



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE MASTER EN INGENIERÍA QUÍMICA

ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO "PILA DE COMBUSTIBLE-BATERÍA" PARA ALIMENTACIÓN DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

AUTOR: RAÚL MARQUÉS GIMENO

TUTOR: ÁLVARO ENRIQUE MONTERO REGUERA

COTUTOR: CARLOS SÁNCHEZ DÍAZ

Curso Académico: 2021-22

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a mis tutores del Trabajo Final de Máster por toda la ayuda, el interés y el esfuerzo que me han dedicado durante todos estos meses para conseguir terminar mi formación académica en Ingeniería Química.

Tanto el Dr. Álvaro E. Montero Reguera como el Dr. Carlos Sánchez Díaz presentan excelentes aptitudes y una amplia experiencia en el ámbito de la ingeniería. Ambos han dedicado mucho tiempo y esfuerzo durante las sesiones de control semanales del trabajo, lo que sumado a su gran ética de trabajo y su enorme calidad humana, me han permitido cumplir con todos los objetivos específicos para cada una de las fases del desarrollo del presente TFM.

Por último y no menos importante, también quiero agradecer todo el apoyo por parte de mi familia, sin olvidar nunca a las personas que desgraciadamente nos han ido dejando a lo largo del tiempo, pero que todavía seguirán estando con nosotros mientras sigan siendo recordadas. Sin duda, ellos son los grandes responsables que han sabido inculcarme la cultura del trabajo, el esfuerzo y la humildad como herramientas para conseguir tus metas y objetivos, tanto a nivel personal como profesional.

RESUMEN

En la actualidad, existe una mayor conciencia social sobre los problemas medioambientales relacionados con el consumo excesivo de combustibles fósiles, tanto en el sector del transporte como en la generación de energía eléctrica mediante las centrales térmicas convencionales. Además, debido al incremento en las necesidades energéticas globales, se requiere una transición progresiva hacia modelos energéticos que resulten mucho más sostenibles y respetuosos con el medioambiente.

En este sentido, la tecnología del hidrógeno y su aplicación en las celdas de combustible representan una alternativa que permite reducir las emisiones contaminantes y los gases de efecto invernadero que contribuyen al fenómeno del calentamiento global, garantizando una mayor independencia y autosuficiencia energética.

El presente Trabajo Final de Máster tiene como objetivo realizar el diseño, modelado y simulación de un sistema híbrido “pila de combustible-batería” como fuente de alimentación para un vehículo aéreo no tripulado. La estrategia de control es garantizar el funcionamiento del vehículo durante la fase de vuelo estacionaria mediante una pila de combustible del tipo PEMFC y utilizar una batería LiPo auxiliar para alcanzar los picos de demanda en las fases de despegue y aterrizaje.

Mediante simulación, se analiza la respuesta dinámica del sistema modelado frente a una curva de demanda semiempírica y se comprueba el potencial del conjunto híbrido como solución para mejorar la autonomía de un dron sanitario o de emergencia, lo que permitiría al vehículo recorrer mayores distancias y realizar intervenciones de rescate en zonas de difícil acceso.

Los resultados obtenidos con el modelo de simulación pretenden contribuir a la implementación de esta tecnología híbrida en vehículos aéreos no tripulados, sirviendo también como referencia para posibles investigaciones futuras sobre el desarrollo de nuevos sistemas híbridos eléctricos dentro del sector automovilístico.

Palabras clave: Hidrógeno, Pila de combustible, PEMFC, Modelado y simulación con TRNSYS, Sistema híbrido eléctrico, Dron.

RESUM

En l'actualitat, existeix una major consciència social sobre els problemes mediambientals relacionats amb el consum excessiu de combustibles fòssils, tant en el sector del transport com en la generació d'energia elèctrica mitjançant les centrals tèrmiques convencionals. A més, a causa de l'increment en les necessitats energètiques globals, es requereix una transició progressiva cap a models energètics que resulten molt més sostenibles i respectuosos amb el medi ambient.

En aquest sentit, la tecnologia de l'hidrogen i la seua aplicació en les cel·les de combustible representen una alternativa que permet reduir les emissions contaminants i els gasos d'efecte d'hivernacle que contribueixen al fenomen del canvi climàtic global, garantint una major independència i autosuficiència energètica.

El present Treball Final de Màster té com a objectiu realitzar el disseny, modelatge i simulació d'un sistema híbrid “pila de combustible-bateria” com a font d'alimentació per a un vehicle aeri no tripulat. L'estratègia de control és garantir el funcionament del vehicle durant la fase de vol estacionària mitjançant una pila de combustible del tipus PEMFC i utilitzar una bateria LiPo auxiliar per a aconseguir els pics de demanda en les fases d'enlairament i aterratge.

Mitjançant simulació, s'analitza la resposta dinàmica del sistema modelat enfront d'una corba de demanda semiempírica i es comprova el potencial del conjunt híbrid com a solució per a millorar l'autonomia d'un dron sanitari o d'emergència, la qual cosa permetria al vehicle recórrer majors distàncies i realitzar intervencions de rescat en zones de difícil accés.

Els resultats obtinguts amb el model de simulació pretenen contribuir a la implementació d'aquesta tecnologia híbrida en vehicles aeris no tripulats, servint també com a referència per a possibles investigacions futures sobre el desenvolupament de nous sistemes híbrids elèctrics dins del sector automobilístic.

Paraules clau: Hidrogen, Pila de combustible, PEMFC, Modelatge i simulació amb TRNSYS, Sistema híbrid elèctric, Dron.

ABSTRACT

Currently, there is an increasing social awareness of the environmental problems related to the excessive consumption of fossil fuels, both in the transport sector and in the generation of electricity through conventional thermal power plants. In addition, due to the increase in global energy requirements, a progressive transition towards more sustainable and environmentally friendly energy models is required.

In this context, the hydrogen technology and its application on fuel cells is considered as an alternative option for reducing the polluting emissions and greenhouses gases involved in the phenomenon of global warming, providing a greater energy independence and self-sufficiency.

The aim of this Master Final Work is the design, modelling and simulation of a hybrid “fuel cell-battery” system as a power supply unit for Unmanned Aerial Vehicles (UAV or *drones*). The control strategy is to ensure the vehicle operation during the hover flight phase by means of a PEMFC fuel cell stack, requiring an auxiliary LiPo battery to meet peak demand during the take-offs and landing phases.

Through simulation software, the dynamic response of the modelled hybrid system to a semi-empirical demand curve is analyzed and the potential of the hybrid assembly is tested as a solution to improve the autonomy of a medical or emergency drone, which would allow the vehicle to travel longer distances and perform rescue interventions in difficult access areas.

The conclusions obtained from the simulation model are intended to contribute to the implementation of this hybrid technology in Unmanned Aerial Vehicles, also serving as a reference for possible future research on the development of new hybrid electric systems within the automotive sector.

Keywords: Hydrogen, Fuel cell stack, PEMFC, TRNSYS modelling and simulation, Hybrid electric system, UAV.

ÍNDICE GENERAL DEL TRABAJO FINAL DE MÁSTER

- **Memoria**
- **Presupuesto**
- **Anexos**



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

MEMORIA

**ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO
“PILA DE COMBUSTIBLE – BATERÍA” PARA ALIMENTACIÓN
DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS**

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. MOTIVACIÓN, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Justificación académica	2
1.2 Justificación profesional	2
1.3 Objetivos	3
2. INTRODUCCIÓN	5
2.1 Hidrógeno como vector energético	6
2.2 Métodos de producción de hidrógeno.....	8
2.3 Aplicaciones de las celdas de combustible.....	10
2.4 Vehículos aéreos no tripulados: Drones.....	13
3. CELDAS DE COMBUSTIBLE	19
3.1 Tipología y clasificación	20
3.2 Principio de funcionamiento de una PEMFC.....	23
3.3 Componentes de una PEMFC.....	25
3.3.1 Membrana de intercambio protónico (Electrolito).....	26
3.3.2 Electrodos y catalizador.....	27
3.3.3 Placas bipolares.....	29
3.3.4 Apilamiento de las celdas de combustible.....	30
4. TERMODINÁMICA ELECTROQUÍMICA	31
4.1 Primera y Segunda Ley de la Termodinámica	31
4.2 Potenciales Termodinámicos	32
4.3 Potencial energético de una PEMFC	33
4.4 Potencial de electrodo en una PEMFC	35
4.4.1 Efecto de la temperatura.....	36
4.4.2 Efecto de la presión	37
4.4.3 Efecto de las concentraciones de los reactivos.....	37
5. CINÉTICA ELECTROQUÍMICA	39
5.1 Semirreacciones electroquímicas de oxidación y reducción.....	40
5.1.1 Semirreacción de oxidación electroquímica del hidrógeno (HOR)	40
5.1.2 Semirreacción de reducción electroquímica del oxígeno (ORR)	42
5.2 Polarización de Activación.....	44
5.3 Polarización Óhmica	47
5.4 Polarización por Concentración	48

6. MODELADO DEL SISTEMA HÍBRIDO ELÉCTRICO “PILA PEMFC + BATERIA LIPO”	49
6.1 Descripción de los componentes de la simulación	50
6.1.1 Modelo de la pila de combustible PEMFC	52
6.1.2 Modelo de la batería LiPo.....	56
6.1.3 Modelo del convertidor de potencia (DC/DC).....	62
6.1.4 Modelo del fichero Excel.....	64
6.2 Diseño detallado del modelo de simulación	66
6.2.1 Modelado de la curva de demanda semiempírica del dron	67
6.2.2 Elementos de control para la simulación del sistema híbrido	70
6.2.3 Cálculo del consumo del combustible de hidrógeno	71
7. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DINÁMICA DEL SISTEMA HÍBRIDO ELÉCTRICO	73
7.1 Curva de Demanda del DRON	74
7.2 Pila de Combustible PEMFC (Aire-H ₂).....	77
7.2.1 Dimensionamiento y selección de modelo comercial	77
7.2.2 Curva I-V (Catálogo vs TRNSYS).....	78
7.2.3 Respuesta PEMFC (Tensión – Potencia).....	78
7.3 Batería LiPo.....	79
7.3.1 Dimensionamiento y selección de modelo comercial	80
7.3.2 Curva I-V (TRNSYS).....	82
7.3.3 Respuesta LiPo (Tensión - Potencia)	82
7.3.4 Respuesta LiPo (Estado Carga – Fracción Carga)	83
7.4 Convertidor de Potencia DC/DC.....	84
7.4.1 Pérdidas de Potencia	85
7.4.2 Respuesta DC/DC (Tensión – Intensidad)	86
7.5 Consumo de Combustible H ₂ (Caudal – Volumen)	86
7.6 Respuesta Global del Sistema Híbrido (Potencia – Intensidad)	88
8. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	91
9. BIBLIOGRAFÍA	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema conceptual del sistema híbrido eléctrico "pila de combustible-batería" propuesto como fuente de alimentación para un vehículo aéreo no tripulado (UAV).	4
Figura 2. Concepto de la economía del hidrógeno	6
Figura 3. Esquema de síntesis del hidrógeno verde.....	7
Figura 4. Métodos convencionales para la obtención de hidrógeno.....	8
Figura 5. Esquema de funcionamiento de un electrolizador	9
Figura 6. Obtención de hidrógeno por metabolismo microbológico vegetal	9
Figura 7. Potenciales aplicaciones de las pilas de combustible.	10
Figura 8. Modelo del cargador portátil MYFC - PowerTrek Fuel Cell Charger.	10
Figura 9. Módulo comercial pila de combustible - Marca STILL (España).....	11
Figura 10. Vehículos ligeros con pilas de combustible - Honda & Toyota FCV (Fuel Cell Vehicles).....	11
Figura 11. Proyecto de la aeronave AIRBUS VP ZEROe Aircraft.....	12
Figura 12. UAV HyDrone Skyle 1550 - Marca MMC.	12
Figura 13. Principio de funcionamiento del dron híbrido Hycopter (HES).....	18
Figura 14. Generación de electricidad - Proceso térmico vs Proceso electroquímico.....	19
Figura 15. Esquema conceptual de una celda de combustible.....	19
Figura 16. Esquema de funcionamiento de una pila de combustible PEMFC.....	23
Figura 17. Fenómenos físico-químicos de transporte en una pila de combustible PEMFC.....	24
Figura 18. Componentes básicos de una pila de combustible PEMFC.	25
Figura 19. Estructura química del Nafión®	26
Figura 20. Mecanismo de Grotthuss sobre el salto protónico.....	26
Figura 21. Estructura de los electrodos de membrana.....	27
Figura 22. Funcionamiento de la capa activa de electrolizador.....	28
Figura 23. Costes económicos y perspectivas de futuro de las pilas de combustible PEMFC	28
Figura 24. Configuraciones más empleadas en el diseño de las placas bipolares.	29
Figura 25. Apilamiento en serie de diversas monoceldas de combustible.....	30
Figura 26. Resumen de los potenciales termodinámicos	32
Figura 27. Influencia de la temperatura sobre el potencial de electrodo	36
Figura 28. Curva de polarización característica de una celda de combustible.	39
Figura 29. Intercambio electrónico superficial en la reacción anódica de una PEMFC (HOR).	40

Figura 30. Transferencia de carga eléctrica del hidrógeno absorbido sobre la superficie del electrodo anódico de una PEMFC (HOR).....	41
Figura 31. Intercambio electrónico superficial en la reacción catódica de una PEMFC (ORR).....	42
Figura 32. Transferencia de carga eléctrica del oxígeno absorbido sobre la superficie del electrodo catódico de una PEMFC (ORR: Dissociative direct 4-electron pathway).....	43
Figura 33. Comparación de la cinética electroquímica de las semirreacciones de oxidación y reducción de una celda de combustible PEMFC (HOR y ORR).....	43
Figura 34. Influencia de la densidad de corriente de intercambio sobre las pérdidas por activación.	45
Figura 35. Pérdidas por activación en los electrodos de una celda de combustible PEMFC.....	46
Figura 36. Resistencias eléctricas e iónicas internas de una celda de combustible PEMFC.....	47
Figura 37. Pérdidas óhmicas lineales en una celda de combustible PEMFC.....	47
Figura 38. Procesos de difusión de los gases reactivos en una celda de combustible PEMFC.....	48
Figura 39. Esquema representativo del sistema híbrido “pila de combustible - batería”.....	49
Figura 40. Configuración general de los componentes (Types) de TRNSYS.....	51
Figura 41. Componentes del modelo TRNSYS para el sistema híbrido "PEMFC+LiPo".....	51
Figura 42. Type 170 - Pila de combustible PEMFC.....	53
Figura 43. Evolución del voltaje de celda con la capacidad energética en una batería LiPo.....	59
Figura 44. Código de programación VBA para la identificación de Inputs y Outputs (Type62).....	65
Figura 45. Modelo de simulación TRNSYS del sistema híbrido “pila de combustible - batería”.	66
Figura 46. Curva de demanda semiempírica de un dron de gran tamaño – 20kg (1h).	75
Figura 47. Modelado de la respuesta del sistema híbrido "PEMFC + LiPo" (1h).	76
Figura 48. Curvas de polarización para la pila de combustible PEMFC (TRNSYS).....	78
Figura 49. Respuesta dinámica de la pila de combustible PEMFC (1h).	79
Figura 50. Curva de Carga para la batería LiPo.	82
Figura 51. Curva de Descarga para la batería LiPo.....	82
Figura 52. Respuesta dinámica de la batería LiPo (1h).	83
Figura 53. Estado de carga de la batería LiPo (1h).....	84
Figura 54. Pérdidas de potencia en el convertidor DC/DC (1h).	85
Figura 55. Acción reductora del convertidor de potencia DC/DC (1h).	86
Figura 56. Relación entre la intensidad de corriente y el caudal de H2 (1h).	88
Figura 57. Consumo de hidrógeno en la pila de combustible PEMFC (1h).....	88
Figura 58. Respuesta del sistema híbrido eléctrico "pila de combustible PEMFC + batería LiPo" frente a la demanda energética de un dron de gran tamaño - 20kg (1h).	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones técnicas del dron sanitario AeroHyb Hexacopter (Aerocamaras).....	13
Tabla 2. Especificaciones técnicas del dron agrícola AGRAS T20 (DJI).....	14
Tabla 3. Especificaciones técnicas del dron de hidrógeno DS30 (Doosan Mobility).	15
Tabla 4. Especificaciones técnicas del dron híbrido Hycopter (HES).	17
Tabla 5. Autonomía de vuelo del dron híbrido Hycopter según el depósito de hidrógeno y la carga.	18
Tabla 6. Características de las celdas de combustible de baja temperatura	21
Tabla 7. Características de las celdas de combustible de media y alta temperatura	22
Tabla 8. Valores de entalpías de formación en condiciones estándar	33
Tabla 9. Valores de entropías de formación en condiciones estándar	34
Tabla 10. Valores de potenciales de reducción en condiciones estándar	35
Tabla 11. Densidades de corriente de intercambio en condiciones estándar (300K, 1atm) para la reacción anódica de oxidación del hidrógeno (HOR) sobre diversas superficies catalíticas	44
Tabla 12. Densidades de corriente de intercambio en condiciones estándar (300K, 1atm) para la reacción catódica de reducción del oxígeno (ORR) sobre diversas superficies catalíticas.	45
Tabla 13. Características del modelo de la pila de combustible PEMFC (Type170).	52
Tabla 14. Características del modelo para la batería LiPo (Type511).	56
Tabla 15. Características del modelo para el convertidor de potencia DC/DC (Type175).....	62
Tabla 16. Características del modelo para el archivo Excel externo (Type62).	64
Tabla 17. Consumo específico de los drones agrícolas AGRAS T10 y AGRAS T16 (DJI).	74
Tabla 18. Especificaciones técnicas de la pila de combustible PEMFC – AEROSTAK 2000 (HES).	77
Tabla 19. Especificaciones técnicas de la batería LiPo - HRB GRAPHENE 10S 3000.	81
Tabla 20. Especificaciones técnicas de los depósitos de hidrógeno - AEROSTAK Series F.	87
Tabla 21. Elementos constituyentes del sistema híbrido eléctrico “pila PEMFC + batería LiPo” diseñado para un dron de gran tamaño (20 kg).	91
Tabla 22. Consumo de hidrógeno y estado de carga para distintos tiempos de vuelo	93

1. MOTIVACIÓN, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

Para un Ingeniero Químico titulado por la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), la preservación del medioambiente es uno de los aspectos más importantes dentro de las competencias básicas exigidas en su profesión. Por lo tanto, el desarrollo de fuentes de energía alternativas y la implementación de modelos energéticos mucho más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente resultan imprescindibles para conseguir reducir la contaminación atmosférica y mitigar los efectos adversos derivados del calentamiento global.

La tecnología del hidrógeno aplicada sobre las pilas de combustible se presenta como una alternativa frente a los combustibles fósiles tradicionales en la generación de energía eléctrica, ya que permite reducir drásticamente los gases de efecto invernadero y proporciona una mayor autosuficiencia energética. Actualmente, las pilas de combustibles se destinan mayoritariamente a la generación estacionaria de electricidad, presentándose como una solución alternativa frente a las centrales térmicas convencionales.

Sin embargo, esta tecnología también se ha conseguido implementar dentro del sector del transporte, donde las pilas de combustible actúan como fuente de energía en diversos modelos comerciales de vehículos eléctricos. Debido a los inconvenientes actuales de los vehículos eléctricos que funcionan con sistemas energéticos basados exclusivamente en baterías, los cuales están relacionados con la disponibilidad de puntos de suministro y los largos tiempos de recarga, la aplicación de las celdas de combustible representa una alternativa que proporciona una mayor densidad energética, permite aumentar el rendimiento de conversión electroquímica y ofrece una mayor autonomía al vehículo.

En el caso de los vehículos aéreos no tripulados (conocidos comúnmente como *drones*) empleados en actividades exteriores, el alcance y la autonomía de vuelo son los factores más importantes del sistema y dependen fundamentalmente de la capacidad de sus baterías eléctricas. La posibilidad de cubrir grandes distancias y la operación en zonas de difícil acceso son cualidades muy interesantes para la grabación de imágenes aéreas durante las tareas de vigilancia perimetral o para la ejecución de misiones de rescate en situaciones de emergencia, por lo que es necesario desarrollar nuevos sistemas de alimentación eléctrica para estos dispositivos que ofrezcan una mayor autonomía

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, el presente Trabajo Final de Máster pretende utilizar una pila de combustible con hidrógeno como fuente de alimentación del vehículo aéreo no tripulado. El alcance del estudio se limita a la simulación y el modelado de la respuesta dinámica de un sistema híbrido formado por el conjunto pila de combustible y batería frente a una curva de demanda característica de un dron comercial, comprobando la eficacia del sistema híbrido para mejorar la autonomía de vuelo del vehículo y reducir los tiempos de recarga del combustible.

1.1 Justificación académica

El presente Trabajo Final de Máster pretende confirmar que el alumno ha adquirido los conocimientos y las competencias requeridas en su titulación. Además, servirá para la obtención de los 12 créditos ECTS necesarios para alcanzar el título de Máster en Ingeniería Química por la Universidad Politécnica de Valencia y que habilita para el ejercicio profesional como Ingeniero Químico.

1.2 Justificación profesional

Desde una perspectiva profesional, el desarrollo de nuevos sistemas energéticos que presenten el potencial suficiente para convertirse en alternativas reales frente a los combustibles fósiles tradicionales permite garantizar una situación de autoabastecimiento energético y consigue reducir las emisiones contaminantes y los gases de efecto invernadero que contribuyen al fenómeno del calentamiento global.

En particular, el modelado y la simulación de un sistema híbrido compuesto por una pila de combustible y una batería, utilizados como fuente de alimentación para un vehículo aéreo no tripulado, representan el fundamento o la base teórica para conseguir la implementación de esta tecnología en modelos comerciales de estos vehículos. Una vez demostrada la eficacia del sistema híbrido eléctrico para incrementar la autonomía del vehículo mediante los resultados y las conclusiones obtenidas del presente trabajo, se procedería con la siguiente fase del proceso de desarrollo que trata sobre los ensayos experimentales y las pruebas de vuelo con modelos comerciales.

Finalmente, si los resultados obtenidos en los ensayos experimentales resultan satisfactorios y demuestran el potencial energético real de la tecnología híbrida, puede suponer un impulso para el desarrollo y la aplicación de los sistemas híbridos eléctricos para el transporte de personas y mercancías, consiguiendo así sustituir parcial o totalmente el papel de los combustibles fósiles y marcando el comienzo de una transición hacia modelos energéticos mucho más limpios, sostenibles y respetuosos con el medioambiente.

1.3 Objetivos

El objetivo del presente Trabajo Final de Máster es realizar el modelado de un sistema híbrido eléctrico para la alimentación de vehículos aéreos no tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles, UAV*), conocidos comúnmente como drones. Actualmente, los modelos de drones comerciales para uso recreativo funcionan únicamente con baterías de polímero de ión de litio (*Lithium-Polymer, LiPo*) como fuente de alimentación, debido fundamentalmente a la gran densidad energética que ofrecen en combinación con un tamaño y peso de la batería muy reducido.

Sin embargo, aunque las baterías LiPo presentan un tamaño muy pequeño para mantener la ligereza del vehículo, se requieren unos ratios de descarga muy elevados para poder abastecer la demanda energética del dron en términos de intensidad de corriente eléctrica, lo que favorece el proceso de descarga en la batería y limita enormemente la autonomía de vuelo del dron.

En este sentido, se propone incorporar una pila de combustible con un pequeño depósito de hidrógeno como solución para incrementar la autonomía de vuelo del dron, permitiendo recorrer mayores distancias y alcanzar zonas de difícil acceso. Evidentemente, la incorporación de la pila de combustible junto al depósito del combustible de hidrógeno implica un importante aumento en el peso total del dron, llegando a alcanzar unos tamaños superiores a los 20 kg, por lo que únicamente se justifica su aplicación para drones sanitarios que operen en situaciones de rescate y emergencia o también para drones de vigilancia y grabación de imágenes aéreas, descartando su uso para fines recreativos.

El tipo de pila de combustible propuesta para el sistema híbrido presenta una membrana polimérica de intercambio protónico (*Proton Exchange Membrane, PEM*) como electrolito sólido, ya que se trata de una pila de combustible con baja temperatura de operación, presenta una rápida respuesta del sistema frente a la demanda de corriente eléctrica y permite el uso del combustible de hidrógeno. Particularmente, se propone utilizar una configuración de cátodo abierto para poder aprovechar el aire atmosférico mediante un único sistema de impulsión, por lo que el aire captado directamente del ambiente se utiliza como agente oxidante y también como fluido de refrigeración del sistema.

La batería es necesaria para arrancar la operación de la pila de combustible y debe cumplir con la demanda del balance de planta durante las fases de encendido y apagado de los componentes de arranque y parada del vehículo. Además, puesto que la batería se debe dimensionar de manera que aporte el menor peso posible al conjunto del sistema híbrido, se ha optado por una batería LiPo para formar el sistema híbrido eléctrico “pila de combustible PEM – batería LiPo” propuesto como fuente de alimentación para vehículos aéreos no tripulados.

Debido a la capacidad de recarga de las baterías LiPo, el dimensionamiento de la pila de combustible se realiza para superar ligeramente el consumo promedio del dron, permitiendo destinar el excedente energético que produce la pila de combustible durante las fases de vuelo estacionario para la recarga de la propia batería. Así pues, el dimensionamiento de la batería se realiza bajo criterios de minimización de peso pero considerando una capacidad energética suficiente para permitir al conjunto del sistema híbrido alcanzar los picos de consumo del dron durante las fases de despegue y aterrizaje.

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería” para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

En la siguiente Figura 1, se muestra un esquema que representa el fundamento del sistema híbrido eléctrico propuesto como fuente de alimentación para un vehículo aéreo no tripulado de gran tamaño:

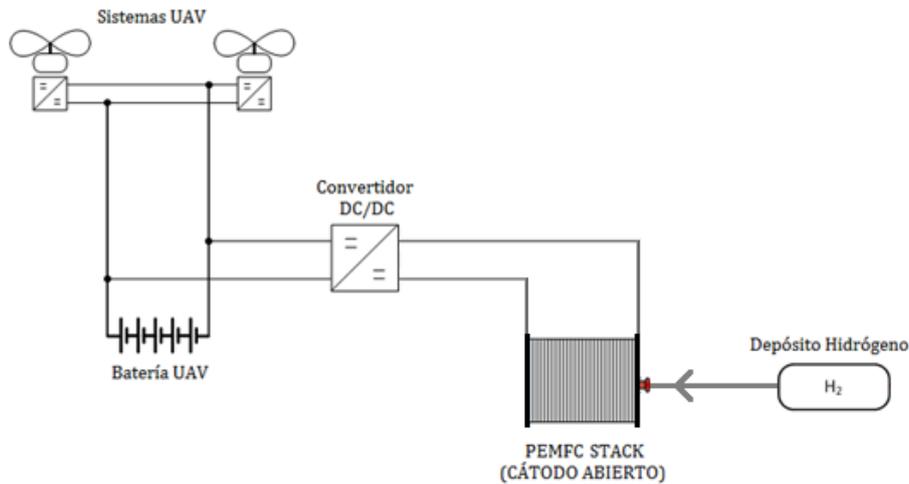


Figura 1. Esquema conceptual del sistema híbrido eléctrico "pila de combustible-batería" propuesto como fuente de alimentación para un vehículo aéreo no tripulado (UAV).

Para poder adaptar la tensión proporcionada por la pila de combustible PEM a la tensión de la batería, se requiere un convertidor de potencia DC/DC. Por tanto, la gestión de la energía eléctrica producida por el sistema híbrido se realiza mediante el control de la corriente eléctrica generada por el conjunto pila de combustible-etapa de potencia hacia el bus de alimentación de los sistemas de vuelo del dron.

La magnitud de la corriente generada por la pila de combustible durante las fases de vuelo estacionario debe superar ligeramente el consumo promedio del vehículo, no solamente para destinar parte de la corriente eléctrica para el proceso de recarga de la batería, sino también para cumplir con el balance de planta del dron y mantener los sistemas de vuelo del vehículo en funcionamiento.

Evidentemente, la autonomía de vuelo del vehículo no tripulado dependerá del consumo de hidrógeno que realiza la pila de combustible PEM y del estado de carga que mantiene la batería LiPo. Para comprobar la mejora en la autonomía de vuelo, se implementa el modelado del sistema híbrido en el programa de simulación TRNSYS y se analiza la respuesta dinámica del sistema frente a distintas curvas de demanda semiempíricas del dron en términos de intensidad de corriente requerida, determinando así el dimensionamiento óptimo de los equipos en base a las características técnicas de los modelos comerciales disponibles y obteniendo una estimación del tamaño del depósito de hidrógeno requerido para cumplir con distintos tiempos de vuelo.

2. INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico y el gran desarrollo industrial de las principales potencias económicas han provocado un incremento en las necesidades energéticas a nivel mundial, lo que ha generado una situación global insostenible que se encuentra caracterizada por el consumo excesivo de combustibles fósiles para poder abastecer la exigente demanda energética (British Petroleum, 2020).

En los últimos años, el uso de combustibles fósiles ha provocado graves problemas medioambientales, relacionados con las emisiones de los gases de efecto invernadero que suponen la principal causa del fenómeno del calentamiento global. Del mismo modo, la sobreexplotación de los recursos fósiles ha generado una incertidumbre respecto al suministro de combustibles para el sector del transporte (López, 2005), debido al agotamiento en las reservas de petróleo y la aparición de conflictos geopolíticos por el control de los recursos fósiles, lo que genera además una situación de inestabilidad económica marcada por la volatilidad en el precio de mercado de los combustibles tradicionales.

Por estos motivos, el desarrollo de nuevas fuentes de energía supone una solución estratégica para alcanzar un modelo energético que resulte más limpio, sostenible y autosuficiente. En este sentido, la tecnología del hidrógeno se presenta como una posible alternativa frente a los combustibles fósiles, especialmente en el sector del transporte, ya que permite establecer un sistema de generación eléctrica en el vehículo mediante el suministro de un combustible de hidrógeno.

Actualmente, la mayoría de vehículos funcionan con motores de combustión interna y emplean los combustibles de automoción tradicionales, como son el diésel o la gasolina. Debido a la importancia del sector del transporte en el consumo energético global, se han desarrollado otro tipo de combustibles que puedan adaptarse a las condiciones de los motores de combustión interna sin necesidad de implementar modificaciones en los vehículos, como es el caso de los biocombustibles de origen renovable obtenidos a partir de la biomasa (por ejemplo, biodiésel o bioetanol).

Sin embargo, la tecnología de los vehículos eléctricos se encuentra mucho más extendida y permite la propulsión mediante un conjunto de baterías, consiguiendo así eliminar las emisiones contaminantes generadas por los motores de combustión interna. Hoy en día, el principal inconveniente de los vehículos eléctricos que funcionan exclusivamente con baterías reside en la limitación de la autonomía y en la escasez de puntos de recarga (Shinnar, 2003).

Como solución que permite mejorar la autonomía de los vehículos eléctricos, las pilas de combustible con hidrógeno se postulan como una posible fuente de energía para el sector de la automoción y el transporte, existiendo actualmente modelos comerciales de vehículos que incorporan esta tecnología. Para promover el uso y la aplicación de las pilas de combustibles con hidrógeno en el sector del transporte, se requiere de la mejora de los aspectos relacionados con las condiciones de seguridad durante el almacenamiento y el transporte del hidrógeno, así como de la investigación en nuevos procesos de obtención de hidrógeno con origen renovable.

2.1 Hidrógeno como vector energético

Por definición, un vector energético es una sustancia que almacena energía para poder liberarla posteriormente de forma controlada. Sin embargo, para la obtención del vector energético de naturaleza química se requiere del suministro de una cantidad de energía superior a la que pueden generar posteriormente.

El hidrógeno es el elemento químico más abundante y se encuentra presente en gran parte de la materia visible del Universo. Sin embargo, para obtener hidrógeno en su forma diatómica (H_2), se requieren procesos de transformación a partir de hidrocarburos o mediante la electrólisis del agua.

El término de la economía del hidrógeno propone utilizar el hidrógeno como vector energético para la producción de energía eléctrica mediante la tecnología basada en las pilas de combustible, permitiendo así ajustar la producción de energía frente al consumo (Pivovar, 2017). En la Figura 2, se muestra un esquema representativo del concepto de la economía del hidrógeno:

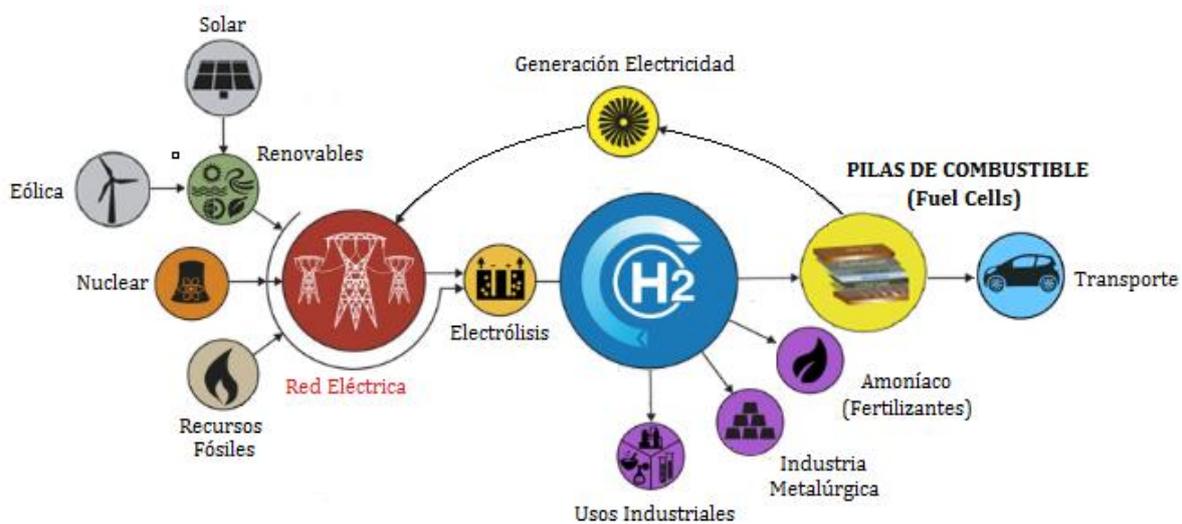


Figura 2. Concepto de la economía del hidrógeno (Pivovar, 2017).

De acuerdo con los fundamentos de la economía del hidrógeno, se propone utilizar fuentes de energía primaria de origen renovable para realizar la electrólisis del agua y así obtener el combustible de hidrógeno. Posteriormente, el hidrógeno se puede utilizar para la generación de electricidad mediante los procesos de conversión electroquímica que tienen lugar en las pilas de combustible y permiten la producción de energía bajo demanda, tanto para la alimentación de vehículos en el sector del transporte como para la generación estacionaria de potencia a nivel doméstico o industrial.

La tecnología de las pilas de combustible con hidrógeno representa un método de almacenamiento químico de energía eléctrica, permitiendo realizar la conversión electroquímica del combustible en situaciones de demanda energética. Debido a las características intrínsecas de los sistemas basados en las pilas de combustible, se consigue obtener un proceso de generación de electricidad eficiente y con un impacto ambiental prácticamente nulo respecto a los modelos basados en combustibles fósiles convencionales, lo que facilita la transición hacia modelos energéticos más limpios y sostenibles (Appleby, 1996).

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería” para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

Las ventajas del sistema de producción de energía eléctrica mediante la tecnología de las pilas de combustible que emplean hidrógeno son las siguientes (Bockris, 2002):

- La pila de combustible es una tecnología limpia con un impacto ambiental prácticamente nulo, ya que eliminan las emisiones altamente contaminantes asociadas a los gases de efecto invernadero liberados durante el proceso de combustión de los recursos fósiles convencionales.
- Permite utilizar un combustible con una gran densidad energética como es el hidrógeno, pudiendo obtenerse partir de fuentes de origen renovable. Las fuentes de energía primaria de origen renovable (solar, eólica, hidroeléctrica...) son capaces de aportar la energía eléctrica necesaria para llevar a cabo la electrólisis del agua y obtener el conocido como “hidrógeno verde”, de acuerdo con el esquema representativo de la Figura 3.
- El aprovechamiento de un recurso tan abundante como es el agua garantiza una situación de independencia energética y establece un modelo energético más sostenible. El agua es una fuente de obtención de hidrógeno mediante el proceso de electrólisis, pero también supone el único producto de reacción liberado durante la conversión electroquímica del hidrógeno en las celdas de combustible, pudiendo formar así un sistema de ciclo cerrado y estable.
- El uso del hidrógeno como vector energético permite ajustar la producción energética frente a la demanda energética, eliminando el desfase temporal entre generación y consumo de energía. Además, el almacenamiento y el transporte del hidrógeno permite comercializar con el excedente energético y suministrar el combustible a los puntos de consumo.

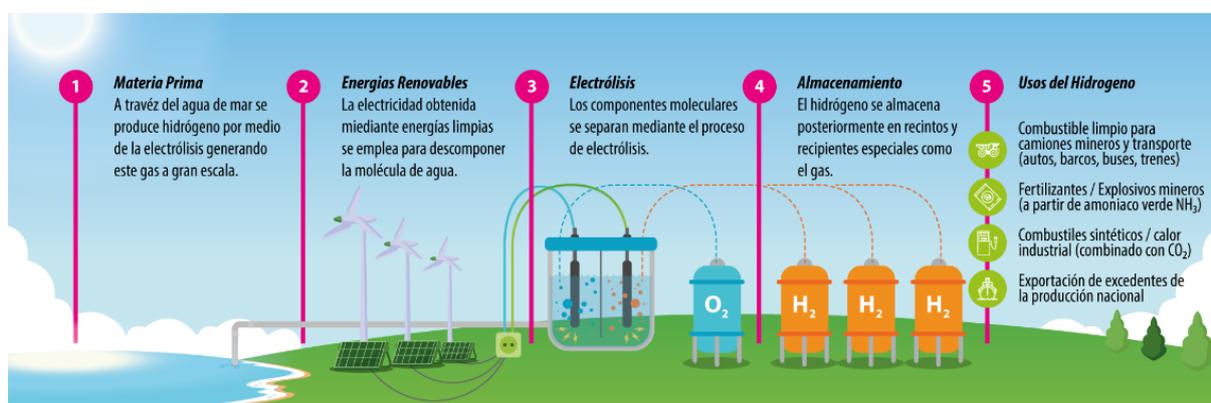


Figura 3. Esquema de síntesis del hidrógeno verde (Mora, 2020).

Los aspectos más críticos de la tecnología del hidrógeno residen en mantener unas adecuadas condiciones de seguridad durante su almacenamiento y posterior transporte (E4Tech, 2019):

- El hidrógeno es un gas muy ligero que presenta una gran volatilidad, lo que implica una fuerte tendencia a fugarse de los depósitos por grietas prácticamente indetectables a simple vista, pudiendo provocar la acumulación de una atmósfera altamente explosiva en la parte superior de los recintos cerrados.
- Habitualmente, el hidrógeno se almacena y se transporta en forma líquida empleando grandes recipientes, por lo que se requieren potentes sistemas auxiliares que permitan la elevada presurización de los depósitos para conseguir la compresión del combustible.

2.2 Métodos de producción de hidrógeno

El combustible de hidrógeno (H₂) se puede obtener de cualquier sustancia que presente dicho elemento en su estructura química, destacando habitualmente las fuentes de hidrocarburos y el agua. Sin embargo, existen diversos procesos de obtención de hidrógeno categorizados en función del origen de la materia prima empleada (Llera & Zabalza, 2011), tal y como puede observarse en la Figura 4:

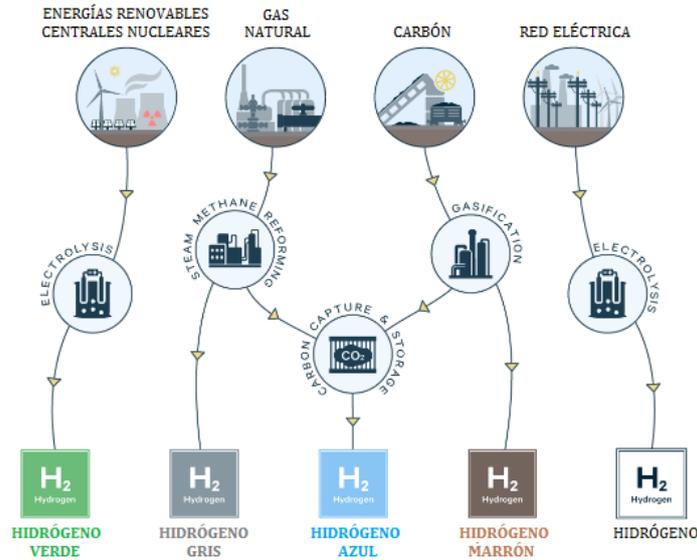
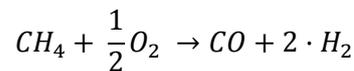
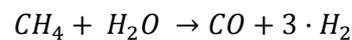


Figura 4. Métodos convencionales para la obtención de hidrógeno (Llera & Zabalza, 2011).

Por tanto, se han identificado diversos métodos implementados industrialmente que utilizan una tecnología ampliamente desarrollada y cuentan con una eficacia demostrada para la generación del combustible de hidrógeno o de una corriente del gas de síntesis (mezcla gaseosa CO + H₂):

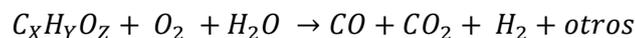
1. Reformado de hidrocarburos (*Steam Reforming and Partial Oxidation*)

Emplean corrientes de hidrocarburos procedentes de combustibles fósiles como materia prima de entrada para los procesos de transformación termoquímica con altas temperaturas (600-800°C). Habitualmente, se emplea el metano (CH₄) procedente de una corriente de gas natural para llevar a cabo las reacciones de hidrólisis en fase vapor o una oxidación parcial catalítica del combustible:



2. Pirólisis de hidrocarburos (*Gasification - Pyrolysis*)

La pirólisis de compuestos orgánicos de origen fósil, también conocida como gasificación, consiste en un proceso de oxidación sin combustión aplicando temperaturas muy elevadas (>1000°C). La gasificación utiliza combustibles fósiles en estado sólido (como el carbón, C_xH_yO_z) para producir la transformación termoquímica en presencia de vapor de agua:



3. Electrólisis del agua (*Water Electrolysis*)

Consiste en una reacción electroquímica que implica la ruptura de una molécula de agua en sus correspondientes elementos. Este proceso requiere del aporte de energía mediante una corriente eléctrica externa, empleando un equipo específico conocido como electrolizador. En la Figura 5 se muestra un esquema simplificado del funcionamiento de un electrolizador (Godula, 2015):

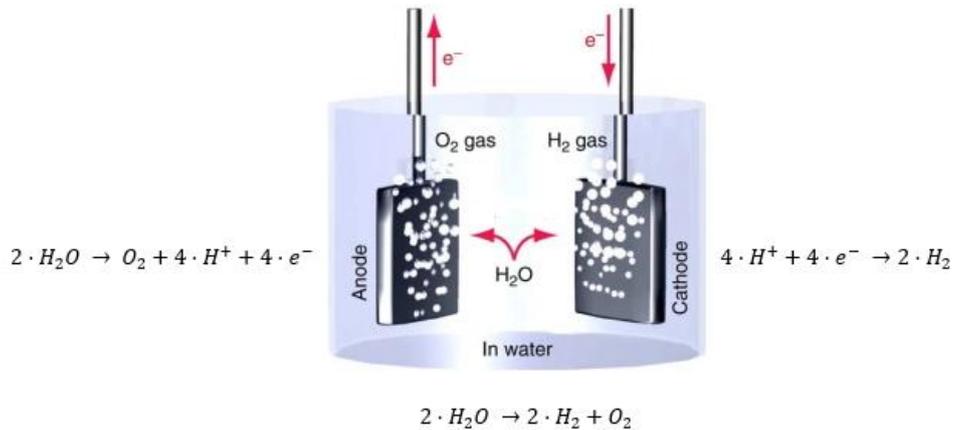


Figura 5. Esquema de funcionamiento de un electrolizador (Godula, 2015).

La electrólisis del agua es un proceso que permite obtener un combustible de hidrógeno con origen renovable (conocido como hidrógeno verde) siempre que la energía eléctrica aportada al electrolizador procede de fuentes de energía primaria renovables, como podría ser la electricidad generada por los paneles solares fotovoltaicos o los aerogeneradores eólicos.

4. Procesos de biomasa (*Biomass Process*)

En esta categoría, se incluyen tanto los procesos de gasificación y pirólisis de la biomasa de origen vegetal (madera o residuos agrícolas) como la generación de hidrógeno debido al metabolismo de organismos biológicos. En este último campo, destaca la fermentación anaerobia de glucosa por parte de microorganismos bacterianos y ciertas variedades de microalgas (Wang & Yin, 2018), según el esquema representado en la Figura 6:

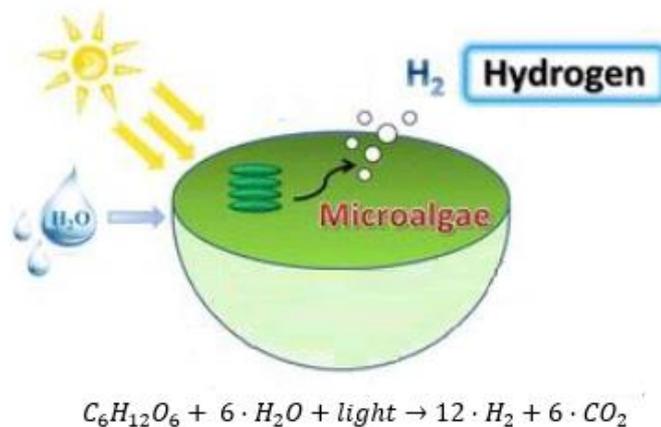


Figura 6. Obtención de hidrógeno por metabolismo microbiano vegetal (Wang & Yin, 2018).

2.3 Aplicaciones de las celdas de combustible

La tecnología de las celdas de combustible presenta una aplicación potencial para cualquier tipo de sistema que requiera del suministro de energía eléctrica, por lo que se pueden emplear como fuente de alimentación en diversos tipos de dispositivos eléctricos o electrónicos. De acuerdo con la Figura 7, se presenta una clasificación de las potenciales aplicaciones de las pilas de combustible según los niveles de potencia requeridos (Bacon, 1985):

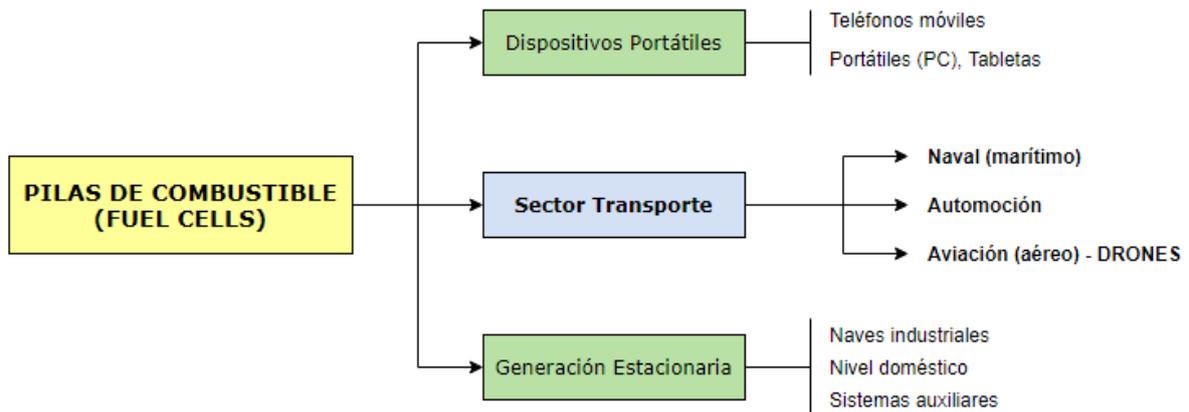


Figura 7. Potenciales aplicaciones de las pilas de combustible.

Se han identificado tres tipos de aplicaciones principales de las pilas de combustible para las que existen modelos comerciales de cada dispositivo en la actualidad:

1. Dispositivos móviles y elementos portátiles (*Portable Devices*)

Se corresponden con pequeños dispositivos electrónicos, tales como teléfonos móviles, ordenadores portátiles y tabletas, donde se requieren fuentes de alimentación de baja potencia. Estos sistemas utilizan cartuchos con una pequeña carga de hidrógeno, lo que permite reemplazar instantáneamente el depósito de combustible y ahorrar tiempo de recarga en la batería.



Figura 8. Modelo del cargador portátil MYFC - PowerTrek Fuel Cell Charger.

