, si continúa su expansión a lo largo del globo, ello permitiría reducir su precio hasta alcanzar valores incluso más rentables que con los derivados del petróleo. Sin embargo, uno de los mayores obstáculos para su ampliación es la necesidad de producirlo mediante métodos que no requieran el uso de combustibles fósiles, ya que, en caso contrario, se perdería gran parte de la eficiencia que se tiene como objetivo con la utilización del hidrógeno, tanto en producción de electricidad, propulsión de vehículos u otros menesteres.

En cuanto al estudio de optimización como tal, gracias al mismo se podría comenzar a desarrollar pilas de combustible capaces de ejecutar dichas misiones, las cuales, aunque al inicio de su producción representarían un coste considerablemente superior al de otras tecnologías tradicionales, consiguiendo establecer una producción a mayor escala de este tipo de pilas de combustible adaptadas a cada situación o misión que se manifieste en el mundo, se puede conseguir un mercado que reduzca los precios de aplicación de esta tecnología y, por tanto, consiguiendo hacer viable a la pila de combustible en este tipo de sectores y entornos. Además, gracias al estudio efectuado en este caso se podría proceder a avanzar en

estas misiones, consiguiendo, de la mano del Estado, aplicar dichas soluciones a la realidad. Por supuesto, el comienzo supondría grandes desembolsos pero, como ya se ha comentado previamente, con el consiguiente desarrollo y aumento en la producción de esta tecnología, en el futuro puede llegar a ser la opción más viable económicamente y en términos de reducción de emisiones contaminantes.

Por último, en el sector aeronáutico se está empezando a desarrollar una alternativa al empleo del hidrógeno como gas, una de las grandes problemáticas en la actualidad. Esta sería su utilización como líquido, y en este apartado la forma más sencilla sería utilizando el amoníaco (NH_3) como vector energético, lo que permitiría almacenar en los tanques grandes cantidades de hidrógeno licuado. El mayor problema relativo a este método es la toxicidad del propio amoníaco, donde sería obligatorio el empleo de materiales capaces de soportar los altos niveles tóxicos que produce este compuesto. Tal es así que actualmente se sigue esta tendencia en aviación, ya que se cree que es probable que la solución a los problemas en potencia y capacidad de almacenamiento podrían ser solventados mediante esta variante tecnológica, de igual manera que en los drones permitiría tanques de almacenamiento de hidrógeno mucho más reducidos y livianos.

Capítulo 7

Presupuesto

En este capítulo se tiene como objetivo ofrecer un breve análisis de los costes a los que ha sido sometido el estudio, desde los costes en tiempo para el alumno como para los profesores involucrados, hasta los costes de equipamiento, laborales y operacionales. Esto se realiza para concretar cómo se ha distribuido el tiempo y el dinero en un proyecto de estas características. Como se puede dilucidar de esta introducción, los costes materiales y de construcción del dron no se tienen en cuenta, ya que corresponden a fases más avanzadas del proyecto, las cuales aquí no se realizan. Por lo tanto, a continuación se exponen todos los costes derivados del estudio de optimización realizado.

7.1. Tiempo invertido

Para la correcta elaboración de todos los costes asociados al proyecto en cuestión, se requiere realizar el siguiente paso previo. Este se corresponde con el cálculo de las horas invertidas en el mismo, tanto por parte de los profesores encargados de la supervisión del estudio como del propio autor del mismo.

Entonces, en base a lo expuesto, se detalla el tiempo invertido para la realización del proyecto. El estudio comenzó su desarrollo en el mes de Abril, terminando a finales del mes de Julio. Dentro de este intervalo de 4 meses, en Abril y Mayo se procedió con las primeras etapas del estudio, con las correspondientes reuniones explicativas del mismo y las primeras fases de búsqueda de información y entendimiento del programa de simulaciones. Además, también se comenzaron dichas simulaciones, las cuales supusieron la mayor parte del tiempo, debido a que el ordenador ha estado desde Abril hasta mediados de Julio simulando las 24 horas del día. Durante los dos últimos meses (Junio y Julio), el porcentaje de trabajo realizado resultó de una combinación entre la redacción de la memoria, la comprensión de los resultados obtenidos y la continuación en las simulaciones de las tres misiones propuestas.

En cuanto al número de horas para cada uno de los trabajos y tareas descritos, las reuniones conllevaron un total de 3.5 horas. Luego, las simulaciones, en base a las 24 horas diarias simulando para cada uno de los 4 meses en los que ha sido realizado el proyecto, se obtienen 2.424 horas de simulaciones. Por otra parte, la redacción de la memoria ha conllevado una media de 5 horas diarias durante 45 días, es decir, 225 horas invertidas para dicho cometido. En cuanto a la búsqueda de información, se han establecido unas 30 horas en total, teniendo en cuenta tanto las exploraciones previas al comienzo del estudio,

las realizadas para adaptar el modelo a cada una de las tres misiones y las efectuadas para elaborar la memoria. Esto se puede ver reflejado en el resumen realizado a continuación:

	Tiempo invertido
Reuniones	3.5 h
Búsqueda de información	30 h
Simulaciones	2.424 h
Redacción de la memoria	225 h
TOTAL	2682.5 h

Cuadro 7.1: Tiempo invertido en el proyecto.

7.2. Costes de equipamiento

Una vez se tiene el tiempo invertido para todo el desarrollo del proyecto, desde sus fases iniciales hasta la completa redacción de la memoria, en esta apartado se exponen los costes de todo el equipamiento necesario para la correcta elaboración del proyecto, desde el ordenador empleado hasta los distintos programas informáticos requeridos para la correcta elaboración del estudio. Entonces, en el siguiente listado se expone todo lo comentado anteriormente:

- *Ordenador portátil*: MSI PE62 8RC, el cual tiene un coste total de 1699 €. Teniendo en cuenta que actualmente tiene 5 años de vida, esto supone un coste de 0.04 €/h.
- *MATLAB*: Programa informático empleado para las simulaciones. Tiene un coste de 900 € anuales. Teniendo en cuenta que la duración del proyecto fueron 4 meses, esto equivaldría a un coste de 300 € para el estudio en su conjunto. En cuanto a su coste por horas, este resulta de 0.10 €/h.
- *Overleaf*: Programa utilizado para la redacción del estudio, el cual tiene un coste de 19 € mensuales. Como la redacción del mismo ha conllevado dos meses, esto equivale a un coste de 38 €. En cuanto al coste por horas, resulta ser de 0.026 €/h.
- *Paquete Office*: Este paquete incluye la herramienta Microsoft Excel, el cual se ha requerido para el correcto control de las simulaciones. Tiene un coste de 69.99 € anuales. Es decir, para los 4 meses su coste ha supuesto 23.33 € al proyecto, que a su vez equivale a 0.008 €/h.
- *Google Maps y Google Earth*: Requeridos para la elaboración de los perfiles de los diferentes terrenos, estos son gratuitos para cualquier individuo, por lo que no suponen coste adicional alguno.
- *Adobe Acrobat Reader*: Necesario para la búsqueda de información y su correcta lectura, también es gratuito para el usuario estándar, como es el caso para este proyecto.

Por lo tanto, en la siguiente tabla se exponen los costes totales en función de las horas empleadas con cada uno de los programas y equipos utilizados:

Equipamiento	Tiempo empleado	Coste por hora	Coste total
Ordenador	2.682.5 h	0.04 €/h	107.3 €
MATLAB	2.424 h	0.10 €/h	242.4 €
Overleaf	225 h	0.026 €/h	5.85 €
Microsoft Excel	10 h	0.008 €/h	0.08 €
TOTAL			355.63 €

Cuadro 7.2: Costes de equipamiento y licencias.

7.3. Costes energéticos

Una vez se tienen los costes derivados de equipamiento y licencias, en este breve apartado se exponen los costes derivados del consumo energético del ordenador empleado, teniendo en cuenta los consumos medios en cada uno de los 4 meses en los que se ha realizado el estudio pertinente:

Mes	Tiempo invertido	Precio energía kWh	Coste mensual
Abril	662 h	0.04885 €/kWh	4.37 €
Mayo	682 h	0.054 €/kWh	4.97 €
Junio	662 h	0.0871 €/kWh	7.78 €
Julio	418 h	0.1253 €/kWh	7.07 €
TOTAL			24.19 €

Cuadro 7.3: Costes energéticos.

7.4. Costes laborales

Por otra parte, los costes totales del estudio no se pueden dar por finalizados sin llevar a cabo la realización de un apartado en lo que respecta a los costes laborales del autor del proyecto y de los dos profesores asociados a dicho estudio.