2. Generación estacionaria de electricidad (*Power Generation*)

Se tratan de unidades para el suministro de energía eléctrica en viviendas domésticas, además de módulos auxiliares de media potencia para la generación de electricidad en instalaciones industriales durante situaciones de avería o emergencia. Los módulos de pilas de combustible incorporan diversos componentes adicionales, como son los sistemas de refrigeración para la disipación del calor, con el fin de mantener una operación continua, mejorando así la durabilidad y la eficiencia del equipo.

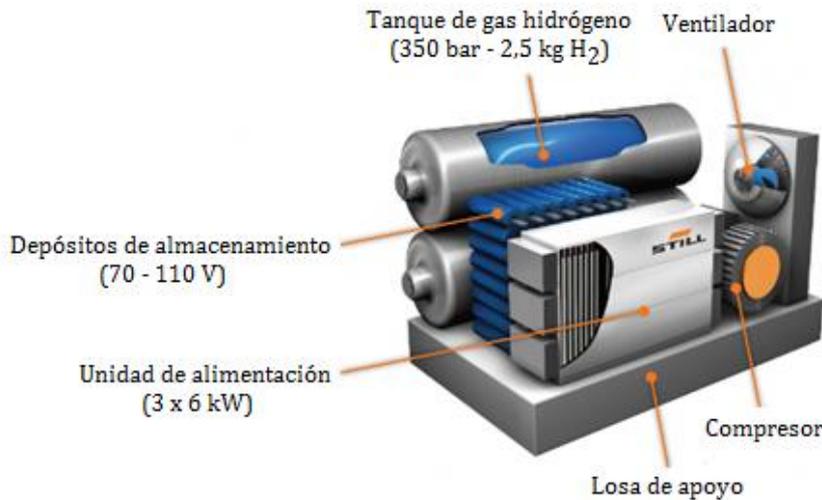


Figura 9. Módulo comercial pila de combustible - Marca STILL (España).

3. Vehículos de transporte: Automoción, aeronaves y drones

Es el campo de aplicación con mayor futuro para las pilas de combustible de gran potencia, debido a la eliminación de las emisiones contaminantes asociadas a los motores de combustión interna. Pese a que se trata del sistema ideal para la alimentación de vehículos eléctricos por su nulo impacto ambiental, la falta de infraestructuras para el suministro de hidrógeno y los costes económicos de inversión suponen un gran obstáculo para su implementación global.

- Las pilas de combustible presentan un mayor desarrollo en el ámbito de los vehículos terrestres, donde predominan comercialmente los modelos de automóviles ligeros que incorporan la tecnología asiática de marcas como Honda o Toyota.



Figura 10. Vehículos ligeros con pilas de combustible - Honda & Toyota FCV (Fuel Cell Vehicles).

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería” para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

- Sin embargo, en el diseño de las aeronaves comerciales y los vehículos aéreos para pasajeros, la tecnología de las pilas de combustible se destina al suministro auxiliar de electricidad para los sistemas eléctrico y electrónicos de la nave, no se trata de una fuente de propulsión (Berger, 2017). En la actualidad, existen algunos programas de investigación que se centran en implementar la tecnología de las pilas de combustible, permitiendo aspirar a desarrollar el primer modelo de aeronave que utiliza un sistema de propulsión alternativo al queroseno y que no produce emisiones contaminantes (*Project “Airbus VP ZEROe Aircraft”*).



Figura 11. Proyecto de la aeronave AIRBUS VP ZEROe Aircraft.

- Dentro del marco de los dispositivos aéreos, surge la posibilidad de incorporar la tecnología de las pilas de combustible en los vehículos aéreos no tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles, UAV*), conocidos popularmente como drones.

La aplicación de las celdas de combustible en los drones mejora notablemente la autonomía del vehículo y permite recorrer mayores distancias, en comparación con los drones del mismo peso que se encuentran alimentados por sistemas de baterías, debido a la mayor densidad energética del hidrógeno en comparación con las tradicionales baterías LiPo (Dukowitz, 2021).



Figura 12. UAV HyDrone Skylle 1550 - Marca MMC.

2.4 Vehículos aéreos no tripulados: Drones

La tecnología de los vehículos aéreos no tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles, UAV*), conocidos popularmente como drones, presenta importantes beneficios para la sociedad contemporánea debido a la gran versatilidad que ofrecen en distintos campos de aplicación, como son la agricultura, la medicina o la seguridad. Los drones representan una herramienta de apoyo vital en situaciones de emergencia, ya que son capaces de efectuar tareas de rescate incluyendo el transporte de equipamiento médico y/o la inspección aérea del terreno (Ayamga, Akaba, & Nyaaba, 2021).

En el ámbito de la medicina, los drones sanitarios se pueden emplear para la entrega aérea de sangre, órganos y vacunas en hospitales y centros médicos especializados, además de poder ofrecer asistencia médica de primeros auxilios en zonas remotas de difícil acceso. Existen modelos comerciales de drones sanitarios para actuaciones en situaciones de emergencia, destacando el modelo *AeroHyb Hexacopter* desarrollado por la empresa Aerocamaras para la búsqueda y el rescate de personas.

El dron *AeroHyb Hexacopter* representa un sistema híbrido que combina la electricidad proporcionada por un conjunto de baterías con un tanque de combustible con gasolina, lo que le permite alcanzar tiempos de vuelo de hasta 7 horas y transportar una carga de hasta 5 kg. Además, el dron permite incorporar cámaras para la grabación de imágenes HD en tiempo real y cámaras termográficas para la inspección del terreno durante la noche.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del dron sanitario *AeroHyb Hexacopter* (Aerocamaras).



 ESPECIALISTAS EN DRONES	
PESO MÁXIMO (MTOW)	19 Kg
PESO VACÍO	10,5 Kg
CARGA MÁXIMA	5 Kg
CAPACIDAD DEL DEPÓSITO	5 - 10 L
TIEMPO VUELO (CARGA MÁX)	2 h
TIEMPO VUELO (SIN CARGA)	7 h
VELOCIDAD MÁXIMA	54 km/h

La tecnología híbrida formada por el depósito de gasolina y la batería de larga duración consigue superar las limitaciones del mercado en cuestión de autonomía, permitiendo realizar la búsqueda y el rescate de personas en situaciones de emergencia tanto en terrenos marítimos como terrestres. Al mismo tiempo, la incorporación de diversos tipos de cámaras (HD, 5K, 360°, Zoom, Térmicas...) permite también la grabación de imágenes aéreas en alta resolución para realizar inspecciones técnicas sobre cualquier estructura y elaborar informes topográficos mediante el análisis espectral y radiométrico del terreno (AeroCamaras, 2021).

El sector agrónomo también ha incorporado la innovadora tecnología de los drones para realizar operaciones autónomas sobre diversos terrenos agrícolas, como son los campos de cultivo de gran extensión o los huertos frutales, permitiendo implementar estrategias de control de plagas y mejorar la eficiencia del proceso de sembrado mediante la optimización del consumo de fertilizantes. Entre los modelos comerciales disponibles, cabe destacar el modelo *AGRAS T20* desarrollado por la empresa asiática DJI para el rociado de gran precisión del terreno agrícola.

El dron *AGRAS T20* presenta un diseño modular robusto que lo protege frente a los impactos provocados por la salpicadura de la carga y facilita la limpieza de la aeronave con agua. El sistema de rociado del fertilizante cuenta con un sistema de 8 boquillas y bombas de impulsión para alcanzar una velocidad de rociado de 6 L/min de un depósito de 20L, además de incorporar también un sistema de esparcido para semillas de tamaños 0,5-5mm que alcanza velocidades de dosificación de 15 kg/min.

Tabla 2. Especificaciones técnicas del dron agrícola *AGRAS T20* (DJI).



	
PESO MÁXIMO (MTOW)	42,6 Kg
PESO VACÍO	21,1 Kg
CARGA MÁXIMA	20 Kg
CAPACIDAD DEL DEPÓSITO	15 - 20 L
VUELO PLANO (CARGA MÁX)	10 min
VUELO PLANO (SIN CARGA)	15 min
VELOCIDAD MÁXIMA	25 km/h

El sistema de posicionamiento integrado RTK permite la programación de la trayectoria con gran precisión, reforzando así las operaciones para optimizar el consumo de fertilizante durante el rociado. Cuenta también con un radar digital omnidireccional para la detección de obstáculos a su alrededor, lo que proporciona un alto nivel de seguridad operativa y la capacidad para eludir dichos obstáculos de forma autónoma, mientras que la cámara FPV en tiempo real otorga un amplio rango de visión incluso en situaciones de baja visibilidad nocturna (DJI Technology Corporation, 2021).

Hasta el momento, los modelos comerciales consultados sobre los drones sanitarios y agrícolas presentan una fuente de alimentación eléctrica mediante un conjunto de baterías. El modelo del dron agrícola *AGRAS T20* presenta un consumo eléctrico en vuelo estacionario de aproximadamente 6000W a plena carga que lo proporciona una batería LiPo de 18000 mA·h, mientras que el modelo del dron sanitario *AeroHyb Hexacopter* presenta un sistema de alimentación híbrido que resulta de la combinación de un depósito de 5-10L de gasolina y un par de baterías LiPo auxiliares de 5200 mA·h.

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería” para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

En el caso del dron sanitario *AeroHyb Hexacopter*, la fuente de alimentación principal es el depósito de combustible de gasolina, por lo que la autonomía de la aeronave se encuentra determinada en función de la capacidad del depósito incorporado y consigue alcanzar tiempos de vuelo de 2h a plena carga utilizando un tanque de gasolina de 5-10L de capacidad. Las baterías auxiliares incorporadas se utilizan para mantener en funcionamiento los componentes eléctricos y electrónicos del dron (cámaras, sensores, sistemas de comunicación, GPS...), mientras que el motor de gasolina alimenta un generador que recarga de manera continua las baterías conectadas con los 6 motores eléctricos que accionan los rotores de vuelo del dron.

En el caso del dron agrícola *AGRAS T20*, presenta una fuente de alimentación puramente eléctrica mediante una batería LiPo de larga duración. Sin embargo, la gran capacidad energética de la batería no parece ser suficiente para garantizar una autonomía de vuelo adecuada, puesto que la fase de vuelo plano apenas presenta una duración de 10-15 min. Por lo tanto, se puede deducir que la alimentación de los sistemas de vuelo del dron con un conjunto de baterías LiPo no permite alcanzar autonomías de vuelo superiores a los 30 min en drones de gran tamaño (>20 kg), ya que se produce un importante consumo energético durante las fases de despegue y aterrizaje del dron.

Para evitar la contaminación atmosférica provocada por los combustibles fósiles como la gasolina, surge la posibilidad de utilizar un nuevo sistema de alimentación eléctrica que mejore drásticamente la autonomía de vuelo del dron y resuelva los problemas asociados con la limitación de las baterías. En este sentido, la empresa coreana Doosan se postula como el principal proveedor mundial de drones propulsados por pilas de combustible alimentadas con hidrógeno, destacando el modelo *DS30*.

Tabla 3. Especificaciones técnicas del dron de hidrógeno DS30 (Doosan Mobility).



	
PESO MÁXIMO (MTOW)	25 Kg
PESO VACÍO (DEPÓSITO 11L)	20 Kg
CARGA MÁXIMA	5 Kg
CAPACIDAD DEL DEPÓSITO	7 - 11 L
TIEMPO VUELO (CARGA MÁX)	-
TIEMPO VUELO (SIN CARGA)	2 h
ALCANCE (2h)	80 km

El dron propulsado por hidrógeno mediante la tecnología de las pilas de combustible PEMFC ha sido galardonado con el reconocimiento “2020 CES Best Innovation Award”. Entre sus características, presenta una gran compatibilidad con varios tipos de cámaras de gran calidad (serie A3 DJI o Pixhawk) e incorpora un sistema automático de seguridad para realizar aterrizajes de emergencia cuando el nivel del combustible de hidrógeno en el depósito sea insuficiente (Doosan Mobility Innovation, 2021).

Evidentemente, la aplicación de las pilas de combustible con hidrógeno ya ha demostrado su potencial como fuente de alimentación eléctrica para los sistemas de vuelo de vehículos aéreos no tripulados, presentándose además como una solución para mejorar considerablemente la autonomía de vuelo. Aunque el modelo actual DS30 desarrollado por la empresa Doosan consigue alcanzar un tiempo de vuelo de 2h utilizando un depósito de combustible de 11L de hidrógeno, las especificaciones técnicas destacan que en los ensayos de vuelo realizados no se transportaba ninguna carga, por lo que esta información no es aplicable para el caso de los drones sanitarios o agrícolas, puesto que la autonomía de vuelo con carga sería notablemente inferior.

Por lo tanto, el presente Trabajo Final de Máster pretende realizar el modelado y la simulación de un sistema híbrido formado por una pila de combustible PEMFC y una batería LiPo, desarrollando así un nuevo sistema de alimentación eléctrica para drones sanitarios o agrícolas. Como se ha visto en las especificaciones técnicas de los principales modelos comerciales de drones sanitarios y agrícolas, se tratan de drones de gran tamaño (15-20 kg aprox.) que permiten transportar cargas de hasta 5 kg.

Con el objetivo de minimizar el peso de la aeronave hasta alcanzar un tamaño de unos 15 kg de peso, se toma como referencia el diseño del modelo DS30 y se incorpora una batería LiPo para implementar el sistema híbrido eléctrico en el dron. La función de la batería LiPo es abastecer el balance de planta de los componentes eléctricos y electrónicos para iniciar el arranque de los sistemas de vuelo del dron, además de permitir alcanzar los picos de consumo eléctrico del dron durante las fases de despegue y aterrizaje. Durante la fase de vuelo plano, la pila de combustible PEMFC se encuentra proporcionando una corriente eléctrica superior al consumo estacionario para mantener el balance de planta y realizar una recarga continua de la batería.

El sistema híbrido eléctrico permite reducir el tamaño de la pila de combustible PEMFC en el dron, puesto que los picos máximos de consumo de corriente eléctrica en las fases de despegue y aterrizaje se alcanzan mediante la disposición en paralelo de la pila PEMFC y la batería LiPo:

- Por un lado, el dimensionamiento de la pila de combustible PEMFC se realiza para alcanzar el punto de mayor rendimiento de conversión energética durante la operación del dron en la fase de vuelo estacionario, generando también un ligero excedente eléctrico para la recarga de la batería LiPo.
- Por su parte, el dimensionamiento de la batería LiPo con el objetivo de minimizar el aporte de peso al conjunto del dron pero garantizando una capacidad energética suficiente para alcanzar los picos máximos de consumo del dron durante las fases de despegue y aterrizaje.

En la pila de combustible PEMFC, el punto de mayor rendimiento de conversión energética representa la situación que permite extraer la mayor potencia útil del combustible de hidrógeno. Es decir, representa el punto óptimo de funcionamiento del dispositivo electroquímico, puesto que permite optimizar el consumo de combustible para reducir el tamaño del depósito de hidrógeno, lo que se traduce también en una disminución en el peso del dron al utilizar una botella de menor capacidad. Por tanto, al minimizar el peso del conjunto del dron hasta los 15 kg mediante el dimensionamiento de la pila de combustible PEMFC en su punto óptimo de funcionamiento se consigue reducir el consumo de combustible, permitiendo emplear un depósito de hidrógeno de menor capacidad para alcanzar una autonomía de vuelo de 1-2 h considerando una carga máxima de unos 5-10 kg.

El fundamento teórico del sistema híbrido eléctrico formado por una pila de combustible PEMFC y una batería LiPo ya se encuentra disponible a nivel comercial, mediante el modelo *Hycopter* de la empresa asiática Hydrogen Energy Systems (HES). El *Hycopter* es un dron de gran tamaño que permite alcanzar hasta 3,5 horas de vuelo continuo sin necesidad de realizar paradas para el reemplazo de los cilindros de almacenamiento para el combustible de hidrógeno o la recarga de la batería. Sin embargo, a diferencia de lo que se propone en el presente Trabajo Final de Master, la pila de combustible PEMFC se encuentra limitada por la intensidad de corriente que proporciona la máxima potencia nominal, por lo que no se mantiene el punto óptimo de funcionamiento que permite conseguir la máxima eficiencia de conversión energética del hidrógeno para reducir así el consumo del combustible.

La fuente de energía eléctrica principal es una pila de combustible de cátodo abierto, por lo que se encuentra diseñada específicamente para aprovechar el aire atmosférico como agente oxidante y como fluido refrigerante del dispositivo electroquímico. El sistema de alimentación del dron se encuentra formado por una pila de combustible PEMFC de la serie Aerostak que proporciona 1500 W de potencia nominal, en combinación con una batería LiPo que cuenta con un gran ratio de descarga para generar picos de potencia de hasta 4000 W en menos de 10s.

Tabla 4. Especificaciones técnicas del dron híbrido *Hycopter* (HES).



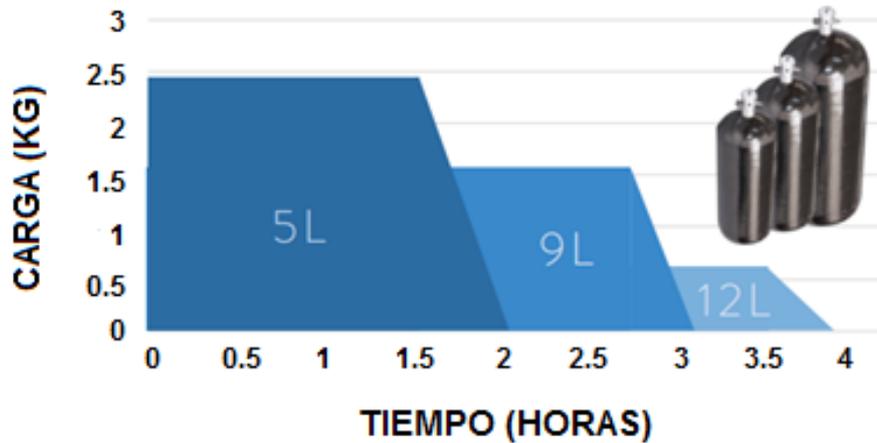
	
PESO MÁXIMO (MTOW)	16,5 Kg
PESO VACÍO (DEPÓSITO 12L)	14 Kg
CARGA MÁXIMA	2,5 Kg
CAPACIDAD DEL DEPÓSITO	5 – 9 – 12 L
TIEMPO VUELO (CARGA MÁX)	90 min
TIEMPO VUELO (SIN CARGA)	+ 3,5 h
VELOCIDAD MÁXIMA	48 km/h

La pila de combustible PEMFC se puede acoplar sobre distintos cilindros de almacenamiento del hidrógeno altamente presurizados, elaborados a partir de fibra de carbono para que resulten muy resistentes y lo más ligeros posible. Sin embargo, hay que tener en cuenta que una mayor cantidad de hidrógeno almacenada en el depósito de combustible no implica necesariamente una mayor autonomía de vuelo, ya que se debe alcanzar un compromiso entre la cantidad de hidrógeno almacenada y el peso extra para el conjunto del dron. Cuanto mayor sea la capacidad del cilindro de hidrógeno, es posible almacenar una mayor cantidad de combustible, pero también se requiere un cilindro mucho más robusto y resistente que representa un peso adicional y se requiere una mayor demanda de potencia en el dron. Así pues, el fabricante proporciona unos gráficos que permiten estimar la autonomía de vuelo del dron según la carga máxima transportada y el tamaño de los cilindros de almacenamiento para el combustible de hidrógeno, de acuerdo con la siguiente Tabla 5:

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería”
para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

Tabla 5. Autonomía de vuelo del dron híbrido *Hycopter* según el depósito de hidrógeno y la carga.

Masa cilindro	Volumen	Masa Hidrógeno	Dimensiones	Energía
1,85 kg	5 L	126 g	Ø: 152 mm L: 395 mm	1900 Wh
3,2 kg	9 L	227 g	Ø: 173 mm L: 528 mm	3500 Wh
3,85 kg	12 L	303 g	Ø: 196 mm L: 532 mm	4700 Wh



Una particularidad muy interesante del fabricante HES para las pilas de combustible PEMFC correspondientes a la serie Aerostak es la posibilidad de incorporar los componentes electrónicos necesarios para realizar una hibridación con una batería LiPo. El dron híbrido *Hycopter* utiliza una batería LiPo para generar la potencia eléctrica adicional cuando la demanda energética supera la máxima potencia de la pila de combustible PEMFC, permitiendo también realizar una recarga de la batería cuando existe un excedente eléctrico disponible en el sistema. Este método de funcionamiento aparece representado esquemáticamente en la siguiente Figura 13:

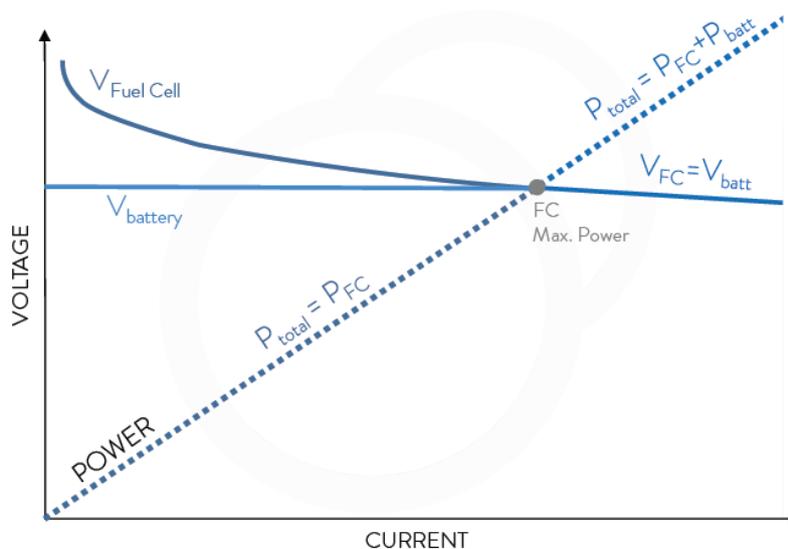


Figura 13. Principio de funcionamiento del dron híbrido *Hycopter* (HES).

3. CELDAS DE COMBUSTIBLE

Las celdas de combustible (Fuel Cells, FC) son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química almacenada en un combustible directamente en energía eléctrica, sin la necesidad de utilizar ningún proceso de combustión (Larminie & Dicks, 2003).

El proceso electroquímico permite la generación de electricidad en forma de corriente continua y presenta un elevado rendimiento de conversión energética, ya que consigue eliminar las pérdidas de potencia asociadas a las diversas etapas de transformación intermedias que requiere el proceso térmico de combustión. Además, desde el punto de vista medioambiental, se consiguen eliminar las emisiones contaminantes que se producen durante la combustión convencional del combustible.

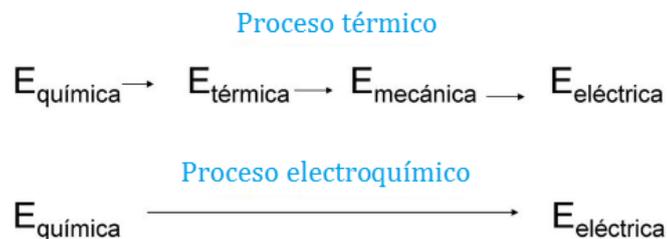


Figura 14. Generación de electricidad - Proceso térmico vs Proceso electroquímico.

De acuerdo con la Figura 14, las celdas de combustible son consideradas como la tecnología principal que permite realizar un aprovechamiento energético del hidrógeno, pero proporcionando elevados rendimientos de conversión electroquímica debido a la ausencia de procesos térmicos de combustión.

Una celda de combustible presenta el principio de funcionamiento de una celda electroquímica que está formada por dos electrodos (ánodo-cátodo) en contacto a través de una disolución de electrolito. Las semirreacciones electroquímicas (oxidación del combustible y reducción del comburente) se producen sobre los electrodos correspondientes, en compartimentos separados para evitar el proceso térmico de combustión y conseguir generar una corriente eléctrica externa (Hoogers, 2002), siguiendo el esquema simplificado que se muestra en la Figura 15:

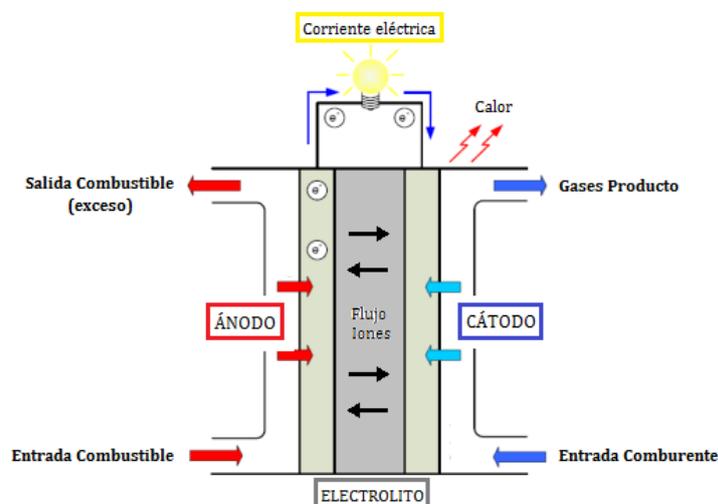


Figura 15. Esquema conceptual de una celda de combustible.

3.1 Tipología y clasificación

Por lo general, la clasificación de las celdas de combustible se realiza en función de la naturaleza de la disolución del electrolito empleada, puesto que este factor determina las condiciones de operación, como son el rango de temperatura alcanzable o el tipo de reactivos utilizados (Lipman & Weber, 2019).

Dependiendo de la naturaleza de la disolución del electrolito, se puede establecer una primera distinción entre las celdas de combustible ácidas y alcalinas:

- Las celdas de combustible ácidas emplean una disolución electrolítica que resulta conductora de iones con carga positiva, concretamente protones (H^+).
- Las celdas de combustible básicas o alcalinas emplean una disolución electrolítica que resulta conductora de iones con carga negativa, habitualmente hidroxilos (OH^-) o carbonatos (CO_3^{2-}).

Sin embargo, el criterio de clasificación más interesante y práctico para las celdas de combustible consiste en distinguir en función del rango de temperatura en operación:

- Celdas de Combustible (Baja temperatura)
 - *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) [ÁCIDA]
 - *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC) [ÁCIDA]
 - *Alkaline Fuel Cell* (AFC) [ALCALINA]
- Celdas de Combustible (Media-Alta Temperatura)
 - *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC) [ÁCIDA]
 - *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC) [ALCALINA]
 - *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC) [ALCALINA]

Cada configuración de las celdas de combustible presenta unas características de funcionamiento específicas que dependen de la tecnología utilizada. Sin embargo, siempre se requiere del suministro de una fuente de hidrógeno, tanto en fase líquida (alcoholes del tipo metanol CH_3OH o etanol C_2H_5OH) como en fase gaseosa (hidrógeno H_2 o una corriente de hidrocarburos, habitualmente metano CH_4). Por su parte, el agente oxidante o comburente se obtiene directamente de una corriente de aire atmosférico, aunque también es posible utilizar un depósito con oxígeno de elevada pureza.

Como se ha mencionado anteriormente, el factor más determinante y característico de una celda de combustible resulta ser el tipo de electrolito empleado, ya que condiciona el rango de temperatura en operación y los costes económicos de inversión y mantenimiento del equipo. Del mismo modo, el tipo de electrolito utilizado establece también las condiciones que deben reunir las corrientes de entrada en el dispositivo electroquímico y su contenido en impurezas, determinando las semirreacciones electroquímicas de oxidación del combustible y de reducción del agente oxidante.

Para tratar de proporcionar una visión global sobre el funcionamiento de todas las configuraciones posibles de las celdas de combustible, se ha decidido elaborar unas tablas donde aparecen recogidas las características más relevantes. En las Tablas 6 y 7, se proporcionan las características de funcionamiento que presentan las distintas configuraciones para las celdas de combustible que operan a baja y media-alta temperatura, respectivamente (Mekhilef, Saidur, & Safari, 2012):

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería”
para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

Tabla 6. Características de las celdas de combustible de baja temperatura (Mekhilef, Saidur, & Safari, 2012)

TIPOLOGÍA	PEMFC	DMFC	AFC
Combustible	Hidrógeno (H ₂)	Metanol (CH ₃ OH)	Hidrógeno (H ₂) PURO
Comburente / Oxidante	Aire (O ₂)	Aire (O ₂)	Aire (O ₂) PURO
Electrolito	Membrana polimérica sólida de intercambio catiónico	Membrana polimérica sólida de intercambio catiónico	Disolución fuertemente alcalina (KOH o NaOH ≤ 85% en peso)
Naturaleza	Ácida	Ácida	Básica o Alcalina
Rango Temperatura (°C)	20 - 100	80 - 120	60 - 180
Reacción Anódica (Oxidación)	$2 \cdot H_2 \rightarrow 4 \cdot H^+ + 4 \cdot e^-$	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6 \cdot H^+ + 6 \cdot e^-$	$2 \cdot H_2 + 4 \cdot OH^- \rightarrow 2 \cdot H_2O + 4 \cdot e^-$
Reacción Catódica (Reducción)	$O_2 + 4 \cdot H^+ + 4 \cdot e^- \rightarrow 2 \cdot H_2O$	$\frac{3}{2} \cdot O_2 + 6 \cdot H^+ + 6 \cdot e^- \rightarrow 3 \cdot H_2O$	$O_2 + 2 \cdot H_2O + 4 \cdot e^- \rightarrow 4 \cdot OH^-$
Portador Carga Iónica	Protones (H ⁺)	Protones (H ⁺)	Hidroxilos (OH ⁻)
Eficiencia Conversión (%)	50 - 60	≤ 40	55 - 60
Potencia (kW)	10 - 250	10 - 100	10 - 100
Aplicaciones	Generador auxiliar, transporte	Aplicaciones portátiles	Sector militar, programas espaciales

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería”
para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

Tabla 7. Características de las celdas de combustible de media y alta temperatura (Mekhilef, Saidur, & Safari, 2012)

TIPOLOGÍA	PAFC	MCFC	SOFC
Combustible	Hidrógeno (H ₂)	Hidrógeno reformado (H ₂) Hidrocarburos (CO, CH ₄)	Hidrógeno reformado (H ₂) Hidrocarburos (CO, CH ₄)
Comburente / Oxidante	Aire (O ₂)	Aire (O ₂)	Aire (O ₂)
Electrolito	Disolución concentrada de ácido fosfórico (H ₃ PO ₄ al 85-95% en peso)	Mezcla fundida de carbonatos alcalinos (Li, Na o K) suspendidos	Matriz cerámica no porosa (ZrO ₂ estabilizada con Y ₂ O ₃)
Naturaleza	Ácida	Básica o Alcalina	Básica o Alcalina
Rango Temperatura (°C)	150 - 200	600 - 700	850 - 1000
Reacción Anódica (Oxidación)	$2 \cdot H_2 \rightarrow 4 \cdot H^+ + 4 \cdot e^-$	$H_2O + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2 \cdot e^-$	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2 \cdot e^-$ $CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2 \cdot e^-$
Reacción Catódica (Reducción)	$O_2 + 4 \cdot H^+ + 4 \cdot e^- \rightarrow 2 \cdot H_2O$	$\frac{1}{2} \cdot O_2 + CO_2 + 2 \cdot e^- \rightarrow CO_3^{2-}$	$\frac{1}{2} \cdot O_2 + 2 \cdot e^- \rightarrow O^{2-}$
Portador Carga Iónica	Protones (H ⁺)	Carbonatos (CO ₃ ²⁻)	Óxidos (O ²⁻)
Eficiencia Conversión (%)	40 - 50	50 - 60	55 - 65
Potencia (kW)	50 - 1000	100 - 1000	100 - 3000
Aplicaciones	Generación estacionaria	Generación estacionaria	Generación estacionaria

3.2 Principio de funcionamiento de una PEMFC

Entre todas las configuraciones posibles que pueden tener las celdas de combustible, el presente Trabajo Final de Máster se centra en desarrollar específicamente la tecnología de las pilas de combustible con membrana de intercambio protónico (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC), puesto que presentan un mayor potencial de aplicación en los vehículos eléctricos.

La tecnología de las celdas de combustible del tipo PEMFC presentan un mayor desarrollo en el sector del transporte, puesto que las bajas temperaturas de operación, la elevada eficiencia de conversión electroquímica y la gran densidad energética del combustible permite utilizar equipos más ligeros, de menor tamaño y que ofrecen una respuesta de arranque más rápida (Fathabadi, 2018).

El fundamento de una celda de combustible del tipo PEMFC requiere del suministro de hidrógeno como combustible y de aire atmosférico como agente oxidante, para así poder generar electricidad por conversión electroquímica y liberar agua como único subproducto de la reacción. En la Figura 16, se muestra un esquema de funcionamiento para una celda de combustible del tipo PEMFC:

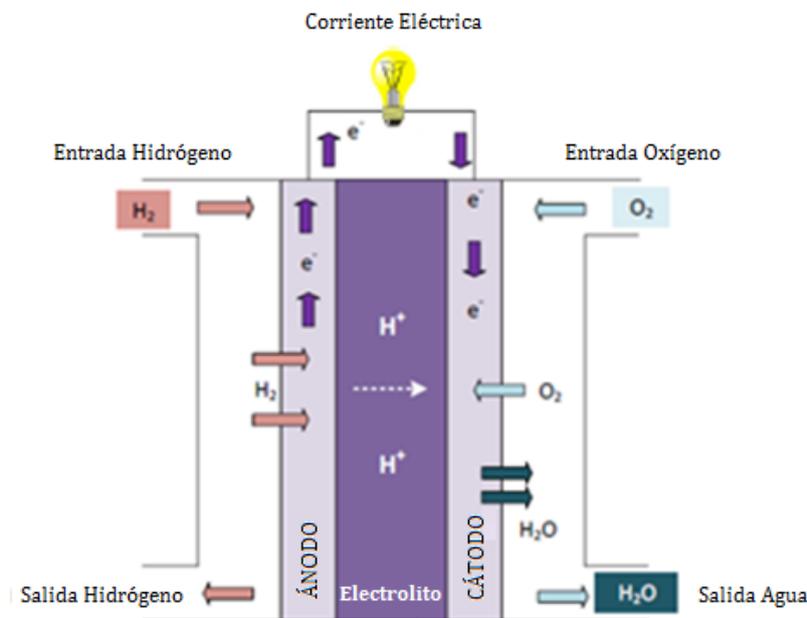
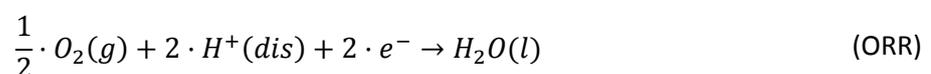


Figura 16. Esquema de funcionamiento de una pila de combustible PEMFC.

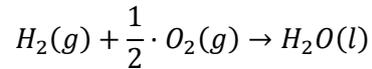
En el electrodo del ánodo, se produce la semirreacción electroquímica de oxidación del combustible de hidrógeno (H₂) para generar electrones (e⁻) y liberar protones al medio del electrolito (H⁺):



Por su parte, los protones (H⁺) viajan a través del electrolito hasta llegar al electrodo del cátodo, donde tiene lugar la semirreacción electroquímica de reducción del oxígeno atmosférico (O₂) y se produce la formación de agua líquida (H₂O) como subproducto de la reacción:



Por lo tanto, la reacción global de una celda de combustible del tipo PEMFC se puede expresar como:



Como se puede observar, las celdas de combustible del tipo PEMFC únicamente liberan agua como subproducto del proceso de conversión electroquímica y generan una corriente eléctrica debido al paso del flujo de electrones a través de un elemento conductor externo que conecta ambos electrodos.

La separación física de la región anódica y catódica en diferentes compartimentos es lo que permite la generación de electricidad por la vía electroquímica. Para cerrar el circuito eléctrico que supone el conjunto de la celda de combustible, se utiliza una membrana polimérica de intercambio iónico que permite el movimiento de los portadores de carga iónica a través de la disolución del electrolito. En este caso, se utiliza una membrana polimérica de intercambio protónico como electrolito sólido para conseguir la migración de los protones generados en la región anódica hasta la región catódica.

Durante la operación y el funcionamiento de una celda de combustible del tipo PEMFC, se producen una serie de fenómenos de transporte relacionados con la transferencia de materia y/o energía, las semirreacciones electroquímicas de oxidación-reducción y el transporte iónico y/o electrónico:

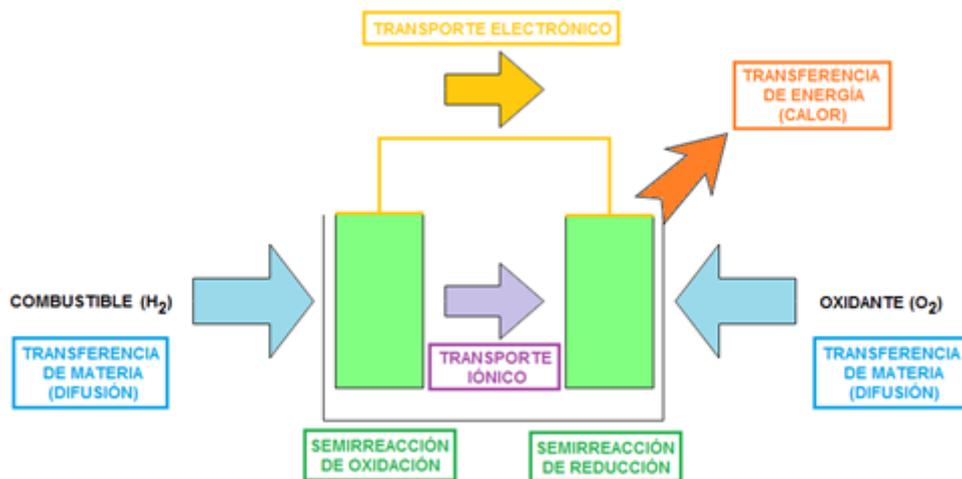


Figura 17. Fenómenos físico-químicos de transporte en una pila de combustible PEMFC.

El principio de funcionamiento de una celda de combustible del tipo PEMFC queda representado por la secuencia de fenómenos físicos de transporte y las reacciones electroquímicas que se muestran en la Figura 17. El conjunto de la celda de combustible está formado por diversos elementos y componentes estructurales que consiguen maximizar los fenómenos físico-químicos para obtener la máxima eficiencia de conversión electroquímica, permitiendo incrementar la potencia eléctrica generada por el sistema.

3.3 Componentes de una PEMFC

Las pilas de combustible representan una secuencia en serie de diversas unidades de monoceldas electroquímicas, generando un apilamiento de celdas de combustible (Fuel Cell Stack) para obtener unos valores de tensión y potencia eléctrica más adecuados. Por lo tanto, la unidad elemental de una pila de combustible representa el conjunto formado por los siguientes elementos básicos:

- Una lámina o membrana polimérica de intercambio protónico como electrolito.
- Los pares de electrodos ánodo y cátodo, recubiertos superficialmente con un catalizador.
- Las placas bipolares que permiten la difusión de los reactivos y productos.

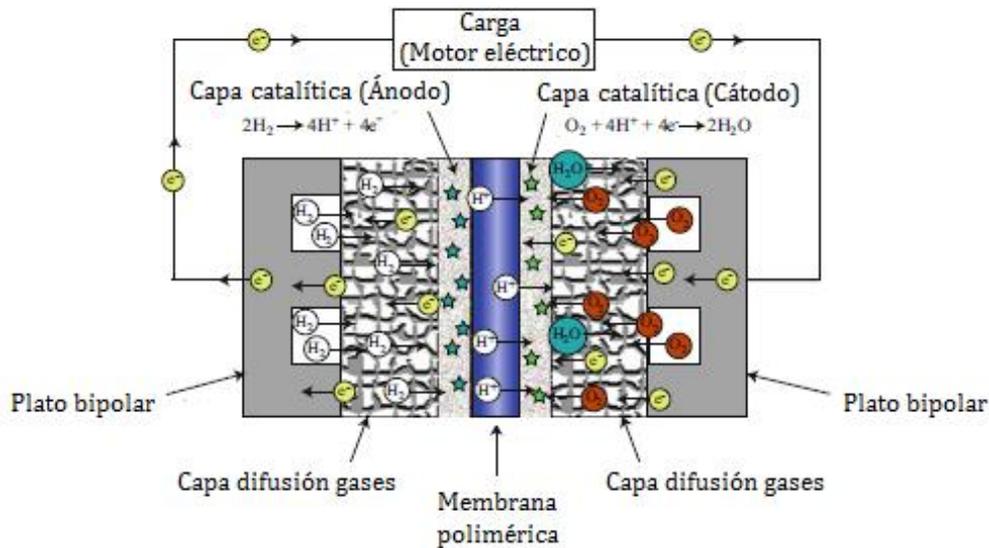


Figura 18. Componentes básicos de una pila de combustible PEMFC.

A nivel general, el funcionamiento de una pila de combustible del tipo PEMFC comienza con el suministro de los reactivos en sus respectivos compartimentos. Gracias a los canales que presentan las placas bipolares situadas en los extremos de la monocelda electroquímica, los gases reactivos son capaces de difundir homogéneamente sobre toda la superficie de los electrodos, a través de las capas de difusión de gas.

La presencia de partículas de electrocatalizador sobre la superficie porosa de los electrodos permite mejorar la cinética de las semirreacciones electroquímicas de oxidación y reducción, lo que contribuye a incrementar la potencia eléctrica generada por el equipo (Zhang, 2008).

Tras la disociación de la molécula de hidrógeno como consecuencia de la semirreacción de oxidación del combustible, los protones atraviesan la membrana polimérica del electrolito y los electrones recorren un circuito eléctrico externo, para así producir la semirreacción de reducción del oxidante en la región catódica. El agua liberada en la región catódica se emplea para mantener unas condiciones adecuadas de humectación de la membrana polimérica, consiguiendo mejorar la conductividad iónica.

A continuación, en este apartado se pretende realizar una revisión de las características y los requisitos más importantes que deben cumplir los componentes representados en la Figura 18, siempre con el objetivo de maximizar la eficiencia de conversión electroquímica.

3.3.1 Membrana de intercambio protónico (Electrolito)

La principal diferencia entre las diversas configuraciones de las celdas de combustible reside en la naturaleza de la disolución del electrolito. En el caso de las pilas de combustible del tipo PEMFC, se utiliza una membrana polimérica de intercambio catiónico como lámina sólida de electrolito que cumple diversas funciones importantes para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

Por un lado, representa la barrera de separación física entre los compartimentos anódico y catódico, resultando impermeable a los gases reactivos y evitando el contacto directo entre el combustible y el agente oxidante. Por otro lado, debe permitir el paso de los protones desde la región anódica hasta la región catódica para completar las semirreacciones electroquímicas, por lo que debe presentar una gran conductividad iónica. Sin embargo, debe impedir el paso de los electrones por el medio del electrolito para forzar el recorrido electrónico a través de un elemento conductor que conecta ambos electrodos, generando así una corriente eléctrica externa (Lee & Quan, 2006).

Tradicionalmente, en la fabricación de la membrana polimérica de intercambio protónico se ha utilizado un material ionomérico perfluorosulfonado de la empresa DuPont, que recibe el nombre comercial de Nafión. Las láminas poliméricas con 50-300 μm de espesor presentan una cadena principal fluorocarbonada similar al Politetrafluoroetileno (PTFE, también conocido como Teflón) que proporciona unas adecuadas propiedades mecánicas y gran estabilidad química, pero incorpora cadenas laterales unidas covalentemente por enlaces éter con grupos sulfónicos terminales (SO_3H) para adquirir un mayor carácter hidrofílico y mejorar la conductividad iónica:

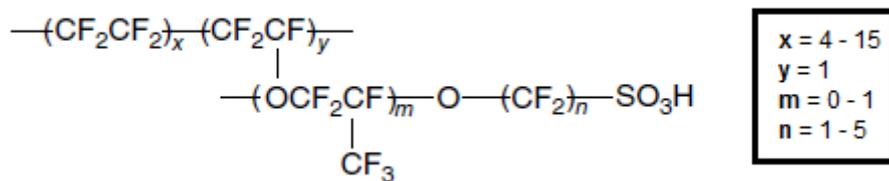


Figura 19. Estructura química del Nafión®.

La conductividad iónica de la membrana polimérica es fundamental para garantizar el transporte iónico a través del medio de electrolito. El proceso de transporte iónico en el medio del electrolito sigue el mecanismo de Grothuss sobre el salto protónico (*Proton Hopping Mechanism*) que se produce sobre las moléculas de agua retenidas en la estructura polimérica de la membrana. Por lo tanto, para maximizar el fenómeno del transporte iónico, se requiere garantizar unas condiciones mínimas de humectación en la membrana polimérica del electrolito, utilizando para ello el propio agua generado durante la reducción del agente oxidante (Becker & Weidner, 2000):

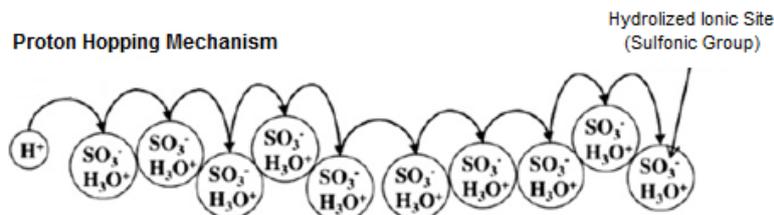


Figura 20. Mecanismo de Grothuss sobre el salto protónico (Becker & Weidner, 2000).

3.3.2 Electrodo y catalizador

En el caso de las pilas de combustible del tipo PEMFC, el conjunto “ánodo/electrolito/cátodo” recibe la designación de electrodos de membrana (*Membrane Electrode Assembly, MEA*) y representa la unidad central de una monocelda de combustible. A escala industrial, se realiza un proceso de unión entre los materiales del electrodo y la membrana polimérica del electrolito, depositando diversas capas de electrocatalizador para formar una superficie activa sobre los electrodos y obteniendo así el conjunto que supone una lámina electrolítica (Litster & McLean, 2004). En la Figura 21, se presenta un esquema de descomposición de la estructura del tipo panel sándwich en los electrodos de membrana:

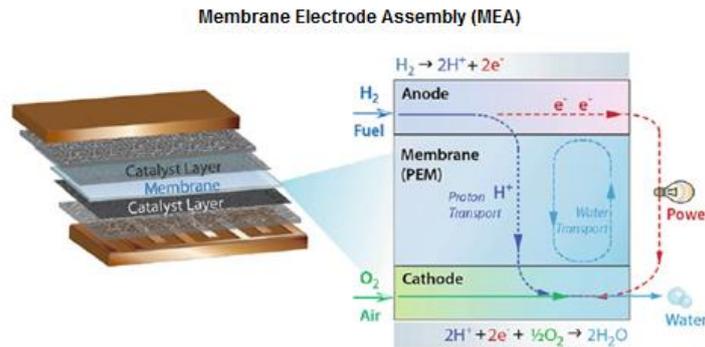


Figura 21. Estructura de los electrodos de membrana (Litster & McLean, 2004).

La condición de emplear un material polimérico como electrolito sólido requiere unas condiciones suaves de temperatura para garantizar la integridad estructural de la membrana de intercambio protónico. Sin embargo, el rango de temperatura en operación más habitual para las pilas de combustible PEMFC ($T^a < 100^{\circ}\text{C}$) provoca que las velocidades de las semirreacciones electroquímicas sean más lentas, especialmente la semirreacción de reducción del oxígeno (Zhang, 2008). Por lo tanto, especialmente en la configuración de las pilas de combustible PEMFC, resulta indispensable utilizar un catalizador para aumentar la cinética de las semirreacciones electroquímicas.

En este sentido, el material metálico que presenta una mayor actividad catalítica en las semirreacciones electroquímicas resulta ser el platino (Pt). La cinética de la reacción de oxidación del hidrógeno (*Hydrogen Oxidation Reaction, HOR*) es bastante aceptable y no requiere grandes cantidades de electrocatalizador, mientras que la cinética de la reacción de reducción del oxígeno (*Oxygen Reduction Reaction, ORR*) es mucho más lenta y consume prácticamente cerca del 90% de la cantidad de platino empleado en la pila de combustible.

La superficie activa de las láminas catalíticas presentes en los electrodos de membrana (MEA) se obtiene mediante la deposición de partículas de platino soportadas en una matriz porosa de carbono (*Pt-C catalyst layer*). Aprovechando el proceso de dispersión del platino sobre partículas de carbono, se consigue maximizar el área superficial del electrocatalizador para aumentar la actividad catalítica en las semirreacciones electroquímicas (Wilson & Gottesfeld, 1992). Por su parte, la porosidad del material de carbono contribuye a incrementar la cantidad de centros activos y facilita los procesos de difusión de los gases reactivos.