En este caso, a pesar de disponer de tutor y cotutor, solamente se estudian los costes relacionados al tutor, ya que en el caso del cotutor no ha participado en el proyecto en sí, sino que ha sido agregado debido a su gran aportación previa en el desarrollo del programa de simulación junto con el tutor. Por ello, es muy complicado evaluar los costes al respecto, teniendo en cuenta solamente al tutor y al autor del proyecto.

Para el correcto cálculo de estos costes, se requiere analizar brevemente ambos integrantes del estudio:

- *Autor:* Al tratarse de un alumno de reciente graduación, el coste por hora es de 5 €/h aproximadamente. Por otro lado, el proyecto ha resultado de un tiempo invertido de 560 h, con una media de 5 horas diarias de dedicación plena al estudio.
- *Tutor:* En este caso, un profesor de Universidad repercute en unos costes al proyecto de aproximadamente 20 €/h. En este caso, el tutor ha invertido 20 h al proyecto en cuestión.

Por lo tanto, los costes relacionados con el ámbito laboral de los integrantes del proyecto se disponen en el siguiente cuadro explicativo:

Personal	Tiempo invertido	Costes por hora	Coste total
Autor	560 h	5 €/h	2.800 €
Tutor	20 h	20 €/h	400 €
TOTAL			3.200 €

Cuadro 7.4: Costes laborales.

7.5. Costes totales

En conclusión, a raíz de todos los costes obtenidos del proyecto, se obtiene el siguiente presupuesto para la correcta realización del mismo:

Apartado	Coste total
Equipamiento	355.63 €
Energía	24.19 €
Laborales	3.200 €
PRESUPUESTO	3579.82 €

Cuadro 7.5: Presupuesto final.

Este resulta ser el presupuesto base, pero para conseguir el presupuesto final es necesario tener en cuenta varios factores. Uno de ellos es el margen de beneficio, en el cual se supone que se debe aumentar en un 14% para poder considerar todos los gastos derivados de la participación de personas externas al proyecto, las cuales han colaborado directa o indirectamente para lograr el éxito del estudio. Además, también se debe conceder otro 6% de margen extra por intereses en el mercado. Esto significa que, ante cualquier posible interés sobre el proyecto, se necesita un margen para poder operar con ello. Por último, esto se ha llevado a cabo sin impuestos, por lo que hay que realizar un incremento del presupuesto en base al IVA (Impuesto de Valor Añadido) del 21% existente en España. Con todo ello, ahora sí que es posible obtener un presupuesto acorde a las características del proyecto y del entorno en el que se encuentra. Este es de **5234.28 €**.

Capítulo 8

Pliego de condiciones

Por último pero no por ello menos relevante en el estudio efectuado, en este apartado se exponen dos leyes/decretos de obligatorio cumplimiento para el correcto funcionamiento y desarrollo del mismo. Estas se encuentran publicadas en el BOE (Boletín Oficial del Estado), y son el *Real Decreto 486/1997 del 14 de Abril*, en el que se establecen las condiciones mínimas del lugar de trabajo en materia de salud y seguridad en dicho entorno; y la *Ley 31/1995 del 8 de Noviembre* de prevención de riesgos laborales.

Estas dos leyes/decretos son requeridos en estudios como el presente para garantizar las condiciones mínimas de seguridad, salud y riesgos laborales, cumpliendo con la normativa vigente en la actualidad.

En cuanto a la normativa aplicable en cada uno de los boletines, a continuación se exponen los requerimientos y condiciones más destacados al respecto en el conjuntos de ambas leyes establecidas por el estado español.

En primer lugar, cabe destacar el orden, limpieza y mantenimiento de los lugares y entornos de trabajo, como dispone el Anexo II del Real Decreto 486/1997, donde se pueden destacar ciertas consideraciones:

- Los lugares de trabajo deben estar correctamente mantenidos en cuanto a limpieza, siendo necesaria dicha limpieza de manera periódica para preservar las condiciones de higiene adecuadas para la realización de los trabajos requeridos.
- De igual manera, las labores de limpieza deberán ser realizadas de tal forma que no representen ningún tipo de riesgo para el trabajador ni su entorno, realizándose en las horas adecuadas, con sus debidas condiciones y con los materiales requeridos para tal fin.
- Los lugares de trabajo deberán estar correctamente mantenidos, con el fin que en su funcionamiento no surja ninguna problemática que pueda provocar condiciones inseguras para el trabajador. Además, si se produjese alguna deficiencia en el entorno de trabajo, esta debe ser subsanada en la mayor brevedad posible, para así poder continuar con las tareas en el lugar de trabajo apropiado.

Otro de los puntos más importantes a destacar al respecto del Real Decreto 486/1997 es el Anexo III, el cual trata sobre las condiciones ambientales de trabajo. De este Anexo se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Primero de todo, la exposición a las condiciones ambientales en el lugar de trabajo deben ser lo suficientemente seguras para que no supongan ningún riesgo al trabajador.
- A consecuencia de lo anterior, el lugar de trabajo debe disponer de un entorno y condiciones que no causen incomodidad o molestia a los trabajadores del mismo. Esto es, no debe haber condiciones extremas de humedad, calor ni frío excesivo, corrientes de aire peligrosas para la salud del trabajador, etc.
- En general, en los entornos de trabajo existen ciertas condiciones de obligatorio cumplimiento. Entre ellas destacar que la temperatura debe situarse en la medida de lo posible entre los 17 y 27 °C para trabajadores de oficina, y no debe haber corrientes que superen cierta velocidad, ya que pueden llegar a ser peligrosas para la salud y seguridad de los trabajadores.

Otro punto relevante es el de las condiciones de higiene presentes en el lugar de trabajo, también establecidas a partir del Real Decreto 486/1997, donde se pueden destacar los siguientes puntos de la normativa:

- Todo lugar de trabajo deberá disponer de agua potable de fácil acceso, ya que se trata de un derecho de cualquier trabajador y necesario para su correcta productividad. Además, los entornos de trabajo deberán disponer de duchas, vestuarios, lavabos o retretes en la medida de lo posible y en función del tipo de trabajo. Por ejemplo, en entornos de oficina será de obligatorio cumplimiento disponer de lavabos y retretes suficientes para los trabajadores.
- Por otro lado, se deberá incorporar al área de trabajo locales de descanso cuando las condiciones o el entorno de trabajo así lo requieran, los cuales deben estar dotados con el inventario necesario para que funcionen adecuadamente, además de ser suficientemente accesibles para cualquier trabajador.

En cuanto a la normativa respecto de la Ley 31/1995, se debe tener en cuenta toda aquella relativa a la prevención de riesgos laborales requerida para trabajos de este tipo, con el fin de cumplir con las condiciones mínimas necesarias para la correcta realización de los trabajos en un entorno seguro y adecuado a los requerimientos dispuestos en dicha Ley. En conclusión, de este estudio se debe aplicar toda aquella normativa que se requiera para la correcta ejecución del mismo, teniendo en cuenta del tipo de trabajo que se está realizando y las condiciones mínimas requeridas para su debido funcionamiento.

REFERENCIAS

1. Holladay, J., Hu, J., King, L. y Wang, Y. *An overview of hydrogen production technologies*. 2009. <https://doi.org/10.1016/J.CATTOD.2008.08.039>.
2. Rasmussen, S. C. *Substantia: an International Journal of the History of Chemistry: 3, 2 Suplemento 1* 2009. <http://digital.casalini.it/4618467>.
3. Katz, E. y Bollella, P. *Fuel Cells and Biofuel Cells: From Past to Perspectives* 2020. <https://doi.org/10.1002/ijch.202000039>.
4. Andújar, J. M. y Segura, F. *Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries*. 2009. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2009.03.015>.
5. *HOJA DE RUTA DEL HIDRÓGENO: UNA APUESTA POR EL HIDRÓGENO RENOVABLE* 2020. chrome - extension : // efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj / https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/ministerio/planes-estrategias/hidrogeno/hojarutahidrogenorenovable_tcm30-525000.PDF.
6. *Airbus lidera GOLIAT, un innovador proyecto europeo de hidrógeno líquido para la aviación 2024*. <https://actualidadaeroespacial.com/airbus-lidera-goliat-un-innovador-proyecto-europeo-de-hidrogeno-liquido-para-la-aviacion/>.
7. *La hoja de ruta del hidrógeno en España: ¿podemos cumplir los objetivos?* 2020. <https://www.retema.es/actualidad/hoja-ruta-del-hidrogeno-espana-podemos-cumplir-objetivos>.
8. *Hidrógeno 2022*. <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/>.
9. De Castilla y León, J. *El combustible hidrógeno 2024*. <https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/combustible-hidrogeno.html>.
10. Appleby, A. J. y Foulkes, F. R. *Cathode electrocatalysis* (Van Nostrand Reinhold New York, 1989).
11. Steinberg, M. y Cheng, H. C. *MODERN AND PROSPECTIVE TECHNOLOGIES FOR HYDROGEN PRODUCTION FROM FOSSIL FUELS* (Int. J. Hydrogen Energy, 1989).
12. *Emisión cero. Co2*. 2003. http://www.energiasostenible.net/emision_cero_03.htm.
13. D, B., P, H. y G, S. *Hydrogen production and storage* (1981).
14. Kalamaras, C. M., Efstathiou, A. M., Al-Assaf, Y. y Poullikkas, A. *Conference Paper Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments* 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/690627>.
15. Abbas, H. F. y Daud, W. M. A. W. *Hydrogen production by methane decomposition: A review* 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.036>.