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería”
para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

En la siguiente Figura 22, se muestra un esquema del funcionamiento de la capa activa del catalizador de platino soportado sobre partículas de carbono (*Pt-C catalyst layer*) en una configuración PEMFC:

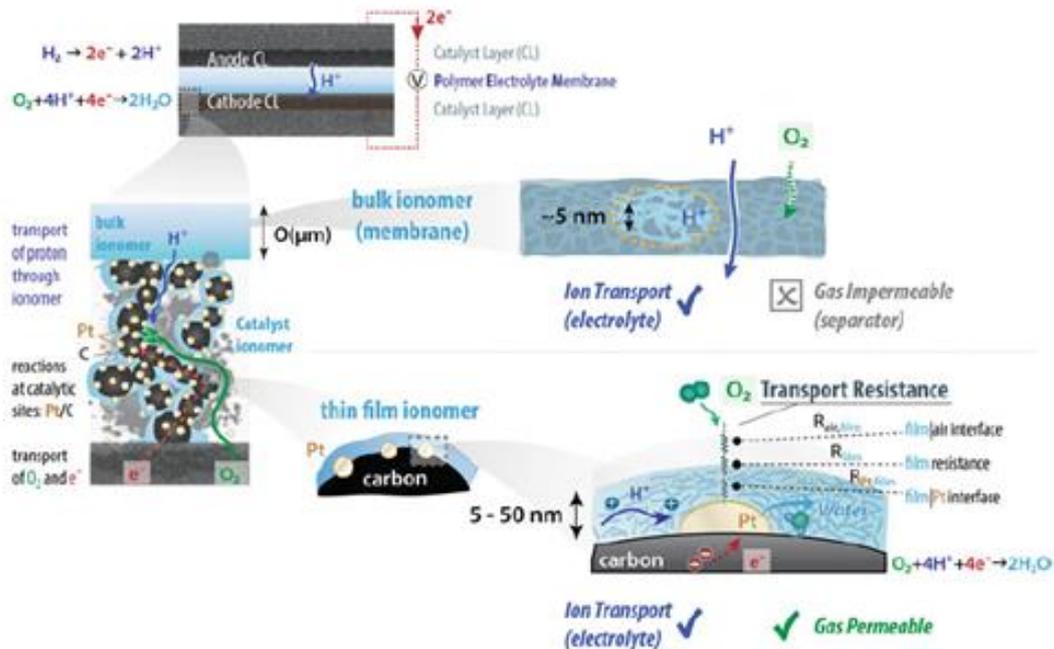


Figura 22. Funcionamiento de la capa activa de electrolizador (Wilson & Gottesfeld, 1992).

Los elevados costes económicos asociados al consumo de catalizador se deben al precio comercial del platino y representan un factor clave en la implementación global de la tecnología basada en las celdas de combustible, como puede verse en la Figura 23. En este sentido, disminuir la cantidad de catalizador empleado en el recubrimiento de los electrodos y mejorar la actividad catalítica resulta fundamental para reducir los costes de inversión, consiguiendo una tecnología mucho más competitiva y con mayor interés industrial (Weber & Newman, 2005). Por lo tanto, parece evidente que el desarrollo de la nanotecnología y de nuevas aleaciones metálicas de platino (*Pt-alloys*) puede contribuir a reducir los costes económicos de la tecnología de las pilas de combustible PEMFC en el futuro, facilitando su aplicación en el sector del transporte y los vehículos eléctricos.

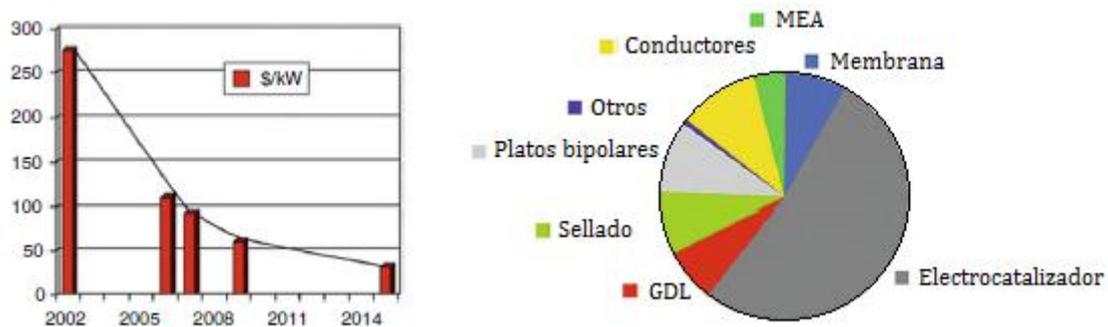


Figura 23. Costes económicos y perspectivas de futuro de las pilas de combustible PEMFC.

3.3.3 Placas bipolares

Las placas bipolares son los elementos situados en los extremos de la monocelda de combustible y se encargan de facilitar la difusión de los gases reactivos sobre la superficie catalítica de los electrodos. Además, también son considerados los componentes de apoyo o soporte para el conjunto de los electrodos de membrana y actúan como colectores de corriente que permiten la conexión en serie de diversas monoceldas electroquímicas para conseguir la configuración final de la pila de combustible.

Los materiales empleados en la fabricación de las placas bipolares deben ser ligeros pero resistentes, presentar una buena conductividad eléctrica y resultar impermeable a los gases reactivos. Por estos motivos, el material más empleado actualmente es el grafito (Hermann, Chaudhurri, & Spagnol, 2005), aunque también existen ciertos modelos comerciales que emplean la familia de los aceros inoxidable, las aleaciones de aluminio y los materiales compuestos.

El diseño de la dirección, el tamaño y la profundidad de los canales de difusión para los gases reactivos es un parámetro crítico para conseguir una distribución homogénea del combustible y del agente oxidante sobre la superficie catalítica de los electrodos. En este sentido, también debe permitir la evacuación del vapor de agua generado en la región catódica y evitar, en la medida de lo posible, la aparición de gotas de agua líquidas en el interior de los canales que dificultarían el proceso de difusión de los gases reactivos (Li & Sabir, 2005).

Para conseguir una distribución homogénea de los gases reactivos sobre la superficie catalítica de los electrodos, se utilizan placas bipolares de distintos tamaños y formas. En el diseño de los patrones que presentan las placas bipolares, las configuraciones en serpentin y en paralelo representadas en la Figura 24 son las que han demostrado una mayor efectividad en el proceso de difusión uniforme de los gases reactivos:

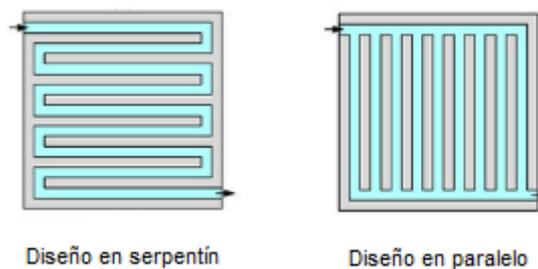


Figura 24. Configuraciones más empleadas en el diseño de las placas bipolares.

- El diseño en serpentin presenta un recorrido único para la difusión de los gases reactivos, por lo que resulta bastante fiable para conseguir un suministro constante y homogéneo en toda la superficie catalítica. Sin embargo, el riesgo de obstrucción por condensación del vapor de agua puede comprometer el paso de los gases reactivos a través del canal.
- Por este motivo, el diseño en paralelo se presenta como una alternativa con múltiples recorridos en paralelo para la difusión de los gases reactivos, reduciendo las caídas de presión por pérdidas de carga y consiguiendo una distribución uniforme sobre la superficie catalítica. Además, esta configuración permite amortiguar el impacto de una obstrucción por condensación sobre el funcionamiento de la pila de combustible, produciéndose instantáneamente una redistribución de flujo en el resto de canales del sistema.

3.3.4 Apilamiento de las celdas de combustible

Como se ha mencionado previamente, las monoceldas de combustible no tienen la capacidad energética suficiente para proporcionar el voltaje y la potencia eléctrica que requieren la mayoría de las aplicaciones de las pilas de combustible. Por este motivo, se debe realizar una conexión eléctrica en serie de diversas monoceldas de combustible para alcanzar unos valores de tensión adecuados, formando un apilamiento de celdas de combustible idénticas (*Fuel Cell Stack*) que permite obtener el dispositivo electroquímico que representan las pilas de combustible.

La configuración más habitual para realizar el apilamiento en serie de las celdas de combustible utiliza diversas unidades de monoceldas electroquímicas interconectadas y siguiendo una disposición unidireccional, de acuerdo con los esquemas simplificados que aparecen en la Figura 25:

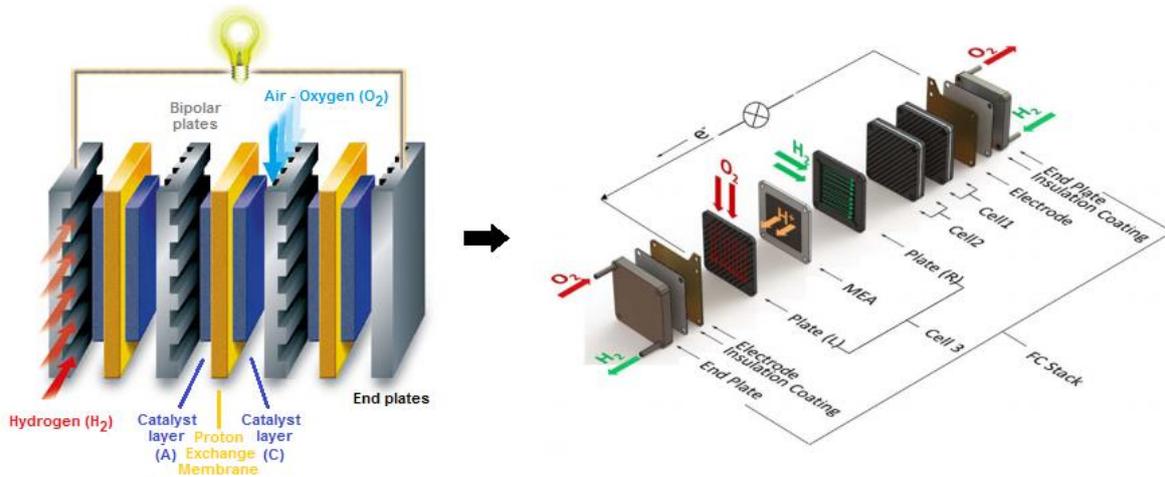


Figura 25. Apilamiento en serie de diversas monoceldas de combustible (Lee & Quan, 2006).

En los esquemas anteriores, se puede observar la presencia de placas bipolares en la parte interna del apilamiento de las monoceldas de combustible. Como se ha visto anteriormente, estas placas bipolares se encargan de la distribución de los gases reactivos en sus respectivos compartimentos y presentan una dirección de flujo perpendicular para el suministro de hidrógeno y del oxígeno atmosférico.

Del mismo modo, en los extremos del apilamiento de las monoceldas de combustible, se colocan unas placas monopolares que actúan como colectores de corriente y se encuentran interconectadas mediante un elemento conductor externo, para así proporcionar un mayor voltaje eléctrico. A su vez, también se utilizan unas placas terminales y aislantes para garantizar el cierre y sellado hermético del apilamiento de las celdas de combustible, evitando la fuga de los gases reactivos y manteniendo las condiciones de temperatura en operación.

Como es evidente, el número de monoceldas electroquímicas utilizadas para formar el apilamiento en serie que supone la pila de combustible PEMFC dependerá de la tensión y potencia eléctrica máxima que se pretende suministrar. Sin embargo, se debe considerar también el incremento en el peso y los costes de inversión del equipo, tratando de alcanzar un compromiso para conseguir un correcto funcionamiento del dispositivo electroquímico en la aplicación deseada.

4. TERMODINÁMICA ELECTROQUÍMICA

La termodinámica aplicada en las pilas de combustible PEMFC se centra en el estudio de los procesos de transformación de la energía. Las celdas de combustible son dispositivos de conversión energética que transforman la energía química almacenada en un combustible de hidrógeno directamente en energía eléctrica. Por tanto, aplicando los principios termodinámicos, se puede predecir si las reacciones electroquímicas son energéticamente espontáneas y establecer el rendimiento máximo de conversión electroquímica alcanzable en dichos dispositivos.

Sin embargo, el comportamiento real de una pila de combustible siempre resulta ser inferior al límite máximo que marcan los principios termodinámicos. Por esta razón, posteriormente se profundizará en el conocimiento de la cinética electroquímica para predecir el funcionamiento práctico de las pilas de combustible PEMFC, permitiendo comprender mejor las limitaciones energéticas de estos sistemas.

4.1 Primera y Segunda Ley de la Termodinámica

La primera ley de la termodinámica también se conoce como ley de conservación de la energía. Este principio establece que en un sistema cerrado, la variación de energía interna del sistema (U) se debe a la transferencia de energía con el entorno, tanto en forma de calor (Q) como de trabajo (W):

$$\partial U = \partial Q - \partial W \quad (\text{Ec. 1})$$

Por el momento, se considera únicamente el trabajo mecánico de expansión que ejerce el sistema en contra de la acción de la presión (p), despreciando el trabajo eléctrico realizado por la pila de combustible para generar electricidad. Así pues, la expresión anterior (Ec.1) se puede escribir también como:

$$\partial U = \partial Q - p \cdot \partial V \quad (\text{Ec. 2})$$

La segunda ley de la termodinámica trata el concepto de la entropía, una propiedad que está relacionada con los posibles microestados accesibles para configurar un sistema aislado. Sin embargo, salvo en el caso de sistemas extremadamente simples, resulta imposible determinar exactamente el valor de la entropía de los sistemas. Por este motivo, la variación de entropía de un sistema (S) se determina a partir de la transferencia de calor reversible (Q_{rev}) en condiciones de presión y temperatura (T) constantes:

$$\partial S = \frac{\partial Q_{rev}}{T} \quad (\text{Ec. 3})$$

Combinando las expresiones de la primera y segunda ley de la termodinámica (Ecs. 2 y 3), se puede expresar la variación de energía interna del sistema (U) a partir de las variables independientes del sistema, como son los cambios de entropía (S) y de volumen (V):

$$\partial U = T \cdot \partial S - p \cdot \partial V \quad (\text{Ec. 4})$$

$$U = U(S, V)$$

4.2 Potenciales Termodinámicos

Los potenciales termodinámicos sirven para explicar y justificar los procesos de conversión energética. Existen cuatro potenciales termodinámicos, entre los cuales se encuentra la energía interna (U), la entalpía (H) o la energía libre de Gibbs (G). En la siguiente Figura 26, se muestra un diagrama donde se establecen las relaciones entre los distintos potenciales termodinámicos (Schroeder, 2000):

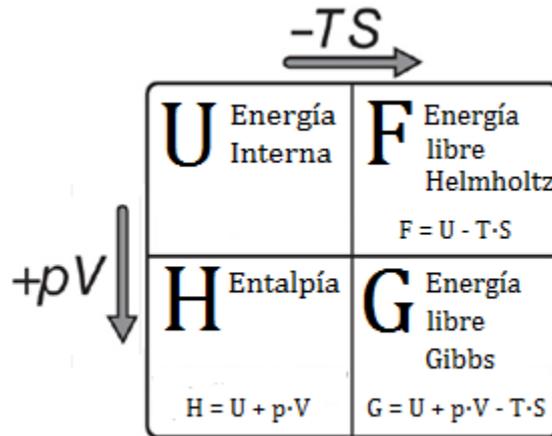


Figura 26. Resumen de los potenciales termodinámicos (Schroeder, 2000).

Por definición, tanto la variación de entalpía (H) como la variación de la energía libre de Gibbs (G) se encuentran relacionadas directamente con el cambio de energía interna (U) del sistema:

$$H = U + p \cdot V \rightarrow \partial H = \partial U + \partial(p \cdot V) \rightarrow \partial H = \partial U + p \cdot \partial V + V \cdot \partial p \quad (\text{Ec.5})$$

$$G = U + p \cdot V - T \cdot S \rightarrow \partial G = \partial U + \partial(p \cdot V) - \partial(T \cdot S); \quad (\text{Ec.6})$$

$$\partial G = \partial U + p \cdot \partial V + V \cdot \partial p - T \cdot \partial S - S \cdot \partial T$$

Sustituyendo la expresión de la energía interna (Ec. 4) en la Ec. 5, se llega a la expresión de la variación de entalpía del sistema (H) en función de las variables independientes de entropía (S) y presión (p):

$$\partial H = (T \cdot \partial S - p \cdot \partial V) + p \cdot \partial V + V \cdot \partial p$$

$$\partial H = T \cdot \partial S + V \cdot \partial p \quad (\text{Ec.7})$$

$$H = H(S, p)$$

Del mismo modo, sustituyendo la expresión de la energía interna (Ec.4) en la Ec.6, se llega a la expresión de la variación de energía libre del sistema (G) en función de las variables independientes de temperatura (T) y presión (p):

$$\partial G = (T \cdot \partial S - p \cdot \partial V) + p \cdot \partial V + V \cdot \partial p - T \cdot \partial S - S \cdot \partial T$$

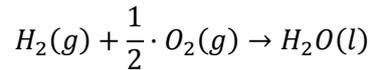
$$\partial G = -S \cdot \partial T + V \cdot \partial p \quad (\text{Ec.8})$$

$$G = G(T, p)$$

4.3 Potencial energético de una PEMFC

La finalidad de una pila de combustible es extraer la máxima cantidad de energía posible que se encuentra contenida en un combustible de hidrógeno para poder generar electricidad. Por tanto, como dispositivos electroquímicos y desde el punto de vista termodinámico, el objetivo es transformar la mayor parte de la energía interna del combustible de hidrógeno directamente en energía eléctrica.

En primer lugar, conviene determinar la cantidad máxima de energía que se puede extraer del combustible de hidrógeno, a partir de la entalpía de reacción global de una pila de combustible PEMFC:



$$\Delta H = (H_F)_{prod} - (H_F)_{reac} = (H_F)_{H_2O} - (H_F)_{H_2} - \frac{1}{2} \cdot (H_F)_{O_2}$$

Considerando las entalpías de formación en condiciones estándar ($p = 1 \text{ bar}$; $T = 25^\circ\text{C} = 298,15\text{K}$) presentadas en la Tabla 8 para las distintas especies químicas involucradas en la reacción de oxidación electroquímica del hidrógeno, la máxima cantidad de energía que se puede extraer del combustible de hidrógeno en una pila de combustible PEMFC resulta:

Tabla 8. Valores de entalpías de formación en condiciones estándar (O'Hayre, Fuel Cell Fundamentals - Chapter 2: Fuel Cell Thermodynamics, 2016).

Sustancias químicas	$H_F^0 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right)$
Agua líquida, H ₂ O (l)	-285.83
Hidrógeno, H ₂ (g)	0
Oxígeno, O ₂ (g)	0

$$\Delta H^0 = (H_F^0)_{H_2O} - (H_F^0)_{H_2} - \frac{1}{2} \cdot (H_F^0)_{O_2} = -285.83 \frac{\text{kJ}}{\text{mol H}_2}$$

$$Q_{m\acute{a}x}^0 \equiv \Delta H^0 = -285.83 \frac{\text{kJ}}{\text{mol H}_2} \approx -286 \frac{\text{kJ}}{\text{mol H}_2}$$

Como se puede observar, la oxidación electroquímica del combustible de hidrógeno es una reacción exotérmica que libera unos 286 kJ/mol de H₂, lo que representa el poder calorífico superior del hidrógeno (Hydrogen Heating Value, HHV). Sin embargo, de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, cualquier proceso que implique una transferencia de calor produce una variación en la entropía del sistema, lo que limita la cantidad de energía que puede convertirse en electricidad.

En este sentido, el siguiente paso consiste en determinar la cantidad total de energía almacenada en el combustible de hidrógeno que se puede aprovechar para realizar un trabajo útil, permitiendo generar electricidad. Este término se denomina potencial de trabajo y se encuentra relacionado con la variación en la energía libre de Gibbs del sistema.

A continuación, la fracción de energía del combustible de hidrógeno que puede convertirse en electricidad se obtiene mediante el desarrollo de la expresión de la energía libre de Gibbs. Aprovechando la relación presentada en la Figura 24 entre la energía libre de Gibbs y la entalpía, es posible calcular el potencial de trabajo de una pila de combustible PEMFC conociendo únicamente los términos de entalpía y entropía de la reacción global:

$$G = U + p \cdot V - T \cdot S \rightarrow G = H - T \cdot S$$

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

$$\Delta G = [(H_F)_{prod} - (H_F)_{reac}] - T \cdot [(S_F)_{prod} - (S_F)_{reac}]$$

Nuevamente, considerando los valores de entropía en condiciones estándar ($p = 1 \text{ bar}$; $T = 298,15\text{K}$) presentadas en la Tabla 9 para las distintas especies químicas involucradas en la reacción electroquímica global del hidrógeno, el potencial de trabajo que se puede obtener del combustible de hidrógeno en una pila de combustible PEMFC resulta:

Tabla 9. Valores de entropías de formación en condiciones estándar (O'Hayre, *Fuel Cell Fundamentals - Chapter 2: Fuel Cell Thermodynamics*, 2016).

Sustancias químicas	$S_F^0 \left(\frac{J}{mol \cdot K} \right)$
Agua líquida, H ₂ O (l)	69.95
Hidrógeno, H ₂ (g)	130.68
Oxígeno, O ₂ (g)	205

$$\Delta S^0 = (S_F^0)_{H_2O} - (S_F^0)_{H_2} - \frac{1}{2} \cdot (S_F^0)_{O_2} = -163.23 \frac{J}{mol \text{ H}_2 \cdot K}$$

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T_0 \cdot \Delta S^0 = -285.83 \left(\frac{kJ}{mol \text{ H}_2} \right) + 298.15 (K) \cdot \frac{163.23}{1000} \left(\frac{kJ}{mol \text{ H}_2 \cdot K} \right)$$

$$W_{máx}^0 \equiv \Delta G^0 = -237.163 \frac{kJ}{mol \text{ H}_2} \approx -237 \frac{kJ}{mol \text{ H}_2}$$

A partir del resultado obtenido y asumiendo condiciones estándar, se comprueba que gran parte del poder calorífico del combustible de hidrógeno ($237/286 = 82,87\%$) resulta aprovechable para producir un trabajo eléctrico, ya que los 49 kJ/mol de H₂ restantes se pierden irreversiblemente en forma de calor cedido al entorno. Además, se confirma que la oxidación electroquímica del hidrógeno es una reacción espontánea ($\Delta G < 0$) que resulta energéticamente favorable, por lo que no se requiere de un aporte energético externo.

Sin embargo, de acuerdo con las características de las pilas de combustible PEMFC presentadas en la Tabla 1, los rendimientos de conversión energética se encuentran en el rango del 50-60%. Por tanto, se comprueba que las pilas de combustible PEMFC se encuentran limitados por los fenómenos relacionados con la cinética electroquímica, los cuales producen unas pérdidas de potencia eléctrica que contribuyen a reducir ligeramente la eficiencia del proceso de conversión energética.

4.4 Potencial de electrodo en una PEMFC

La capacidad de un sistema electroquímico para producir un trabajo eléctrico se encuentra directamente relacionada con el potencial de electrodo de una pila de combustible (E) y depende de la cantidad total de carga eléctrica generada en el dispositivo debido a las reacciones electroquímicas. Además, teniendo en cuenta el potencial de trabajo del combustible de hidrógeno, se obtiene una expresión que relaciona el potencial de electrodo con la energía libre de Gibbs de la reacción global:

$$W_{elec} \equiv -\Delta G = n \cdot F \cdot E \quad (\text{Ec.9})$$

Así pues, considerando las condiciones estándar y aplicando la Ec.9, es posible determinar el potencial de electrodo reversible para la reacción global electroquímica de una celda de combustible PEMFC:

$$E^0 = \frac{-\Delta G^0}{n \cdot F} = \frac{237 \cdot 10^3 \left(\frac{J}{mol H_2}\right)}{2 \left(\frac{mol e^-}{mol H_2}\right) \cdot 96500 \left(\frac{C}{mol e^-}\right)} = 1.228 V$$

Otra forma de calcular el potencial de electrodo reversible para una monocelda electroquímica de una pila de combustible PEMFC consiste en recurrir a las tablas de los potenciales de reducción correspondientes con las semirreacciones electroquímicas para el sistema H_2 - O_2 . Los potenciales de reducción en condiciones estándar presentados en la Tabla 10 se han obtenido mediante diversos ensayos experimentales, utilizando el electrodo de hidrógeno (H^+/H_2) como referencia:

Tabla 10. Valores de potenciales de reducción en condiciones estándar (O'Hayre, Fuel Cell Fundamentals - Chapter 2: Fuel Cell Thermodynamics, 2016).

Semirreacciones de reducción	E_{red}^0 (V)
$2 \cdot H^+ + 2 \cdot e^- \rightarrow H_2$	0.000
$O_2 + 4 \cdot e^- + 4 \cdot H^+ \rightarrow 2 \cdot H_2O$	1.229

A la vista de los potenciales de reducción del hidrógeno y del oxígeno, la semirreacción que presente un mayor potencial de reducción se producirá en el electrodo del cátodo, mientras que la semirreacción con menor potencial de reducción tendrá lugar en el electrodo del ánodo pero en el sentido de la oxidación. Por tanto, el potencial de electrodo en condiciones estándar para una monocelda de combustible se obtiene como la diferencia de los potenciales de los electrodos del cátodo y del ánodo:

$$E^0 = E_c^0 - E_a^0 = E_{red}^0(O_2/H_2O) - E_{red}^0(H^+/H_2) = 1.229 V$$

De acuerdo con los resultados obtenidos por ambos métodos, se comprueba que en condiciones de presión y temperatura estándar, el máximo potencial de electrodo obtenible para el sistema electroquímico H_2 - O_2 resulta en 1,23 V. Por tanto, se demuestra que para obtener unos valores de tensión mayores en el dispositivo electroquímico, se requiere de un apilamiento en serie de diversas monoceldas de combustible para obtener el conjunto que supone la pila de combustible PEMFC.

Sin embargo, la operación en las pilas de combustible del tipo PEMFC se realiza en condiciones no estándar. De acuerdo con las características especificadas en la Tabla 1, las pilas de combustible con membrana polimérica de intercambio protónico operan en rangos de temperatura bajos (30-100 °C) y con presiones ligeramente superiores a la presión atmosférica (3-5 bar), además de presentar gradientes de concentración de los sustancias reactivas sobre la superficie de los electrodos.

4.4.1 Efecto de la temperatura

Para conocer el efecto exclusivo de la temperatura de operación sobre el potencial de electrodo de una celda de combustible, se considera una variación de temperatura a presión constante sobre la expresión de la energía libre de Gibbs (Ec.8):

$$\partial G = -S \cdot \partial T + V \cdot \partial p \rightarrow \left. \frac{\partial G}{\partial T} \right|_{p=cte} = -S \quad (\text{Ec.10})$$

Aplicando la relación entre la energía libre de Gibbs y el potencial de electrodo (Ec.9) sobre la expresión anterior (Ec.10), se obtiene una expresión del potencial de electrodo en función de la temperatura:

$$\Delta G = -n \cdot F \cdot E \rightarrow \left. \frac{\partial E}{\partial T} \right|_{p=cte} = \frac{\Delta S}{n \cdot F} \quad (\text{Ec.11})$$

Definiendo el potencial de electrodo en una celda de combustible a una temperatura arbitraria (E_T), este parámetro se puede calcular estableciendo una temperatura de referencia. Si la temperatura de referencia coincide con la temperatura en condiciones estándar, entonces el potencial de electrodo se obtiene a partir del potencial de electrodo reversible (E^0) del siguiente modo:

$$E_T = E^0 + \frac{\Delta S^0}{n \cdot F} \cdot (T - T_0) \quad (\text{Ec.12})$$

Como se puede observar en la Ec.12, la variación de entropía de la reacción global representa el parámetro que marca la relación entre el potencial de electrodo de una celda de combustible y la temperatura. En las pilas de combustible PEMFC, la variación de entropía para la reacción de oxidación electroquímica del hidrógeno en condiciones estándar presenta un signo negativo ($\Delta S^0 < 0$), lo que indica que el potencial de electrodo disminuye al incrementar la temperatura de operación, tal y como se observa en la siguiente Figura 27:

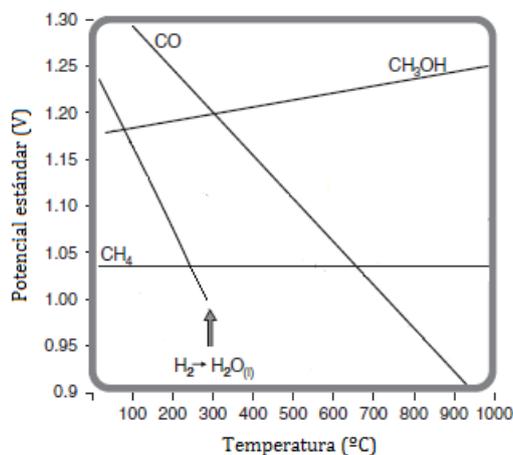


Figura 27. Influencia de la temperatura sobre el potencial de electrodo (O'Hayre, Fuel Cell Fundamentals - Chapter 2: Fuel Cell Thermodynamics, 2016).

4.4.2 Efecto de la presión

Para conocer el efecto exclusivo de la presión de operación sobre el potencial de electrodo de una celda de combustible, se considera una variación de presión a temperatura constante sobre la expresión de la energía libre de Gibbs (Ec.8):

$$\partial G = -S \cdot \partial T + V \cdot \partial p \rightarrow \left. \frac{\partial G}{\partial p} \right|_{T=cte} = V \quad (\text{Ec.13})$$

Aplicando la relación entre la energía libre de Gibbs y el potencial de electrodo (Ec.9) sobre la expresión anterior (Ec.13), se obtiene una expresión del potencial de electrodo en función de la presión:

$$\Delta G = -n \cdot F \cdot E \rightarrow \left. \frac{\partial E}{\partial p} \right|_{T=cte} = - \frac{\Delta V}{n \cdot F} \quad (\text{Ec.14})$$

Considerando las sustancias químicas en fase gas que intervienen en la oxidación electroquímica del hidrógeno en una celda de combustible PEMFC y asumiendo un comportamiento de gases ideales, se puede establecer una relación entre la variación en el potencial de electrodo y la presión de operación:

$$\left. \frac{\partial E}{\partial p} \right|_{T=cte} = - \frac{\Delta n_G \cdot R \cdot T}{n \cdot F \cdot p} = - \frac{(n_P - n_R) \cdot R \cdot T}{n \cdot F \cdot p} \quad (\text{Ec.15})$$

Como se puede observar, puesto que la variación en los moles globales de las especies gaseosas presenta un signo negativo ($\Delta n_G < 0$), un aumento en la presión de operación proporciona un mayor potencial de electrodo para la celda de combustible PEMFC.

4.4.3 Efecto de las concentraciones de los reactivos

Para estudiar el efecto de la concentración de los reactivos en la superficie de los electrodos sobre el voltaje proporcionado por una celda de combustible, se debe aplicar la ecuación de Nernst y calcular el potencial de electrodo en una reacción electroquímica.

La ecuación de Nernst considera unas condiciones de operación no estándar e incluye el potencial de electrodo reversible (E^0), obteniendo una expresión en función de la actividad de las especies químicas involucradas en la reacción global. Para el caso de la oxidación electroquímica del hidrógeno que tiene lugar en una pila de combustible PEMFC, la ecuación de Nernst queda del siguiente modo:

$$E = E^0 - \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{\prod a_{prod}}{\prod a_{reac}} \right) = E^0 - \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{a_{H_2O}}{a_{H_2} \cdot a_{O_2}^{1/2}} \right) \quad (\text{Ec.16})$$

En el caso del agua líquida generada como único producto en la reacción de oxidación electroquímica del hidrógeno, la actividad de un componente puro es igual a la unidad ($a_{H_2O} = 1$). Por su parte, se asume que tanto el hidrógeno como el oxígeno se comportan como gases ideales, por lo que su actividad coincide con la presión parcial de ambos reactivos sobre la superficie del electrodo.

Por tanto, la ecuación de Nernst particularizada sobre la reacción electroquímica global de una celda de combustible PEMFC permite analizar el efecto que tiene la concentración de los reactivos sobre el potencial de electrodo:

$$E = E^0 - \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{1}{p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{1/2}} \right) = E^0 + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left(p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{1/2} \right) \quad (\text{Ec.17})$$

5. CINÉTICA ELECTROQUÍMICA

Los principios termodinámicos permiten conocer el rendimiento máximo de conversión energética alcanzable en las celdas de combustible, puesto que el potencial de celda termodinámico representa el voltaje máximo que se puede obtener en una monocelda de combustible que se encuentra en unas condiciones de operación determinadas y en ausencia de corriente eléctrica.

Sin embargo, se ha comprobado que el funcionamiento real de las celdas de combustible presenta importantes desviaciones respecto a la situación ideal establecida por los límites termodinámicos. Cuando la celda de combustible comienza a generar corriente eléctrica, el potencial de celda disminuye debido a la presencia de irreversibilidades del proceso electroquímico (O'Hayre, 2016). En la práctica, las curvas de polarización representan el funcionamiento real de una celda de combustible y permiten identificar la aparición de diversos fenómenos electroquímicos que causan unas pérdidas progresivas de tensión en el sistema, los cuales se conocen por los términos de sobrepotencial o polarización.

La siguiente Figura 28 representa una curva de polarización característica del funcionamiento real de una celda de combustible, donde se observa la presencia de diversos tipos de polarizaciones conforme se incrementa la intensidad de corriente generada por el dispositivo electroquímico, lo que implica un descenso progresivo en el voltaje de celda generado:

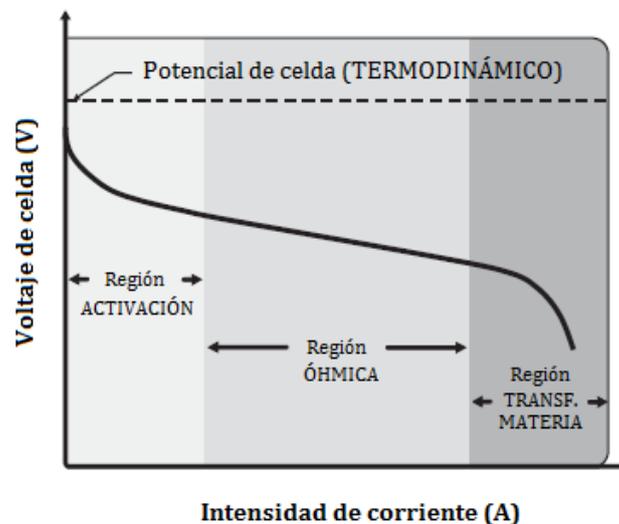


Figura 28. Curva de polarización característica de una celda de combustible.

Como se puede apreciar, existen tres tipos de polarizaciones que afectan directamente sobre el voltaje de celda proporcionado por una celda de combustible, donde cada fenómeno está relacionado con distintas etapas del proceso global de conversión electroquímica:

- **Polarización de Activación:** Predominan a bajas intensidades de corriente, apareciendo pérdidas de tensión asociadas a la cinética electroquímica de las semirreacciones de oxidación y reducción.
- **Polarización Óhmica:** Al incrementar la intensidad de corriente, comienzan a predominar las pérdidas resistivas de tensión debido al transporte protónico por la membrana polimérica (resistencia iónica) y al transporte electrónico por los conductores (resistencia electrónica).
- **Polarización por Concentración:** Predominan a elevadas intensidades de corriente, cuando se alcanza la limitación por transferencia de materia de los reactivos y en el medio de electrolito.

Por tanto, el voltaje de celda real proporcionado por una celda de combustible (U_{CELDA}) se puede obtener a partir del potencial de celda termodinámico (E_{CELDA}) y considerando las pérdidas de tensión asociadas a los distintos tipos de polarizaciones:

$$U_{CELDA} = E_{CELDA} - \eta_{ACT} - \eta_{OHM} - \eta_{CONC} \quad (\text{Ec.18})$$

Así pues, en este apartado sobre la cinética electroquímica de las celdas de combustible se pretende analizar específicamente los distintos tipos de sobrepotenciales y su influencia en el voltaje de celda, tratando de obtener expresiones que permitan calcular las pérdidas de tensión asociadas con los fenómenos de las polarizaciones.

5.1 Semirreacciones electroquímicas de oxidación y reducción

En primer lugar, hay que tener en cuenta que cualquier reacción electroquímica implica una transferencia de carga eléctrica sin contacto directo entre las especies reactivas, puesto que los electrones generados por la semirreacción de oxidación en el ánodo viajan por un elemento conductor externo hasta llegar al cátodo para ser consumidos por la semirreacción de reducción. El flujo de electrones libres generados que viajan a través de un circuito externo desde el electrodo del ánodo hasta el electrodo del cátodo representa una corriente eléctrica y es lo que permite realizar un trabajo eléctrico en las celdas de combustible.

En este sentido, ambas semirreacciones electroquímicas (oxidación y reducción) requieren de una transferencia de electrones entre el material de electrodo y la sustancia reactiva (reductor y oxidante), por lo que se pueden considerar como procesos necesariamente heterogéneos que tienen lugar en la interfase entre el electrodo y el medio de electrolito. En una celda de combustible del tipo PEMFC, el combustible de hidrógeno actúa como agente reductor y sufre la semirreacción de oxidación en el electrodo del ánodo, mientras que el oxígeno atmosférico es un agente oxidante que sufre la semirreacción de reducción en el electrodo del cátodo.

5.1.1 Semirreacción de oxidación electroquímica del hidrógeno (HOR)

En la semirreacción de oxidación electroquímica del hidrógeno (*Hydrogen Oxidation Reaction, HOR*), el intercambio de electrones entre el combustible y el material de electrodo representa un fenómeno interfacial que tiene lugar en la superficie del electrodo, concretamente sobre la región de contacto entre la disolución del electrolito y el electrodo anódico, como se puede observar en la Figura 29:

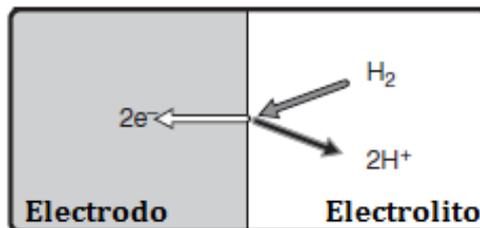
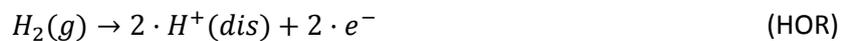
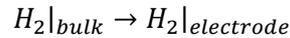


Figura 29. Intercambio electrónico superficial en la reacción anódica de una PEMFC (HOR).

Sin embargo, la reacción anódica de oxidación electroquímica del hidrógeno (HOR) se produce mediante un mecanismo de reacción que involucra diversas etapas, siguiendo la siguiente secuencia:

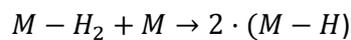
- 1) Difusión del combustible gaseoso de hidrógeno hasta la superficie del electrodo:



- 2) Absorción del hidrógeno sobre la superficie del electrodo:



- 3) Disociación del combustible de hidrógeno en átomos de hidrógeno sobre la superficie del electrodo:



- 4) Transferencia de electrones entre los átomos de hidrógeno absorbidos en la superficie del electrodo. En la siguiente Figura 30 se muestra un esquema representativo del proceso que termina liberando protones sobre la interfase de material de electrodo y el medio del electrolito:

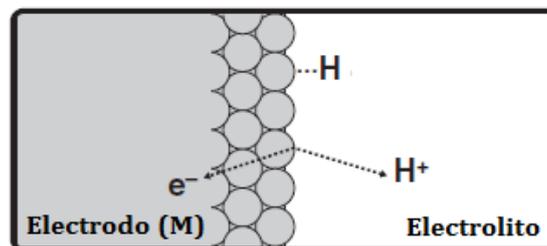
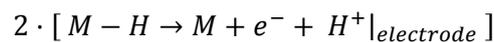
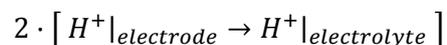


Figura 30. Transferencia de carga eléctrica del hidrógeno absorbido sobre la superficie del electrodo anódico de una PEMFC (HOR).

- 5) Difusión de los protones desde la superficie del electrodo hasta el seno de la disolución de electrolito:



La velocidad de una reacción global se encuentra limitada por la cinética de la etapa más lenta del mecanismo de reacción propuesto. En el caso de la reacción HOR, la transferencia electrónica entre el átomo de hidrógeno absorbido sobre la superficie del electrodo representa la etapa limitante del proceso. Sin embargo, existen una gran cantidad de estudios realizados sobre la cinética electroquímica de una celda de combustible PEMFC que demuestran que la semirreacción anódica de oxidación del hidrógeno (HOR) es mucho más rápida que la semirreacción catódica de reducción del oxígeno (ORR) (Amphlett J. , y otros, 1995).

5.1.2 Semirreacción de reducción electroquímica del oxígeno (ORR)

El mecanismo de reacción más probable para la semirreacción de reducción electroquímica del oxígeno (*Oxygen Reduction Reaction, ORR*) en una celda de combustible del tipo PEMFC que utilice un electrodo metálico de platino como catalizador es el mecanismo disociativo directo de 4 electrones (Song, 2007). Nuevamente, la semirreacción de reducción del oxígeno también representa un fenómeno interfacial que tiene lugar en la superficie de contacto entre el electrodo catódico y la disolución del electrolito, tal y como se puede observar en la Figura 31:

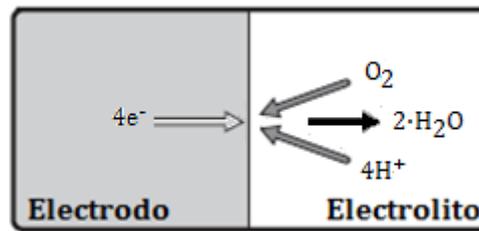
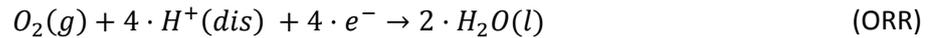
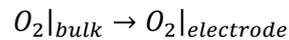


Figura 31. Intercambio electrónico superficial en la reacción catódica de una PEMFC (ORR).

Así pues, las etapas que componen el mecanismo disociativo directo de 4 electrones para la reacción catódica de reducción electroquímica del oxígeno (ORR) resultan muy similares al mecanismo de la reacción anódica de oxidación electroquímica del hidrógeno (HOR) propuesto anteriormente:

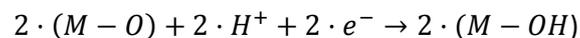
- 1) Difusión del oxígeno atmosférico hasta la superficie del electrodo:



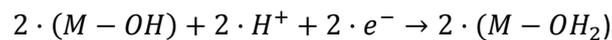
- 2) Absorción del oxígeno sobre la superficie del electrodo y disociación en átomos de oxígeno:



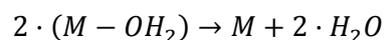
- 3) Formación de grupos hidroxilo absorbidos sobre la interfase del electrodo y del electrolito:



- 4) Formación de moléculas de agua en la superficie del electrodo:



- 5) Desorción de las moléculas de agua generadas en la superficie del electrodo



En la siguiente Figura 32, se puede observar la captación de electrones y protones de los átomos de oxígeno absorbidos sobre la superficie del electrodo, produciéndose la reducción sucesiva del oxígeno en grupos hidroxilo (-OH) y finalmente en agua (H_2O):

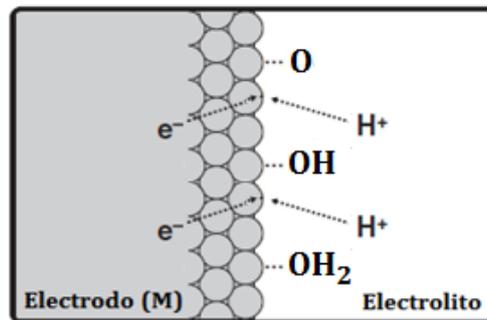


Figura 32. Transferencia de carga eléctrica del oxígeno absorbido sobre la superficie del electrodo catódico de una PEMFC (ORR: Dissociative direct 4-electron pathway).

La etapa limitante del mecanismo propuesto sobre la disociación directa de 4 electrones para la reducción electroquímica del oxígeno es la reducción electroquímica de los grupos hidroxilo absorbidos para formar moléculas agua sobre la superficie del electrodo catódico (Zhang, 2008).

Por tanto, teniendo en cuenta la reacción global que tiene lugar en una pila de combustible del tipo PEMFC que utiliza hidrógeno gaseoso como combustible y oxígeno atmosférico como oxidante, la semirreacción catódica (ORR) presenta la cinética electroquímica más lenta en relación con la semirreacción anódica (HOR). Esto se puede deducir directamente mediante la comparación de los valores de la energía de activación para ambas semirreacciones electroquímicas. De acuerdo con el esquema de la Figura 33, se observa que la semirreacción de reducción del oxígeno (ORR) presenta una mayor energía de activación respecto de la semirreacción de oxidación del hidrógeno (HOR), por lo que se requiere una mayor cantidad de electrocatalizador en el electrodo catódico para tratar de reducir la barrera de activación de la semirreacción de reducción y mejorar la cinética electroquímica global de la pila de combustible PEMFC (O'Hayre, 2016).

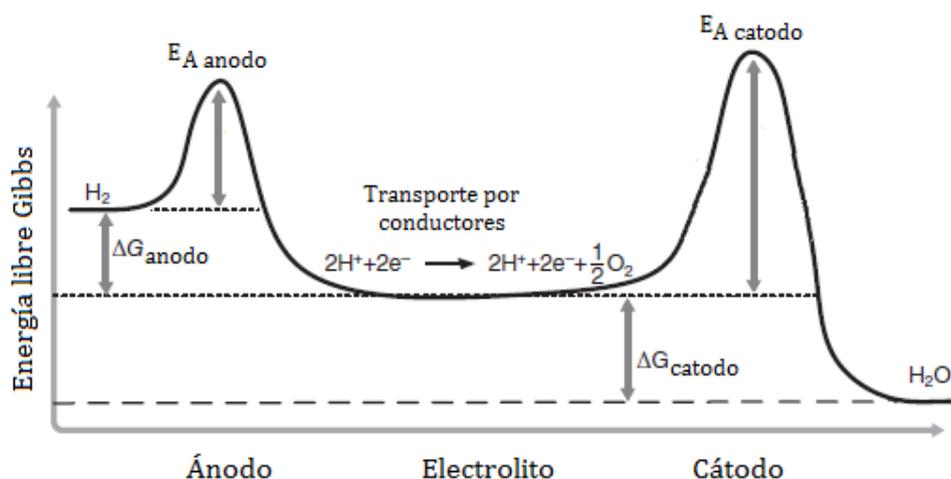


Figura 33. Comparación de la cinética electroquímica de las semirreacciones de oxidación y reducción de una celda de combustible PEMFC (HOR y ORR).

5.2 Polarización de Activación

El sobrepotencial de activación está relacionado directamente con la cinética de las semirreacciones electroquímicas. La corriente eléctrica generada en una celda de combustible debido a las semirreacciones de oxidación y reducción que tienen lugar en los electrodos del ánodo y cátodo representa una medida directa de la cinética de la reacción electroquímica global.

Para obtener una determinada intensidad de corriente, se produce una pérdida de tensión que recibe el nombre de sobrepotencial de activación. En electroquímica, el término de sobrepotencial hace referencia a la diferencia entre el potencial termodinámico y el potencial real de electrodo. Por tanto, el sobrepotencial de activación representa la tensión o el voltaje empleado para superar la barrera de activación de una reacción electroquímica, por lo que en realidad, este parámetro es el responsable de la generación de electricidad en las celdas de combustible.

En cualquier reacción electroquímica, la expresión de Butler-Volmer permite establecer una relación entre la densidad de corriente generada y el sobrepotencial obtenido. Considerando que no existe limitación por transferencia de materia y se consigue una difusión completa de los gases reactivos hacia la superficie de los correspondientes electrodos, la ecuación de Butler-Volmer simplificada es:

$$i = i_0 \cdot \left(e^{\frac{\alpha \cdot n \cdot F \cdot \eta}{R \cdot T}} - e^{-\frac{(1-\alpha) \cdot n \cdot F \cdot \eta}{R \cdot T}} \right) \quad (\text{Ec.19})$$

Dicha expresión depende fundamentalmente de unos parámetros cinéticos que resultan intrínsecos a la propia reacción electroquímica, como son la densidad de corriente de intercambio (i_0) y el coeficiente de transferencia de carga (α).

La densidad de corriente de intercambio representa la intensidad de corriente requerida por una reacción electroquímica para alcanzar la condición de equilibrio. Cualquier reacción electroquímica presenta unas velocidades de reacción tanto en el sentido directo como en el sentido inverso, por lo que la condición de equilibrio se alcanza cuando ambas velocidades de reacción se igualan, estableciendo un estado de equilibrio dinámico. De acuerdo con las siguientes Tablas 11 y 12, la densidad de corriente de intercambio para las semirreacciones de oxidación de hidrógeno (HOR) y de reducción del oxígeno (ORR) depende de las condiciones de operación, el medio de electrolito y la presencia de un electrocatalizador específico sobre el electrodo correspondiente (O'Hayre, 2016):

Tabla 11. Densidades de corriente de intercambio en condiciones estándar (300K, 1atm) para la reacción anódica de oxidación del hidrógeno (HOR) sobre diversas superficies catalíticas .

Electrocatalizador	Medio de Electrolito	$i_0 \left(\frac{A}{cm^2} \right)$
Pt	Ácido	10^{-3}
Pt	Alcalino	10^{-4}
Pd	Ácido	10^{-4}
Ni	Alcalino	10^{-4}
Ni	Ácido	10^{-5}
Ag	Ácido	10^{-5}

Tabla 12. Densidades de corriente de intercambio en condiciones estándar (300K, 1atm) para la reacción catódica de reducción del oxígeno (ORR) sobre diversas superficies catalíticas.

Electrocatalizador	Medio de Electrolito	$i_0 \left(\frac{A}{cm^2} \right)$
Pt	Ácido	10^{-9}
Pt-C	Nafión	$3 \cdot 10^{-9}$
Pt-Ni-C	Nafión	$5 \cdot 10^{-9}$
Pt-Co-C	Nafión	$6 \cdot 10^{-9}$
Pt-Mn-C	Nafión	$6 \cdot 10^{-9}$
Pd	Ácido	10^{-10}
Au	Ácido	10^{-11}

Comparando los valores presentados sobre las densidades de corriente de intercambio en condiciones estándar para las semirreacciones electroquímicas de una celda de combustible PEMFC (HOR y ORR), se puede observar que la reacción anódica de oxidación del hidrógeno presenta unas densidades de corriente en el equilibrio varios órdenes de magnitud superiores respecto a la reacción catódica de reducción del oxígeno. Por tanto, considerando la ecuación de Butler-Volmer (Ec.19) donde se han fijado previamente las variables de operación y el coeficiente de transferencia de carga, se deduce que una mayor densidad de corriente de intercambio supone una cinética electroquímica más favorable, por lo que se reducen las pérdidas de tensión por activación del electrodo:

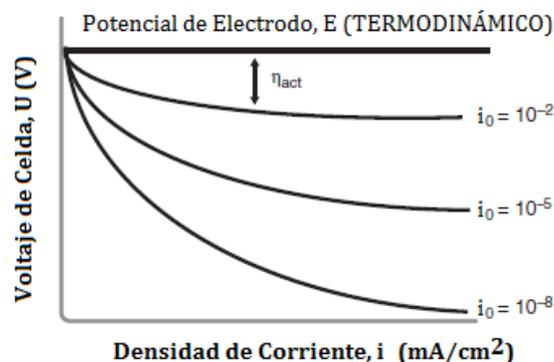


Figura 34. Influencia de la densidad de corriente de intercambio sobre las pérdidas por activación.

Por lo tanto, observando la tendencia presentada en la Figura 34 y considerando la gran diferencia que existe en cuanto a los valores de las densidades de corriente de intercambio para la semirreacción de oxidación del hidrógeno (HOR) y la semirreacción de reducción del oxígeno (ORR) según los valores presentados en las Tablas 11 y 12, se comprueba nuevamente que la cinética electroquímica de la reacción catódica resulta ser mucho más desfavorable respecto de la reacción anódica, por lo que aparecerán unas mayores pérdidas de tensión por activación en el electrodo del cátodo.

Así pues, de acuerdo con la gráfica de la Figura 35, una celda de combustible del tipo PEMFC presenta mayores pérdidas de tensión por activación en el electrodo del cátodo. Esto se debe a la cinética intrínseca de la semirreacción electroquímica ORR, puesto que presenta una mayor energía de activación en relación con la semirreacción electroquímica HOR y se requiere aplicar un mayor sobrepotencial para poder superar la barrera de activación y comenzar a generar electricidad:

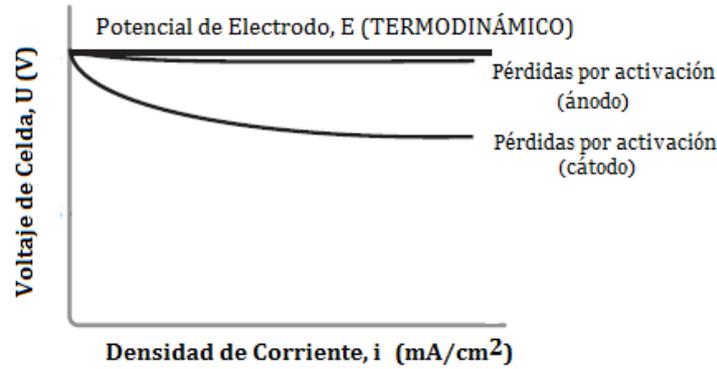


Figura 35. Pérdidas por activación en los electrodos de una celda de combustible PEMFC.

En este sentido, el grupo de Amphlett y otros colaboradores desarrollaron un modelo semiempírico para el cálculo de las pérdidas de tensión por activación en una celda de combustible del tipo PEMFC, partiendo del desarrollo de la expresión de Butler-Volmer (Ec.19). En dicho modelo, se obtiene una expresión del sobrepotencial de activación en función de la temperatura de operación, la concentración de oxígeno en los centros activos de la superficie del electrodo anódico y la densidad de corriente generada por el sistema electroquímico (Amphlett J. , y otros, 1995):

$$\eta_{act} = \eta_{act}^{catodo} + \eta_{act}^{anodo} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \cdot T + \varepsilon_3 \cdot T \cdot \ln[O_2]_e + \varepsilon_4 \cdot T \cdot \ln(i) \quad (Ec.20)$$

Del mismo modo, también se presentan las expresiones necesarias para el cálculo de los cuatro parámetros del modelo (ε_i) en función de diversas variables asociadas con las semirreacciones anódicas y catódicas de una pila de combustible PEMFC, como son la energía de activación (E_A) y las constantes cinéticas intrínsecas (k^0) de las semirreacciones HOR y ORR, así como las concentraciones de diversas sustancias en los centros activos de la superficie del correspondiente electrodo ($[C]_e$):

$$\varepsilon_1 = -\frac{E_A^{catodo}}{\alpha_{cat} \cdot n_{cat} \cdot F} - \frac{E_A^{anodo}}{2 \cdot F} \quad (Ec.21)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{R}{\alpha_{cat} \cdot n_{cat} \cdot F} \cdot \ln(n_{cat} \cdot F \cdot A_e \cdot k_{catodo}^0 \cdot [H^+]_e^{1-\alpha_{cat}} \cdot [H_2O]_e^{\alpha_{cat}}) + \frac{R}{2 \cdot F} \cdot \ln(4 \cdot F \cdot A_e \cdot k_{anodo}^0 \cdot [H_2]_e) \quad (Ec.22)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{R}{\alpha_{cat} \cdot n_{cat} \cdot F} \cdot (1 - \alpha_{cat}) \quad (Ec.23)$$

$$\varepsilon_4 = -\left(\frac{R}{\alpha_{cat} \cdot n_{cat} \cdot F} + \frac{R}{2 \cdot F}\right) \quad (Ec.24)$$

5.3 Polarización Óhmica

El sobrepotencial óhmico representa las pérdidas de tensión óhmicas relacionadas con los fenómenos de transporte de carga en la pila de combustible. En una celda del combustible del tipo PEMFC, tanto los electrones como los protones generados en la reacción anódica de oxidación del hidrógeno (HOR) deben migrar al electrodo catódico para llevar a cabo la reducción del oxígeno (ORR), por lo que es evidente que las pérdidas óhmicas están asociadas con los procesos de transporte de carga desde el electrodo anódico hasta el electrodo catódico.

Por tanto, en los fenómenos de transporte de carga se incluyen tanto el transporte de electrones a través de los electrodos y del elemento conductor externo como el transporte iónico de los protones a través del medio de electrolito, de forma que se producen unas pérdidas de potencial debido a la aparición de una resistencia eléctrica interna en la celda de combustible que se puede obtener directamente a partir de la ley de Ohm:

$$\eta_{ohm} = I \cdot R_{int} = I \cdot (R_{elec} + R_{ion}) = I \cdot (R_{elec}^{electrodos} + R_{elec}^{conductor} + R_{ion}) \quad (Ec.25)$$

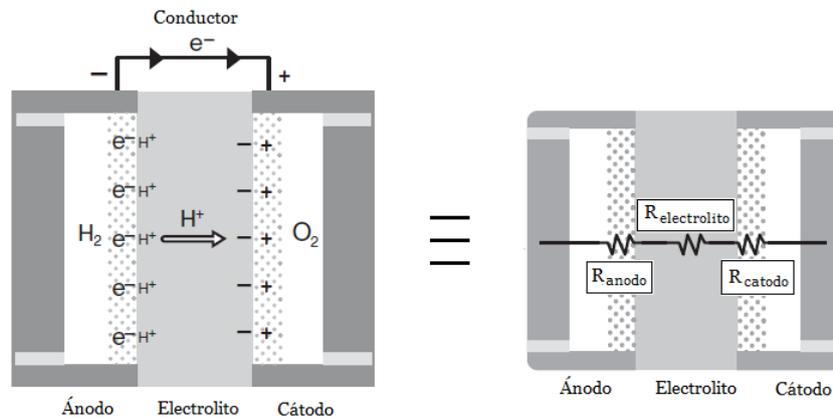


Figura 36. Resistencias eléctricas e iónicas internas de una celda de combustible PEMFC.

Sin embargo, la resistencia eléctrica resulta prácticamente despreciable en comparación con la resistencia iónica de la membrana polimérica de intercambio protónico empleada como electrolito. Por este motivo, se puede considerar que las pérdidas óhmicas lineales producidas en una celda de combustible del tipo PEMFC se deben fundamentalmente a los problemas de transporte iónico a través de la membrana polimérica del electrolito:

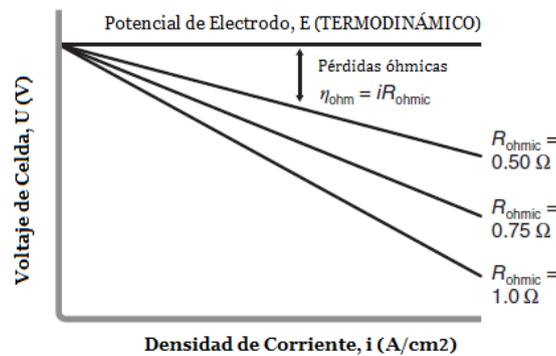


Figura 37. Pérdidas óhmicas lineales en una celda de combustible PEMFC.

5.4 Polarización por Concentración

El sobrepotencial por concentración aparece cuando el proceso electroquímico alcanza una limitación por transferencia de materia en los procesos de difusión de los gases reactivos sobre la superficie catalítica de los electrodos. Considerando los procesos difusivos de los gases reactivos en una celda de combustible del tipo PEMFC presentados en la Figura 38, se puede analizar la evolución de la concentración de hidrógeno y oxígeno desde la entrada por los canales de distribución con las placas bipolares ($C_{H_2}^0, C_{O_2}^0$) hasta la superficie catalítica de los correspondientes electrodos ($C_{H_2}^*, C_{O_2}^*$):

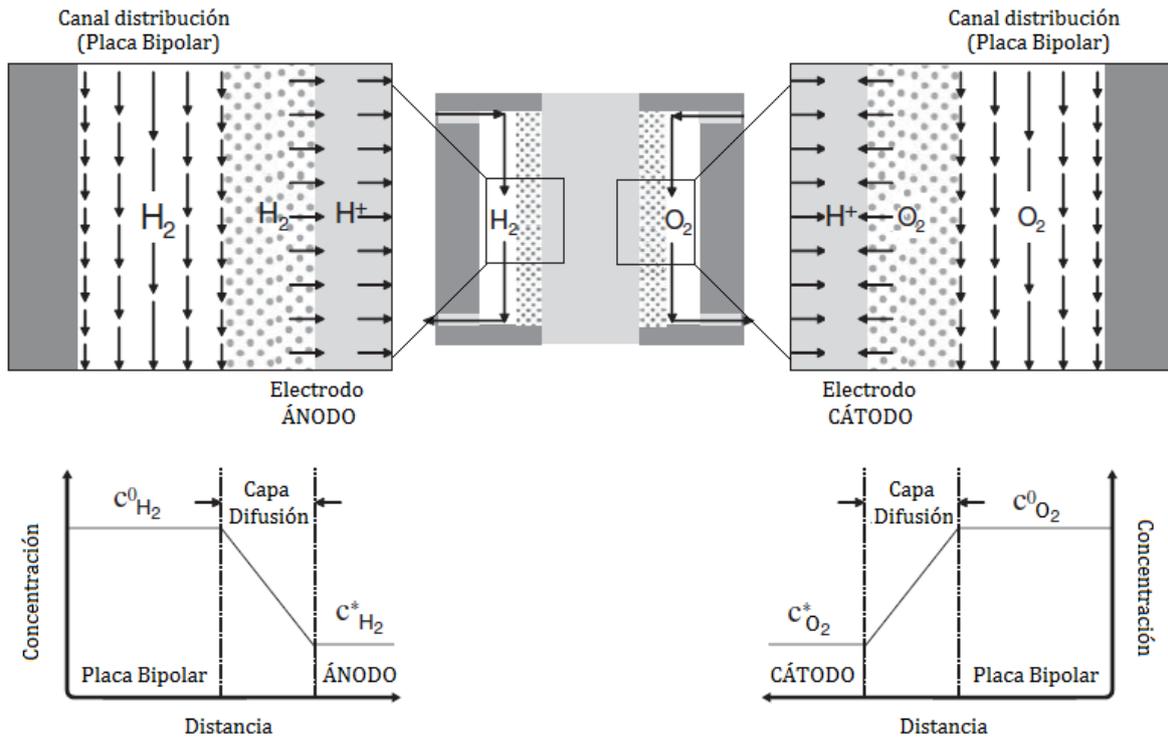


Figura 38. Procesos de difusión de los gases reactivos en una celda de combustible PEMFC.

Teniendo en cuenta la expresión de Nernst que recoge la influencia de la concentración de los gases reactivos sobre el potencial de electrodo de una celda de combustible PEMFC (Ec.17), se puede definir genéricamente la sobretensión por concentración de reactivo del siguiente modo:

$$\eta_{conc} = E_{Nerst}^0 - E_{Nerst}^* = \left[E^0 - \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{1}{C_R^0} \right) \right] - \left[E^0 - \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{1}{C_R^*} \right) \right];$$

$$\eta_{conc} = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{C_R^0}{C_R^*} \right);$$

$$\eta_{conc} = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{i_L}{i_L - i} \right) \quad (Ec.26)$$

La relación entre la concentración de reactivo en el canal de distribución (C_R^0) y la concentración de reactivo en la superficie catalítica del electrodo (C_R^*) se encuentra relacionado directamente con la densidad de corriente límite (i_L), lo que representa la máxima densidad de corriente que es capaz de generar la celda de combustible hasta alcanzar la limitación por transferencia de materia.

6. MODELADO DEL SISTEMA HÍBRIDO ELÉCTRICO “PILA PEMFC + BATERIA LIPO”

El esquema representativo del sistema híbrido formado por el conjunto “pila de combustible - batería” que se pretende emplear como fuente de alimentación eléctrica para vehículos aéreos no tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles, UAV*) se muestra en la Figura 39:

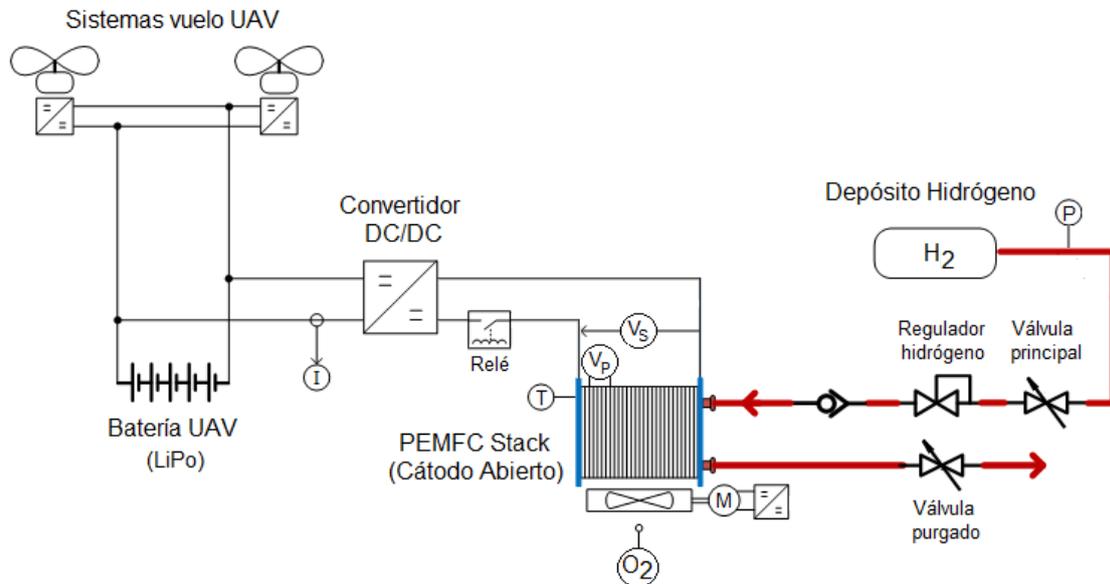


Figura 39. Esquema representativo del sistema híbrido “pila de combustible - batería”.

En primer lugar, el depósito del combustible de hidrógeno (H_2) cuenta con un manómetro de presión (P) para conocer la cantidad de hidrógeno existente en el tanque de almacenamiento. Cuando el nivel del combustible de hidrógeno en el tanque desciende, también lo hace la presión en el interior del depósito, lo que permite mandar una señal de control a los sistemas de vuelo del dron para iniciar un aterrizaje de seguridad cuando el nivel del combustible de hidrógeno alcance un cierto valor mínimo. Por lo general, el propio depósito del combustible de hidrógeno cuenta con un regulador de presión incorporado para adaptar la presión de almacenamiento a la presión de suministro del hidrógeno en el compartimento anódico de la pila de combustible PEMFC.

A su vez, la línea de suministro que conecta el depósito de hidrógeno con la pila de combustible PEMFC debe incorporar una válvula antirretorno para evitar el flujo inverso del combustible de hidrógeno hacia el depósito de almacenamiento. Por su parte, también se requiere una válvula principal que actúe como medida básica de seguridad para detener por completo el suministro del combustible de hidrógeno en caso de emergencia o incidente grave durante el vuelo del dron.

La pila de combustible PEMFC presenta una configuración de cátodo abierto, por lo que cuenta con un ventilador accionado por un motor como único sistema de impulsión y captación del aire atmosférico. En esta configuración, el propio aire captado del ambiente actúa como agente oxidante (O_2) que se suministra directamente al compartimento catódico y también como fluido refrigerante de la pila de combustible. La temperatura de operación se controla mediante un sensor de temperatura (T) colocado a la salida del compartimento catódico y se regula mediante el flujo de aire atmosférico introducido al sistema de refrigeración.

El suministro de aire atmosférico a la pila de combustible PEMFC pretende garantizar un flujo de oxígeno homogéneo en el compartimento catódico de cada una de las celdas de combustible que componen el “*Stack*”. Sin embargo, las pérdidas de carga que se producen en el canal de distribución del aire atmosférico sobre los compartimentos catódicos generan un flujo de oxígeno no uniforme en cada una de las celdas de combustible, lo que implica que no todas las celdas proporcionan el mismo valor de tensión. De hecho, a partir de la tensión de salida que proporciona la pila de combustible (V_s) es posible determinar una tensión promedio para cada una de las celdas de combustible (V_p).

De hecho, existe una válvula de purgado para evitar la acumulación de partículas de polvo e impurezas que han sido introducidas junto con la corriente de aire atmosférico. Cuando se detecta que la tensión que produce la última celda del “*Stack*” resulta notablemente inferior al valor de la tensión promedio para cada una de las celdas de combustible, se acciona la válvula de purgado para que una pequeña corriente del combustible de hidrógeno evacúe las impurezas hacia el exterior, en forma de pulso.

Por último, la pila de combustible PEMFC y la batería LiPo presentan una configuración en paralelo para que los sistemas de vuelo del dron (UAV) reciban la corriente eléctrica proporcionada por ambos dispositivos electroquímicos. Sin embargo, para adaptar la tensión de la pila de combustible (V_s) a la tensión de la batería LiPo, se requiere colocar a la salida un convertidor de potencia de corriente continua (*Direct Current – Direct Current, DC/DC*). El relé es un mecanismo de protección para la pila de combustible PEMFC en caso de algún fallo de funcionamiento en el convertidor de potencia DC/DC.

6.1 Descripción de los componentes de la simulación

Para el diseño del sistema híbrido formado por el conjunto de una pila de combustible del tipo PEMFC y una batería de polímero de ión de litio (*Lithium Polymer, LiPo*), se recurre al entorno de simulación conocido como TRNSYS (*Transient System Simulation Program*). El software TRNSYS permita realizar el modelado y la simulación de sistemas dinámicos complejos mediante la interconexión de estructuras modulares implementadas internamente en la librería del programa.

En este sentido, la compatibilidad de los componentes de TRNSYS con diversos lenguajes de programación (C++, PASCAL, FORTRAN, etc...) permite modificar las ecuaciones matemáticas de los modelos teóricos empleados en la programación de los componentes integrados, además de ofrecer al usuario la posibilidad de crear nuevos componentes de forma independiente. De hecho, ha sido necesario realizar una modificación del modelo existente para una batería de plomo ácido con el fin de adaptar sus expresiones matemáticas al comportamiento de una batería LiPo. Por otro lado, el entorno de simulación también permite una conexión interactiva con otros programas y aplicaciones de interés (Microsoft Excel, Matlab, COMIS, etc...), ya que las curvas de demanda semiempíricas sobre el consumo del dron se encuentran modeladas en un fichero Excel externo.

Los componentes integrados en las librerías del programa TRNSYS se conocen con el término *Types* y presentan una descripción del modelo matemático empleado, así como una referencia sobre los autores del artículo científico consultado. Cada componente integrado se interpreta como un modelo del tipo “caja negra” que recibe una serie de variables de entrada (*Inputs*) y proporciona una serie de variables de salida (*Outputs*), en función de unos parámetros internos preestablecidos (*Parameters*).

En la siguiente Figura 40, se muestra un ejemplo de la configuración general de un componente implementado internamente en la librería de TRNSYS, donde tanto las variables de entrada y salida como los parámetros internos presentan una descripción detallada sobre el significado de cada variable, sus unidades dimensionales, el rango de valores asociado y el valor establecido por defecto:

NAME

Proforma: Category\Sub-category\Type X.tmf
TRNSYS Model: Type X
Model description and references

Icon		TRNSYS Model	Type X
Proforma	Category\Sub-category\Type X.tmf		

PARAMETERS, INPUTS & OUTPUTS

Nº	Name	Dimension	Units	Type	Range	Default
-						
	Notes and description					

Figura 40. Configuración general de los componentes (Types) de TRNSYS.

Los componentes principales del modelo TRNSYS empleados en el diseño del sistema híbrido se representan en la siguiente Figura 41, donde se incluyen los siguientes elementos: curva de demanda semiempírica del dron, pila de combustible con hidrógeno y aire atmosférico (PEMFC H₂-Aire), batería de polímero de ión de litio (Batería LiPo) y un convertidor eléctrico de potencia (DC/DC):

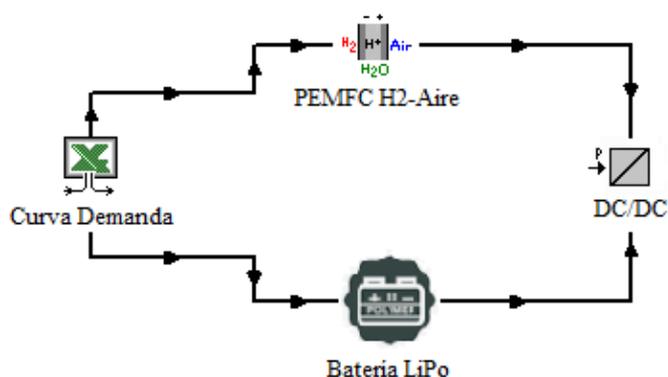


Figura 41. Componentes del modelo TRNSYS para el sistema híbrido "pila de combustible - batería".

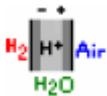
Para el diseño del sistema de simulación, se han empleado los componentes existentes en la librería del programa TRNSYS y se han ajustado los parámetros internos en función de las características técnicas de los modelos disponibles a nivel comercial. La gran versatilidad del modelo de simulación reside en la posibilidad de modificar externamente la curva de demanda del dron en un fichero Excel, consiguiendo aprovechar la información extraída de diversos ensayos experimentales para realizar el dimensionamiento de la pila de combustible PEMFC y permitiendo establecer diversas condiciones de vuelo para determinar la autonomía del vehículo a partir del consumo de combustible.

6.1.1 Modelo de la pila de combustible PEMFC

La pila de combustible se representa mediante un modelo matemático genérico para las celdas de combustible con membrana de intercambio protónico (PEMFC) desarrollado por la organización *Institute for Energy Technology* (Øystein Ulleberg, 2004).

El modelo para la pila de combustible PEMFC (*Type170*) representa un dispositivo electroquímico de cátodo abierto que incorpora un sistema de impulsión de aire para garantizar el suministro de oxígeno al compartimento catódico y mantener la refrigeración del equipo, consiguiendo reducir el tamaño y mejorar la eficiencia. A continuación, en la Tabla 13 se presentan los parámetros característicos y las variables de entrada y salida para la unidad de la pila de combustible PEMFC (H₂-Aire):

Tabla 13. Características del modelo de la pila de combustible PEMFC (*Type170*).

Icono		Modelo TRNSYS	Type 170
Directorio (Proforma)	Hydrogen Systems\Fuel Cells\PEMFC\Air-H2\Type170.tmf		

PARÁMETROS INTERNOS		
1	Número de celdas conectadas en serie, N_{CELLS}	1 – 100 [Ø]
2	Número de pilas conectadas en paralelo, N_{STACKS}	1 – 25 [Ø]
3	Área de electrodo del conjunto MEA, A_{PEM}	25 – 10 ⁴ cm ²
4	Grosor de la membrana polimérica, T_{PEM}	0,01 – 0,012 cm
5	Condición de humectación en la membrana polimérica, γ ($\gamma = 0$: membrana adecuadamente hidratada)	0 – 1 [Ø]
6	Voltaje mínimo alcanzable en cada celda, UC_{MIN}	0 – 1,6 V
7	Densidad de corriente máxima alcanzable en la pila, IC_{MAX}	0 – 1500 mA/cm ²

VARIABLES DE ENTRADA		
1	Intensidad de corriente generada por la pila de combustible, I_{FC}	0 – 5000 A
2	Temperatura de operación en la pila de combustible, T_{STACK}	10 – 90 °C
3	Presión de suministro del hidrógeno en el compartimento anódico, p_{H2}	0,1 – 10 bar
4	Presión de suministro del aire en el compartimento catódico, p_{Air}	0,1 – 20 bar
5	Ratio estequiométrico del hidrógeno, S_{H2}	1 – 1,5 [Ø]
6	Ratio estequiométrico del oxígeno, S_{O2}	1 – 5 [Ø]

VARIABLES DE SALIDA		
1	Potencia proporcionada por la pila de combustible, P_{FC}	W
2	Tensión generada por la pila de combustible, U_{STACK}	V
3	Eficiencia de conversión energética, η_e	$[\emptyset]$
4	Densidad de corriente generada por la pila de combustible, i_{FC}	mA/cm^2
5	Tensión generada por cada celda de combustible, U_{cell}	V
6	Caudal volumétrico de hidrógeno consumido en condiciones normales ($T = 273K, p = 1 \text{ bar}$), V_{H_2}	Nm^3/h
7	Caudal volumétrico de aire ambiente consumido en condiciones normales ($T = 273K, p = 1 \text{ bar}$), V_{air}	Nm^3/h

Para establecer los parámetros internos del modelo de la pila de combustible PEMFC, se consultan las especificaciones técnicas de los modelos comerciales existentes en relación con las características de la membrana polimérica de intercambio protónico empleada como electrolito sólido. En este sentido, para evitar la operación del dispositivo en la región de limitación por transferencia de materia, se establecen los valores por defecto del voltaje mínimo en cada celda de combustible (UC_{MIN}) y de la máxima densidad de corriente (IC_{MAX}), consiguiendo así evitar la aparición del fenómeno de polarización por concentración.

En cuanto a las variables de entrada, se debe establecer la temperatura de operación (T_{STACK}), las presiones de suministro de los gases reactivos en sus respectivos compartimentos (p_{H_2}, p_{O_2}) y la relación estequiométrica del combustible y del oxidante (S_{H_2}, S_{O_2}). Posteriormente, mediante la curva de demanda semiempírica del dron modelada en un fichero Excel externo, se obtiene la variación temporal de la intensidad que debe generar la pila de combustible PEMFC (I_{FC}).

El componente Type170 representa un modelo electroquímico con expresiones y términos que cuentan con un reconocido fundamento teórico (Amphlett, Mann, Hooper, Jensen, & Peppley, 2000), además de incluir una serie de coeficientes y parámetros experimentales:

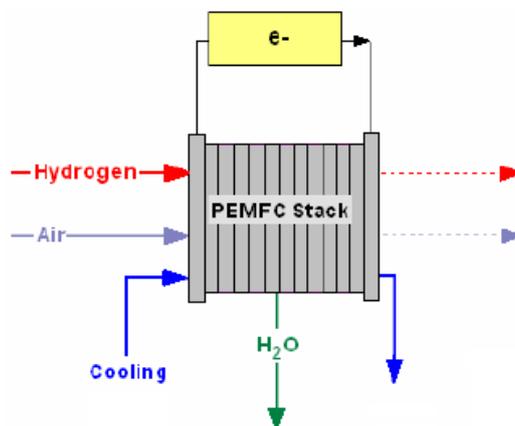


Figura 42. Type 170 - Pila de combustible PEMFC.

El comportamiento de una celda de combustible se define en función de la tensión de salida (U_{cell}). Este término se obtiene a partir del potencial de celda termodinámico y de las pérdidas de tensión debido a los fenómenos de las polarizaciones. Como se ha mencionado previamente, al establecer un valor del voltaje de celda mínimo (UC_{MIN}) y una densidad de corriente máxima (IC_{MAX}), no se alcanza la densidad de corriente límite y se evita la operación en la región donde predominan las pérdidas de tensión por concentración. Por tanto, se llega a una expresión equivalente a la Ec. 18 pero sin incluir el término de la sobretensión por concentración:

$$U_{cell} = E - \eta_{act} - \eta_{ohmic} \quad (Ec.27)$$

El potencial de celda termodinámico (E) también se obtiene mediante la ecuación de Nerst, por lo que se incluye el efecto de la temperatura de operación (T_{STACK}) y de las presiones de los gases reactivos en sus respectivos compartimentos (p_{H_2}, p_{O_2}), llegando a una expresión genérica que resulta de la combinación de las Ecs. 12 y 17:

$$E = E^0 + \frac{\Delta S^0}{n \cdot F} \cdot (T - T_0) + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln(p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{1/2}) \quad (Ec.28)$$

$$E = 1,23 - 0,00085 \cdot (T_{stack} - 298) + 0,0000431 \cdot T_{stack} \cdot \ln(p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{1/2})$$

Las pérdidas de tensión por activación (η_{act}) se modelizan a partir del desarrollo teórico de la expresión de Butler-Volmer (Amphlett J. , y otros, 1995). Utilizando la expresión de la pérdidas de tensión por activación en los electrodos del ánodo y cátodo (Ec.20) y aplicando las expresiones de los cuatro parámetros característicos del modelo (Ecs. 21-24), se obtiene finalmente:

$$\eta_{act} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \cdot T + \varepsilon_3 \cdot T \cdot \ln[O_2]_e + \varepsilon_4 \cdot T \cdot \ln(I/A_e) \quad (Ec.29)$$

$$\eta_{act} = -0,95 + 0,00243 \cdot T_{stack} + 0,000076 \cdot T_{stack} \cdot \ln[O_2] - 0,000192 \cdot T_{stack} \cdot \ln(I_{FC}/A_{PEM})$$

Las pérdidas de tensión en la región óhmica (η_{ohmic}) se modelizan despreciando la contribución de la resistencia del circuito externo y de los electrodos al paso de corriente eléctrica sobre la resistencia interna de la celda de combustible PEMFC, obteniendo así una simplificación en la Ec.25:

$$\eta_{ohmic} = I \cdot R_{int} = I \cdot (R_{elec}^{electrodos} + R_{elec}^{conductor} + R_{ion}) = I \cdot R_{ion} \quad (Ec.30)$$

Por tanto, se establece que las pérdidas óhmicas que se producen en la celda de combustible PEMFC se deben a la resistencia al paso de la carga iónica a través del medio de electrolito. Esta condición equivale a considerar únicamente la resistencia iónica que ofrece la membrana polimérica de intercambio protónico (R_{ion}) empleada como electrolito sólido.

Así pues, la conductividad iónica del medio de electrolito depende fundamentalmente del grado de humectación en la membrana polimérica (γ), ya que se facilita la difusión de los protones desde el compartimento anódico hasta el compartimento catódico de acuerdo con el mecanismo de Grotthuss. En ausencia de modelos explícitos, se pretenden modelizar las pérdidas de tensión óhmicas contemplando la interacción y el efecto cuadrático de la densidad de corriente ($i_{FC} = I_{FC}/A_{PEM}$) y la temperatura de operación (T_{stack}) sobre la resistencia interna de la celda de combustible PEMFC (Amphlett J. , y otros, 1995).

Sin embargo, se incluyen unos términos de corrección para considerar el grosor de la membrana polimérica (t_{PEM}) y la condición de humectación en la membrana (γ), lo que permite obtener la siguiente expresión empírica:

$$\eta_{ohmic} = \frac{I_{FC} \cdot t_{PEM}}{A_{PEM}} \cdot \frac{8}{\exp \left[3,6 \cdot \left(\frac{T_{stack} - 353}{T_{stack}} \right) \right]} \cdot \left[1 + 1,64 \cdot \frac{I_{FC}}{A_{PEM}} + \gamma \cdot \left(\frac{I_{FC}}{A_{PEM}} \right)^3 \right]$$

Tras conocer el voltaje que proporciona una monocelda de combustible, se puede obtener la tensión de salida en la pila de combustible PEMFC (U_{stack}) a partir del número de celdas conectadas en serie:

$$U_{stack} = N_{cells} \cdot U_{cell} \quad (Ec.31)$$

Por lo que la potencia entregada por la pila de combustible PEMFC (P_{FC}) resulta inmediatamente:

$$P_{FC} = I_{FC} \cdot U_{stack} \quad (Ec.32)$$

El consumo de los gases reactivos (V_{H_2}, V_{Air}) se modeliza mediante la expresión de Faraday y es función de la intensidad de corriente generada por la pila de combustible y del ratio estequiométrico establecido para el combustible y el agente oxidante (S_{H_2}, S_{O_2}):

$$V_{H_2} = N_{cells} \cdot \frac{I_{FC}}{n_e \cdot F} \cdot S_{H_2} \quad (Ec.33)$$

$$V_{O_2} = \frac{1}{2} \cdot V_{H_2} \cdot S_{O_2} = \frac{1}{2} \cdot N_{cells} \cdot \frac{I_{FC}}{n_e \cdot F} \cdot S_{H_2} \cdot S_{O_2};$$

$$V_{Air} = \frac{1}{0,21} \cdot V_{O_2} = \frac{4,76}{2} \cdot N_{cells} \cdot \frac{I_{FC}}{n_e \cdot F} \cdot S_{H_2} \cdot S_{O_2} \quad (Ec.34)$$

Teniendo en cuenta que el potencial energético del combustible de hidrógeno en condiciones estándar no se modifica significativamente en el rango de 0-100°C y 0-100 bar ($HHV \equiv Q_{max}^\circ = 286 \text{ kJ/mol}$), es posible determinar el máximo potencial de celda considerando que todo el calor de reacción liberado se aprovecha completamente para obtener un trabajo eléctrico útil del sistema. Este concepto se conoce con el término de “*thermoneutral voltaje*” (U_{TH}) y se calcula de forma similar a la Ec.9:

$$U_{TH} = \frac{Q_{max}^\circ}{n_e \cdot F} = \frac{286 \cdot 10^3 \left(\frac{J}{mol \text{ H}_2} \right)}{2 \left(\frac{mol \text{ e}^-}{mol \text{ H}_2} \right) \cdot 96500 \left(\frac{C}{mol \text{ e}^-} \right)} = 1,482 \text{ V} \quad (Ec.35)$$

Por tanto, la eficiencia de conversión energética de la pila de combustible PEMFC (η_e) se calcula directamente a partir del voltaje de celda obtenido (U_{cell}) según la expresión:

$$\eta_e = \frac{U_{cell}}{U_{TH}} \quad (Ec.36)$$

6.1.2 Modelo de la batería LiPo

La batería LiPo se modeliza mediante la creación de un nuevo código de programación pero tomando como referencia el componente de una batería de plomo ácido (Lead-Acid Battery: Type 47). El voltaje de una batería LiPo (V) se representa mediante una ecuación matemática que depende del estado de carga (*State of Charge, SOC*) y de la corriente eléctrica (I). La combinación de los tres modelos empíricos clásicos (Sheperd, Unnewehr y Nernst) permite obtener una mayor precisión para predecir el voltaje de celda en una batería LiPo (Meng, Luo, Ricco, & Teodorescu, 2018).

El nuevo componente de la batería LiPo (Type511) permite calcular las intensidades de corriente máximas de carga y descarga ($I_{Q_{MAX}}, I_{Q_{MIN}}$) a partir de los ratios de carga y descarga (R_C, R_D) proporcionados en las especificaciones técnicas de los modelos disponibles a nivel comercial, por lo que puede describir la variación temporal del estado de carga. A continuación, en la Tabla 14 se presentan los parámetros característicos y las variables de entrada y salida para la batería LiPo:

Tabla 14. Características del modelo para la batería LiPo (Type511).

Icono		Modelo TRNSYS	Type 511
Directorio (Proforma)	Electrical\Batteries\Current as an Input\LiPo Battery\Type511.tmf		

PARÁMETROS INTERNOS		
1	Capacidad energética nominal de celda, Q_M	$0 - \infty^+ A \cdot h$
2	Número de celdas conectadas en paralelo, C_P	$1 - \infty^+ [\emptyset]$
3	Número de celdas conectadas en serie, C_S	$1 - \infty^+ [\emptyset]$
4	Eficiencia de carga eléctrica de la batería (<i>Faraday Efficiency</i>), EFF	$0 - 1 [\emptyset]$
5	Ratio de carga de la batería, R_C	$0 - 5C [\emptyset]$
6	Ratio de descarga de la batería, R_D	$0 - 50C [\emptyset]$
7	Voltaje máximo de corte en estado de carga, V_C	$3,7 - 4,2 V$
8	Voltaje mínimo de corte en descarga, V_D	$2,7 - 3,2 V$

VARIABLE DE ENTRADA		
1	Corriente eléctrica de la batería, I_Q (Corriente eléctrica consumida por la batería - CARGA: $I_Q > 0$) (Corriente eléctrica generada por la batería - DESCARGA: $I_Q < 0$)	$\infty^- - \infty^+ A$

VARIABLES DE SALIDA		
1	Estado de carga de la batería, Q	$A \cdot h$
2	Fracción de carga de la batería, $F = Q/Q_M$	$[\emptyset]$
3	Potencia de la batería, P (Potencia consumida por la batería - CARGA: $P > 0$) (Potencia entregada por la batería - DESCARGA : $P < 0$)	W
4	Potencia de pérdidas durante la carga de la batería, P_{LOSS}	W
5	Corriente eléctrica total de la batería, $I_T = I_Q \cdot C_P$ (Corriente eléctrica consumida por la batería - CARGA: $I_T > 0$) (Corriente eléctrica generada por la batería - DESCARGA : $I_T < 0$)	A
6	Voltaje de celda, V	V
7	Voltaje total de la batería, $V_T = V \cdot C_S$	V
8	Potencia máxima de carga de la batería, $P_{MAX} = V_{MAX} \cdot I_{QMAX}$	W
9	Potencia máxima de descarga de la batería, $P_{MIN} = V_{MIN} \cdot I_{QMIN}$	W
10	Voltaje total de corte para descarga completa de la batería, $V_{DP} = V_D \cdot C_S$	V
11	Potencia asociada al voltaje de corte en descarga de la batería, P_D	W
12	Voltaje total de corte para carga completa de la batería, $V_{CP} = V_C \cdot C_S$	V
13	Potencia asociada al voltaje de corte en carga de la batería, P_C	W

Para establecer los parámetros internos del modelo de la batería LiPo, se consultan las especificaciones técnicas de los modelos comerciales existentes en relación con la configuración y la capacidad energética nominal de las celdas que componen el conjunto de la batería. En este sentido, hay que tener en cuenta que el voltaje de cada elemento en una batería LiPo varía desde 2,7 V (completamente descargada) hasta los 4,23 V (completamente cargada).

Por lo tanto, se debe establecer una tensión máxima de celda ($V_C = 4,2V$) para evitar la sobrecarga y proteger la batería frente a incendios y explosiones. Del mismo modo, también se establece una tensión mínima de celdas ($V_D = 3V$) para evitar la descarga completa de la batería, ya que en caso de no detenerse la descarga completa, la batería LiPo ya no aceptará una carga completa y con el tiempo tendrá problemas para mantener una tensión alta durante la fase de descarga (Burke, 2007).

En cualquier dispositivo electroquímico, la eficiencia faradaica se define como la relación entre la corriente eléctrica de carga suministrada al sistema y la corriente eléctrica generada por el sistema. Por tanto, el término de la eficiencia faradaica particularizado para una batería LiPo representa la eficiencia de carga eléctrica de la batería (EFF), puesto que determina la fracción de corriente eléctrica suministrada a la batería que se aprovecha para llevar a cabo la reacción electroquímica de recarga.

En cuanto a la única variable de entrada, hay que determinar exactamente el modo de funcionamiento de la batería (carga o descarga) en cada una de las fases de vuelo del dron:

- Como se ha comentado previamente, la batería debe alimentar el balance de planta del sistema híbrido durante el arranque del dron y también permite alcanzar los picos de consumo del dron en las fases de vuelo de mayor demanda. Por tanto, durante el arranque del dron y en las fases de despegue y aterrizaje, la batería se encuentra en descarga proporcionando una corriente eléctrica a los sistemas de vuelo del dron ($I_Q < 0$).
- Por otro lado, como el dimensionado de la batería LiPo se realiza al mínimo para que aporte el menor peso posible al conjunto del sistema híbrido, el excedente eléctrico generado por la pila de combustible PEMFC durante las fases de demanda estable se destina a la recarga de la batería. Por tanto, en las fases de vuelo estacionario, la batería realiza su recarga recibiendo parte de la corriente eléctrica generada por la pila de combustible PEMFC ($I_Q > 0$).

El componente Type511 representa el funcionamiento de una batería LiPo, basándose en la ecuación matemática resultante tras combinar las expresiones empíricas de los modelos clásicos de Sheperd, Unnewehr y Nernst:

$$\text{Modelo Sheperd} \quad V = E_0 + R \cdot I_Q - K_1 \cdot \frac{1}{F} \quad (\text{Ec.37})$$

$$\text{Modelo Unnewehr} \quad V = E_0 + R \cdot I_Q - K_2 \cdot F \quad (\text{Ec.38})$$

$$\text{Modelo Nernst} \quad V = E_0 + R \cdot I_Q + K_3 \cdot \ln(F) + K_4 \cdot \ln(1 - F) \quad (\text{Ec.39})$$

Finalmente, el voltaje de celda (V) depende únicamente del estado de carga (Q) que se relaciona con la fracción de carga (F) y según el modo de funcionamiento de la batería que viene determinado por el signo de la intensidad de corriente (I_Q):

$$V = E_0 + R \cdot I_Q - K_1 \cdot \frac{1}{F} - K_2 \cdot F + K_3 \cdot \ln(F) + K_4 \cdot \ln(1 - F) \quad (\text{Ec.40})$$

Las Ecs.37-40 utilizan varios coeficientes del modelo empírico resultante (Tang, Wang, & Chen, 2015):

- Q : Estado de carga de la celda.
- Q_M : Capacidad energética nominal de celda.
- F : Fracción de carga respecto a la capacidad nominal ($F = Q/Q_M$).
- $E_0 = 3,8V$: Voltaje a circuito abierto.
- $R = 0,08\Omega$: Resistencia interna de la batería.
- K_1, K_2, K_3, K_4 : Parámetros experimentales relacionados con las pérdidas de polarización.
($K_1 = 0,0142V, K_2 = -0,011V, K_3 = 0,01V, K_4 = -0,03V$)

En el caso de las baterías LiPo, el voltaje a circuito abierto (*Open Circuit Voltage, OCV*) depende fundamentalmente del estado de carga (*State of Charge, SOC*) mediante las curvas OCV-SOC, aunque se suele encontrar dentro del rango 3,5 - 3,9 V (Roscher, Bohlen, & Vetter, 2011).

Para prolongar la vida útil de la batería y evitar los riesgos de incendio o explosión, la batería LiPo no debe cargarse hasta alcanzar valores demasiado elevados de tensión ni tampoco debe descargarse hasta valores demasiado bajos. Se establece que la capacidad máxima de carga se encuentra alrededor del 95% de la capacidad nominal de celda ($Q_C/Q_M = 95\%$) y la capacidad mínima de descarga se establece sobre el 5% de la capacidad nominal de celda ($Q_D/Q_M = 5\%$). Las resistencias internas de una batería LiPo (R) se van incrementando progresivamente con los ciclos de cargas y descarga, encontrándose típicamente dentro del rango de los 20 - 100 m Ω (León, 2021).

En la siguiente Figura 42, se presenta una evolución del voltaje de celda en una batería LiPo en función de la capacidad energética de la batería (Oscar Liang, 2021), donde se puede identificar la tensión máxima a plena carga (4,2 V) y la tensión mínima de corte en descarga (3,0 V):

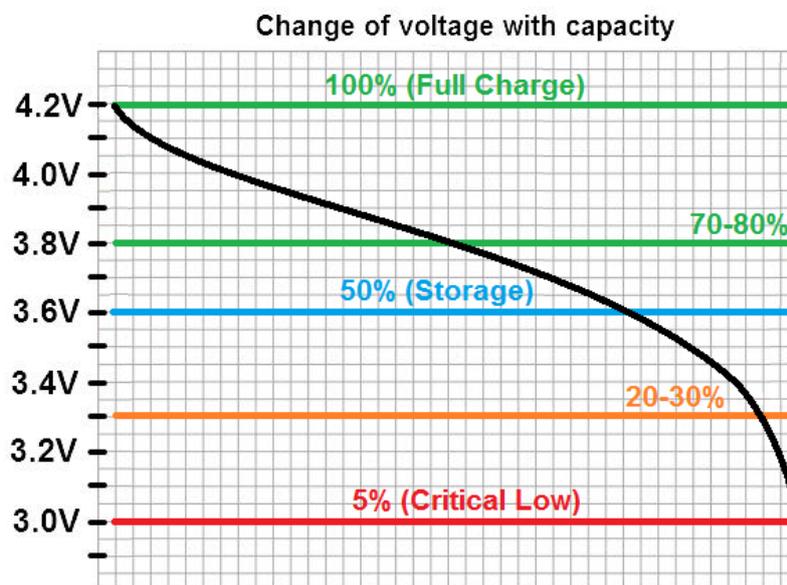


Figura 43. Evolución del voltaje de celda con la capacidad energética en una batería LiPo (Oscar Liang, 2021).

La rutina de cálculo aplicada para el modelado de la respuesta dinámica de una batería LiPo depende fundamentalmente del modo de funcionamiento, puesto que aunque el fundamento teórico es idéntico en ambos casos, las ecuaciones se modifican ligeramente si se encuentra en modo de carga o descarga, además de que también cambia el signo de la intensidad de corriente suministrada como variable de entrada al componente de TRNSYS para el módulo de la batería LiPo.