16. Piqué, J. L. *El hidrógeno y nuestro futuro energético* (2010).
17. Kudo, A. *Photocatalysis and solar hydrogen production* 2009. <https://doi.org/10.1351/PAC200779111917/MACHINEREAABLECITATION/RIS>.
18. Baykara, S. Z. *Hydrogen production by direct solar thermal decomposition of water; possibilities for improvement of process efficiency* 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.02.014>.
19. M., S., E., B., A., T. y K., Y. *SOLAR UT-3 THERMOCHEMICAL CYCLE FOR HYDROGEN PRODUCTION* (Else Science Ltd (Vol. 57, Issue I), 1996).
20. Wang, Z. L., Naterer, G. F., Gabriel, K. S., Gravelins, R. y Daggupati, V. N. *Comparison of different copper-chlorine thermochemical cycles for hydrogen production* 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.02.023>.
21. Delgado, E. y López López, J. *ESTUDIO Y MODELIZACIÓN DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE SOFC* (2017).
22. Züttel, A. *Hydrogen storage methods* 2004. <https://doi.org/10.1007/s00114-004-0516-x>.
23. Makridis, S. S. *Hydrogen storage and compression* (2017).
24. Qi, X. *et al. Production and characterization of hollow glass microspheres with high diffusivity for hydrogen storage* 2012. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2011.10.034>.
25. Aziz, M. *Liquid Hydrogen: A Review on Liquefaction, Storage, Transportation, and Safety* 2021. <https://doi.org/10.3390/EN14185917>.
26. Hu, Y. H. y Zhang, L. *Hydrogen Storage in Metal-Organic Frameworks* 2010. <https://doi.org/10.1002/adma.200902096>.
27. Larminie, J. y Dicks, A. *Fuel Cell Systems Explained* 2022. www.wiley.co.uk/fuelcellsystems.
28. Ren, J., Langmi, H. W., North, B. C. y Mathe, M. *Review on processing of metal-organic framework (MOF) materials towards system integration for hydrogen storage* 2015. <https://doi.org/10.1002/ER.3255>.
29. Delgado, E. y López López, J. *ESTUDIO Y MODELIZACIÓN DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE SOFC* (2017).
30. Vielstich, W., Lamm, A. y Gasteiger, H. *Handbook of Fuel Cells: Fundamentals* (2003).
31. Sharaf, O. Z. y Orhan, M. F. *An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications* 2014. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.01.012>.
32. Lucia, U. *Overview on fuel cells* 2014. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2013.09.025>.
33. De Física y Química, D. *Pilas de combustible: ¿sustituto energético también para pequeños dispositivos electrónicos?* 2014. <http://www.fqsaja.com/?p=8253%C3%A7>.
34. Kirubakaran, A., Jain, S. y Nema, R. K. *A review on fuel cell technologies and power electronic interface* 2009. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2009.04.004>.
35. Mekhilef, S., Saidur, R. y Safari, A. *Comparative study of different fuel cell technologies* 2012. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.09.020>.
36. Lee, J. H. y Lalk, T. R. *Modeling fuel cell stack systems* 1998. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(97\)02812-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(97)02812-7).