Para comenzar, se procede con el cálculo de la fracción de carga (F) a partir de la determinación del estado de carga (Q). Para la recarga de la batería LiPo, se debe considerar la eficiencia de carga (EFF):

$$\begin{aligned} \text{DESCARGA: } \frac{dQ}{dt} &= I_Q \quad (I_Q < 0); \\ \text{CARGA: } \frac{dQ}{dt} &= I_Q \cdot EFF \quad (I_Q > 0) \end{aligned} \quad (\text{Ec.41})$$

$$F = \frac{Q}{Q_M} \quad (\text{Ec.42})$$

Como se ha mencionado previamente, para evitar la pérdida de capacidad de carga y prolongar la vida útil de la batería LiPo, se establece un voltaje mínimo durante la descarga de la batería (V_D). Así pues, es posible determinar la intensidad de corriente correspondiente al voltaje de corte en descarga (I_D), despejando directamente de la Ec.40 y considerando una fracción de carga (F) mínima del 5%:

$$\begin{aligned} V_D &= E_0 + R \cdot I_D - K_1 \cdot \frac{1}{0,05} - K_2 \cdot 0,05 + K_3 \cdot \ln(0,05) + K_4 \cdot \ln(1 - 0,05); \\ I_D &= \frac{V_D - E_0 + K_1 \cdot \frac{1}{0,05} + K_2 \cdot 0,05 - K_3 \cdot \ln(0,05) - K_4 \cdot \ln(1 - 0,05)}{R} \end{aligned} \quad (\text{Ec.43})$$

Posteriormente, para evitar los riesgos de incendio y explosión de la batería LiPo se establece un voltaje máximo durante la carga de la batería (V_C). Así pues, es posible determinar la intensidad correspondiente al voltaje de corte en carga (I_C), despejando directamente de la Ec.40 y considerando una fracción de carga (F) máxima del 95%:

$$\begin{aligned} V_C &= E_0 + R \cdot I_C - K_1 \cdot \frac{1}{0,95} - K_2 \cdot 0,95 + K_3 \cdot \ln(0,95) + K_4 \cdot \ln(1 - 0,95); \\ I_C &= \frac{V_C - E_0 + K_1 \cdot \frac{1}{0,95} + K_2 \cdot 0,95 - K_3 \cdot \ln(0,95) - K_4 \cdot \ln(1 - 0,95)}{R} \end{aligned} \quad (\text{Ec.44})$$

A continuación, conociendo el ratio de descarga de la batería LiPo (R_D) es posible determinar la máxima intensidad de corriente que es capaz de proporcionar la batería (I_{QMIN}) a partir de la capacidad energética de celda (Q_M):

$$I_{QMIN} = -R_D \cdot \frac{Q_M}{1000} \quad (\text{Ec.45})$$

Del mismo modo, conociendo el ratio de carga de la batería LiPo (R_C) es posible determinar la máxima intensidad de corriente que es capaz de recibir la batería (I_{QMAX}) a partir de la capacidad energética de celda (Q_M):

$$I_{QMAX} = R_C \cdot \frac{Q_M}{1000} \quad (\text{Ec.46})$$

Si la intensidad generada por la batería es superior al límite de descarga ($I_Q < I_{QMIN}$), se debe calcular el voltaje de celda (V) mediante la Ec.40 pero considerando la intensidad máxima de descarga. Este término se conoce como el potencial mínimo de descarga (V_{MIN}) y representa el voltaje de celda correspondiente con la tasa máxima de descarga para la batería. Sin embargo, el límite inferior del potencial mínimo de descarga debe ser el voltaje de corte en descarga ($V_D \leq V_{MIN}$):

$$V_{MIN} = E_0 + R \cdot I_{QMIN} - K_1 \cdot \frac{1}{F} - K_2 \cdot F + K_3 \cdot \ln(F) + K_4 \cdot \ln(1 - F) \quad (\text{Ec.47})$$

De manera análoga, si la intensidad que recibe la batería es superior al límite de carga ($I_Q > I_{QMAX}$), se debe calcular el voltaje de celda (V) mediante la Ec.40 pero considerando la intensidad máxima de carga. Este término se conoce como el potencial máximo de carga (V_{MAX}) y representa el voltaje de celda correspondiente con la tasa máxima de recarga para la batería. Sin embargo, el límite superior del potencial máximo de carga debe ser el voltaje de corte en carga ($V_C \geq V_{MAX}$):

$$V_{MAX} = E_0 + R \cdot I_{QMAX} - K_1 \cdot \frac{1}{F} - K_2 \cdot F + K_3 \cdot \ln(F) + K_4 \cdot \ln(1 - F) \quad (\text{Ec.48})$$

En este instante, se procede con la determinación del estado de carga actual de la batería (Q) en función de la intensidad de corriente (I_Q) generada por la batería:

$$\frac{dQ}{dt} = I_Q \cdot 1000 \quad (\text{Ec.49})$$

Finalmente, se determina la potencia generada por cada celda de la batería (P') para después proceder con la estimación de la potencia total proporcionada por la batería LiPo (P):

$$P' = I_Q \cdot V \quad (\text{Ec.50})$$

$$P = P' \cdot C_p \cdot C_s \quad (\text{Ec.51})$$

Finalmente, se determina también la potencia suministrada en cada celda de la batería (P') por la Ec.50 y la potencia total consumida por la batería LiPo (P) por la Ec.51, mientras que las pérdidas de potencia que se producen durante la carga de la batería (P_{LOSS}) resultan:

$$P_{LOSS} = (1 - EFF) \cdot P \quad (\text{Ec.52})$$

6.1.3 Modelo del convertidor de potencia (DC/DC)

El convertidor de potencia se representa mediante un modelo matemático basado en curvas empíricas de eficiencia para convertidores eléctricos (Ulleberg, 1998). En sistemas que presentan tanto un componente generador como consumidor de corriente continua (*Direct Current, DC*), el convertidor de potencia DC/DC permite adaptar la potencia eléctrica a un voltaje determinado.

El modelo para el convertidor de potencia DC/DC (*Type175*) se requiere para adaptar la tensión que proporciona la pila de combustible PEMFC a la tensión de la batería LiPo del sistema híbrido, controlando así la corriente entregada por el conjunto “pila de combustible-convertidor de potencia” hacia el bus de alimentación de los sistemas de vuelo del dron. A continuación, en la Tabla 15 se presentan los parámetros característicos y las variables de entrada y salida para la unidad del convertidor de potencia DC/DC:

Tabla 15. Características del modelo para el convertidor de potencia DC/DC (*Type175*).

Icono		Modelo TRNSYS	Type 175
Directorio (Proforma)	Electrical\Power Conditioning\Power INPUT is known\Type175.tmf		

PARÁMETROS INTERNOS		
1	Potencia nominal del convertidor, P_N	$1 - \infty^+ W$
2	Efecto ralenti (<i>Idling Constant</i>), P_0	$0 - 1 W$
3	Voltaje objetivo (<i>Set-point</i>), U_S	$1 - 25 V$
4	Resistencia interna del convertidor, R_i	$0 - 1000 \Omega$
5	Número de unidades en paralelo, M_P	$1 - 100 [\phi]$

VARIABLES DE ENTRADA		
1	Intensidad de salida, I_{OUT}	$0 - \infty^+ A$
2	Voltaje de salida, U_{OUT}	$0 - \infty^+ V$

VARIABLES DE SALIDA		
1	Potencia eléctrica de salida, $P_{OUT} = U_{OUT} \cdot I_{OUT}$	W
2	Pérdidas de potencia del convertidor, P_{LOSS}	W
3	Potencia eléctrica de entrada, P_{IN}	W
4	Eficiencia de conversión energética, η	[Ø]
5	Intensidad de corriente de entrada, I_{IN}	A
6	Voltaje de entrada, U_{IN}	V

Las pérdidas de potencia en el convertidor DC/DC (P_{LOSS}) dependen fundamentalmente de la corriente eléctrica que recorre el dispositivo. Las pérdidas de potencia se calculan mediante un modelo empírico de tres parámetros (Snyman & Enslin, 1993) en función de la potencia de salida (P_{OUT}):

$$P_{LOSS} = P_0 + \frac{U_S}{U_{OUT}} \cdot P_{OUT} + \frac{R_I}{U_{OUT}^2} \cdot P_{OUT}^2 \quad (\text{Ec.53})$$

Por lo tanto, es posible establecer una relación directa entre la potencia de entrada (P_{IN}) y la potencia de salida (P_{OUT}) a través de las pérdidas de potencia del convertidor (P_{LOSS})

$$P_{LOSS} = P_{IN} - P_{OUT} \rightarrow P_{IN} = P_{OUT} + P_{LOSS} \quad (\text{Ec.54})$$

Por lo tanto, la eficiencia de conversión energética (η) para el convertidor de potencia resulta:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \quad (\text{Ec.55})$$

Así pues, para la determinación tanto de la intensidad de corriente de entrada (I_{IN}) como de la tensión de entrada (U_{IN}), el módulo implementado en TRNSYS permite encontrar el punto de corte entre las curvas I-V de la pila de combustible PEMFC y del convertidor de potencia DC/DC. El funcionamiento consiste en encontrar un valor de intensidad de corriente que consiga minimizar al máximo posible la diferencia en términos absolutos entre el voltaje de la pila de combustible PEMFC (U_{PEMFC}) y un supuesto valor de voltaje de entrada al convertidor de potencia DC/DC (U_{ENT}):

$$U_{ENT}(I) = \frac{P_{IN}}{I} \rightarrow I_{IN} = I / I = \text{mín} |U_{ENT}(I) - U_{PEMFC}(I)| \quad (\text{Ec.56})$$

$$U_{IN} = \frac{P_{IN}}{I_{IN}} \quad (\text{Ec.57})$$

6.1.4 Modelo del fichero Excel

Para la simulación del sistema híbrido “pila de combustible PEMFC-batería LiPo”, se ha decidido proporcionar la curva de demanda del dron mediante un módulo TRNSYS que permite la lectura directa de los datos de consumo de intensidad de corriente contenidos en un fichero Excel externo. Esta posibilidad proporciona una gran versatilidad a la simulación, ya que permite analizar distintas situaciones de vuelo y conocer el consumo de combustible para determinar la autonomía del vehículo.

El componente del fichero Excel (*Type62*) establece un link directamente con un fichero Excel, de forma que la rutina Fortran de TRNSYS se comunica a través de una interfaz COM (*Component Object Model*) para el intercambio de información. A continuación, en la Tabla 16 se presentan los parámetros característicos y las variables de entrada y salida para la invocación del fichero Excel externo:

Tabla 16. Características del modelo para el archivo Excel externo (*Type62*).

Icono		Modelo TRNSYS	Type 62
Directorio (Proforma)	Utility\Calling External Programs\Excel\Type62.tmf		

PARÁMETROS INTERNOS		
1	Número de variables de entrada al fichero Excel, N_{Inp} (Definir las correspondientes variables en la hoja Excel - Inp1, Inp2...InpN)	1 – 10 [∅]
2	Número de variables de salida del fichero Excel, N_{Outp} (Definir las correspondientes variables en la hoja Excel - Out1, Out2...OutN)	1 – 10 [∅]

VARIABLES DE ENTRADA		
1	Variable(s) de entrada del programa TRNSYS al fichero Excel, $Inp1 \dots InpN$	–

VARIABLES DE SALIDA		
1	Variable(s) de salida del fichero Excel al programa TRNSYS, $Out1 \dots OutN$	–

Es posible establecer hasta 10 variables de entrada (Inputs) en las celdas de las hojas de trabajo del fichero Excel, por lo que se requiere definir un nombre específico para cada variable de entrada en su celda correspondiente (Inp1, Inp2...InpN). Del mismo modo, también es posible obtener hasta 10 variables de salida (Outputs) mediante funciones preestablecidas en Excel o con programación más avanzada mediante líneas de código propio (*Visual Basic for Applications, VBA*). En cualquier caso, las variables de salida también deben estar definidas con un nombre específico en sus correspondientes celdas (Out1, Out2...OutN).

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería”
para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

Sin embargo, el fichero Excel (Type62) recibe 3 variables de entrada que se corresponden con el tiempo inicial de la simulación (T_0), el tiempo final de la simulación (T_F) y el instante de tiempo actual (T_i). Al proporcionar un tiempo inicial y final de la simulación, se comprueba la respuesta del sistema híbrido durante distintas fases de vuelo del dron, permitiendo así evaluar el consumo de combustible de la pila PEMFC y el estado de carga de la batería LiPo en las fases de mayor demanda energética (despegue/aterrizaje) o en la fase de vuelo estacionario.

Por su parte, el componente Excel devuelve 5 variables de salida que se corresponden con la intensidad de corriente demandada por el dron (I_{DRON}), por la pila de combustible (I_{PEMFC}) y por la batería (I_{LiPO}). Como la intensidad de corriente para la batería LiPo presenta un signo negativo (-) cuando se encuentra en descarga y un signo positivo (+) cuando se encuentra en carga, se decide emplear una variable adicional para establecer la demanda neta de corriente (I_{Neta_LiPo}) en función del modo de funcionamiento de la batería ($CARGA \rightarrow I_{Neta_LiPo} = I_{LiPO}$; $DESCARGA \rightarrow I_{Neta_LiPo} = -I_{LiPO}$). La última variable de salida representa el instante de tiempo del paso anterior de la simulación (T_{i-1}).

Sin embargo, para permitir la identificación de las celdas correspondientes a las variables de entrada (Inputs) y las variables de salida (Outputs) del componente Excel, se requiere implementar la siguiente rutina con macros VBA en el propio fichero Excel que contiene las curvas de demanda del dron:

```
Option Explicit

Sub TRNSYS(Optional Input1 As Variant, _
Optional Input2 As Variant, _
Optional Input3 As Variant, _
Optional Input4 As Variant, _
Optional Input5 As Variant, _
Optional Input6 As Variant, _
Optional Input7 As Variant, _
Optional Input8 As Variant, _
Optional Input9 As Variant, _
Optional Input10 As Variant)
With Names
If Not IsMissing(Input1) Then: .Item("Inp1").RefersToRange = Input1: Else: GoTo GoOn
If Not IsMissing(Input2) Then: .Item("Inp2").RefersToRange = Input2: Else: GoTo GoOn
If Not IsMissing(Input3) Then: .Item("Inp3").RefersToRange = Input3: Else: GoTo GoOn
If Not IsMissing(Input4) Then: .Item("Inp4").RefersToRange = Input4: Else: GoTo GoOn
If Not IsMissing(Input5) Then: .Item("Inp5").RefersToRange = Input5: Else: GoTo GoOn
If Not IsMissing(Input6) Then: .Item("Inp6").RefersToRange = Input6: Else: GoTo GoOn
If Not IsMissing(Input7) Then: .Item("Inp7").RefersToRange = Input7: Else: GoTo GoOn
If Not IsMissing(Input8) Then: .Item("Inp8").RefersToRange = Input8: Else: GoTo GoOn
If Not IsMissing(Input9) Then: .Item("Inp9").RefersToRange = Input9: Else: GoTo GoOn
If Not IsMissing(Input10) Then: .Item("Inp10").RefersToRange = Input10: Else: GoTo GoOn
End With
GoOn:
End Sub
```

Figura 44. Código de programación VBA para la identificación de Inputs y Outputs (Type62).

Por último, para poder realizar correctamente la llamada de la función Excel e iniciar el proceso de simulación del sistema híbrido, se debe seleccionar la pestaña “Special Cards” del componente Type62 donde el usuario debe introducir manualmente el directorio exacto del fichero Excel en su equipo. Para comprobar la mejora en la autonomía de vuelo del vehículo, se debe analizar la respuesta dinámica del sistema híbrido frente a distintas curvas de demanda semiempíricas, determinado el consumo total del combustible de hidrógeno y el estado de carga de la batería para cada uno de los trayectos de vuelo del dron durante sus correspondientes periodos de tiempo establecidos.

6.2 Diseño detallado del modelo de simulación

Además de los componentes principales descritos anteriormente en el apartado 6.1 y representados en la Figura 41, el modelado del sistema híbrido eléctrico formado por una pila de combustible PEMFC y una batería LiPo requiere de una serie de elementos adicionales para el control de la simulación. Al mismo tiempo, para facilitar el proceso de análisis de los resultados obtenidos con la simulación, se emplean diversas herramientas para la representación gráfica de las respuestas ofrecidas tanto por la pila de combustible como por la batería LiPo, permitiendo así determinar el consumo de combustible y el estado de carga de la batería.

La posibilidad de incluir ecuaciones (*Assembly/Insert New Equation*) permite implementar un control de la simulación estableciendo un periodo temporal sobre el que analizar la respuesta dinámica del sistema híbrido, lo que puede resultar de gran utilidad a la hora de estimar el consumo de combustible o la descarga de la batería en las fases de mayor demanda del dron, como es el despegue o el aterrizaje. A su vez, también ofrece la posibilidad de realizar un cambio de unidades sin necesidad de modificar el código de programación de los componentes existentes o determinar el consumo del combustible en base a las condiciones de almacenamiento en el depósito de hidrógeno incorporado en el vehículo. Por último, se incluyen elementos para la representación gráfica de los resultados de la simulación (*Output/Online Plotter*), generando el entorno de trabajo TRNSYS presentado en la siguiente Figura 45:

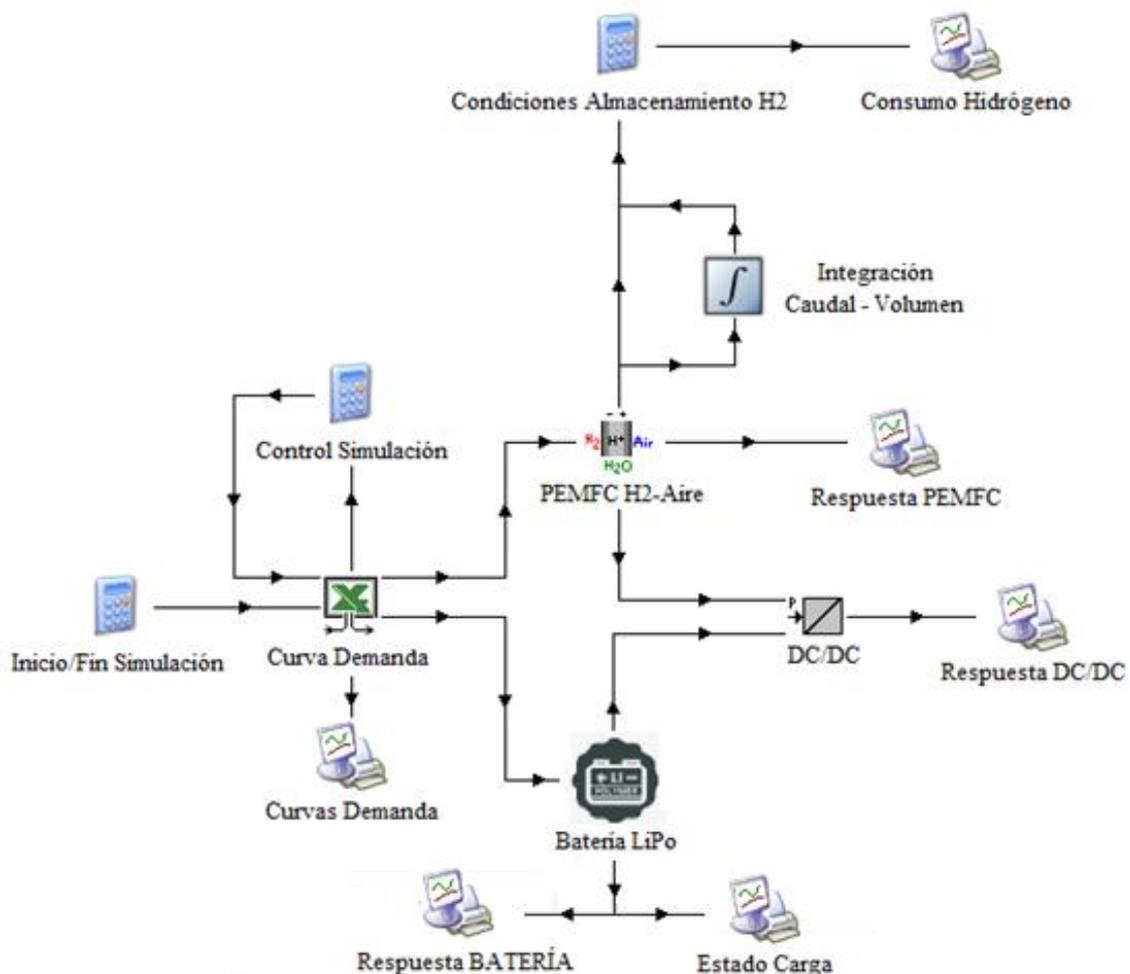


Figura 45. Modelo de simulación TRNSYS del sistema híbrido “pila de combustible - batería”.

6.2.1 Modelado de la respuesta del sistema híbrido “pila PEMFC + batería LiPo”

Para comprender mejor el funcionamiento del modelo de simulación en TRNSYS representado en la Figura 45 anterior, resulta imprescindible describir con detalle el contenido del fichero Excel (Type62). El archivo *Curva Demanda.xls* contiene la evolución temporal del consumo de intensidad de corriente eléctrica que realiza el dron durante diversos ensayos de vuelo experimentales, por lo que la curva de demanda semiempírica equivale inicialmente a dos columnas de datos, correspondientes con el instante de tiempo (t) y la intensidad de corriente demandada por el dron (I_{DRON}).

Debido a los requerimientos del sistema híbrido “pila de combustible PEMFC - batería LiPo” en el entorno de simulación TRNSYS, el consumo de la pila de combustible y el modo de funcionamiento de la batería se debe implementar internamente en el propio fichero Excel. Para ello, se debe definir la intensidad de corriente proporcionada por la pila de combustible PEMFC (I_{PEMFC}) y la intensidad de corriente que consume o produce la batería (I_{LiPo}) dependiendo si se encuentra en carga o descarga. Como se ha mencionado previamente, el modo de funcionamiento de la batería determina el signo de la intensidad de corriente que se suministra como variable de entrada o *Input* al componente de la batería LiPo (TypeXX), de manera que cuando la batería se encuentra en modo carga consume una intensidad de corriente procedente de la pila de combustible PEMFC ($I_{Neta_LiPo} > 0$), mientras que si la batería se encuentra en descarga proporciona una intensidad de corriente al dron ($I_{Neta_LiPo} < 0$).

En definitiva, el modo de funcionamiento de la batería viene establecido en función de la fase de vuelo del dron en cada instante de tiempo y es lo que determina consecuentemente el modelado de la curva de demanda semiempírica del sistema híbrido. Cualquier trayecto de vuelo que realiza un dron se puede dividir en 5 fases (Arranque, Despegue, Vuelo Plano/Estacionario, Aterrizaje y Parada) que se caracterizan por un periodo de tiempo aproximado y un rango de consumo establecido:

1. Fase de Arranque

Para encender los sistemas de vuelo del dron (sistemas de navegación, comunicación...) y comenzar con la alimentación del balance de planta que requiere el arranque de la pila de combustible PEMFC (sistema de impulsión de aire atmosférico, electroválvula de combustible...), la batería LiPo comienza aportando toda la intensidad de corriente necesaria en modo descarga durante un periodo de tiempo aproximado de 1 min.

$$I_{LiPo} = I_{DRON} = 2 \text{ A};$$

$$I_{PEMFC} = 0 \text{ A};$$

$$DESCARGA: I_{Neta_LiPo} = -I_{LiPo} = -2 \text{ A};$$

2. Fase de Despegue

Hasta que la pila de combustible PEMFC no se encuentre en funcionamiento, la aeronave no puede comenzar el recorrido ascendente. En los instantes previos al despegue de tierra, la intensidad de corriente demanda por el dron va incrementándose progresivamente de forma lineal durante 1 min hasta alcanzar el pico máximo de consumo que marca el inicio del ascenso del dron. Para garantizar un ascenso seguro hasta alcanzar una altitud de vuelo suficiente, se ha establecido un periodo de tiempo de 3 min donde se prolonga el consumo máximo de corriente eléctrica por parte del dron.

Una vez establecido el punto óptimo de funcionamiento de la pila de combustible PEMFC a partir de su curva de polarización, se determina el voltaje de operación que proporcione la máxima eficiencia de conversión energética del hidrógeno para optimizar el consumo del combustible. El punto óptimo de funcionamiento establece aproximadamente el rango de intensidades de corriente que debería proporcionar la pila de combustible PEMFC durante las fases de despegue y aterrizaje, por lo que se determina la máxima intensidad de corriente que puede proporcionar la pila de combustible ($I_{PEMFC}^{M\grave{A}X}$).

Siempre que la intensidad de corriente generada por la pila de combustible PEMFC sea capaz de abastecer por completo la demanda total del dron y permita cubrir los requerimientos energéticos del balance de planta, la batería no se encuentra en funcionamiento en la fase de despegue. Sin embargo, cuando la demanda total del dron es superior a la corriente eléctrica generada por la pila de combustible, la batería LiPo entra en funcionamiento en modo descarga para que el conjunto del sistema híbrido proporcione la demanda total del dron y alcance el pico máximo de consumo eléctrico.

$$I_{DRON} = 4 - 80 \text{ A (Lineal, 1min)} \rightarrow I_{DRON} = 80 \text{ A (Máximo, 3min)} ;$$

$$IF (I_{PEMFC} > I_{DRON}) \rightarrow I_{PEMFC} = I_{DRON} \cap I_{LiPo} = 0 \text{ A} = I_{Neta_LiPo} ;$$

$$IF (I_{PEMFC} < I_{DRON}) \rightarrow I_{PEMFC} = I_{PEMFC}^{M\grave{A}X} \cap I_{LiPo} = I_{DRON} - I_{PEMFC} ;$$

$$DESCARGA: I_{Neta_LiPo} = -I_{LiPo} ;$$

3. Fase de Vuelo Plano o Estacionario

Cuando el recorrido ascendente del dron alcanza una altitud de vuelo suficiente, comienza una fase de vuelo plano que se caracteriza por presentar un desplazamiento mayoritariamente horizontal. En relación con el trayecto de vuelo total que realiza el dron, la fase de vuelo plano es la que presenta una mayor duración y donde se produce un mayor consumo de combustible. Por lo tanto, el análisis del consumo de hidrógeno para determinar la capacidad del depósito de combustible en esta fase resulta fundamental para establecer la autonomía de vuelo del dron.

La fase de vuelo plano también se suele denominar fase de vuelo estacionario, ya que durante el recorrido horizontal del dron se establece una demanda energética estable ($\overline{I_{DRON}}$) que resulta notablemente inferior respecto a los picos máximos de consumo en las fases de despegue y aterrizaje. Lo interesante es seleccionar la configuración de un modelo comercial para la pila de combustible cuyo punto de funcionamiento óptimo permita cubrir la demanda estacionaria del dron, pero generando un ligero excedente eléctrico para realizar el proceso de recarga de la batería LiPo, ya que viene de un estado de descarga en la fase de despegue anterior y se debe preparar para otro estado de descarga en la fase de aterrizaje posterior.

Para analizar el consumo de combustible necesario para alcanzar unas autonomías de vuelo de 30 min y 1h, se establece que la fase de vuelo estacionario se prolonga durante 20 y 50 min respectivamente.

$$I_{DRON} = \overline{I_{DRON}} \rightarrow I_{PEMFC} > I_{DRON} ;$$

$$CARGA: I_{LiPo} = I_{PEMFC} - I_{DRON} = I_{Neta_LiPo} ;$$

4. Fase de Aterrizaje

Cuando el dron haya finalizado el desplazamiento horizontal en la fase de vuelo plano o estacionario para llegar a la zona de actuación o bien cuando el nivel de hidrógeno en el depósito de combustible sea demasiado bajo e insuficiente, comienza el recorrido descendente del aterrizaje. Para garantizar un descenso seguro hasta el suelo, el aterrizaje comienza con un periodo de tiempo de 2-3 min donde se mantiene el pico máximo de consumo del dron. En los instantes finales del aterrizaje en tierra, la intensidad de corriente demanda por el dron va disminuyendo progresivamente de forma lineal durante 1 min, partiendo del pico máximo de consumo y hasta alcanzar la demanda del balance de planta que marca el final del aterrizaje del dron.

Siempre que la intensidad de corriente generada por la pila de combustible PEMFC en su punto óptimo de operación sea capaz de abastecer por completo la demanda total del dron y permita cubrir los requerimientos energéticos del balance de planta, la batería tampoco entra en funcionamiento en la fase de aterrizaje. Sin embargo, cuando la demanda total del dron es superior a la corriente eléctrica generada por la pila de combustible, la batería LiPo entra en funcionamiento en modo descarga para que el conjunto del sistema híbrido proporcione la demanda total del dron y alcance el pico máximo de consumo eléctrico. Se puede considerar que el principio de funcionamiento del sistema híbrido en las fases de despegue y aterrizaje son prácticamente equivalentes.

$$I_{DRON} = 80 \text{ A (Máximo, 3min)} \rightarrow I_{DRON} = 80 - 4 \text{ A (Lineal, 1min)} ;$$

$$IF (I_{PEMFC} > I_{DRON}) \rightarrow I_{PEMFC} = I_{DRON} \cap I_{LiPo} = 0 \text{ A} = I_{Neta_LiPo} ;$$

$$IF (I_{PEMFC} < I_{DRON}) \rightarrow I_{PEMFC} = I_{PEMFC}^{MÁX} \cap I_{LiPo} = I_{DRON} - I_{PEMFC} ;$$

$$DESCARGA: I_{Neta_LiPo} = -I_{LiPo} ;$$

5. Fase de Parada

Para detener los sistemas de vuelo del dron y el balance de planta de la pila de combustible PEMFC, la batería LiPo deja de estar en funcionamiento y la propia pila de combustible comienza a disminuir progresivamente la corriente eléctrica durante un periodo de tiempo aproximado de 1 min.

$$I_{PEMFC} = I_{DRON} = 2 - 0 \text{ A} ;$$

$$I_{LiPo} = 0 \text{ A} = I_{Neta_LiPo} ;$$

Por lo tanto, dependiendo de la demanda energética del dron (I_{DRON}) y la fase de vuelo en el instante de tiempo considerado (t), se generan dos columnas de datos adicionales correspondientes con la intensidad de corriente generada por la pila de combustible (I_{PEMFC}) y la intensidad de corriente neta que consume o genera la batería según el modo de funcionamiento de carga o descarga (I_{Neta_LiPo}). Para extraer toda la información contenida en el fichero externo como *Outputs* del componente Excel (*Type62*), se proporciona el instante de tiempo actual en la simulación y se asignan los valores de la demanda energética para el conjunto del sistema híbrido mediante la función de búsqueda “*BUSCARV(valor X ; matriz datos ; columna Y)*” integrada en el propio documento de Microsoft Excel.

6.2.2 Elementos de control para la simulación del sistema híbrido

Para comenzar el proceso de simulación sobre la respuesta del sistema híbrido frente a una curva de demanda semiempírica del dron, se requiere establecer un rango temporal para evaluar el estado de carga de la batería y determinar el consumo del combustible de hidrógeno. Así pues, el componente “Inicio/Fin Simulación” se emplea para definir el tiempo inicial (t_{INICIO}) y el tiempo final (t_{FINAL}) del periodo temporal sobre el que evaluar la respuesta del sistema híbrido, proporcionando una gran versatilidad al entorno de simulación para analizar individualmente todas las fases de vuelo del dron.

Cuando el programa TRNSYS invoca el componente para el fichero Excel (*Type62*), únicamente realiza la lectura de la demanda energética correspondiente a una fila de datos que se encuentra asociada a un determinado instante de tiempo. Para poder realizar un barrido temporal de la demanda energética global del dron y evaluar la respuesta del sistema híbrido a lo largo de un periodo de tiempo, se define un contador temporal (k). Cada vez que se realiza una lectura de la información contenida en una fila de datos, el componente Excel devuelve un valor del contador temporal de salida (k_{SAL}) para que el componente “Control Simulación” calcule un contador temporal de entrada (k_{ENT}) como retorno al fichero Excel en función del paso temporal de la simulación (*Paso*):

$$k_{ENT} = k_{SAL} + Paso ;$$

Es importante tener en cuenta que el paso temporal de la simulación debe coincidir aproximadamente con el salto temporal en la columna de datos del fichero Excel, por lo que se debe acudir a la pestaña “Control Cards” de TRNSYS y ajustar el paso temporal de la simulación de forma manual. Finalmente, la programación y el funcionamiento del componente Excel quedaría representado mediante la siguiente rutina de cálculo:

t (s)	I_{DRON} (A)	I_{PEMFC} (A)	I_{LiPo} (A)	I_{Neta_LiPo} (A)
...



$$IF (t_{INICIO} \leq k \leq t_{FINAL}) :$$

$$I_{DRON} = BUSCARV(k; columna 1: columna 5; columna 2) ;$$

$$I_{PEMFC} = BUSCARV(k; columna 1: columna 5; columna 3) ;$$

$$I_{LiPo} = BUSCARV(k; columna 1: columna 5; columna 4) ;$$

$$I_{Neta_LiPo} = BUSCARV(k; columna 1: columna 5; columna 5) ;$$

En el inicio de la simulación, el valor del contador temporal coincide con el tiempo inicial ($k = t_{INICIO}$) pero después será igual al contador de entrada proporcionado por el elemento “Control Simulación” ($k = k_{ENT}$). En el caso de que el tiempo total de la simulación sea mayor que el periodo temporal establecido por el usuario ($k > t_{FINAL}$), automáticamente se asignan valores nulos a la demanda energética de cada uno de los componentes del sistema híbrido.

6.2.3 Cálculo del consumo del combustible de hidrógeno

Una de las variables de salida más importantes que proporciona la pila de combustible PEMFC para determinar la autonomía de vuelo del dron es el caudal de hidrógeno consumido (Q_{H_2}). Sin embargo, el componente “Integración Caudal-Volumen” (*Utility/Quantity Integrator/Type24*) permite realizar una integración temporal del caudal volumétrico de hidrógeno consumido por la pila de combustible para obtener el volumen total de hidrógeno necesario (V_{H_2}) en el depósito de almacenamiento.

Según la programación interna del componente para la pila de combustible PEMFC (*Type170*), el caudal de hidrógeno consumido se proporciona expresado en condiciones normales de presión y temperatura ($p_N = 1atm$; $T_N = 0^\circ C \equiv 273K$). Por lo tanto, el componente “Condiciones Almacenamiento H_2 ” permite aprovechar el caudal volumétrico de hidrógeno expresado en condiciones normales para calcular el consumo de hidrógeno en las condiciones de almacenamiento del tanque de combustible.

Conociendo el caudal volumétrico de hidrógeno consumido en condiciones normales ($Q_{H_2}^{CN}$), se puede determinar directamente el flujo molar de hidrógeno consumido (F_{H_2}) aplicando la ecuación de los gases ideales, puesto que el hidrógeno presenta un factor de compresibilidad unitario ($Z_N=1$):

$$F_{H_2} \left(\frac{mol}{h} \right) = \frac{p_N(atm) \cdot Q_{H_2}^{CN} \left(\frac{m^3}{h} \right) \cdot 10^3}{Z_N \cdot R_G \left(\frac{atm \cdot L}{mol \cdot K} \right) \cdot T_N(K)} \quad (Ec.58)$$

Posteriormente, teniendo en cuenta las condiciones de almacenamiento del hidrógeno en relación con la presión y la temperatura en el depósito de combustible (P_{H_2} ; T_{H_2}), se puede calcular el consumo real del combustible de hidrógeno (Q_{H_2}) empleando la ecuación de los gases ideales. Sin embargo, puesto que el hidrógeno se encuentra altamente presurizado en el depósito de almacenamiento, se debe incluir la corrección que supone la desviación del comportamiento ideal mediante el factor de compresibilidad del hidrógeno (ETSII-UPV, 2015) en las condiciones de almacenamiento del depósito de combustible (Z_{H_2}):

$$Q_{H_2} \left(\frac{L}{h} \right) = \frac{Z_{H_2} \cdot F_{H_2} \left(\frac{mol}{h} \right) \cdot R_G \left(\frac{atm \cdot L}{mol \cdot K} \right) \cdot T_{H_2}(K)}{p_{H_2}(atm)} \quad (Ec.59)$$

Paralelamente, a partir del volumen total de hidrógeno requerido en condiciones normales ($V_{H_2}^{CN}$), se obtienen los moles totales de hidrógeno consumidos (N_{H_2}) mediante la ecuación de los gases ideales:

$$N_{H_2}(mol) = \frac{p_N(atm) \cdot V_{H_2}^{CN} (m^3) \cdot 10^3}{Z_N \cdot R_G \left(\frac{atm \cdot L}{mol \cdot K} \right) \cdot T_N(K)} \quad (Ec.60)$$

Por último, teniendo en cuenta las condiciones de almacenamiento del hidrógeno, se puede calcular también el volumen real del combustible de hidrógeno (V_{H_2}) mediante la ecuación de los gases ideales corregida mediante el factor de compresibilidad del hidrógeno en las condiciones de almacenamiento:

$$V_{H_2}(L) = \frac{Z_{H_2} \cdot N_{H_2}(mol) \cdot R_G \left(\frac{atm \cdot L}{mol \cdot K} \right) \cdot T_{H_2}(K)}{p_{H_2}(atm)} \quad (Ec.61)$$

7. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DINÁMICA DEL SISTEMA HÍBRIDO ELÉCTRICO

A continuación, se procede con el análisis de la respuesta dinámica del sistema híbrido eléctrico (formado por una pila de combustible PEMFC y una batería LiPo) frente a una curva de demanda semiempírica diseñada específicamente para un dron de gran tamaño (15-20 kg).

En primer lugar, se requiere modelar la demanda energética del dron en función de sus características, especialmente en lo referente a su potencia máxima en las fases de despegue/aterrizaje y a la potencia promedio de sustentación durante la fase de vuelo estacionario. A partir de la información extraída de las necesidades energéticas del dron, se establece un punto óptimo de funcionamiento para la pila de combustible PEMFC que permita obtener, como mínimo, la potencia promedio de sustentación para la aeronave durante la fase de vuelo estacionario. Así pues, el dimensionamiento de la batería LiPo se realiza con el criterio de minimizar su tamaño y peso, pero garantizando una capacidad eléctrica suficiente para alcanzar los picos de demanda durante el despegue y aterrizaje.

El punto óptimo de funcionamiento de la pila de combustible PEMFC representa un valor de intensidad de corriente que permite producir la máxima potencia eléctrica en el dispositivo electroquímico. Por tanto, la pila de combustible PEMFC se encuentra trabajando continuamente en un régimen constante alrededor del punto óptimo de máxima potencia. Consecuentemente, el punto de operación para la batería LiPo viene determinado por la fase de vuelo del dron y representa el valor de intensidad de corriente complementario al régimen constante de la pila de combustible PEMFC que permite cubrir la demanda eléctrica del dron. Sin embargo, el dimensionamiento de la batería LiPo consiste en determinar el número de celdas en serie y la capacidad energética necesaria para alcanzar la potencia máxima de despegue o aterrizaje del dron, pero cumpliendo con una condición de carga mínima.

Posteriormente, el convertidor de potencia DC/DC se justifica para adaptar la tensión de salida de la pila de combustible PEMFC a la tensión de salida de la batería LiPo. En este caso, el convertidor DC/DC presenta una configuración reductora, ya que el número de celdas seleccionadas para el dimensionamiento de la batería queda limitado por el rango de tensión de la pila de combustible, lo que implica que la tensión de la pila PEMFC es siempre superior a la tensión de la batería LiPo. Teniendo en cuenta la corriente eléctrica que debe enviar la etapa de potencia (pila PEMFC + convertidor DC/DC) hacia el bus de alimentación de los sistemas de vuelo del dron, tras calcular las pérdidas de potencia en función de la potencia eléctrica de salida, se consigue determinar la intensidad de corriente de entrada al convertidor de potencia DC/DC que debe generar la propia pila de combustible PEMFC.

Finalmente, conociendo la intensidad de corriente que proporciona la pila de combustible PEMFC, es posible determinar el consumo de hidrógeno expresado en forma de caudal volumétrico y según las condiciones de almacenamiento en el depósito de combustible. Así pues, considerando distintos tiempos de vuelo en el entorno de simulación, es posible obtener el volumen total de hidrógeno requerido para alcanzar una determinada autonomía, lo que permite en cierto modo estimar el alcance o el recorrido máximo que puede realizar el dron.

Al combinar las intensidades de corriente y las potencias eléctricas que proporcionan tanto la pila de combustible PEMFC como la batería LiPo, se comprueba si la configuración del esquema de control establecido para el sistema híbrido eléctrico es capaz de abastecer las necesidades energéticas para un dron de gran tamaño.

7.1 Curva de Demanda del DRON

En el modelado de las curvas de demanda semiempíricas del dron, el factor más determinante resulta ser la masa máxima de despegue (*Maximum Take-Off Weight, MTOW*). Como se ha mencionado anteriormente, los drones sanitarios o agrícolas presentan un gran tamaño, alcanzando perfectamente los 15 kg y permitiendo transportar una carga máxima de 5 kg, lo que implica un valor para el MTOW de 20 kg aproximadamente.

Por lo tanto, el parámetro determinante para calcular la potencia máxima consumida por el dron durante las fases de despegue y aterrizaje es el consumo específico del vehículo (expresado en W/kg). Aunque distintas fuentes consultadas señalan que el consumo específico para un dron cuadricóptero de gran tamaño ronda los 150 W/kg, se ha decidido consultar las especificaciones técnicas de los modelos comerciales de los drones agrícolas de la marca asiática DJI, concretamente la información referente a las series *AGRAS T10* y *AGRAS T16* por tener un tamaño más similar a nuestro dron:

Tabla 17. Consumo específico de los drones agrícolas *AGRAS T10* y *AGRAS T16* (DJI).

Modelo UAV	Masa vacío (kg)	MTOW (kg)	Consumo vuelo estacionario (W)	Consumo máximo MTOW (W)
AGRAS T10	17	26	3000	3700
AGRAS T16	25	40	4600	5600

Como se puede observar en la Tabla 17, tanto la potencia máxima de despegue y aterrizaje como la potencia promedio en la fase de vuelo estacionario, se corresponden con los consumos energéticos del dron cuando se encuentra con la carga máxima (MTOW). Por tanto, se puede obtener el consumo específico de los drones agrícolas durante las fases de despegue/aterrizaje y durante el vuelo estacionario:

- Dron agrícola *AGRAS T10* (DJI – MTOW 26kg):

$$\text{Consumo}_{MTOW} \left(\frac{W}{kg} \right) = \frac{\text{Consumo MTOW (W)}}{MTOW (kg)} = 142,31 \frac{W}{kg}$$

$$\text{Consumo}_{estacionario} \left(\frac{W}{kg} \right) = \frac{\text{Consumo Estacionario (W)}}{MTOW (kg)} = 115,38 \frac{W}{kg}$$

- Dron agrícola *AGRAS T16* (DJI – MTOW 40kg):

$$\text{Consumo}_{MTOW} \left(\frac{W}{kg} \right) = \frac{\text{Consumo MTOW (W)}}{MTOW (kg)} = 140 \frac{W}{kg}$$

$$\text{Consumo}_{estacionario} \left(\frac{W}{kg} \right) = \frac{\text{Consumo Estacionario (W)}}{MTOW (kg)} = 115 \frac{W}{kg}$$

A la vista de los resultados obtenidos, se puede establecer un consumo específico máximo para las fases de despegue y aterrizaje de unos 140-150 W/kg, mientras que ese consumo específico disminuye considerablemente hasta los 115 W/kg durante la fase de vuelo estacionario.

Así pues, considerando la carga máxima para nuestro dron sanitario o agrícola (MTOW = 20kg), se determina un pico de potencia máximo de 3000W en las fases de despegue y aterrizaje, así como un consumo promedio de unos 2300W durante la fase de vuelo estacionario.

Debido a las características y los requerimientos del sistema híbrido eléctrico empleado como fuente de alimentación para el dron, se requiere una pila de combustible PEMFC con una configuración de cátodo abierto que permita tomar el aire atmosférico como agente oxidante. Por lo tanto, se recurre a los modelos comerciales disponibles según la marca *HES Energy Systems* para comprobar el rango de potencia y voltaje que alcanzan. Se decide seleccionar el modelo de pila de combustible PEMFC que presente una potencia máxima suficiente para cubrir el consumo promedio del dron durante la fase de vuelo estacionario (2000-2300W). La batería LiPo se selecciona para permitir que el sistema híbrido sea capaz de alcanzar los picos de potencia máximos (3000W), teniendo en cuenta factores determinantes como el ratio de descarga y el rango de voltaje según el número de celdas en serie.

Posteriormente, a partir del rango de tensión que alcanzan tanto la pila de combustible PEMFC como la batería LiPo, es posible traducir directamente las necesidades energéticas del dron (expresadas inicialmente en términos de potencia) y convertirlas en una demanda de intensidad de corriente eléctrica. A modo representativo, en la Figura 46 se presentan la curva de demanda del dron para el tiempo de simulación equivalente a 1 hora de vuelo total:

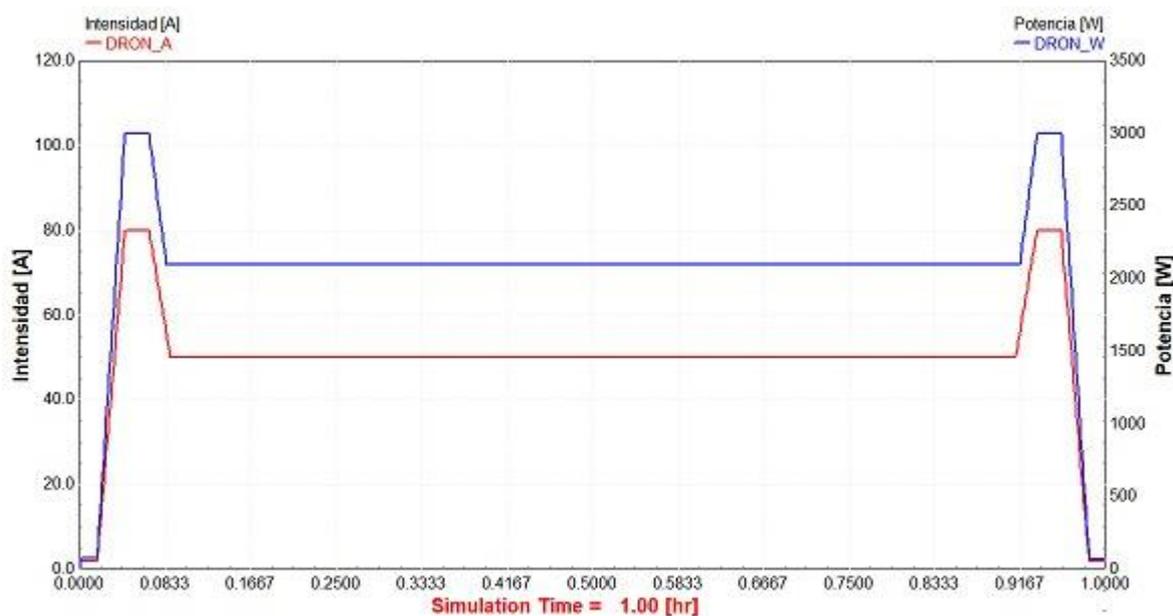


Figura 46. Curva de demanda semiempírica de un dron de gran tamaño – 20kg (1h).

Como se puede observar, los picos máximos de demanda del dron se alcanzan durante las fases de despegue y aterrizaje, lo que supone unos 3000W de potencia y unos 80A de intensidad de corriente. Del mismo modo, la demanda promedio del dron durante la fase de vuelo estacionario se establece entorno a los 2100W de potencia y unos 50A de intensidad de corriente. Para el encendido y apagado de los sistemas de arranque del dron, se demanda una intensidad de corriente de 2A en los instantes iniciales y finales de la simulación, lo que supone alrededor de unos 70-80W de potencia eléctrica.

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería” para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

El modelado de las respuestas dinámicas que debe proporcionar la etapa de potencia (PEMFC+DC/DC) y la batería LiPo se ha realizado en base a la justificación del apartado 6.2.1. En términos de intensidad de corriente, se establece el punto óptimo de funcionamiento en régimen constante para la pila de combustible PEMFC y se utiliza la batería LiPo como sistema auxiliar de soporte para alcanzar los picos máximos de consumo durante las fases de despegue y aterrizaje del dron, tal y como puede observarse en la siguiente Figura 47 para un tiempo de simulación equivalente a 1 hora de vuelo total:



Figura 47. Modelado de la respuesta del sistema híbrido "PEMFC + LiPo" (1h).

Al comienzo de la simulación ($t < 1\text{min}$), la batería LiPo se encarga de proporcionar los 2A necesarios para iniciar los sistemas de arranques del dron y abastecer el balance de planta que requiere la pila de combustible PEMFC. Posteriormente, la alimentación del balance de planta se autoabastece con la propia corriente que genera la pila de combustible PEMFC.

La etapa de potencia (PEMFC+DC/DC) alcanza un régimen constante de operación sobre los 51A, mientras que la batería LiPo proporciona los 30A restante para alcanzar los picos máximos de 80A del dron durante las fases de despegue y aterrizaje. En este sentido, se observa que durante la fase de vuelo estacionario, la etapa de potencia se encuentra generando un ligero excedente energético en forma de corriente eléctrica (+1A) para la recarga de la batería LiPo.

7.2 Pila de Combustible PEMFC (Aire-H₂)

7.2.1 Dimensionamiento y selección de modelo comercial

A continuación, se procede con el dimensionamiento del componente principal para el sistema híbrido eléctrico diseñado, como es el caso de la pila de combustible PEMFC de cátodo abierto que emplea aire atmosférico como agente oxidante y como fluido de refrigeración. Posteriormente, de acuerdo con los resultados obtenidos tras el dimensionamiento óptimo de este componente, se consultarán catálogos de fabricantes que dispongan de pilas de combustible PEMFC con una configuración de cátodo abierto (Aire-H₂) y se seleccionará el modelo comercial disponible cuyas características técnicas cumplan con los requerimientos mínimos exigibles del sistema híbrido, tratando de cumplir siempre con el criterio de minimización de tamaño y peso.

La pila de combustible PEMFC debe presentar una configuración en cátodo abierto para permitir la captura del aire atmosférico directamente del ambiente durante las maniobras de vuelo, por lo que el fabricante HES (Hydrogen Energy Systems) presenta una amplia experiencia en el diseño y fabricación de pilas de combustible PEMFC que funcionan con hidrógeno de pureza (>99%) y aire atmosférico.

Teniendo en cuenta que la potencia máxima que debe alcanzar la pila de combustible PEMFC debe ser suficiente para cubrir el consumo promedio durante la fase de vuelo estacionario del dron (2200 W) y destinar un mínimo excedente eléctrico para la recarga de la batería LiPo, se selecciona el modelo comercial *AEROSTAK – 2000 (HES)* cuyas características técnicas se presentan a continuación en la siguiente Tabla 18:

Tabla 18. Especificaciones técnicas de la pila de combustible PEMFC – *AEROSTAK 2000 (HES)*.

AEROSTAK 2000 – ULTRA LIGHT FUEL CELLS



Número de celdas	62
Masa Total del Sistema	3800 g
Rango de Potencia Óptimo	2000 – 2300 W
Rango de Voltaje	37 – 60 V
Rango de Intensidad	0 – 50 A
Presión de Entrada del H ₂	0,6 – 0,8 bar

7.2.2 Curvas de polarización (I-V, I-P)

A partir de las especificaciones técnicas del modelo *AEROSTAK-2000 (HES)* recogidas en la Tabla 18, se establecen los parámetros internos y las variables de entrada al módulo TRNSYS del componente para la pila de combustible PEMFC (*Type170*).

Así pues, estableciendo el número de celdas ($N_{CELLS} = 62$) y la presión de suministro del hidrógeno ($P_{H_2} = 0,8\text{bar}$), se debe asumir una temperatura de operación que proporcione un tiempo de arranque rápido (<1min) sin comprometer la integridad de la membrana polimérica ($T_{STACK} = 50^{\circ}\text{C}$). Al desconocer parámetros característicos relacionados con el área de electrodo o el grosor de la membrana polimérica, se mantienen sus valores por defecto ($A_{PEM} = 232\text{ cm}^2$; $T_{PEM} = 0,0118\text{ cm}$).

Según el módulo TRNSYS, las curvas de polarización características para una pila de combustible PEMFC que se encuentra en dichas condiciones de operación, se presenta en la siguiente Figura 48:

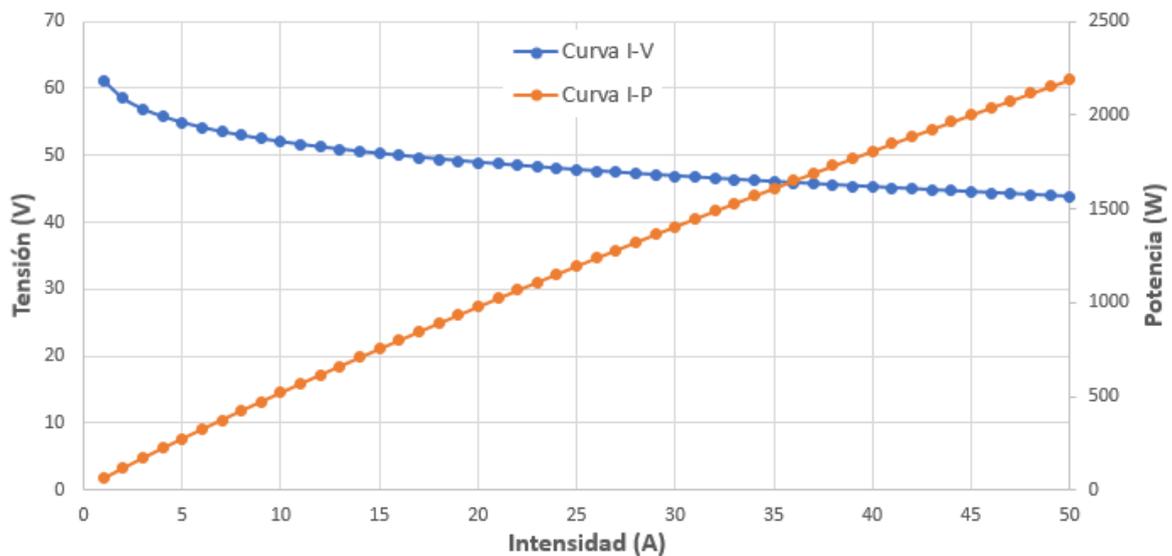


Figura 48. Curvas de polarización para la pila de combustible PEMFC (TRNSYS).

Como se puede observar a intensidades de corriente muy bajas (<1A), el módulo TRNSYS para la pila de combustible PEMFC (*Type170*) proporciona una tensión ligeramente superior al límite máximo que indica el fabricante en sus especificaciones técnicas (>60 V). Esto se produce por las pérdidas a circuito abierto (*Open Circuit Voltage, OCV*) que no se han contemplado en las ecuaciones del modelo teórico, pero que sí que aparecen en el comportamiento real de las pilas de combustible PEMFC debido habitualmente al efecto “crossover” provocado por la difusión de los gases reactivos a través de la membrana polimérica empleada como electrolito sólido.

Por su parte, también es posible apreciar que el módulo TRNSYS para la pila de combustible PEMFC proporciona unos valores mínimos de tensión notablemente superiores al límite inferior que indica el fabricante en sus especificaciones técnicas (>37 V). Sin duda alguna, esta condición viene a confirmar la importancia que tienen las pérdidas de tensión debido a la limitación por transferencia de materia (también conocida como polarización por concentración) en el funcionamiento real de una pila de combustible PEMFC, ya que tampoco han sido incluidas en las ecuaciones del modelo teórico.

7.2.3 Respuesta PEMFC (Tensión – Potencia)

Tras el modelado de la respuesta que debe proporcionar la etapa de potencia (PEMFC + DC/DC) frente a la curva de demanda del dron, junto con la determinación del punto óptimo de funcionamiento de la pila de combustible PEMFC bajo ciertas condiciones de operación, se obtiene la siguiente Figura 49 donde aparecen representadas las prestaciones en servicio que ofrece la pila de combustible PEMFC durante un tiempo de simulación equivalente a 1 hora de vuelo total:

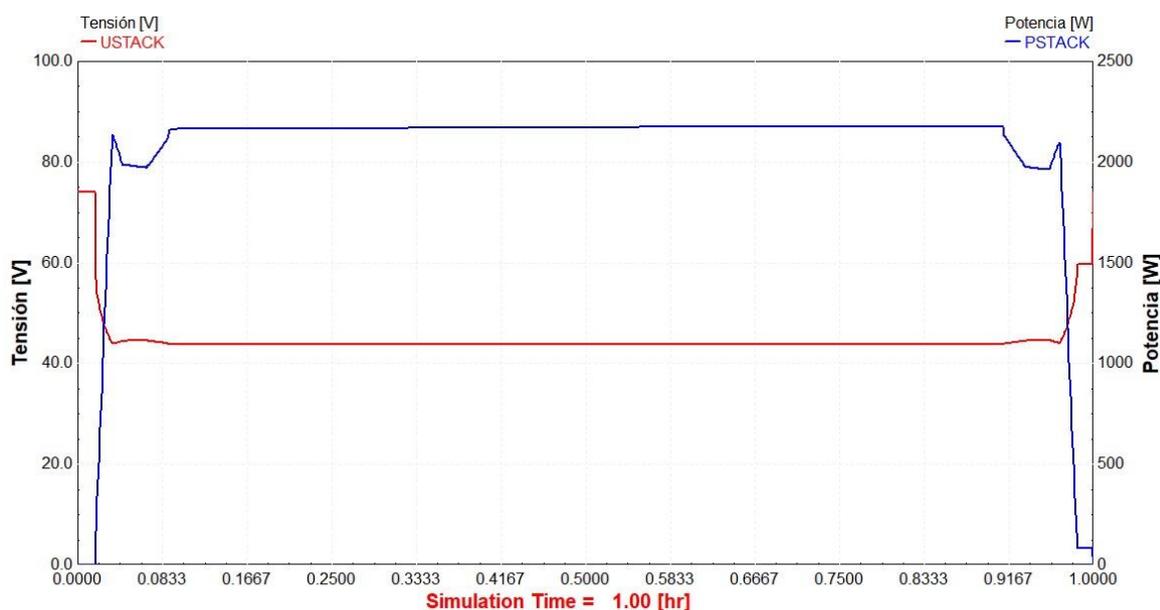


Figura 49. Respuesta dinámica de la pila de combustible PEMFC (1h).

Como se puede observar, el valor de tensión que proporciona la pila de combustible PEMFC resulta prácticamente constante, manteniéndose siempre dentro del rango de los 45-50V. No obstante, el análisis de la respuesta que ofrece la pila de combustible PEMFC resulta más interesante desde el punto de vista de la potencia eléctrica que proporciona al bus de alimentación del dron.

En este sentido, se puede apreciar que durante la fase de vuelo estacionario, la pila de combustible PEMFC es capaz de generar los 2100W de potencia que requiere un dron de gran tamaño (20 kg) para mantenerse en sustentación y permitiendo también realizar los desplazamientos horizontales. Sin embargo, durante las fases de despegue y aterrizaje, se observa que la potencia entregada disminuye sensiblemente debido a la acción reductora del convertidor de potencia DC/DC.

La acción reductora del convertidor de potencia DC/DC pretende reducir la tensión que proporciona la pila de combustible PEMFC, de forma que la tensión de salida en la etapa de potencia (PEMFC + DC/DC) coincide con la tensión que ofrece la batería LiPo. En las fases de despegue y aterrizaje, la batería LiPo permite alcanzar los picos máximos de demanda del dron, por lo que se encuentra entregando una corriente eléctrica y su voltaje se va reduciendo progresivamente debido al proceso de descarga.

Por tanto, debido a la descarga progresiva de la batería LiPo durante las fases de despegue y aterrizaje, se produce una mayor acción reductora en el convertidor de potencia DC/DC que se traduce directamente en una reducción de la corriente y potencia eléctrica que debe proporcionar la pila de combustible PEMFC a la entrada de la etapa de potencia (PEMFC + DC/DC).

7.3 Batería LiPo

7.3.1 Dimensionamiento y selección de modelo comercial

A continuación, se procede con el dimensionamiento de la batería LiPo teniendo en cuenta el rango de voltaje que proporciona la pila de combustible PEMFC. Para ello, se consultarán los catálogos de fabricantes y se seleccionará el modelo comercial disponible cuyas características técnicas cumplan con los requerimientos mínimos exigibles del sistema híbrido, tratando de cumplir siempre con el criterio de minimización de tamaño y peso.

Para la selección de la batería LiPo, en las especificaciones técnicas del modelo comercial para la pila de combustible *HES – AEROSTAK 2000* se contempla la posibilidad de incorporar una batería LiPo 10S para formar un sistema híbrido eléctrico. Específicamente, se sugiere una batería LiPo 10S porque presenta una tensión nominal de 37V que se encuentra dentro del rango de tensión que proporciona la pila de combustible PEMFC según las características recogidas en la Tabla 18 anterior. Además, el hecho de combinar una pila de combustible PEMFC y una batería LiPo que presentan un rango de voltajes compatibles y muy similares, facilita sensiblemente el modelado predictivo debido a la acción reductora del convertidor de potencia DC/DC.

Teniendo en cuenta que la batería LiPo debe permitir alcanzar los picos máximos de consumo eléctrico del dron durante las fases de despegue/aterrizaje (3000 W) y que la pila de combustible PEMFC se encuentra operando en régimen constante proporcionando una potencia energética correspondiente al consumo promedio del dron durante la fase de vuelo estacionario (2100 W), se puede concluir que la batería LiPo debe presentar una capacidad energética y un ratio de descarga suficiente para proporcionar alrededor de 1000 W de potencia eléctrica durante las fases de despegue/aterrizaje, pero manteniendo una fracción de carga mínima del 20-30% tras el vuelo completo del dron.

En primer lugar, debido a las características inherentes a las propias baterías LiPo, el ratio de descarga no resulta un factor determinante para la selección del modelo comercial, ya que las baterías LiPo presentan ratios de descarga excesivamente elevados (<100C) que les permiten proporcionar corrientes eléctricas muy elevadas durante un corto periodo de tiempo. Por tanto, el dimensionamiento de la batería LiPo 10S consiste únicamente en determinar la capacidad energética mínima necesaria para poder cumplir con la demanda eléctrica del dron.

Para ello, se considera el escenario más desfavorable durante las maniobras de vuelo del dron, que consiste en una situación de vuelo donde no se produce la recarga de la batería LiPo durante la fase de consumo estacionario. Esta situación equivale a cumplir estrictamente tanto con la fase de arranque del sistema (1min | 2A) como con la fase de despegue y aterrizaje (3 min | 0 – 30 A), tratando de obtener una fracción mínima de carga final del 20%. Finalmente, se determina que la capacidad energética mínima que cumple con el criterio sobre la fracción mínima de carga es de 3000 mA·h.

Evidentemente, en una situación normal de vuelo donde se destina un ligero excedente energético procedente de la etapa de potencia (PEMFC+DC/DC) para la recarga de la batería LiPo, se alcanzan fracciones de carga notablemente superiores a la fracción mínima de carga. En este sentido, otro parámetro de interés para el modelado y la configuración del sistema híbrido eléctrico consiste en determinar el valor de dicho excedente energético que produce la etapa de potencia para realizar la recarga de la batería LiPo. Las baterías LiPo admiten ratios de carga bastante más reducidos (<5C), aunque tampoco interesa destinar demasiada corriente eléctrica para la recarga de la batería porque implicaría un mayor consumo de hidrógeno por parte de la pila de combustible PEMFC.

Por tanto, tras analizar diversos escenarios con distintos valores de corrientes de carga, se concluye que un excedente eléctrico de +1A resulta más que suficiente para recargar la batería LiPo tras la fase de despegue del dron, obteniendo así una fracción de carga suficiente para poder completar la fase de aterrizaje con un cierto margen de seguridad razonable. Además, cuanto mayor sea el tiempo de vuelo total del dron, mayor será la duración de la fase de vuelo estacionario para realizar la recarga, lo que implicará una mayor fracción de carga final para la batería.

Consultando los catálogos comerciales de diversos fabricantes de baterías LiPo, se decide seleccionar el modelo *HRB GRAPHENE 10S - 3000* por su gran ligereza y fiabilidad. El factor más determinante a la hora de realizar el diseño óptimo del sistema híbrido “pila de combustible PEMFC + batería LiPo” reside en el dimensionamiento de la batería, ya que es importante reducir al máximo posible el tamaño y el peso extra que supone la batería LiPo para permitir el transporte de una mayor carga adicional sin comprometer la demanda energética del dron. Así pues, las características técnicas de la batería LiPo seleccionada se presentan en la siguiente Tabla 19:

Tabla 19. Especificaciones técnicas de la batería LiPo - HRB GRAPHENE 10S 3000.

HRB – GRAPHENE 10S 3000 mA·h (LiPo Battery)



Número de celdas	10S (5S + 5S)
Capacidad Energética	3000 mA·h
Voltaje Nominal	37 V
Ratio de Carga Máximo	2C (+6A)
Ratio de Descarga Máximo	100C (-300A)
Masa Neta	876 g

7.3.2 Curvas de Carga-Descarga

A continuación, se pretende ilustrar las curvas de carga y descarga para la batería LiPo, empleando como parámetros internos del módulo TRNSYS las características técnicas presentadas en la Tabla 19. Como recordatorio, es importante tener en cuenta que la tensión nominal de una celda LiPo es de 3,7V aproximadamente al 50-70% de su capacidad máxima. Por otro lado, para proteger a la celda LiPo de incendios y explosiones, se establece una tensión máxima de 4,2V cuando alcanza el 100% de su capacidad, mientras que también se asigna una tensión mínima de 3V para evitar la descarga completa y no comprometer la tensión máxima que se alcanzará en los futuros ciclos de carga y descarga.

Considerando una batería LiPo 10S de 3000 mA·h de capacidad máxima y estableciendo una corriente de carga de +1A (partiendo de un estado de carga inicial del 0%) y una corriente de descarga de -1A (partiendo de un estado de carga inicial del 100%), se obtienen las siguientes curvas de carga-descarga que representan la evolución temporal de la tensión de celda y de la fracción de carga:

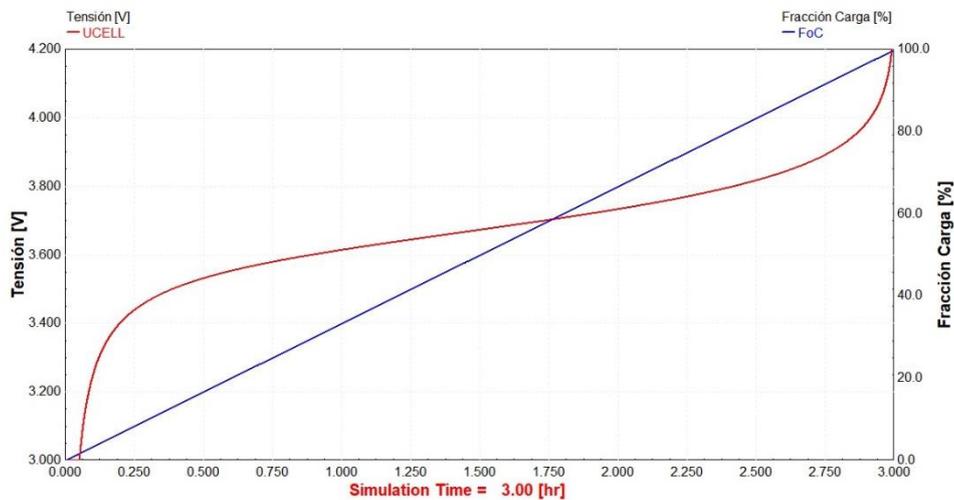


Figura 50. Curva de Carga para la batería LiPo.

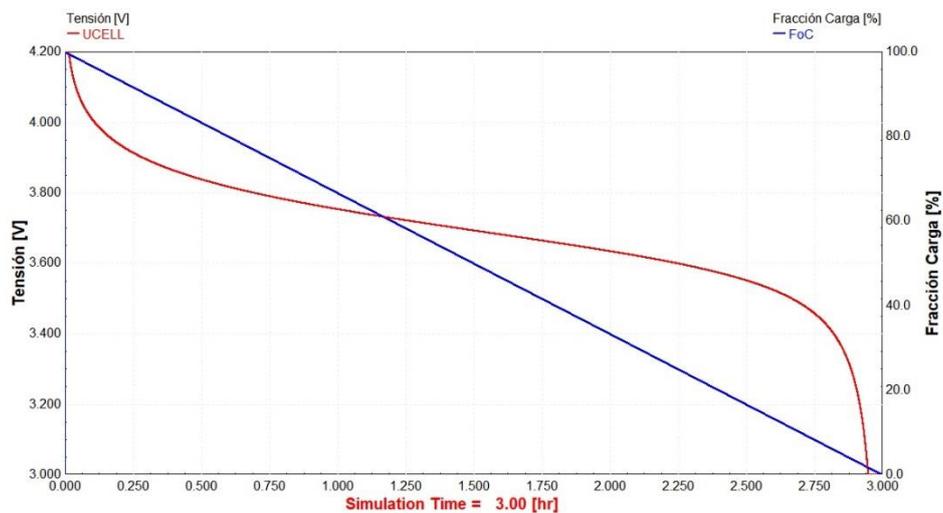


Figura 51. Curva de Descarga para la batería LiPo.

7.3.3 Respuesta LiPo (Tensión - Potencia)

Tras el modelado de la respuesta que debe proporcionar la batería LiPo frente a la curva de demanda del dron, gracias a la determinación de la capacidad energética mínima y la corriente eléctrica de carga óptimas, se obtiene la siguiente Figura 52 donde aparecen representadas las prestaciones en servicio que ofrece la batería LiPo 10S durante un tiempo de simulación equivalente a 1 hora de vuelo total:

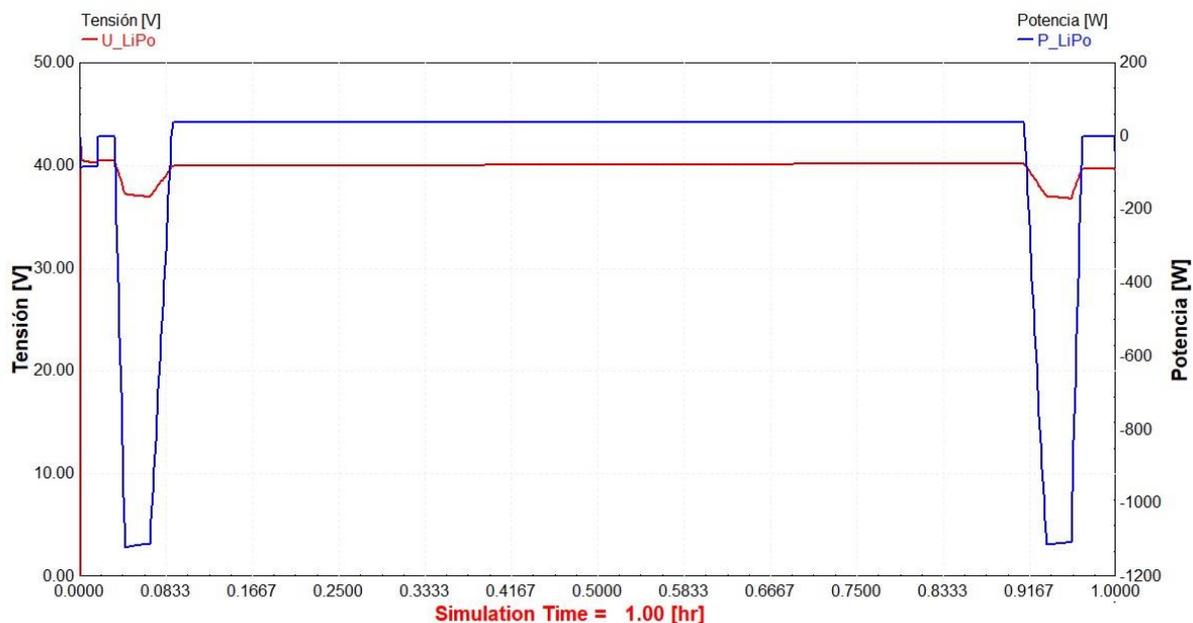


Figura 52. Respuesta dinámica de la batería LiPo (1h).

Como se puede apreciar, el valor de tensión que proporciona la batería LiPo resulta prácticamente constante, manteniéndose alrededor de los 40V. Por tanto, se comprueba que el rango de tensión que proporciona la pila de combustible PEMFC resulta ser superior a la tensión de la batería LiPo en todo momento, por lo que se justifica la necesidad de incluir un convertidor de potencia DC/DC con una configuración reductora para adaptar la tensión de salida de la pila de combustible PEMFC al rango de tensión que proporciona la batería LiPo.

Sin embargo, nuevamente sucede que el análisis de la respuesta que ofrece la batería LiPo también resulta más interesante desde el punto de vista de la potencia eléctrica que proporciona al bus de alimentación del dron. En este sentido, se observa que durante la fase de arranque de los sistemas de vuelo del dron y el balance de planta de la pila de combustible PEMFC, la batería proporciona una potencia eléctrica de 80W que equivale a una corriente de descarga de 2A.

La finalidad principal de la batería LiPo consiste en permitir al sistema híbrido alcanzar los picos de demanda de 3000W que necesita el dron para realizar las fases de despegue y aterrizaje. Teniendo en cuenta que la pila de combustible PEMFC opera en régimen estacionario aportando aproximadamente 2000W, necesariamente la batería LiPo tiene que entregar los 1000W de potencia eléctrica restante. Esto se observa claramente en la Figura 52, siendo posible identificar un notable descenso en la tensión de la batería LiPo debido al proceso de descarga asociado con las fases de despegue y aterrizaje.

Por último, cabe destacar que durante la fase de vuelo estacionario, la batería LiPo recibe una potencia eléctrica de 40W correspondiente con la corriente de carga de 1A.

7.3.4 Respuesta LiPo (Estado Carga – Fracción Carga)

Nuevamente, mediante el modelado de la respuesta que debe proporcionar la batería LiPo frente a la curva de demanda del dron y gracias a la determinación tanto de la capacidad energética mínima como de la corriente de carga óptima, se obtiene la siguiente Figura 53 donde se puede apreciar la evolución temporal del estado de carga para la batería LiPo 10S con capacidad máxima de 3000 mA·h durante un tiempo de simulación equivalente a 1 hora de vuelo total:

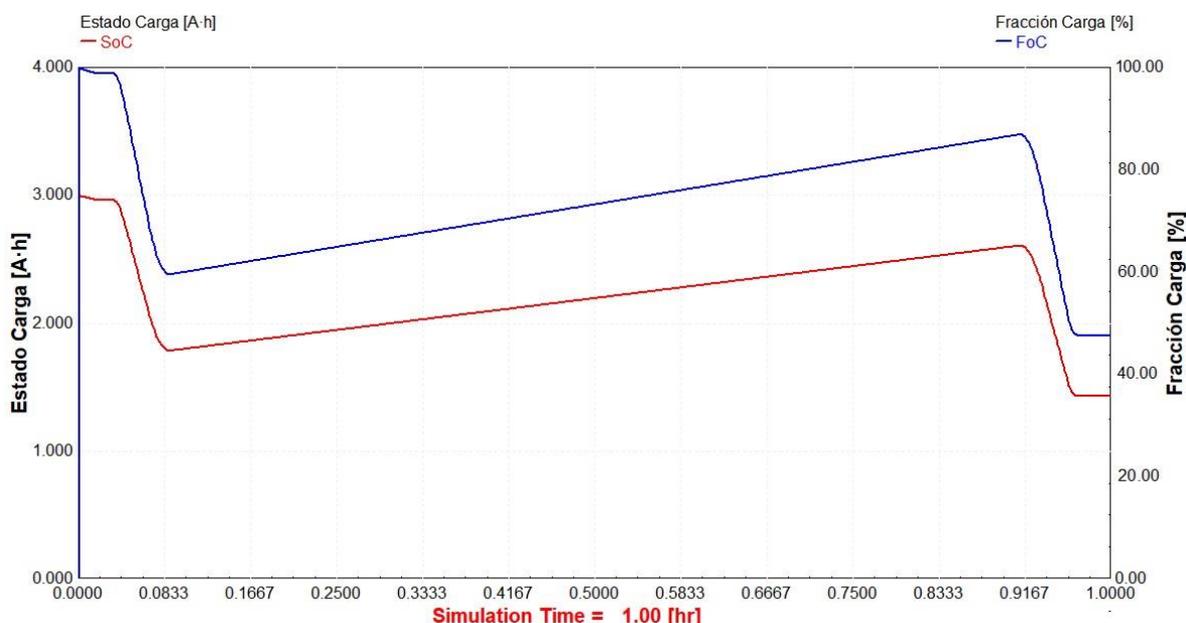


Figura 53. Estado de carga de la batería LiPo (1h).

En primer lugar, partiendo de un estado de carga inicial del 100% ($3000 \text{ mA}\cdot\text{h} \equiv 3 \text{ A}\cdot\text{h}$), se aprecia un ligero proceso de descarga hasta el 98% debido a la fase de arranque de los sistemas de vuelo del dron y del abastecimiento del balance de planta de la pila de combustible PEMFC de cátodo abierto.

Posteriormente, se procede con la fase de despegue del dron donde se produce una descarga drástica en la batería LiPo, alcanzando finalmente un estado de carga alrededor del 60% ($1800 \text{ mA}\cdot\text{h} \equiv 1,8 \text{ A}\cdot\text{h}$). En ese instante, si no se destinase ninguna corriente eléctrica para la recarga de la batería LiPo antes de proceder nuevamente con la fase de aterrizaje, no se cumpliría con la condición de mantener un estado de carga mínimo del 20%.

Por este motivo, durante la fase de vuelo estacionario se puede observar un gran incremento en el estado de carga de la batería LiPo debido al aporte de una corriente de carga de 1A por parte de la pila de combustible PEMFC, permitiendo así que la batería LiPo recupere parte de su capacidad energética hasta alcanzar prácticamente un 90% ($2700 \text{ mA}\cdot\text{h} \equiv 2,7 \text{ A}\cdot\text{h}$). Evidentemente, cuanto mayor sea la duración de la fase de vuelo estacionario, se conseguirá una mayor recuperación de la capacidad energética en la batería LiPo porque se estará aportando una corriente de recarga durante más tiempo.

Finalmente, se procede con la fase de aterrizaje del dron donde también se produce otra descarga drástica en la batería LiPo, alcanzando así un estado de carga al finalizar el recorrido de vuelo completo del 50% ($1500 \text{ mA}\cdot\text{h} \equiv 1,5 \text{ A}\cdot\text{h}$).

7.4 Convertidor de Potencia DC/DC

7.4.1 Pérdidas de Potencia

El convertidor de potencia DC/DC permita ajustar el rango de tensión que proporciona la pila de combustible PEMFC a la tensión de salida que presenta la batería LiPo. La ecuación teórica empleada en el modelo para el cálculo de las pérdidas de potencia en el convertidor DC/DC (Ec.53) permite identificar las resistencias eléctricas asociadas a distintos elementos constituyentes del convertidor:

$$P_{LOSS} = P_0 + \frac{U_S}{U_{OUT}} \cdot P_{OUT} + \frac{R_I}{U_{OUT}^2} \cdot P_{OUT}^2 \quad (\text{Ec.53})$$

- El término independiente (P_0) representa las pérdidas constantes asociadas al circuito de control.
- El término lineal $\left(\frac{U_S}{U_{OUT}}\right)$ se relaciona directamente con las pérdidas en los semiconductores de unión, tales como los diodos de potencia.
- El término cuadrático $\left(\frac{R_I}{U_{OUT}^2}\right)$ está asociado con las pérdidas en los transistores tipo MOSFET.

Teniendo en cuenta que la potencia de salida del convertidor ($P_{OUT} = U_{OUT} \cdot I_{OUT}$) se calcula como el producto entre la intensidad que debe proporcionar la etapa de potencia ($I_{OUT} = I_{PEMFC+DC/DC}$) y la tensión que ofrece la batería LiPo ($U_{OUT} = U_{LiPo}$), en la siguiente Figura 54 se puede observar la evolución temporal de las pérdidas de potencia en el convertidor de potencia DC/DC para un tiempo de simulación equivalente a 1 hora de vuelo total:

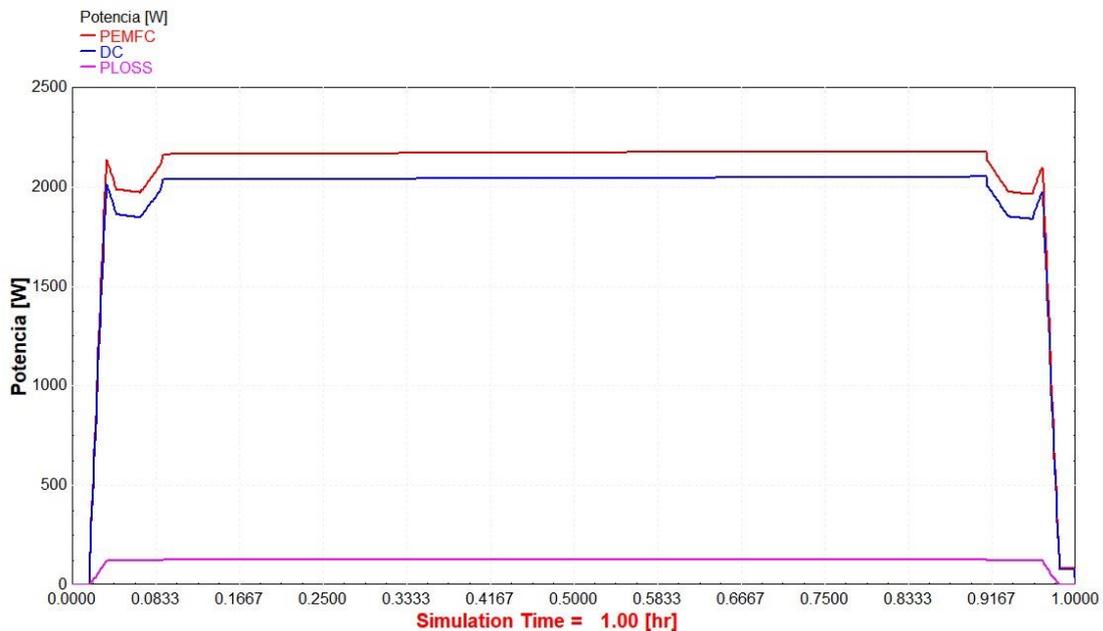


Figura 54. Pérdidas de potencia en el convertidor DC/DC (1h).

Como se puede ver, las pérdidas de potencia en el convertidor DC/DC son aproximadamente del 10%, ya que partiendo de unos 2200W de potencia eléctrica que entrega la pila de combustible PEMFC durante la fase de vuelo estacionario, se obtienen alrededor de unos 2000W en la salida de la etapa de potencia (PEMFC+DC/DC), cumpliendo así con la demanda estacionaria para un dron de 20kg.

7.4.2 Respuesta DC/DC (Tensión – Intensidad)

Sin embargo, tal y como se ha mencionado previamente, puesto que el rango de tensión de la pila de combustible PEMFC resulta ser siempre superior a la tensión que ofrece la batería LiPo, se requiere emplear un convertidor de potencia DC/DC con una configuración reductora.

La acción reductora del convertidor de potencia DC/DC se puede apreciar analizando las tensiones de entrada y salida del mismo convertidor, de acuerdo con la siguiente Figura 55. Por un lado, la tensión de entrada se corresponde con la tensión de la pila de combustible PEMFC ($U_{ENT} = U_{PEMFC}$), mientras que la tensión de salida debe ser la tensión que proporciona la batería LiPo ($U_{SAL} = U_{LiPo}$):

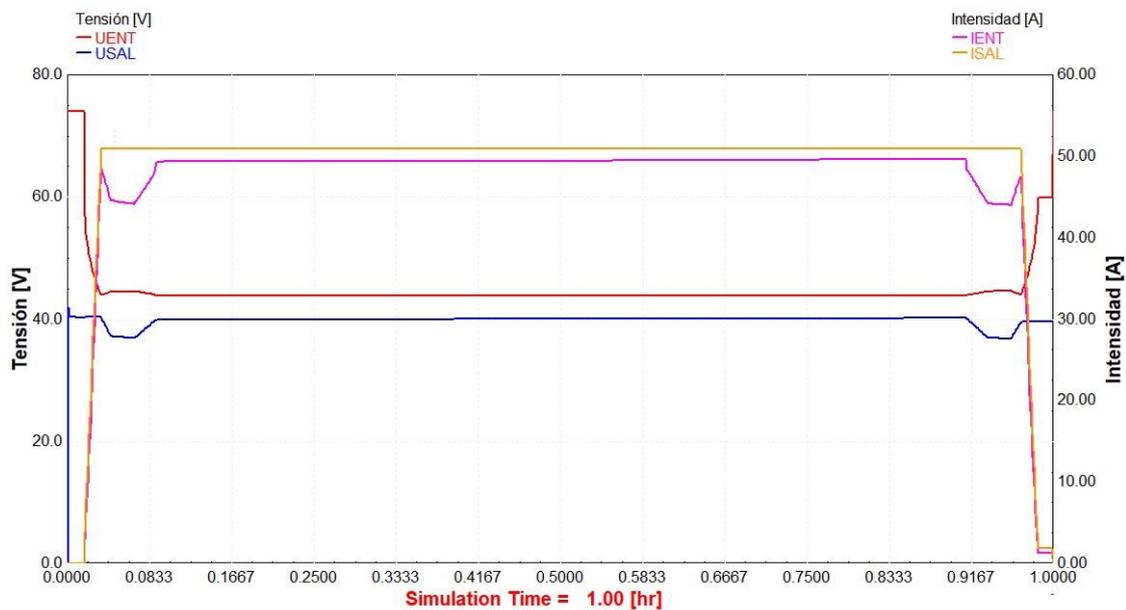


Figura 55. Acción reductora del convertidor de potencia DC/DC (1h).

Como se puede observar, al reducir la tensión de entrada al convertidor (que se corresponde con la tensión que entrega la pila de combustible PEMFC) para obtener una tensión de salida del convertidor equivalente a la tensión de la batería LiPo, se produce el efecto contrario en la intensidad de corriente.

La corriente eléctrica de salida de la etapa de potencia (PEMFC+DC/DC) viene determinada por el modelado de la respuesta del sistema híbrido frente a la curva de demanda semiempírica del dron ($I_{SAL} = I_{PEMFC+DC/DC}$), por lo que la acción reductora que introduce el convertidor DC/DC implica una menor corriente eléctrica de entrada que debe suministrar la propia pila de combustible PEMFC ($I_{ENT} = I_{PEMFC}$).

Por su parte, la acción reductora que introduce el convertidor de potencia DC/DC provoca un leve descenso en el consumo de hidrógeno que realiza la pila de combustible PEMFC durante las fases de despegue y aterrizaje. Debido al proceso de descarga, la tensión que proporciona la batería LiPo disminuye progresivamente durante las fases de despegue y aterrizaje, lo que ofrece la posibilidad de demandar una menor corriente eléctrica de entrada al convertidor DC/DC procedente de la pila de combustible PEMFC, consiguiendo así reducir ligeramente el caudal de hidrógeno requerido. Se trata pues de una característica circunstancial que no representa ninguna ventaja operacional, ya que posteriormente el consumo de hidrógeno aumentará durante el proceso de recarga de la batería LiPo.

7.5 Consumo de Combustible H₂ (Caudal – Volumen)

En primer lugar, hay que tener en cuenta que el modelado de la respuesta dinámica del sistema híbrido frente a una curva de demanda del dron permite establecer la corriente eléctrica que debe entregar la etapa de potencia (PEMFC+DC/DC). Por tanto, estableciendo una configuración reductora en el convertidor de potencia DC/DC, se puede determinar la corriente eléctrica que debe generar la pila de combustible PEMFC y así calcular el consumo de hidrógeno requerido.

Como se ha mencionado previamente, la relación entre los moles de hidrógeno consumidos y la intensidad de corriente generada por una pila de combustible PEMFC se establece mediante la expresión de Faraday (Ec.33):

$$V_{H_2} = N_{cells} \cdot \frac{I_{FC}}{n_e \cdot F} \cdot S_{H_2} \quad (\text{Ec.33})$$

En esta expresión, la razón estequiométrica del hidrógeno (S_{H_2}) tampoco interesa que sea demasiado elevada para no disparar excesivamente el consumo de combustible en el dispositivo electroquímico, por lo que se establece un valor muy próximo a la unidad.

Posteriormente, se deben considerar las condiciones de almacenamiento del hidrógeno en el depósito de combustible. Para ello, el fabricante HES aconseja emplear la gama *AEROSTAK Series F* directamente sobre cualquier modelo comercial de pila de combustible PEMFC de su catálogo. Las características técnicas de los depósitos de almacenamiento del hidrógeno se recogen en la siguiente Tabla 20:

Tabla 20. Especificaciones técnicas de los depósitos de hidrógeno - *AEROSTAK Series F*.

HES – AEROSTAK: GAMA SERIES F



Presión almacenamiento	300 bar	
Certificación	UNE-EN 12245	
Serie	Masa total	Capacidad
F2	1,7 kg	2 L
F3	2,1 kg	3 L
F6	3,6 kg	6 L
F7.2	3,8 kg	7,2 L
F9	4,8 kg	9 L

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería” para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

Finalmente, utilizando unos depósitos de almacenamiento de hidrógeno presurizados a 300 bar y asumiendo una temperatura ambiente de 25°C para el almacenamiento del combustible, se obtiene la siguiente Figura 56 como representación de la evolución temporal del caudal de hidrógeno consumido durante un tiempo de simulación equivalente a 1 hora de vuelo total:

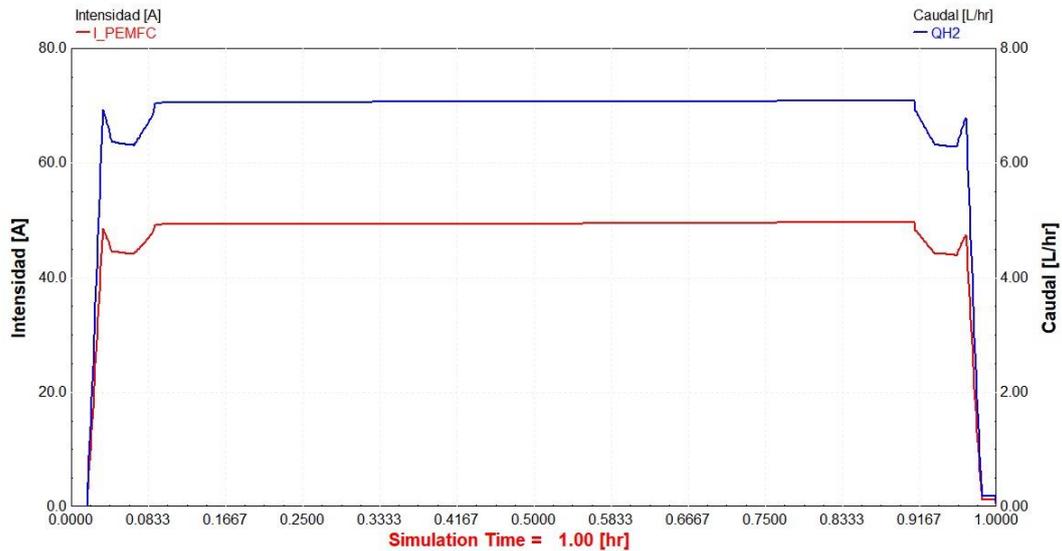


Figura 56. Relación entre la intensidad de corriente y el caudal de H₂ (1h).

En la Figura 56, se puede observar que la pila de combustible PEMFC se encuentra proporcionando una corriente eléctrica de 48A en régimen estacionario, lo que equivale a un caudal de hidrógeno promedio de 7L/h para las condiciones de almacenamiento en el interior del depósito de combustible ($P_{DepH_2} = 300\text{bar}$; $T_{DepH_2} = 293\text{K}$). En este sentido, es posible determinar el volumen total de hidrógeno mediante la integración temporal del caudal de hidrógeno consumido durante un tiempo de simulación equivalente a 1 hora de vuelo total. De acuerdo con la Figura 57, sería necesario incorporar el *modelo F7.2* de la gama *AEROSTAK Series F* para la botella de almacenamiento del H₂:

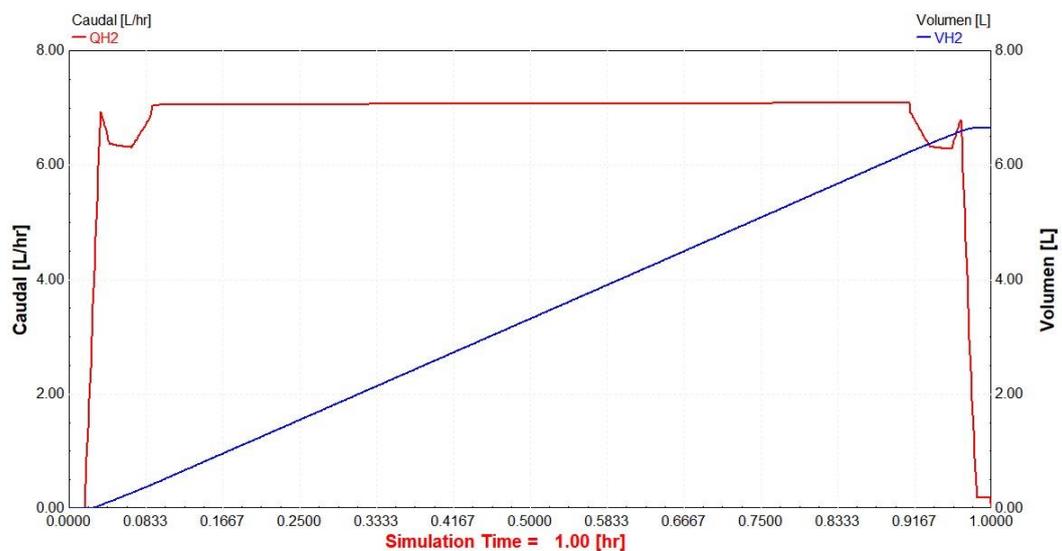


Figura 57. Consumo de hidrógeno en la pila de combustible PEMFC (1h).

7.6 Respuesta Global del Sistema Híbrido (Potencia – Intensidad)

Para analizar la respuesta global del sistema híbrido eléctrico, diseñado para abastecer la demanda energética de un dron de gran tamaño con una masa máxima de 20 kg, se debe combinar la potencia eléctrica que proporciona la etapa de potencia (PEMFC+DC/DC) con la potencia eléctrica que entrega la batería LiPo.

Para un tamaño de dron aproximadamente de 20kg, se requiere una fuente de alimentación que sea capaz de generar unos 3000W de potencia eléctrica máxima durante las fases de despegue y aterrizaje. Para alcanzar los picos de demanda del dron, se utiliza pila de combustible PEMFC de cátodo abierto (que emplea aire atmosférico captado directamente del ambiente) en paralelo con una batería LiPo. Por su parte, el sistema híbrido debe ser capaz de generar un ligero excedente energético respecto a la demanda estacionaria de 2000W que presenta el dron, destinando una pequeña corriente eléctrica para la recarga de la batería.

En la siguiente Figura 58, se puede observar la respuesta global del sistema híbrido eléctrico formado por la pila de combustible PEMFC (AEROSTAK-2000 ; HES) y la batería LiPo (HRB 10S ; 3000 mA·h) tanto en términos de potencia eléctrica como de intensidad de corriente:

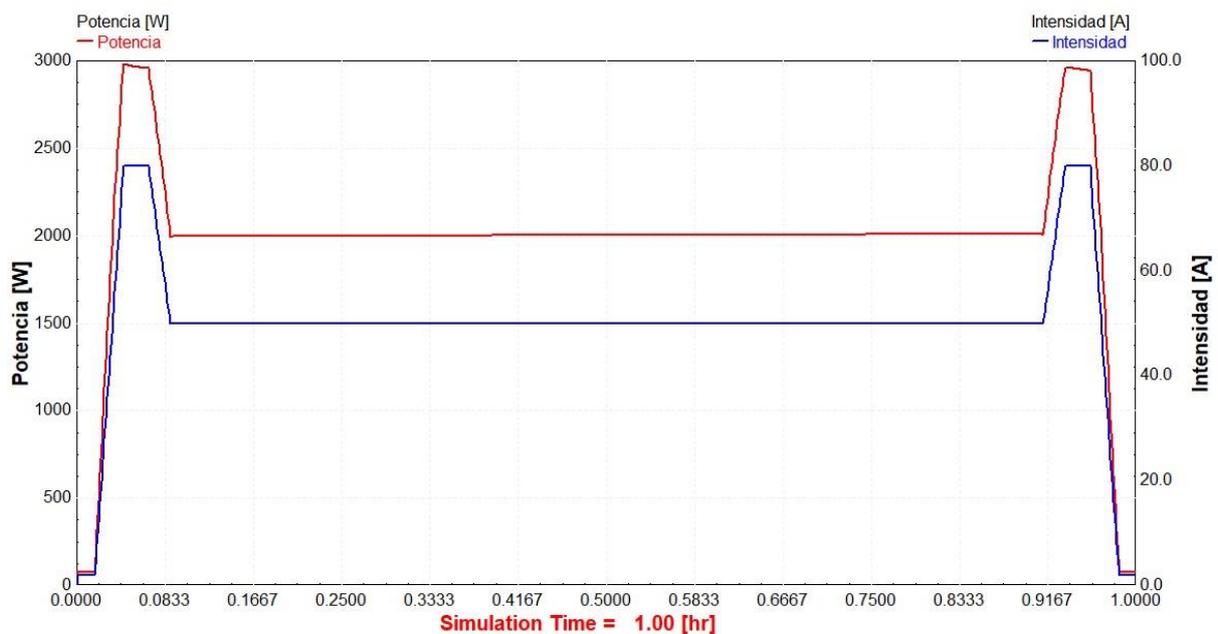


Figura 58. Respuesta del sistema híbrido eléctrico “pila de combustible PEMFC + batería LiPo” frente a la demanda energética de un dron de gran tamaño - 20kg (1h).

Como se puede apreciar al comparar la Figura 58 con la Figura 46, se observa que el modelado de la respuesta dinámica del sistema híbrido eléctrico “pila de combustible PEMFC + batería LiPo” presenta un gran potencial como fuente de alimentación para un vehículo aéreo no tripulado de gran tamaño, ya que es capaz de cubrir las curvas de demanda energéticas correspondientes a un dron de 20kg, tanto en términos de intensidad de corriente como de potencia eléctrica.

8. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este apartado final, se procede con una revisión analítica sobre el dimensionamiento y la selección del modelo comercial para los componentes principales del sistema híbrido eléctrico diseñado (como son la pila de combustible PEMFC y la batería LiPo), partiendo de una justificación de peso a partir de los elementos estructurales y accesorios que incorpora típicamente un dron de gran tamaño (20kg). Por último, se presentan los resultados obtenidos en relación con el consumo de hidrógeno por parte de la pila de combustible PEMFC y la evolución del estado de carga en la batería LiPo, según las condiciones climáticas existentes durante las maniobras de vuelo del dron.

- En primer lugar, con la información disponible en catálogos comerciales sobre las características y las especificaciones técnicas de diversos fabricantes de drones agrícolas y sanitarios (DJI y/o HES), se consigue obtener una estimación sobre las masas de los distintos elementos constituyentes del sistema híbrido eléctrico diseñado para un dron de gran tamaño, contemplando la posibilidad de transportar una carga adicional de 5kg.

Tabla 21. Elementos constituyentes del sistema híbrido eléctrico “pila PEMFC + batería LiPo” diseñado para un dron de gran tamaño (20 kg).

Esqueleto de la Aeronave (motores, hélice, estructura, soportes...):	5 kg
Pila de Combustible PEMFC (AEROSTAK 2000 – HES):	3,8 kg
Depósito del combustible de Hidrógeno 6L (AEROSTAK Series F – HES) :	3,6 kg
Batería LiPo 10S de 3000 mA·h (HRB – Graphene):	0,9 kg
Cámara integrada para visión e inspección del terreno en HD (Zemuse L1):	1 kg
Margen de Seguridad (componentes eléctricos y electrónicos: [~10%])	~ 1 kg
SUBTOTAL para el DRON VACÍO:	15 kg
Carga Adicional de 5 kg (material sanitario, botiquín de emergencias...):	5 kg
TOTAL para el DRON CON CARGA:	20 kg

- A continuación, mediante la estimación del consumo específico habitual para drones agrícolas y sanitarios de gran tamaño (expresado en W/kg), se determina tanto los picos máximos de consumo durante los desplazamientos verticales en las fases de despegue y aterrizaje (MTOW) como la demanda estacionaria para mantener la sustentación y permitir los desplazamientos horizontales.

El consumo específico máximo durante las fases de despegue y aterrizaje (MTOW) resulta ser aproximadamente de 150 W/kg, por lo que para un dron de gran tamaño (20kg) será necesario suministrar unos picos de potencia eléctrica de 3000W. El promedio del consumo específico del dron durante la fase de vuelo estacionario resulta ser aproximadamente de 100-115 W/kg, por lo que para un dron de gran tamaño (20kg) será necesario suministrar una potencia eléctrica estacionaria de 2000-2300W. Debido a la poca fiabilidad y la confusión en la información aportada en las especificaciones técnicas de los drones agrícolas y sanitarios analizados, se decide establecer una potencia eléctrica estacionaria de 2100W.

- El dimensionamiento y la selección del modelo comercial para la pila de combustible PEMFC se realiza en base a la potencia eléctrica estacionaria de 2100W. El modelo *AEROSTAK – 2000 (HES)* presenta una configuración de cátodo abierto con aire atmosférico captado directamente del ambiente, pudiendo ser empleado como agente oxidante y como fluido de refrigeración. El rango de tensión (37-60V) y el rango de intensidad de corriente (0-50A) permite alcanzar un rango de potencia nominal suficiente para abastecer la demanda estacionaria (2000-2300W) y destinar un ligero excedente eléctrico para la recarga de la batería LiPo.
- El dimensionamiento y la selección del modelo comercial para la batería LiPo se realiza en base al rango de tensión que proporciona la pila de combustible PEMFC, pero siempre cumpliendo con el criterio de minimización de tamaño y peso. El modelo *Graphene 10S 3000 mA-h (HRB)* presenta una tensión nominal (37-40V) que se encuentra dentro del rango de tensión que ofrece la pila de combustible PEMFC y un ratio de descarga de hasta 100C (0 – 300A), lo que permite alcanzar los picos máximos de consumo (3000W) al proporcionar los 1000W complementarios al régimen estacionario de la pila de combustible PEMFC (~2000W). Del mismo modo, el ratio de descarga 2C (0 – 6A) permite utilizar una corriente eléctrica de 1A procedente de la pila de combustible PEMFC para recargar la batería LiPo durante la fase de vuelo estacionario, conservando así un mayor estado de carga final y permitiendo utilizar una menor capacidad energética en la batería LiPo.
- Por lo tanto, el convertidor de potencia DC/DC se justifica para adaptar la tensión de la pila de combustible PEMFC a la tensión de la batería LiPo, ya que se contempla una disposición en paralelo entre la etapa de potencia (pila PEMFC + convertidor DC/DC) y la batería LiPo para configurar el sistema híbrido eléctrico empleado como fuente de alimentación del dron. El convertidor DC/DC introduce unas pérdidas de potencia del 5-10% (100-200W) respecto de la potencia eléctrica nominal de entrada que proviene de la pila de combustible PEMFC (2200W), lo que permite obtener una potencia eléctrica a la salida del convertidor DC/DC correspondiente con la demanda estacionaria del dron (2000W).
- Finalmente, es importante tener en cuenta las condiciones de almacenamiento en el interior del depósito de combustible para estimar el consumo de hidrógeno en la pila de combustible PEMFC. La gama *AEROSTAK – Series F (HES)* está diseñada específicamente para los modelos comerciales de pilas de combustible PEMFC y permite incorporar las botellas de almacenamiento con distintas capacidades de hidrógeno (3 - 6 - 9 L). Los depósitos de almacenamiento se encuentran a una presión de almacenamiento de 300 bar y presentan un regulador de presión incorporado para reducir a la presión hasta la presión de suministro del hidrógeno en la pila de combustible PEMFC.
- Desde el punto de vista de la simulación, la viabilidad técnica del sistema híbrido eléctrico “pila de combustible PEMFC + batería LiPo” ha quedado demostrada. La respuesta del sistema híbrido frente a una curva de demanda semiempírica debe ser capaz de cubrir las necesidades energéticas del dron, tanto en términos de intensidad de corriente como en términos de potencia eléctrica. Para ello, la pila de combustible PEMFC se encuentra trabajando a régimen constante dentro de su rango óptimo de operación que proporciona el rango de potencia eléctrica máxima, mientras que la batería LiPo es la responsable de asumir las pequeñas fluctuaciones que pueden aparecer en la práctica sobre la demanda del dron, permitiendo además que el sistema híbrido pueda alcanzar los picos máximos de consumo durante las fases de despegue y aterrizaje.

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería”
para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

- Sin embargo, los parámetros que garantizan el funcionamiento en operación resultan ser el consumo de hidrógeno por parte de la pila de combustible PEMFC y el estado de carga final de la batería LiPo. Así pues, se han realizado varias simulaciones a distintos tiempos de vuelo pero empleando los mismos parámetros de potencia máxima (3000W) y estacionaria (2000W) para modelar la curva de demanda semiempírica del dron. En todas las simulaciones realizadas que se adjuntan en los ANEXOS, se ha decidido mantener constante la duración de las fases de arranque y parada, así como también los tiempos de despegue y aterrizaje, por lo que la única diferencia entre los distintos tiempos de vuelo analizados es la duración de la fase de vuelo estacionario.

Los resultados obtenidos durante las distintas simulaciones se resumen en la siguiente Tabla 22, determinando el consumo de hidrógeno que realiza la pila de combustible PEMFC para las condiciones de almacenamiento consideradas ($p = 300\text{bar}$, $T = 25^\circ\text{C}$). Del mismo modo, también se incluye el estado de carga final de la batería LiPo, así como los estados de carga previos y posteriores a las fases de despegue y aterrizaje del dron.

Tabla 22. Consumo de hidrógeno y estado de carga para distintos tiempos de vuelo.

Tiempo (hh:min)	V_{H_2} (L)	Botella H_2 (L)	Estado de Carga (%)		
			Despegue	Aterrizaje	Final
0h : 30 min	3,10 L	5 L	98,9% → 59,6%	70,4% → 31,1%	31,1%
1h : 00 min	6,65 L	6,8 – 7,2 L	98,9% → 59,6%	86,9% → 47,6%	47,6%
1h : 30min	10,20 L	12 L	98,9% → 59,6%	99% → 59,7%	59,7%
2h : 00min	13,75 L	-	98,9% → 59,6%	99% → 59,7%	59,7%
3h : 00min (*)	20,85 L	-	98,9% → 59,6%	99% → 59,7%	59,7%
4h : 00min (*)	27,95 L	-	98,9% → 59,6%	99% → 59,7%	59,7%

(*) Las simulaciones se han realizado para un tiempo máximo de vuelo de 2h, ya que a partir de ese instante, el consumo de hidrógeno sería demasiado elevado y se requeriría un depósito de almacenamiento específico o hecho a medida, por lo que simplemente se ha estimado el volumen de hidrógeno necesario para 3 y 4 h de vuelo mediante interpolación lineal.

En lo que respecta al consumo de hidrógeno, se observa que el punto óptimo de funcionamiento de la pila de combustible PEMFC AEROSTAK-2000 ($I_{PEMFC} = 48\text{A}$, $P_{PEMFC} = 2200\text{W}$) requiere un consumo de hidrógeno específico de $+3,55\text{ L}/30\text{ min}$ para las condiciones de almacenamiento establecidas en las especificaciones de los depósitos de AEROSTAK – Series F.

Por su parte, al analizar el estado de carga tras la fase de despegue y compararlo con el estado de carga previo a la fase de aterrizaje, se comprueba el efecto del tiempo de vuelo total del dron sobre el proceso de recarga de la batería LiPo con el excedente eléctrico que genera la etapa de potencia (PEMFC+DC/DC). Las fases de despegue y aterrizaje representan un consumo del 39,3% de la capacidad energética de la batería LiPo ($39,3\% \cdot 3000\text{mA} \cdot h = 1179\text{mA} \cdot h$). Sin embargo, destinando +1A como corriente eléctrica de carga, se observa que cuanto mayor sea el tiempo de vuelo del dron, se conseguirá una mayor fracción de carga en la batería LiPo antes de proceder con la fase de aterrizaje, permitiendo obtener un máximo estado de carga final del 59,7%.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] AeroCamaras. (30 de Junio de 2021). *AeroCamaras - Dron Híbrido AeroHyb*. Obtenido de <https://dronehibrido.com/es/>
- [2] Amphlett, J., Baumert, R., Mann, R., Peppley, B., Roberge, P. & Harris, T. (1995). *Performance modelling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolite fuel cell - Empirical model development*. *Journal of Electrochemical Society* vol. 142. Págs: 9-15.
- [3] Amphlett, J., Baumert, R., Mann, R., Peppley, B., Roberge, P. & Harris, T. (1995). *Performance modelling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell - Mechanistic model development*. *Journal of Electrochemical Society* vol. 142. Págs: 1-8.
- [4] Amphlett, J., Mann, R., Hooper, M., Jensen, H. & Peppley, B. (2000). *Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell*. *Journal Power Sources* vol. 86. Págs: 173-180.
- [5] Appleby, A. J. (1996). *Fuel Cells Technology: Status and Future Prospects*. *Energy* vol.21.
- [6] Ayamga, M., Akaba, S. & Nyaaba, A. (2021). *Multifaceted applicability of drones: A review*. *Technological Forecasting & Social Change* 167. Págs: 1-5.
- [7] Bacon, F. (1985). *The development and practical applications of fuel cells*. *International Journal of Hydrogen Energy*. Págs: 425-430.
- [8] Becker, A. & Weidner, J. (2000). *Difussion of water in Nafion membranes*. *Journal of Electrochemistry Society*. Págs: 3171-3177.
- [9] Berger, R. (2017). *Development of Business Cases for Fuel Cells and Hydrogen Applications*. FCH2 JU.
- [10] Blomen, L. J. & Mugerwa, M. N. (2013). *Fuel cell systems*. Springer Science and Business Media.
- [11] Bockris, J. (2002). *The origin of hydrogen economy and its solution to the decay of the environment*. *International Journal of Hydrogen Energy*. Págs: 733-739.
- [12] British Petroleum. (2020). *Statistical Review of World Energy*. BP 69th Edition.
- [13] Burke, A. (2007). *Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid and fuel cell vehicles*. *Proceedings of IEEE* vol. 95. Págs: 806-820.
- [14] DJI Technology Corporation (30 de Junio de 2021). *DJI - AGRAS T20*. Obtenido de <https://www.dji.com/es/t20?site=brandsite&from=nav>
- [15] Doosan Mobility Innovation (1 de Julio de 2021). Obtenido de Doosan - Fuel Cell Drones: <https://www.doosanmobility.com/en/products/drone-ds30/>
- [16] Dukowitz, Z. (2021). *Top Hydrogen Fuel Drones: The Best Hydrogen Drones and Applications*. UAV Coach Online.
- [17] E4Tech (2019). *The Fuel Cell Industry: A review*.

- [18] ETSII-UPV. (2015). *Colección de Tablas y Gráficos Termodinámicos. Factor de Compresibilidad del Hidrógeno*.
- [19] Fathabadi, H. (2018). *Combining a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) with a Li-on battery to supply the power of an hybrid electric vehicle. Renewable Energy* 130. Págs: 715-722.
- [20] Godula, A. J. (2015). *Hydrogen production by Electrolysis. Wiley VCH*.
- [21] Hermann, A., Chaudhurri, T. & Spagnol, P. (2005). *Bipolar plates for PEM fuel cells: a review. International Journal of Hydrogen Energy*. Págs: 1297-1302.
- [22] Hoogers, G. (2002). *Fuel Cell Technology. Handbook Series for Mechanical Engineering*.
- [23] Hyman, E. (1977). *Phenomenological Cell Modelling: A Tool for Planing and Analyzing Battery Testing at the BEST Facility. Report RD77-1: Public Service Electric and Gas Company, PSE & Research Corporation*.
- [24] Larminie, J. & Dicks, A. (2003). *Fuel Cell Systems Explained. John Wiley and Sons Inc*.
- [25] Lee, J. & Quan, N. (2006). *Polymer electrolyte membrane for fuel cells. Journal of Industrial Engineering and Chemistry*. Págs: 175-183.
- [26] León, F. (25 de Junio de 2021). *Dynamo Electronics. Obtenido de <https://dymoelectronics.com/baterias-lipo-caracteristicas-y-cuidados/>*
- [27] Li, X. & Sabir, I. (2005). *Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs. International Journal of Hydrogen Energy*. Págs: 362-368.
- [28] Lipman, T. & Weber, A. (2019). *Fuel Cells and Hydrogen Production - Fuel Cell Types and their Electrochemistry. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology 2nd Edition*. Págs: 92-97.
- [29] Litster, S. & McLean, G. (2004). *PEM fuel cell electrodes. Journal of Power Sources vol. 130*. Págs: 63-73.
- [30] Llera, E. M. & Zabalza, I. (2011). *Hidrógeno: producción, almacenamiento y usos energéticos. Prensa Universitaria de Zaragoza*.
- [31] López, M. Á. (2005). *El problema energético en el sector del transporte. Págs: 15-20*.
- [32] Mekhilef, S., Saidur, R. & Safari, A. (2012). *Comparative study of different fuel cell technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Págs: 981-989.
- [33] Meng, J., Luo, G., Ricco, M. & Teodorescu, R. (2018). *Overview of Lithium-Ion Battery Modeling Methods for State of Charge Estimation. MDPI Applied Sciences*. Págs: 1-4.
- [34] Mora, E. (2020). *Hidrógeno Verde: La industria con valor potencial para el futuro. Universidad de Concepción. Diario Oficial de la Energía*.
- [35] O'Hayre, R. (2016). *Fuel Cell Fundamentals - Chapter 2: Fuel Cell Thermodynamics. John Wiley & Sons Inc*. Págs: 6-14.
- [36] O'Hayre, R. (2016). *Fuel Cell Fundamentals - Chapter 3. Fuel Cell Reaction Kinetics. John Wiley & Sons Inc*. Págs: 77-82.

- [37] Oscar Liang (25 de Junio de 2021). *Prometec*. Obtenido de <https://www.prometec.net/elegir-bateria-lipo/>
- [38] Pivovar, B. (2017). *H2@Scale*. U.S National Renewable Energy Laboratory.
- [39] Roscher, M., Bohlen, O. & Vetter, J. (2011). *OCV Hysteresis in Li-Ion Batteries including Two-Phase Transition Materials*. *Research Article - International Journal of Electrochemistry*. Págs: 1-6.
- [40] Schroeder, D. (2000). *An Introduction to Thermal Physics*. Pearson Education Inc. Págs: 151-153.
- [41] Shepperd, C. (1965). *Design of Primary and Secondary Cells II. An Equation Describing Battery Discharge*. *Journal of Electrochemical Society* vol.112.
- [42] Shinnar, R. (2003). *The hydrogen economy of fuel cells and electric cars*. Págs: 1828-1834.
- [43] Snyman, D. & Enslin, J. (1993). *An experimental evaluation of Maximum Power Point Tracker (MPPT) converter topologies for PV installations*. *Renewable Energy* vol. 3. Págs: 841-848.
- [44] Song, C. (2007). *PEM fuel cell reaction kinetics in the temperature range of 23°C - 120 °C*. *Electrochimica Acta*. Págs: 2552-2561.
- [45] Tang, X., Wang, Y. & Chen, Z. (2015). *A method for state of charge estimation of LiFePO₄ batteries based on a dual-circuit state observer*. *Journal of Power Sources* 296. Págs: 23-29.
- [46] Ulleberg, O. (1998). *Stand-Alone Power Systems for the Future: Optimal Design, Operation & Control of Solar-Hydrogen Energy Systems*. PhD Tesis - Norwegian University of Science and Technology.
- [47] Wang, J. & Yin, Y. (2018). *Fermentative hydrogen production using pretreated microalgal biomass as feedstock*. *Microbial Cell Factories*. Págs: 17-22.
- [48] Weber, A. & Newman, J. (2005). *Effects of microporous layers in polymer electrolyte fuel cells*. *Journal Electrochemical Society*. Págs: 677-688.
- [49] Wilson, M. & Gottesfeld, S. (1992). *Thin-film catalyst layers for polymer electrolyte fuel cell electrodes*. *Journal of Applied Electrochemistry*. Págs: 3-7.
- [50] Zhang, J. (2008). *PEM fuel cells electrocatalysts and catalyst layers: fundamentals and applications*. London Springer Science and Business Media.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

PRESUPUESTO

**ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO
“PILA DE COMBUSTIBLE – BATERÍA” PARA ALIMENTACIÓN
DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS**

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

CAPÍTULO 1. ALCANCE	1
CAPÍTULO 2. GASTOS DE PERSONAL	3
CAPÍTULO 3. EQUIPO INFORMÁTICO Y SOFTWARE DE SIMULACIÓN	5
CAPÍTULO 4. ENSAYOS DE VUELO	7
CAPÍTULO 5. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL	9
CAPÍTULO 6. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA	11
CAPÍTULO 7. PRESUPUESTO BASE DE LICITACIONES	13

ÍNDICE DE TABLAS PRESUPUESTADAS

Presupuesto Parcial Nº 1. Gastos de Personal	4
Presupuesto Parcial Nº 2. Equipo Informático y Software de Simulación	5
Presupuesto Parcial Nº 3. Ensayos de Vuelo	7
Presupuesto 1. Presupuesto de Ejecución Material.....	9
Presupuesto 2. Presupuesto de Ejecución por Contrata.....	11
Presupuesto 3. Presupuesto Base de Licitaciones.....	13

CAPÍTULO 1. ALCANCE

El Presupuesto del presente Trabajo Final de Máster pretende estimar los costes económicos del diseño y la simulación del sistema híbrido eléctrico “pila de combustible PEM + batería LiPo” empleado como fuente de alimentación para vehículos aéreos no tripulados.

Por un lado, se incluirán los gastos de personal según los criterios del Servicio de Gestión I+D+i de la Universidad Politécnica de Valencia (SGI-UPV) en función de la dedicación horaria y la retribución salarial por convenio. Por otro lado, también se incluyen el coste de amortización del equipo informático empleado y la compra de la licencia del software de simulación utilizado, así como los costes asociados con los ensayos de vuelo de un dron en la zona de El Puig.

En el Presupuesto no se consideran los costes de adquisición de los modelos comerciales para la pila de combustible PEM o la batería LiPo, además del resto de componentes electrónicos que conforman los sistemas de vuelo del dron (elementos de control, visualización de imágenes en tiempo real, sistemas de adquisición de datos...). Del mismo modo, tampoco se incluye la mano de obra necesaria para el montaje de todos estos componentes sobre la estructura del dron.

Al tratarse de un Trabajo Final de Máster enfocado en el diseño y la simulación de un sistema híbrido eléctrico, tanto el ensamblaje de los componentes estructurales como la fabricación de un prototipo del dron que integre el sistema híbrido “pila de combustible PEM + batería LiPo” queda excluido del alcance de esta primera fase del proyecto.

CAPÍTULO 2. GASTOS DE PERSONAL

En este capítulo, se detallan los costes asociados con el gasto del personal investigador según la dedicación horaria para cada uno de los apartados que se describen a continuación:

- [1] Búsqueda Bibliográfica – Fundamentos Teóricos
- [2] Diseño del sistema híbrido “pila de combustible PEM + batería LiPo”
- [3] Simulación del sistema híbrido “pila de combustible PEM + batería LiPo”
- [4] Sesiones de control y seguimiento
- [5] Informes de evaluación

Para establecer la retribución salarial del personal investigador según los convenios del SGI-UPV, se considera la imputación de Raúl Marqués como Ingeniero Químico recién titulado, además de la imputación de Álvaro Montero y Carlos Sánchez como Personal Docente Investigador (PDI). De acuerdo con *las Recomendaciones en la Elaboración de Presupuestos en Actividades I+D+i*, el coste horario del personal queda definido en las siguientes tablas orientativas del SGI-UPV:

CATEGORIA PLANTILLA UPV	CATEGORÍA EN LA ACTIVIDAD	Horas/año facturables ²	Coste directo por hora ³
Catedrático/a de Universidad	Responsable	1.650	55,5
Titular de Universidad	Experto	1.650	41,3
Prof. Contratado Doctor		1.650	38,1
Ayudante Doctor	Técnico	1.650	20,9
Ayudante		1.650	18,3
Catedrático/a de Escuela Universitaria		1.650	41,5
Titular de Escuela Universitaria		1.650	31,6
Profesor Colaborador		1.650	38,5

CATEGORIA	Retribución anual bruta		Coste anual con S.S. (32,1%) e indemnización (3,04%).		Coste horario (incluido S.S.)	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Doctor contratado	16.849,84	40.956,86	22.770,87	55.349,10	12,94	31,45
FPI Años 1 y 2	16.849,84	32.540,48	22.770,87	43.975,20	12,94	24,99
Titulado superior	16.849,84	32.540,48	22.770,87	43.975,20	12,94	24,99
Titulado medio	14.569,66	26.032,44	19.689,44	35.180,24	11,19	19,99
Especialista técnico	C16: 20.396,60	C19: 21.846,58	C16: 27.563,97	C19: 29.523,47	C16: 15,66	C19: 16,77

Por un lado, la retribución salarial de Álvaro Montero y Carlos Sánchez se estima sobre 40€/h, ya que ambos pertenecen a la categoría de Profesor Titular de Universidad (PDI).

Por su parte, la retribución salarial de Raúl Marqués se establece en 20€/h, lo que representa el coste horario promedio entre el mínimo y el máximo correspondiente a un Titulado Superior.

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería”
para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

Presupuesto Parcial Nº 1. Gastos de Personal

Nº	Ud	Concepto	Medición	Precio (€)	Importe (€)	Subtotal (€)
1.1	h	Titulado Superior	300	20	6.000	
1.2	h	Titular de Universidad (1)	50	40	2.000	
1.3	h	Titular de Universidad (2)	50	40	2.000	
						10.000

La descomposición del Presupuesto Parcial Nº1 (Gastos de Personal) se realiza en función de la dedicación del personal investigador sobre los apartados mencionados previamente, de acuerdo con las siguientes imputaciones:

Nº	Ud	Concepto	Medición	Precio (€)	Importe (€)	Subtotal (€)
1.1	h	Titulado Superior	100	20	2.000	
1.2	h	Titular de Universidad (1)	5	40	200	
1.3	h	Titular de Universidad (2)	5	40	200	
APARTADO 1. BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA – FUNDAMENTOS TEÓRICOS						2.400
1.1	h	Titulado Superior	100	20	2.000	
1.2	h	Titular de Universidad (1)	15	40	600	
1.3	h	Titular de Universidad (2)	5	40	200	
APARTADO 2. DISEÑO SISTEMA HÍBRIDO “PILA PEMFC + BATERÍA LIPO”						2.800
1.1	h	Titulado Superior	50	20	1.000	
1.2	h	Titular de Universidad (1)	5	40	200	
1.3	h	Titular de Universidad (2)	15	40	600	
APARTADO 3. SIMULACIÓN SISTEMA HÍBRIDO “PILA PEMFC + BATERÍA LIPO”						1.800
1.1	h	Titulado Superior	40	20	800	
1.2	h	Titular de Universidad (1)	20	40	800	
1.3	h	Titular de Universidad (2)	20	40	800	
APARTADO 4. SESIONES DE CONTROL Y SEGUIMIENTO						2.400
1.1	h	Titulado Superior	10	20	200	
1.2	h	Titular de Universidad (1)	5	40	200	
1.3	h	Titular de Universidad (2)	5	40	200	
APARTADO 5. INFORMES DE EVALUACIÓN						600
TOTAL GASTOS DE PERSONAL (APARTADOS 1 - 5)						10.000

CAPÍTULO 3. EQUIPO INFORMÁTICO Y SOFTWARE DE SIMULACIÓN

En este capítulo, se detallan los costes relacionados con la amortización del equipo informático y la adquisición de la licencia del software de simulación.

Según las *Recomendaciones en la Elaboración de Presupuestos en Actividades I+D+i* (SGI-UPV), la amortización del equipo informático y del software de simulación se determina mediante la siguiente expresión:

$$Amortización (\text{€}) = Uso (\text{años}) \cdot \frac{Precio (\text{€})}{Periodo amortización (\text{años})}$$

Clasificación económica del gasto		Amortización (años)
68358	Adquisición de equipos para procesos de información	6
68359	Adquisición de aplicaciones informáticas	6
68360	Adquisición de maquinaria	12
68361	Adquisición de instalaciones técnicas	12
68362	Adquisición de útiles y herramientas	12
68363	Adquisición de otro inmovilizado material	12
68364	Adquisición de equipos didácticos y de investigación	10

El ordenador portátil empleado es el modelo HP 245 G8, que presenta un precio de mercado aproximado de 650€ y un periodo de amortización establecido en 6 años. El ordenador portátil se ha empleado tanto en la redacción de la memoria como en la simulación del sistema híbrido, por lo que presenta un uso completo equivalente a toda la duración del TFM (~10 meses).

La compra de la licencia del software de simulación TRNSYS18 para uso educativo representa un coste de 2.250€ para un lote de 10 unidades, lo que equivale a un precio unitario de 225€ para un periodo de amortización establecido en 6 años. El diseño y la simulación del sistema híbrido se inició tras finalizar la parte del fundamento teórico y la búsqueda bibliográfica, por lo que su uso ha sido parcial respecto a la duración del TFM (~8 meses).

Presupuesto Parcial Nº 2. Equipo Informático y Software de Simulación

Nº	Ud	Concepto	Medición	Precio (€)	Importe (€)	Subtotal (€)
2.1	ud	PC portátil (HP 245 G8)	1	90,28	90,28	
2.2	ud	Software (TRNSYS 18)	1	27,78	27,78	
						118,06

CAPÍTULO 4. ENSAYOS DE VUELO

En este capítulo, se detallan los costes asociados con los ensayos de vuelo de un dron comercial en la zona habilitada para dichas maniobras aéreas, dentro del término municipal de El Puig.

Se ha decidido incluir el coste del alquiler del dron comercial (DJI MATRICE 300) durante toda la mañana del Lunes 25 de Octubre de 2021, lo que supone alrededor de unos 100€ y permite realizar diversos ensayos de vuelo con maniobras verticales y horizontales durante 3h.

Al mismo tiempo, también se debe imputar los honorarios del piloto, ya que se requiere un técnico especializado en el vuelo del dron. La retribución salarial del piloto se ha determinado según los criterios del SGI-UPV para la categoría de especialista técnico.

Presupuesto Parcial Nº 3. Ensayos de Vuelo

Nº	Ud	Concepto	Medición	Precio (€)	Importe (€)	Subtotal (€)
3.1	ud	Dron DJI MATRICE 300	1	100	100	
3.2	h	Piloto Dron	3	16,50	49,50	
						149,50

CAPÍTULO 5. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL

El Presupuesto de Ejecución Material (PEM) se obtiene mediante la suma de los costes asociados a los presupuestos parciales anteriores:

Presupuesto 1. Presupuesto de Ejecución Material

Presupuesto de Ejecución Material (PEM)	Importe (€)
Presupuesto Parcial Nº1. Gastos de Personal	10.000
Presupuesto Parcial Nº2. Equipo Informático y Software de Simulación	118,06
Presupuesto Parcial Nº3. Ensayos de Vuelo	149,50
TOTAL (€)	10.267,56

El Presupuesto de Ejecución Material (PEM) asciende a la cantidad de DIEZ MIL DOSCIENTOS SESENTA Y SIETE EUROS CON CINCUENTA Y SEIS CÉNTIMOS.

CAPÍTULO 6. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA

El Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC) se obtiene al incluir los Gastos Generales como Costes Indirectos (GG) estimados sobre el 10% del Presupuestos de Ejecución Material (PEM), en relación con el consumo eléctrico de los equipos informáticos y el coste de alquiler de los despachos del personal investigador PDI.

Por otro lado, al tratar de facturar comercialmente por el proyecto realizado, se incluye también un Beneficio Industrial (BI) del 6% sobre el Presupuesto de Ejecución Material (PEM):

Presupuesto 2. Presupuesto de Ejecución por Contrata

Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC)	Importe (€)
Presupuesto de Ejecución Material (PEM)	10.267,56
Gastos Generales (GG) 25%	2.566,89
Beneficio Industrial (BI) 6%	616,05
TOTAL (€)	13.450,50

El Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC) asciende a la cantidad de TRECE MIL CUATROCIENTOS CINCUENTA EUROS CON CINCUENTA CÉNTIMOS.

CAPÍTULO 7. PRESUPUESTO BASE DE LICITACIONES

El Presupuesto Base de Licitaciones (PBL) se obtiene al incorporar el IVA del 21% sobre el Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC):

Presupuesto 3. Presupuesto Base de Licitaciones

Presupuesto Base de Licitaciones (PBL)		Importe (€)
Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC)		13.450,50
IVA 21%		2.824,61
TOTAL (€)		16.275,11

El Presupuesto Base de Licitaciones (PBL) asciende a la cantidad de DIECISEIS MIL DOSCIENTOS SETENTA Y CINCO EUROS CON ONCE CÉNTIMOS.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

ANEXOS

**ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO
“PILA DE COMBUSTIBLE – BATERÍA” PARA ALIMENTACIÓN
DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS**

ÍNDICE DE LOS ANEXOS

ANEXO 1. TIEMPO DE SIMULACIÓN: 30MIN

Figura 1. Curva de demanda semiempírica de un dron de gran tamaño – 20kg (30 mins).....	1
Figura 2. Modelado de la respuesta del sistema híbrido "PEMFC + LiPo" (30 mins).....	1
Figura 3. Respuesta dinámica de la pila de combustible PEMFC (30 mins).....	2
Figura 4. Respuesta dinámica de la batería LiPo (30 mins).....	2
Figura 5. Estado de carga de la batería LiPo (30 mins).	3
Figura 6. Pérdidas de potencia en el convertidor DC/DC (30 mins).....	3
Figura 7. Acción reductora del convertidor de potencia DC/DC (30 mins).....	4
Figura 8. Relación entre la intensidad de corriente y el caudal de H2 (30 mins).....	4
Figura 9. Consumo de hidrógeno en la pila de combustible PEMFC (30 mins).	5
Figura 10. Respuesta del sistema híbrido eléctrico "pila de combustible PEMFC + batería LiPo" frente a la demanda energética de un dron de gran tamaño – 20kg (30 mins).	5

ANEXO 2. TIEMPO DE SIMULACIÓN: 1H 30MIN

Figura 11. Curva de demanda semiempírica de un dron de gran tamaño – 20kg (1h:30mins).....	7
Figura 12. Modelado de la respuesta del sistema híbrido "PEMFC + LiPo" (1h:30mins).....	7
Figura 13. Respuesta dinámica de la pila de combustible PEMFC (1h:30mins).....	8
Figura 14. Respuesta dinámica de la batería LiPo (1h:30mins).	8
Figura 15. Estado de carga de la batería LiPo (1h:30mins).	9
Figura 16. Pérdidas de potencia en el convertidor DC/DC (1h:30mins).	9
Figura 17. Acción reductora del convertidor de potencia DC/DC (1h:30mins).	10
Figura 18. Relación entre la intensidad de corriente y el caudal de H2 (1h:30mins).	10
Figura 19. Consumo de hidrógeno en la pila de combustible PEMFC (1h:30mins).	11
Figura 20. Respuesta del sistema híbrido eléctrico "pila de combustible PEMFC + batería LiPo" frente a la demanda energética de un dron de gran tamaño – 20kg (1h:30mins).	11

ANEXO 3. TIEMPO DE SIMULACIÓN: 2H

Figura 21. Curva de demanda semiempírica de un dron de gran tamaño – 20kg (2h).	13
Figura 22. Modelado de la respuesta del sistema híbrido "PEMFC + LiPo" (2h).	13
Figura 23. Respuesta dinámica de la pila de combustible PEMFC (2h).	14
Figura 24. Respuesta dinámica de la batería LiPo (2h).	14
Figura 25. Estado de carga de la batería LiPo (2h).	15
Figura 26. Pérdidas de potencia en el convertidor DC/DC (2h).	15
Figura 27. Acción reductora del convertidor de potencia DC/DC (2h).	16
Figura 28. Relación entre la intensidad de corriente y el caudal de H2 (2h).	16
Figura 29. Consumo de hidrógeno en la pila de combustible PEMFC (2h).....	17
Figura 30. Respuesta del sistema híbrido eléctrico "pila de combustible PEMFC + batería LiPo" frente a la demanda energética de un dron de gran tamaño – 20kg (2h).....	17

ANEXO 1. TIEMPO DE SIMULACIÓN: 30 MINS

A continuación, se procede con el análisis de las simulaciones realizadas para un tiempo de simulación equivalente a 30 minutos de vuelo del dron. En el modelado de la curva de demanda semiempírica del dron de gran tamaño, se mantienen constantes las duraciones de las fases de arranque/parada (1 min) y de las fases de despegue/aterrizaje (4 min), por lo que la duración de la fase de vuelo estacionario resulta en 20 min.

En la Figura 1, se observa el modelado de la curva de demanda semiempírica del dron para un tiempo de vuelo de 30 mins. Se pueden apreciar los picos máximo de potencia (3000W|80A) durante las fases de despegue/aterrizaje, así como la demanda estacionaria (2000W|50A). En la Figura 2, se puede observar el modelado de la respuesta del sistema híbrido eléctrico “pila de combustible PEMFC + batería LiPo” frente a la curva de demanda semiempírica del dron, según el funcionamiento detallado previamente en los apartados 6 y 7 de la Memoria.

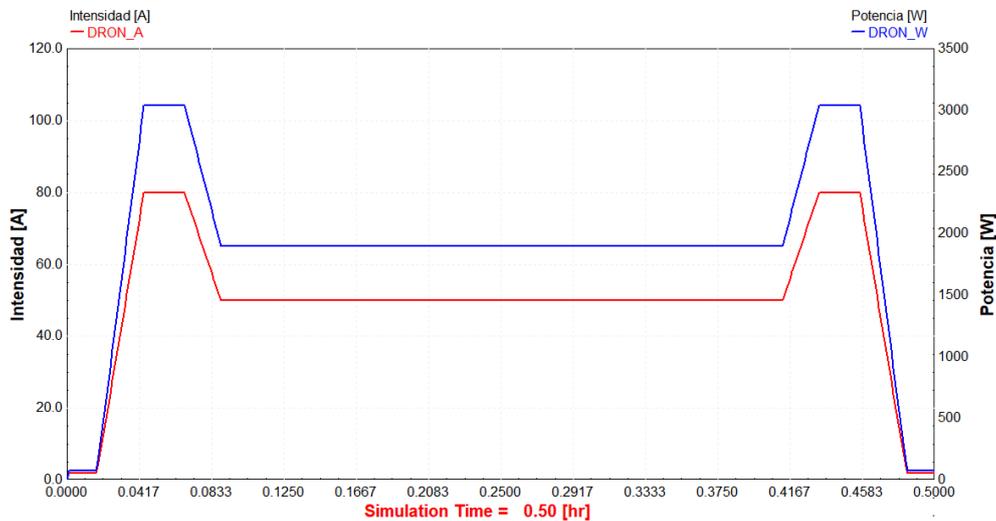


Figura 1. Curva de demanda semiempírica de un dron de gran tamaño – 20kg (30 mins).

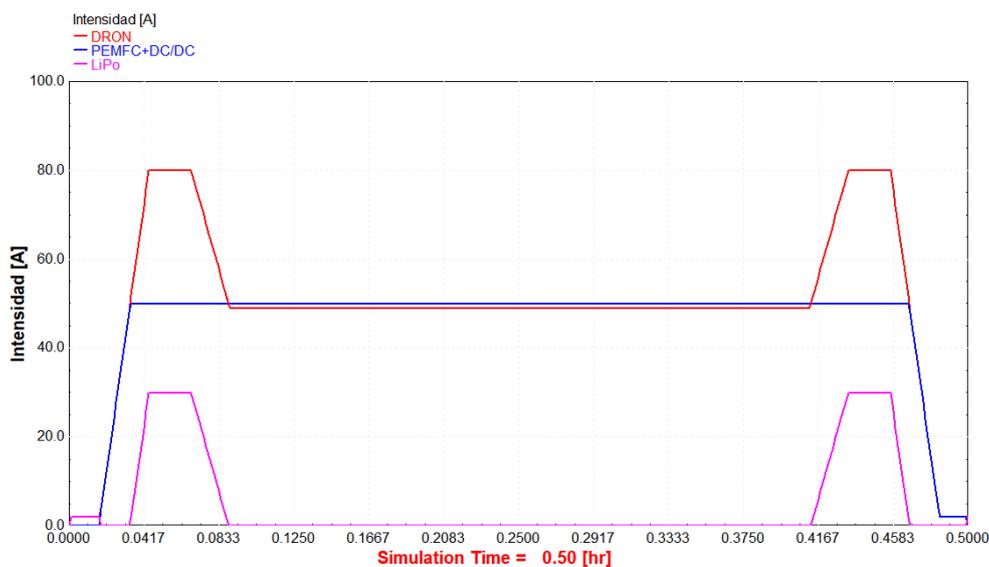


Figura 2. Modelado de la respuesta del sistema híbrido "PEMFC + LiPo" (30 mins).

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería” para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

En la Figura 3, se puede observar la respuesta de la pila de combustible PEMFC para un tiempo de simulación de 30min, presentando un comportamiento en régimen estacionario (2200W) y ofreciendo un rango de tensión estable entre 45-50V.

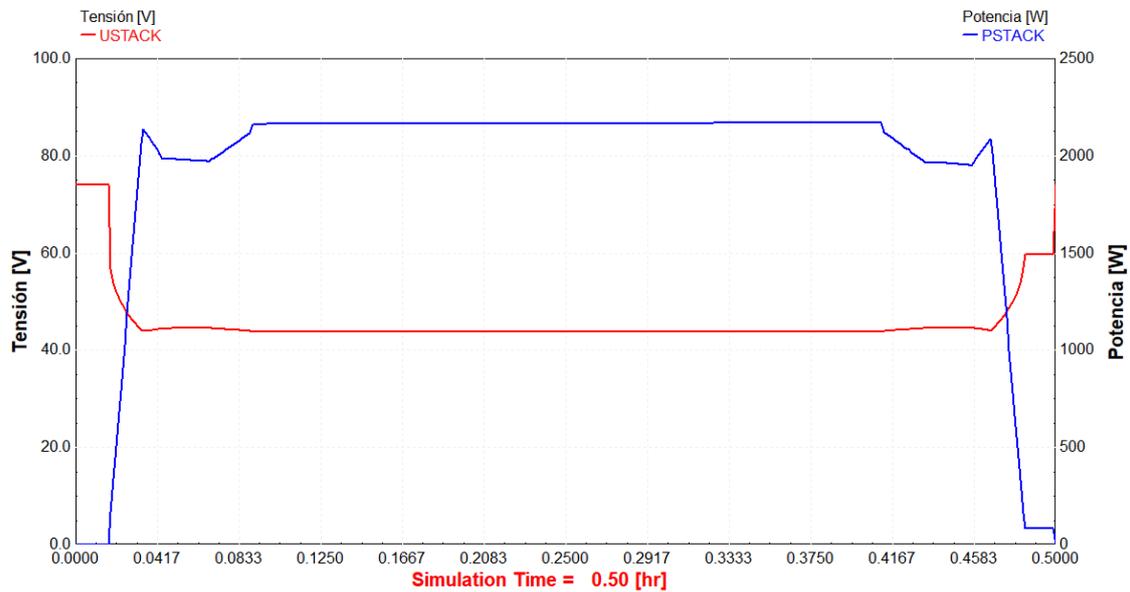


Figura 3. Respuesta dinámica de la pila de combustible PEMFC (30 mins).

En la Figura 4, se presenta la respuesta de la batería LiPo para un tiempo de simulación de 30min, donde se aprecia que la batería LiPo resulta fundamental durante las fases de despegue y aterrizaje, proporcionando una potencia eléctrica de +1000W para alcanzar los picos máximos de demanda del dron (3000W) y manteniendo un rango de tensión fluctuante entre 37-40V según el estado de carga.



Figura 4. Respuesta dinámica de la batería LiPo (30 mins).

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería” para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

Por su parte, en la Figura 5 se puede observar la evolución del estado de carga de la batería LiPo para un tiempo de simulación de 30min, permitiendo identificar claramente los procesos de descarga de la batería LiPo durante las correspondientes fases de despegue y aterrizaje. Sin embargo, resulta más interesante comprobar el proceso de recarga de la batería LiPo aprovechando el excedente eléctrico que genera la pila de combustible PEMFC durante la fase de vuelo estacionario.

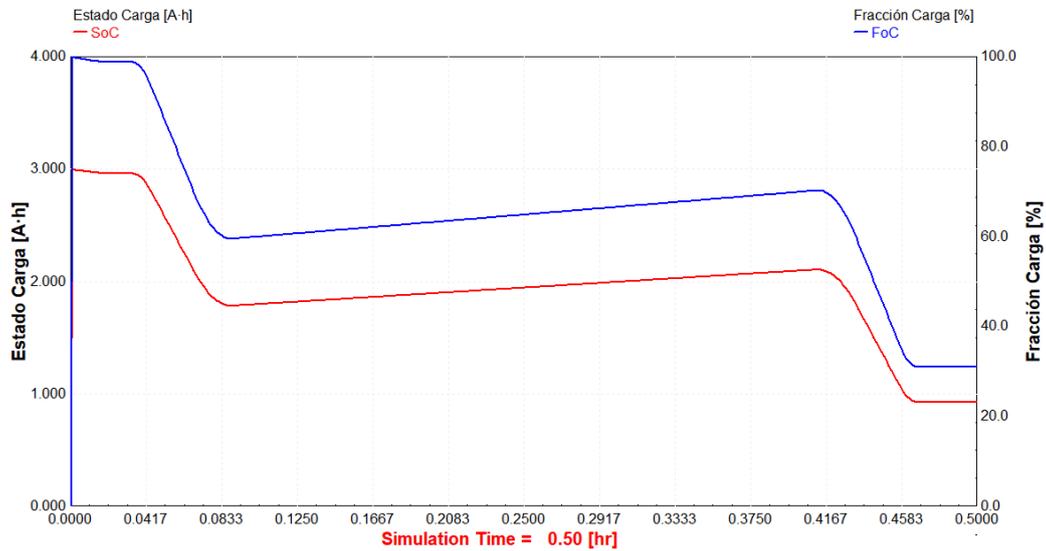


Figura 5. Estado de carga de la batería LiPo (30 mins).

Debido al rango de tensión de la pila de combustible PEMFC (45-50V) y de la batería LiPo (37-40V) según los resultados de las Figuras 3 y 4, se justifica la necesidad de un convertidor de potencia DC/DC con configuración reductora para ajustar la tensión de la pila PEMFC al rango de tensión de la batería. Por tanto, en la Figura 6 se observan las pérdidas en el convertidor DC/DC para un tiempo de simulación de 30min, de forma que la salida de la etapa de potencia (PEMFC+DC/DC) se mantiene alrededor de la demanda estacionaria del dron de gran tamaño (2000W).

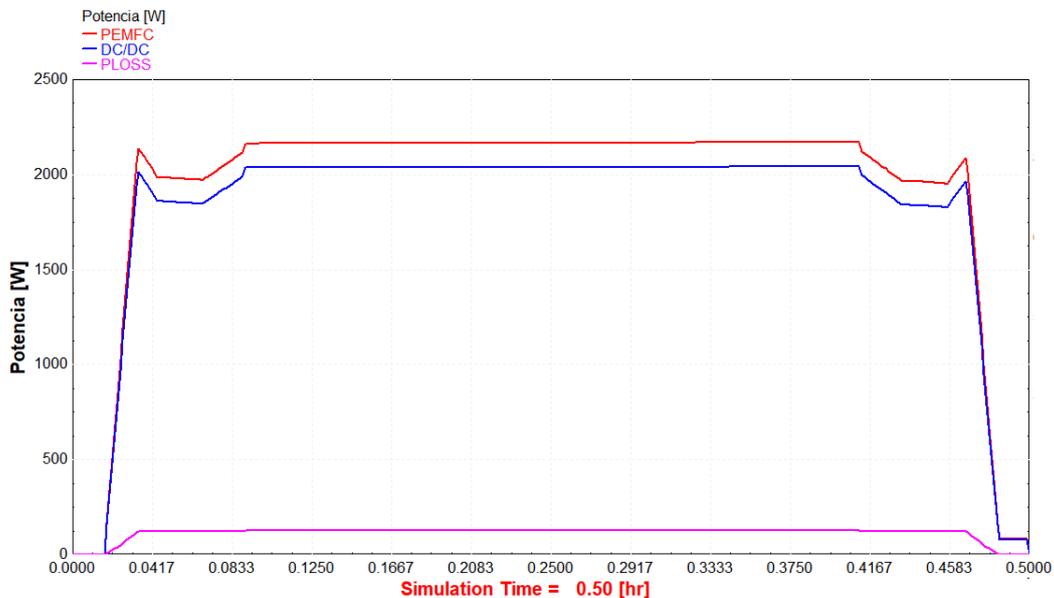


Figura 6. Pérdidas de potencia en el convertidor DC/DC (30 mins).

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería”
para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

En la Figura 7, se presenta la acción reductora del convertidor de potencia DC/DC para un tiempo de simulación de 30min. Para reducir la tensión de la pila de combustible PEMFC (U_{ENT}) al rango de tensión de la batería LiPo (U_{SAL}), se producen unas pérdidas de potencia (según la Figura 6 anterior) y según el modelado de la corriente eléctrica de salida en el convertidor de potencia DC/DC (I_{SAL}), es posible determinar la corriente eléctrica que debe proporcionar la pila de combustible PEMFC (I_{ENT}).