37. Zou, Y., Li, J., Zhang, J., Ding, K. y Wen, H. *Simulation of two types fuel cell stack models to investigate the relationship between air flow distribution and structure* 2019. <https://doi.org/10.1007/s11581-019-03059-5>.
38. Lee, J. H., Lalk, T. R. y Appleby, A. J. *Modeling electrochemical performance in large scale proton exchange membrane fuel cell stacks* 1998. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(97\)02683-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(97)02683-9).
39. Hidalgo García, I. *Estructura y conexión de las celdas* 2013. <https://es.slideshare.net/InmaHidalgoGarca/estructura-y-conexin-de-las-celdas>.
40. Hermann, A., Chaudhuri, T. y Spagnol, P. *Bipolar plates for PEM fuel cells: A review*. 2005. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2005.04.016>.
41. Larminie, J. y Dicks, A. *Fuel Cell Systems Explained* 2022. www.wiley.co.uk/fuelcellsystems.
42. Park, S., Chen, C., Lai, J. y Moon, S. *Admittance Compensation in Current Loop Control for a Grid-Tie LCL Fuel Cell Inverter* 2008. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2008.924828>.
43. Hou, J., Yang, M., Ke, C. y Zhang, J. *Control logics and strategies for air supply in PEM fuel cell engines* 2020. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2020.115059>.
44. Yoshida, H. *et al. The high efficiency multi-less (HEML) fuel cell - A high energy source for underwater vehicles, buoys, and stations* 2011. <https://doi.org/10.1109/Oceans-Spain.2011.6003656>.
45. Ramezanizadeh, M., Alhuyi Nazari, M., Hossein Ahmadi, M. y Chen, L. *A review on the approaches applied for cooling fuel cells* 2019. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2019.05.032>.
46. Kolli, A. *et al. A review on DC/DC converter architectures for power fuel cell applications* 2015. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2015.07.060>.
47. Carrette, L., Friedrich, K. A. y Stimming, U. *Fuel Cells: Principles, Types, Fuels, and Applications* (CHEMPHYSICHEM, 2000).
48. Wang, Y., Ruiz Diaz, D. F., Chen, K. S., Wang, Z. y Adroher, X. C. *Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells - A review* 2020. <https://doi.org/10.1016/J.MATTOD.2019.06.005>.
49. Mishra, V., Yang, F. y Pitchumani, R. *Analysis and design of PEM fuel cells* 2005. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2004.08.051>.
50. Gamburzev, S. y Appleby, A. J. *Recent progress in performance improvement of the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)* 2002. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00970-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00970-3).
51. A., B., G., C. J., M., S. y G., O. A. *Materials in PEM fuel cells* (MATERIALS SCIENCE y MATERIALS ENGINEERING, 2012).
52. S., A. A., S., S. y V., A. *DMFCs: From Fundamental Aspects to Technology Development* 2001. [https://doi.org/10.1002/1615-6854\(200107\)1:2%3C133::AID-FUCE133%3E3.O.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/1615-6854(200107)1:2%3C133::AID-FUCE133%3E3.O.CO;2-5).
53. Pan, C. *et al. Integration of high temperature PEM fuel cells with a methanol reformer* 2005. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2005.02.056>.
54. 2, S. *Polymer structure of polytetrafluoroethylene* 2022. <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/>.

55. Ji, M. y Wei, Z. *Review of Water Management in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells* 2009. <https://doi.org/10.3390/en20401057>.
56. Litster, S. y McLean, G. *PEM fuel cell electrodes* 2004. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2003.12.055>.
57. Perry, M. L. y Fuller, T. F. *A Historical Perspective of Fuel Cell Technology in the 20th Century* 2002. <https://doi.org/10.1149/1.1488651>.
58. Tomczyk, P. *MCFC versus other fuel cells-Characteristics, technologies and prospects* 2006. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2006.04.071>.
59. De-Troya, J. J., Álvarez, C., Fernández-Garrido, C. y Carral, L. *Analysing the possibilities of using fuel cells in ships* 2016. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2015.11.145>.
60. Hidalgo García, I. *Pilas de combustible AFC* 2013. <https://es.slideshare.net/InmaHidalgoGarca/afc-24743591>.
61. Gülzow, E. *Alkaline fuel cells: A critical view* 1996. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(96\)02344-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(96)02344-0).
62. *Tipos de pilas de combustible y su clasificación* 2022. <https://apilados.com/blog/tipos-de-pilas-de-combustible-su-clasificacion/>.
63. Patiño Jiménez, F. *Diseño y construcción de una celda de combustible de metanol directo de bajo impacto ambiental* 2007. <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/530>.
64. Alias, M. S., Kamarudin, S. K., Zainoodin, A. M. y Masdar, M. S. *Active direct methanol fuel cell: An overview* 2020. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2020.04.202>.
65. Yao, S. C. *et al. Micro-electro-mechanical systems (MEMS)-based micro-scale direct methanol fuel cell development* 2006. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2005.10.016>.
66. Sheldon, D. *Methanol Production - A Technical History* 2017. <https://doi.org/10.1595/205651317X695622>.
67. Neergat, M. y Shukla, A. K. *A high-performance phosphoric acid fuel cell* 2001. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00766-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00766-2).
68. Sammes, N., Bove, R. y Stahl, K. *Phosphoric acid fuel cells: Fundamentals and applications* 2004. <https://doi.org/10.1016/J.COSSMS.2005.01.001>.
69. Hidalgo García, I. *Pilas de combustible PAFC* 2013. <https://es.slideshare.net/InmaHidalgoGarca/pafc>.
70. Açikkalp, E. y Ahmadi, M. H. *Parametric investigation of phosphoric acid fuel cell - Thermally regenerative electro chemical hybrid system* 2018. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.07.231>.
71. Wilailak, S. *et al. Thermo-economic analysis of Phosphoric Acid Fuel-Cell (PAFC) integrated with Organic Ranking Cycle (ORC)* 2021. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.119744>.
72. Mamlouk, M. y Scott, K. *Phosphoric acid-doped electrodes for a PBI polymer membrane fuel cell* 2011. <https://doi.org/10.1002/er.1708>.
73. Miki, H. y Shimizu, A. *Dynamic characteristics of phosphoric-acid fuel-cell stack cooling system* 1998. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(98\)00035-X](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(98)00035-X).

74. Kulkarni, A. y Giddey, S. *Materials issues and recent developments in molten carbonate fuel cells* 2012. <https://doi.org/10.1007/s10008-012-1771-y>.
75. *Tipos de pilas de combustible y su clasificación* 2016. <https://apilados.com/blog/tipos-de-pilas-de-combustible-su-clasificacion/>.
76. Böhme, O., Leidich, F. U., Salge, H. J. y Wendt, H. *Development of materials and production technologies for molten carbonate fuel cells* 1994. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(94\)90067-1](https://doi.org/10.1016/0360-3199(94)90067-1).
77. Plomp, L., Veldhuis, J. B. J., Sitters, E. F. y van der Molen, S. B. *Improvement of molten-carbonate fuel cell (MCFC) lifetime* 1992. [https://doi.org/10.1016/0378-7753\(92\)80008-Y](https://doi.org/10.1016/0378-7753(92)80008-Y).
78. Singhal, S. C. *Advances in solid oxide fuel cell technology* 2000. [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(00\)00452-5](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(00)00452-5).
79. Laosiripojana, N. et al. *Reviews on Solid Oxide Fuel Cell Technology* 2009. <https://doi.org/10.4186/ej.2009.13.1.65>.
80. Ormerod, R. M. *Solid oxide fuel cells* 2003. <https://doi.org/10.1039/b105764m>.
81. *La pila SOFC: Pila de combustible de óxido sólido* 2018. https://nanopdf.com/download/la-pila-sofc-pila-de-combustible-de-oxido-solido-la-pila-con_pdf.
82. Zhu, B. *Solid oxide fuel cell (SOFC) technical challenges and solutions from nano-aspects* 2009. <https://doi.org/10.1002/er.1600>.
83. Lawlor, V. *Review of the micro-tubular solid oxide fuel cell (Part II: Cell design issues and research activities)* 2013. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2013.03.191>.
84. Costamagna, P., Selimovic, A., del Borghi, M. y Agnew, G. *Electrochemical model of the integrated planar solid oxide fuel cell (IP-SOFC)* 2004. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2004.02.005>.
85. Shukla, A. K., Suresh, P., Berchmans, S. y Rajendran, A. *Biological fuel cells and their applications* (CURRENT SCIENCE, 2004).
86. Ghassemi, Z. y Slaughter, G. *Biological Fuel Cells and Membranes, Volume 7* 2017. <https://doi.org/10.3390/membranes7010003>.
87. *Pilas biológicas: generar energía del tratamiento de aguas* 2015. <https://epre.gov.ar/web/pilas-biologicas-generar-energia-del-tratamiento-de-aguas/>.
88. Maitlo, H. A., Kim, J. H., Kim, K. H., Park, J. Y. y Khan, A. *Metal-air fuel cell electrocoagulation techniques for the treatment of arsenic in water* 2019. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.09.232>.
89. Ponce de León, C., Frías-Ferrer, A., González-García, J., Szánto, D. A. y Walsh, F. C. *Redox flow cells for energy conversion* 2006. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2006.02.095>.
90. Baroutaji, A., Wilberforce, T., Ramadan, M. y Olabi, A. G. *Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors* 2019. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.02.022>.
91. Melgar, A. S. *TRABAJO DE FIN DE GRADO* 2021. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/350343/memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
92. *DS30W* 2024. <https://www.doosanmobility.com/en/products/drone-ds30>.

93. *Equipos de la Universidad de Maryland honrados por el primer trasplante de órganos por drone* 2019. <https://www.aeroermo.com/home/equipos-de-la-universidad-de-maryland-honrados-por-el-primer-trasplante-de-organos-por-drone/>.
94. Argumosa, M. P. *Uso de Pilas de Combustible para propulsar aeronaves no tripuladas* 2016. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.researchgate.net/profile/Maria-Argumosa-2/publication/292961807_Uso_de_pilas_de_combustible_en_UAVs/links/56b2147808aed7ba3fedb56b/Uso-de-pilas-de-combustible-en-UAVs.pdf.
95. Tiseira, A., Novella, R., Garcia-Cuevas, L. y López-Juárez, M. *Concept design and energy balance optimization of a hydrogen fuel cell helicopter for unmanned aerial vehicle and aerotaxi applications* (CMT-Motores Térmicos, Universitat Politècnica de València, 2023).
96. Desantes, J. M., Novella, R., García-Cuevas, L. M. y Lopez-Juarez, M. *FEASIBILITY STUDY FOR A FUEL CELL-POWERED UNMANNED AERIAL VEHICLE WITH A 75 KG PAYLOAD* (CMt-Motores térmicos. Universitat Politècnica de València, 2022).
97. López Redondo, N. *Debutan en el CES 2022 los primeros drones de hidrógeno del mundo* 2022. <https://www.energynews.es/debutan-en-el-ces-2022-los-primeros-drones-de-hidrogeno-del-mundo/>.
98. Lopez-Juarez, M., Rockstroh, T., Novella, R. y Vijayagopal, R. *A methodology to develop multi-physics dynamic fuel cell system models validated with vehicle realistic drive cycle data* (Applied Energy, 2024).
99. Clari Mengo, V. *ANALYSIS OF THE IMPLEMENTATION OF FC SYSTEMS IN UNMANNED AERIAL VEHICLES* (UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA, 2021).
100. *Colombia y España finalizan detalles para el desarrollo de un drone militar táctico* 2019. <https://maquina-de-combate.com/blog/archives/60410>.

Anexo I. Objetivos de Desarrollo Sostenibles

En este Anexo se persigue cumplimentar la tabla de la siguiente página, en la que se categorizan los diferentes Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS). El objetivo con esto resulta en justificar adecuadamente todo aquello que ya ha sido comentado a lo largo del documento con respecto al apartado de la sostenibilidad y el medio ambiente, todo ello conforme a la Agenda 2030.

Por lo tanto, en la siguiente tabla se incluyen todos los Objetivos de Desarrollo Sostenibles obligatorios de testificar por la Universidad, cumplimentando todos aquellos que sí que tienen que ver con el estudio realizado, mientras que aquellos objetivos que no están relacionados con el mismo se marcan con un "No Procede".

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1. Fin de la pobreza.				X
ODS 2. Hambre cero.				X
ODS 3. Salud y bienestar.	X			
ODS 4. Educación de calidad.				X
ODS 5. Igualdad de género.				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.		X		
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.	X			
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.		X		
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.	X			
ODS 10. Reducción de las desigualdades.				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.		X		
ODS 12. Producción y consumo responsables.			X	
ODS 13. Acción por el clima.	X			
ODS 14. Vida submarina.			X	
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.		X		
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.		X		