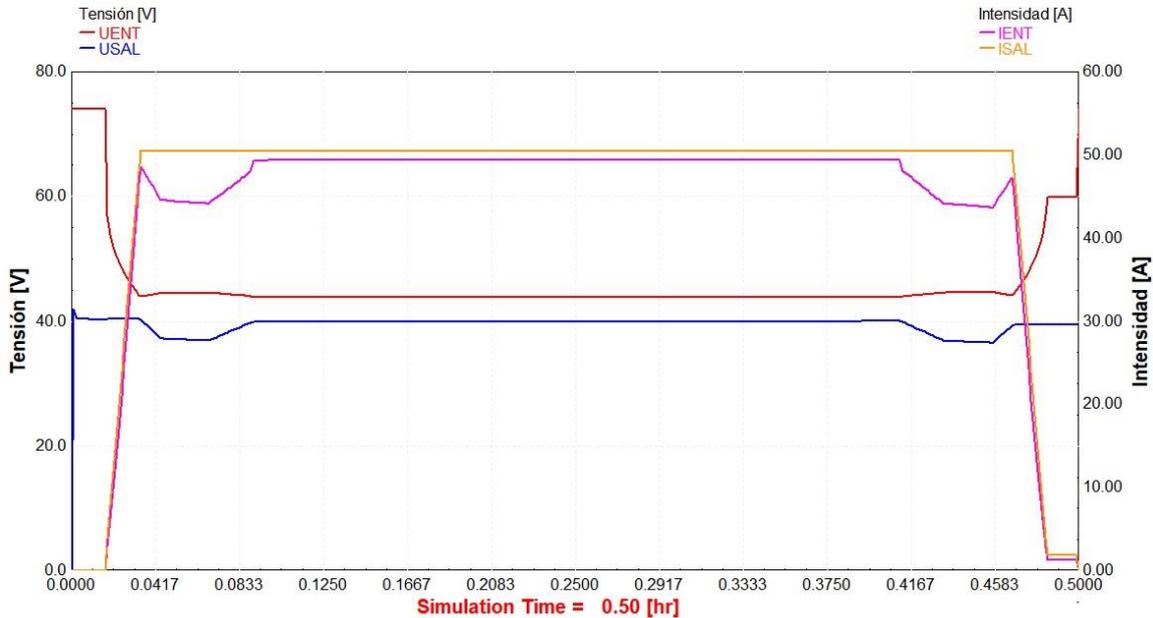


Figura 7. Acción reductora del convertidor de potencia DC/DC (30 mins).

La Figura 8 establece una relación directa entre la intensidad de corriente que genera la pila de combustible PEMFC y el caudal de hidrógeno según las condiciones de almacenamiento en el depósito ($p = 300bar$, $T = 25^{\circ}C$) para un tiempo de simulación de 30min. Para una intensidad de corriente promedio de 50A durante la fase de vuelo estacionario, se requiere un consumo de unos 7 L/h de H_2 .

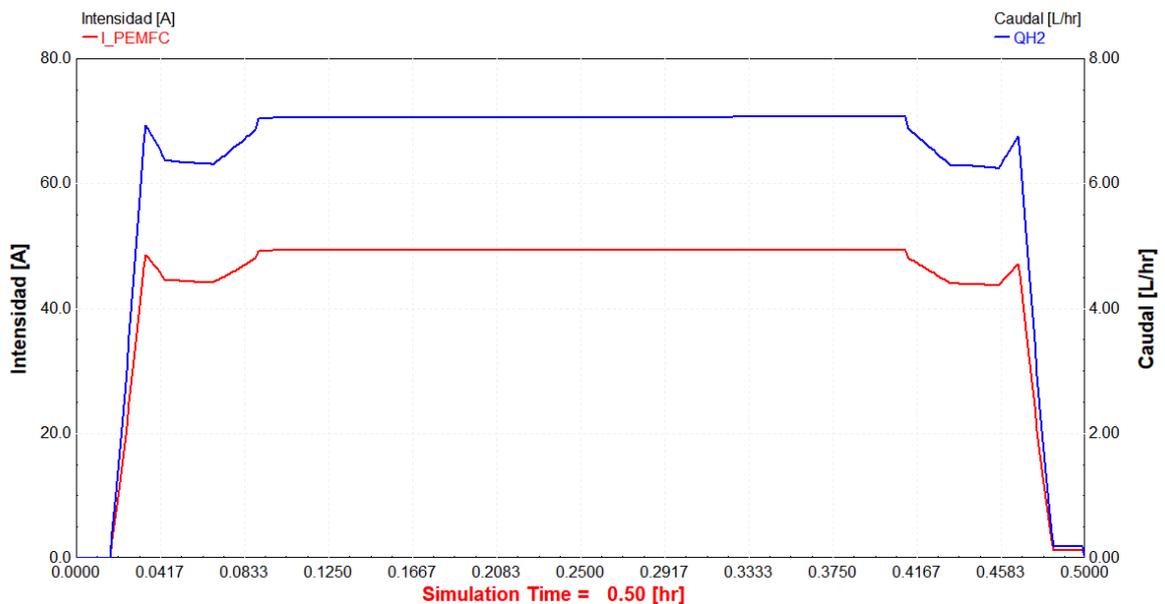


Figura 8. Relación entre la intensidad de corriente y el caudal de H_2 (30 mins).

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería”
para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

La Figura 9 representa la evolución del consumo de hidrógeno en la pila de combustible PEMFC para un tiempo de simulación de 30min. Para un caudal promedio de 7 L/h y considerando una duración de la fase de vuelo estacionario de 20min, el volumen final de hidrógeno necesario para cumplir con un tiempo de vuelo de 30min resulta en 3,10 L de H₂ para unas condiciones de almacenamiento en el depósito de combustible ($p = 300bar$, $T = 25^{\circ}C$).

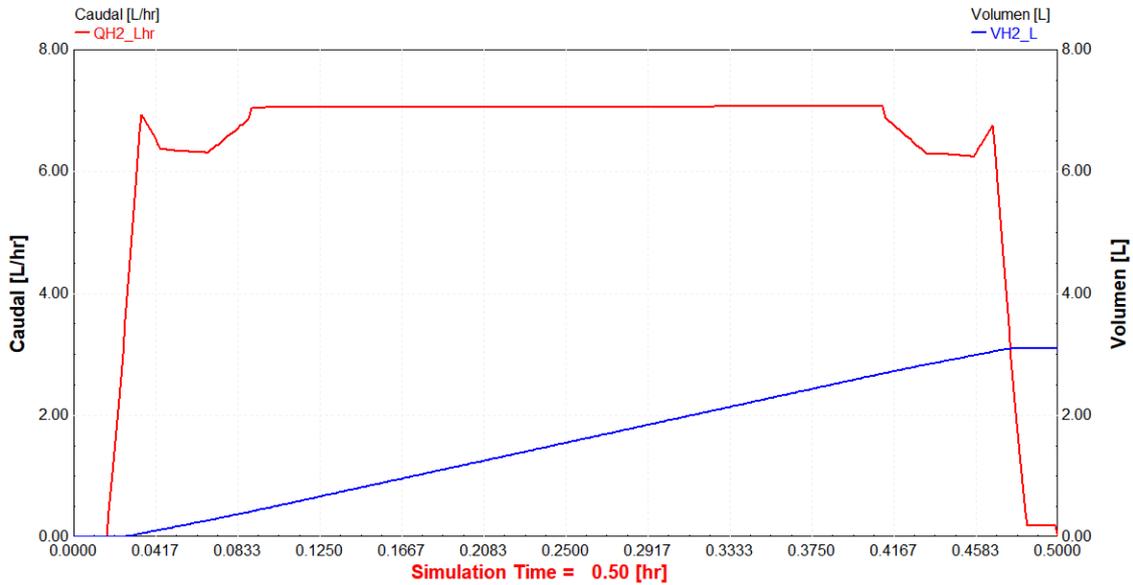


Figura 9. Consumo de hidrógeno en la pila de combustible PEMFC (30 mins).

En la Figura 10 se observa la respuesta del sistema híbrido eléctrico formado por una pila de combustible PEMFC y una batería LiPo frente a la demanda energética de un dron de gran tamaño, considerando un tiempo de simulación equivalente a 30min de vuelo, permitiendo comprobar que se cumplen las demandas energéticas de vuelo según la curva de demanda en la Figura 1.

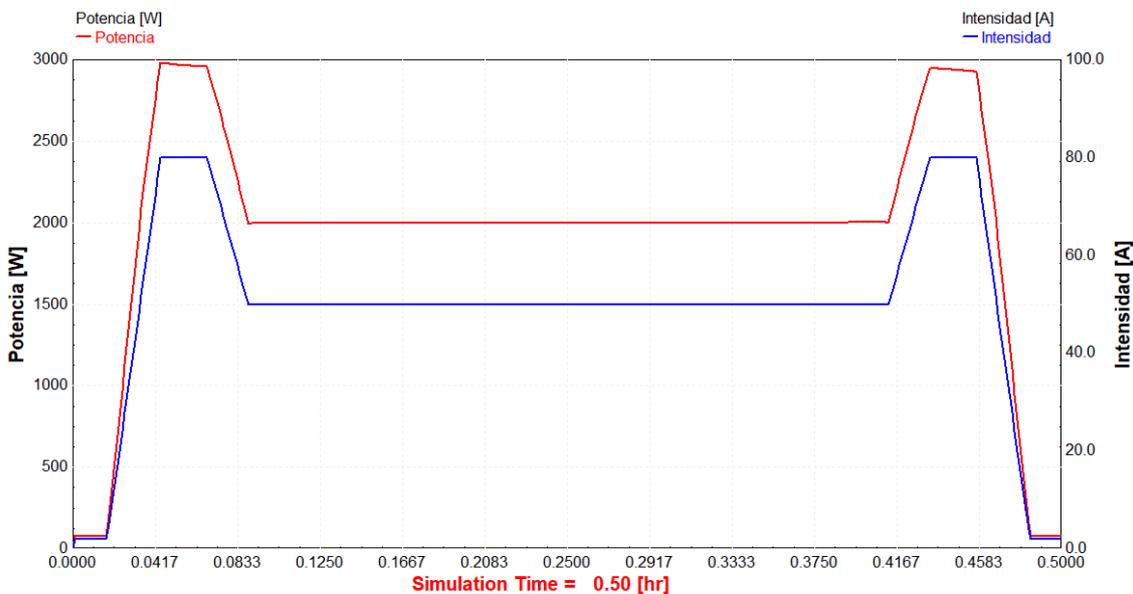


Figura 10. Respuesta del sistema híbrido eléctrico “pila de combustible PEMFC + batería LiPo” frente a la demanda energética de un dron de gran tamaño – 20kg (30 mins).

ANEXO 2. TIEMPO DE SIMULACIÓN: 1H 30MIN

A continuación, se procede con el análisis de las simulaciones realizadas para un tiempo de simulación equivalente a 1h:30min de vuelo del dron. En el modelado de la curva de demanda semiempírica del dron de gran tamaño, se mantienen constantes las duraciones de las fases de arranque/parada (1 min) y de las fases de despegue/aterrizaje (4 min), por lo que la duración de la fase de vuelo estacionario resulta en 80 min (1h:20min).

En la Figura 11, se observa el modelado de la curva de demanda semiempírica del dron para un tiempo de vuelo de 1h:30 mins. Se pueden apreciar los picos máximo de potencia (3000W|80A) durante las fases de despegue/aterrizaje, así como la demanda estacionaria (2000W|50A). En la Figura 12, se puede observar el modelado de la respuesta del sistema híbrido eléctrico “pila de combustible PEMFC + batería LiPo” frente a la curva de demanda semiempírica del dron, según el funcionamiento detallado previamente en los apartados 6 y 7 de la Memoria.

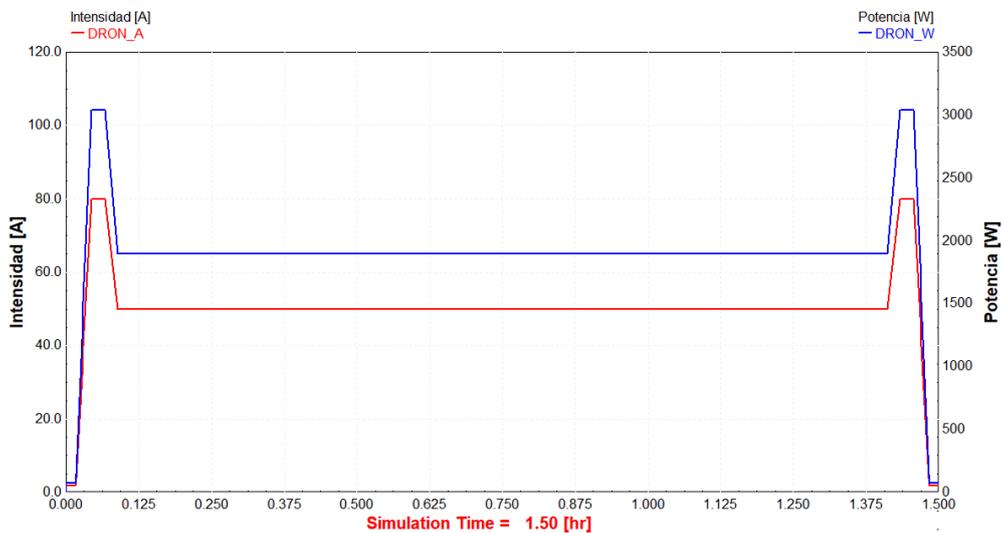


Figura 11. Curva de demanda semiempírica de un dron de gran tamaño – 20kg (1h:30mins).



Figura 12. Modelado de la respuesta del sistema híbrido "PEMFC + LiPo" (1h:30mins).

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería”
para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

En la Figura 13, se puede observar la respuesta de la pila de combustible PEMFC para un tiempo de simulación de 1h:30min, presentando un comportamiento en régimen estacionario (2200W) y ofreciendo un rango de tensión estable entre 45-50V.

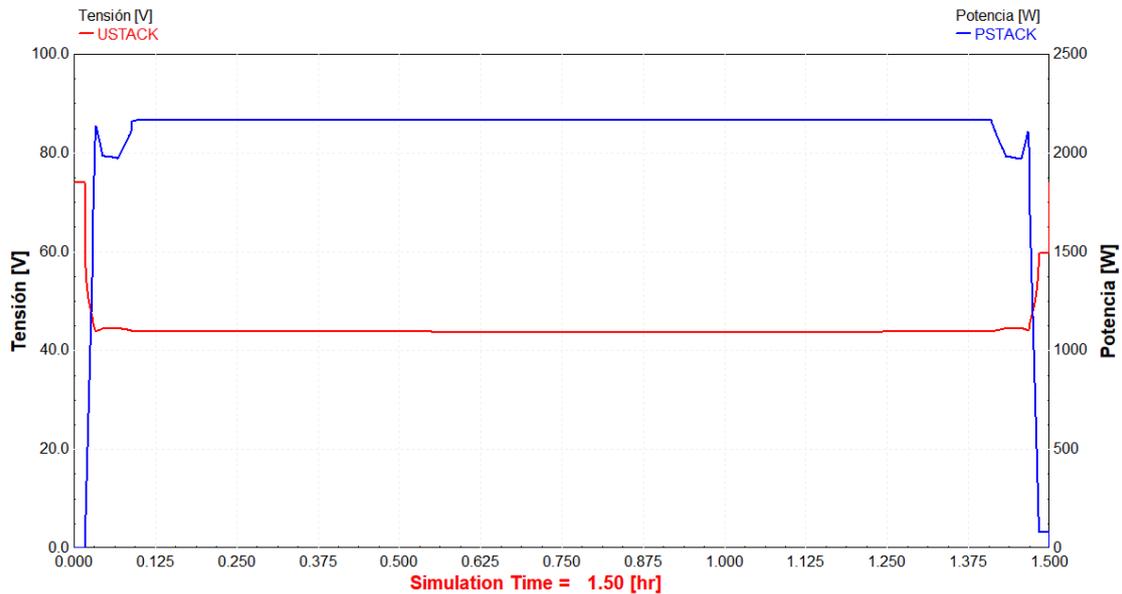


Figura 13. Respuesta dinámica de la pila de combustible PEMFC (1h:30mins).

En la Figura 14, se presenta la respuesta de la batería LiPo para un tiempo de simulación de 1h:30min, donde se aprecia que la batería LiPo resulta fundamental durante las fases de despegue y aterrizaje, proporcionando una potencia eléctrica de +1000W para alcanzar los picos máximos de demanda del dron (3000W) y manteniendo un rango de tensión fluctuante entre 37-40V según el estado de carga.

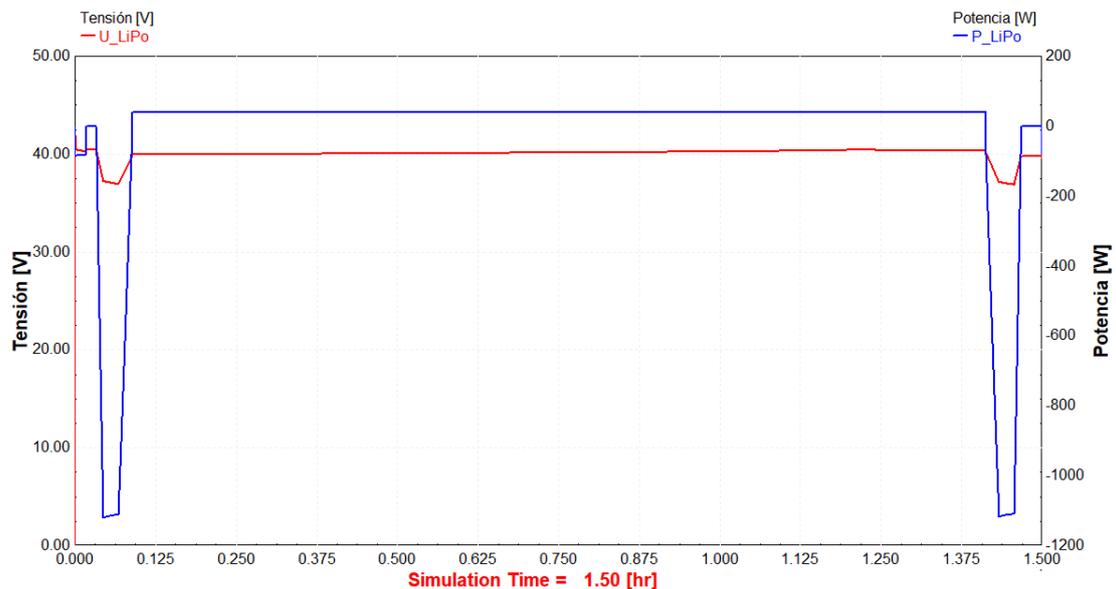


Figura 14. Respuesta dinámica de la batería LiPo (1h:30mins).

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería” para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

Por su parte, en la Figura 15 se puede observar la evolución del estado de carga de la batería LiPo para un tiempo de simulación de 1h:30min, permitiendo identificar claramente los procesos de descarga de la batería LiPo durante las correspondientes fases de despegue y aterrizaje. Sin embargo, resulta más interesante comprobar el proceso de recarga de la batería LiPo aprovechando el excedente eléctrico que genera la pila de combustible PEMFC durante la fase de vuelo estacionario.

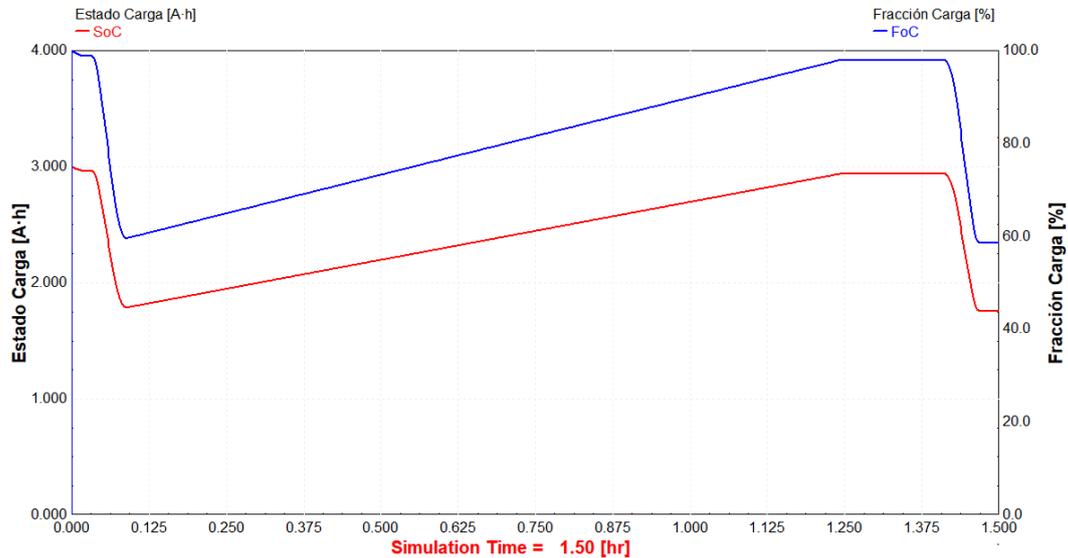


Figura 15. Estado de carga de la batería LiPo (1h:30mins).

Debido al rango de tensión de la pila de combustible PEMFC (45-50V) y de la batería LiPo (37-40V) según los resultados de las Figuras 13 y 14, se justifica la necesidad de un convertidor de potencia DC/DC con configuración reductora para ajustar la tensión de la pila PEMFC al rango de tensión de la batería. Por tanto, en la Figura 16 se observan las pérdidas en el convertidor DC/DC para un tiempo de simulación de 1h:30min, de forma que la salida de la etapa de potencia (PEMFC+DC/DC) se mantiene alrededor de la demanda estacionaria del dron de gran tamaño (2000W).

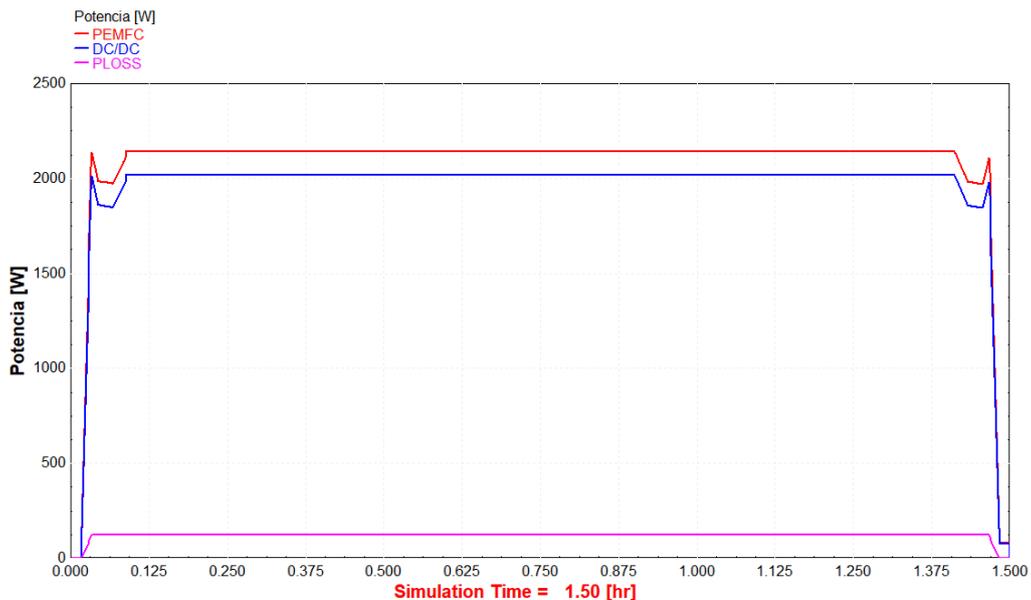


Figura 16. Pérdidas de potencia en el convertidor DC/DC (1h:30mins).

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería” para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

En la Figura 17, se presenta la acción reductora del convertidor de potencia DC/DC para un tiempo de simulación de 1h:30min. Para reducir la tensión de la pila de combustible PEMFC (U_{ENT}) al rango de tensión de la batería LiPo (U_{SAL}), se producen unas pérdidas de potencia (según la Figura 16 anterior) y según el modelado de la corriente eléctrica de salida en el convertidor de potencia DC/DC (I_{SAL}), es posible determinar la corriente eléctrica que debe proporcionar la pila de combustible PEMFC (I_{ENT}).

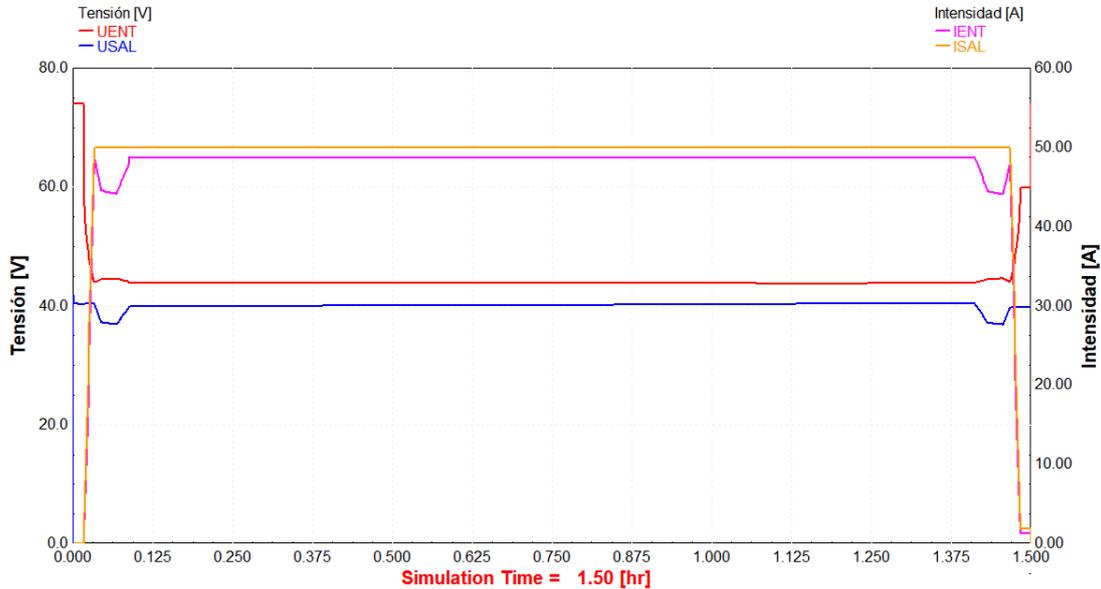


Figura 17. Acción reductora del convertidor de potencia DC/DC (1h:30mins).

La Figura 18 establece una relación directa entre la intensidad de corriente que genera la pila de combustible PEMFC y el caudal de hidrógeno según las condiciones de almacenamiento en el depósito ($p = 300\text{bar}$, $T = 25^{\circ}\text{C}$) para un tiempo de simulación de 1h:30min. Para una corriente promedio de 50A durante la fase de vuelo estacionario, se requiere un consumo de unos 7 L/h de H_2 .

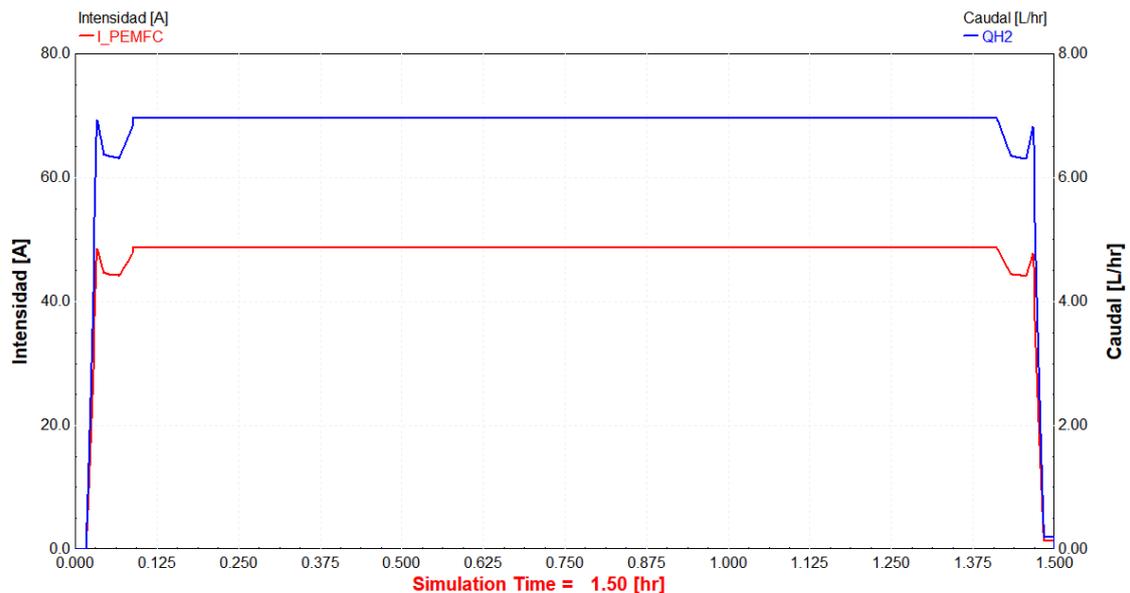


Figura 18. Relación entre la intensidad de corriente y el caudal de H_2 (1h:30mins).

Análisis y diseño de un sistema híbrido "pila de combustible – batería"
para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

La Figura 19 representa la evolución del consumo de hidrógeno en la pila de combustible PEMFC para un tiempo de simulación de 1h:30min. Para un caudal promedio de 7 L/h y considerando una duración de la fase de vuelo estacionario de 80min, el volumen final de hidrógeno necesario para cumplir con un tiempo de vuelo de 1h:30min resulta en 10,20 L de H₂ para unas condiciones de almacenamiento en el depósito de combustible ($p = 300bar$, $T = 25^{\circ}C$).

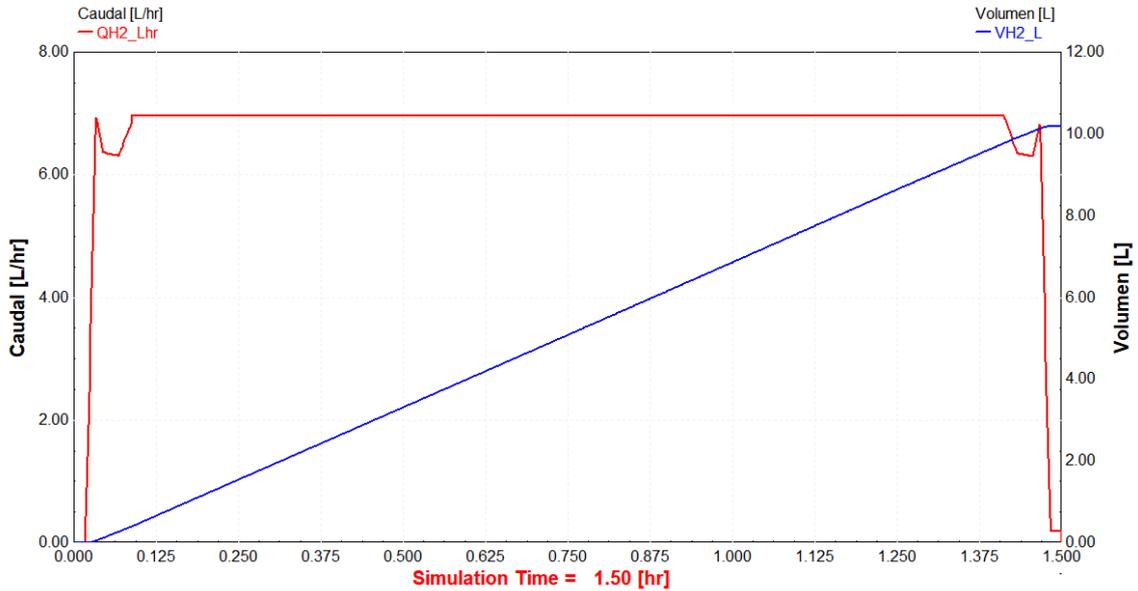


Figura 19. Consumo de hidrógeno en la pila de combustible PEMFC (1h:30mins).

En la Figura 20 se observa la respuesta del sistema híbrido eléctrico formado por una pila de combustible PEMFC y una batería LiPo frente a la demanda energética de un dron de gran tamaño, considerando un tiempo de simulación equivalente a 1h:30min de vuelo, permitiendo comprobar que se cumplen las demandas energéticas de vuelo según la curva de demanda en la Figura 11.

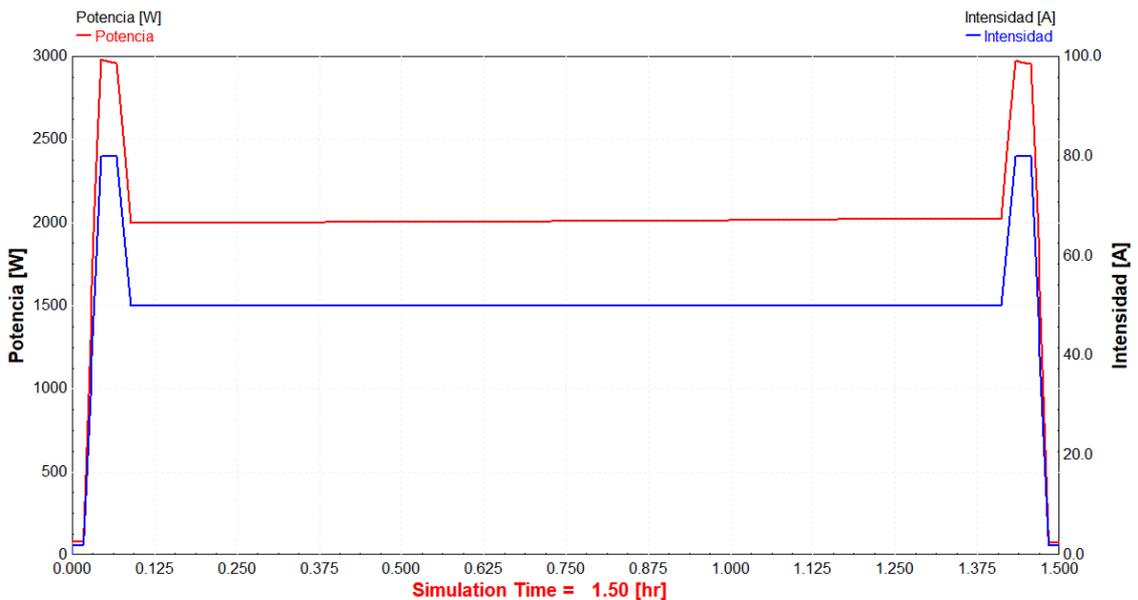


Figura 20. Respuesta del sistema híbrido eléctrico "pila de combustible PEMFC + batería LiPo" frente a la demanda energética de un dron de gran tamaño – 20kg (1h:30mins).

ANEXO 3. TIEMPO DE SIMULACIÓN: 2H

A continuación, se procede con el análisis de las simulaciones realizadas para un tiempo de simulación equivalente a 2 horas de vuelo del dron. En el modelado de la curva de demanda semiempírica del dron de gran tamaño, se mantienen constantes las duraciones de las fases de arranque/parada (1 min) y de las fases de despegue/aterrizaje (4 min), por lo que la duración de la fase de vuelo estacionario resulta en 110min (1h:50min).

En la Figura 21, se observa el modelado de la curva de demanda semiempírica del dron para un tiempo de vuelo de 2 horas. Se pueden apreciar los picos máximo de potencia (3000W|80A) durante las fases de despegue/aterrizaje, así como la demanda estacionaria (2000W|50A). En la Figura 22, se puede observar el modelado de la respuesta del sistema híbrido eléctrico “pila de combustible PEMFC + batería LiPo” frente a la curva de demanda semiempírica del dron, según el funcionamiento detallado previamente en los apartados 6 y 7 de la Memoria.

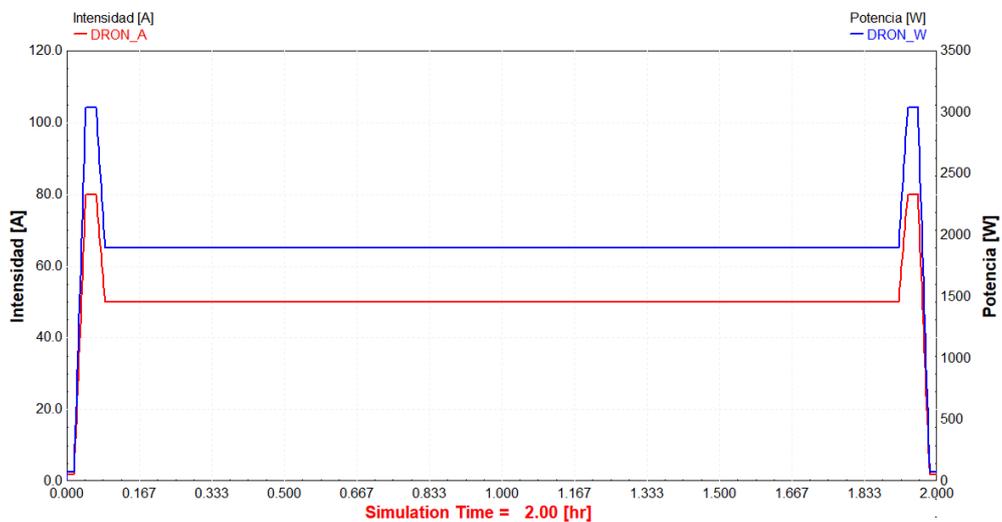


Figura 21. Curva de demanda semiempírica de un dron de gran tamaño – 20kg (2h).

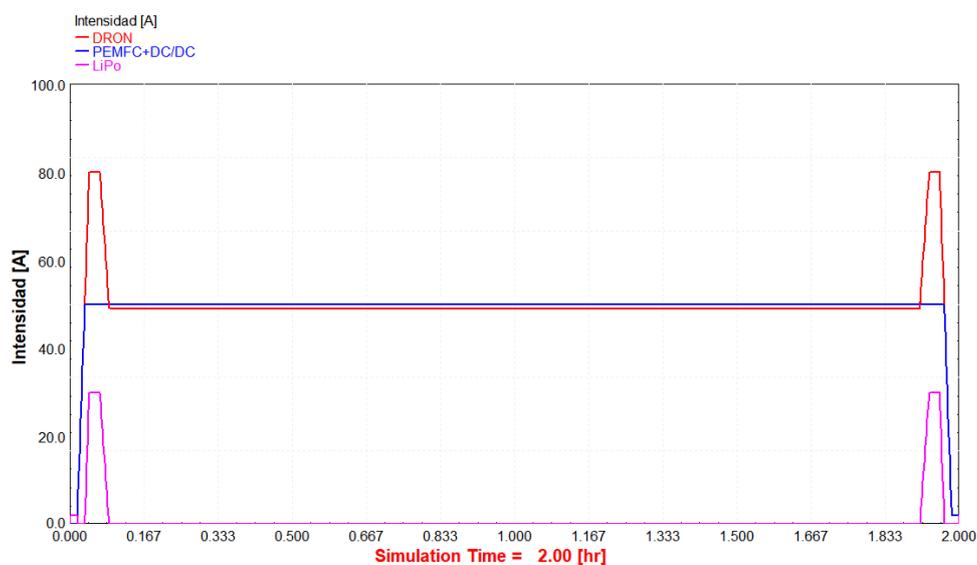


Figura 22. Modelado de la respuesta del sistema híbrido "PEMFC + LiPo" (2h).

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería”
para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

En la Figura 23, se puede observar la respuesta de la pila de combustible PEMFC para un tiempo de simulación de 2h, presentando un comportamiento en régimen estacionario (2200W) y ofreciendo un rango de tensión estable entre 45-50V.

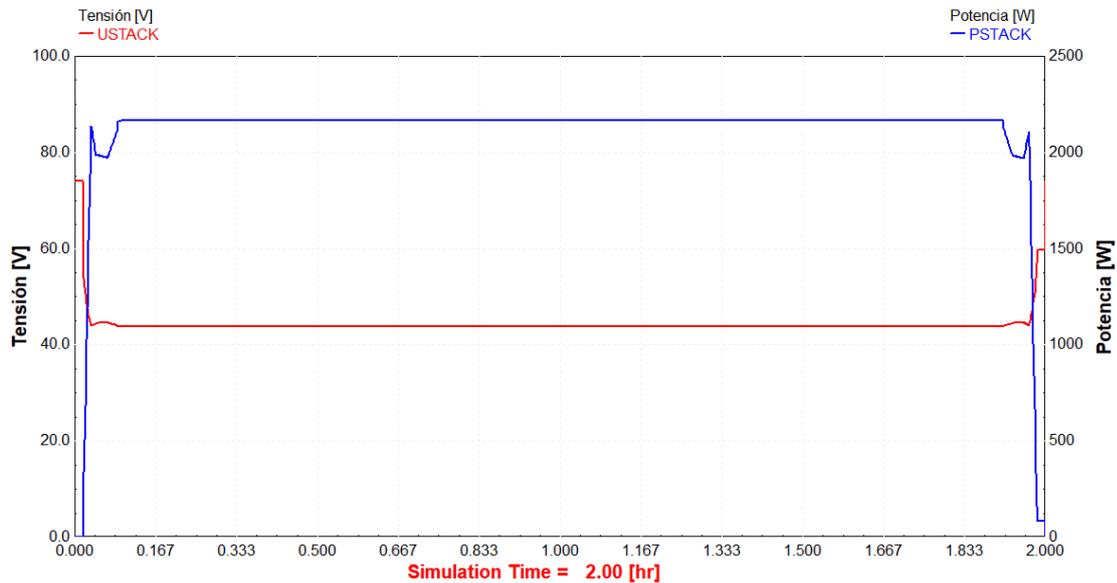


Figura 23. Respuesta dinámica de la pila de combustible PEMFC (2h).

En la Figura 24, se presenta la respuesta de la batería LiPo para un tiempo de simulación de 2h, donde se aprecia que la batería LiPo resulta fundamental durante las fases de despegue y aterrizaje, proporcionando una potencia eléctrica de +1000W para alcanzar los picos máximos de demanda del dron (3000W) y manteniendo un rango de tensión fluctuante entre 37-40V según el estado de carga.

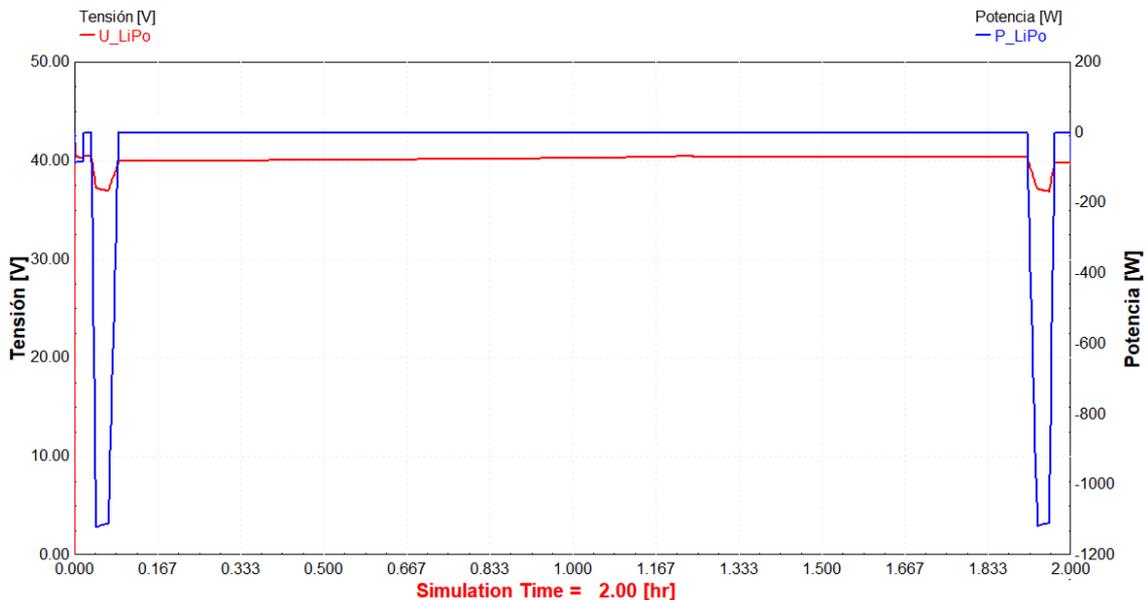


Figura 24. Respuesta dinámica de la batería LiPo (2h).

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería” para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

Por su parte, en la Figura 25 se puede observar la evolución del estado de carga de la batería LiPo para un tiempo de simulación de 2h, permitiendo identificar claramente los procesos de descarga de la batería LiPo durante las correspondientes fases de despegue y aterrizaje. Sin embargo, resulta más interesante comprobar el proceso de recarga de la batería LiPo aprovechando el excedente eléctrico que genera la pila de combustible PEMFC durante la fase de vuelo estacionario.

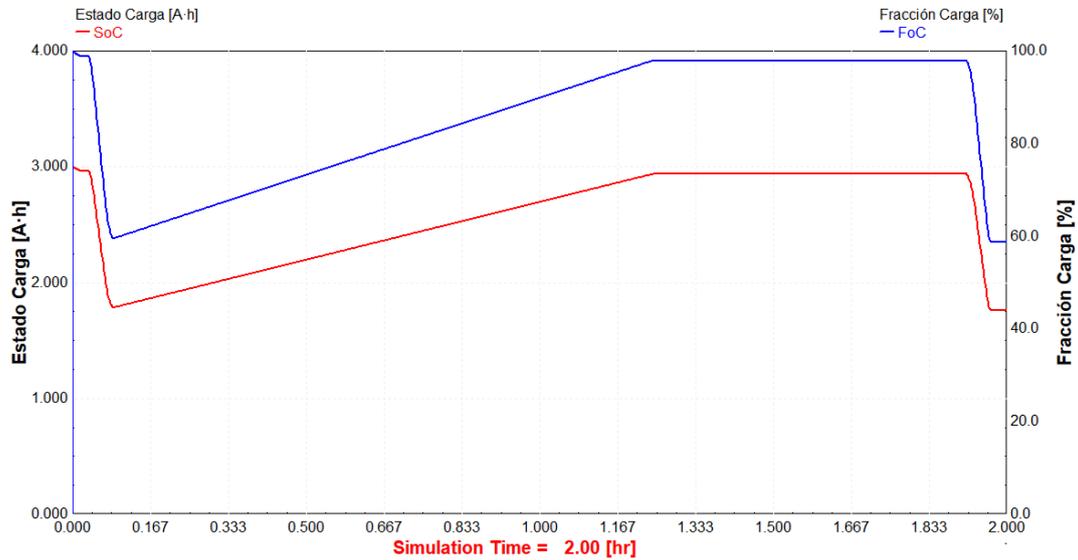


Figura 25. Estado de carga de la batería LiPo (2h).

Debido al rango de tensión de la pila de combustible PEMFC (45-50V) y de la batería LiPo (37-40V) según los resultados de las Figuras 23 y 24, se justifica la necesidad de un convertidor de potencia DC/DC con configuración reductora para ajustar la tensión de la pila PEMFC al rango de tensión de la batería. Por tanto, en la Figura 26 se observan las pérdidas en el convertidor DC/DC para un tiempo de simulación de 2h, de forma que la salida de la etapa de potencia (PEMFC+DC/DC) se mantiene alrededor de la demanda estacionaria del dron de gran tamaño (2000W).

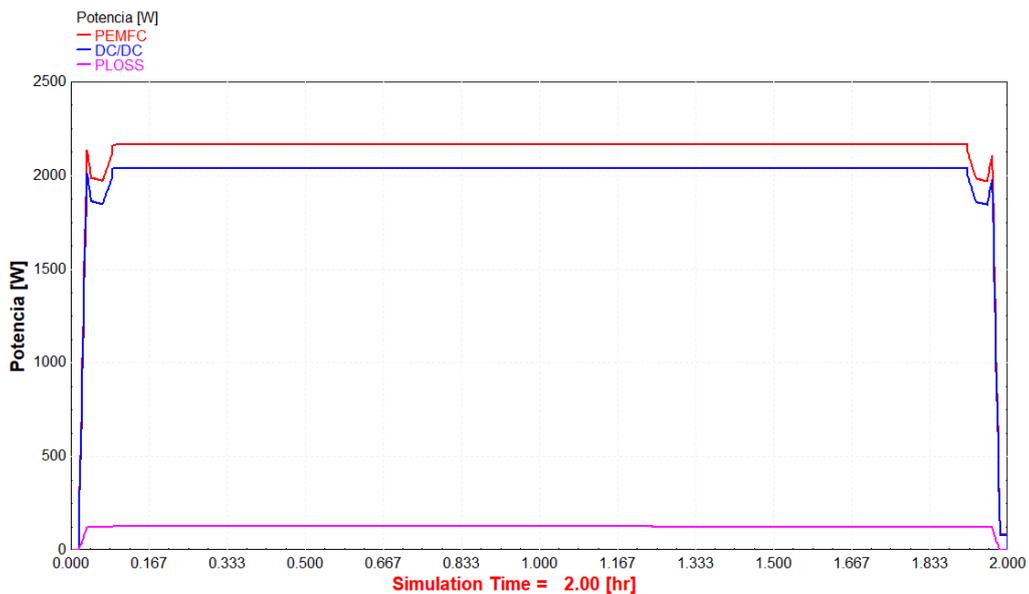


Figura 26. Pérdidas de potencia en el convertidor DC/DC (2h).

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería” para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

En la Figura 27, se presenta la acción reductora del convertidor de potencia DC/DC para un tiempo de simulación de 2h. Para reducir la tensión de la pila de combustible PEMFC (U_{ENT}) al rango de tensión de la batería LiPo (U_{SAL}), se producen unas pérdidas de potencia (según la Figura 26 anterior) y según el modelado de la corriente eléctrica de salida en el convertidor de potencia DC/DC (I_{SAL}), es posible determinar la corriente eléctrica que debe proporcionar la pila de combustible PEMFC (I_{ENT}).

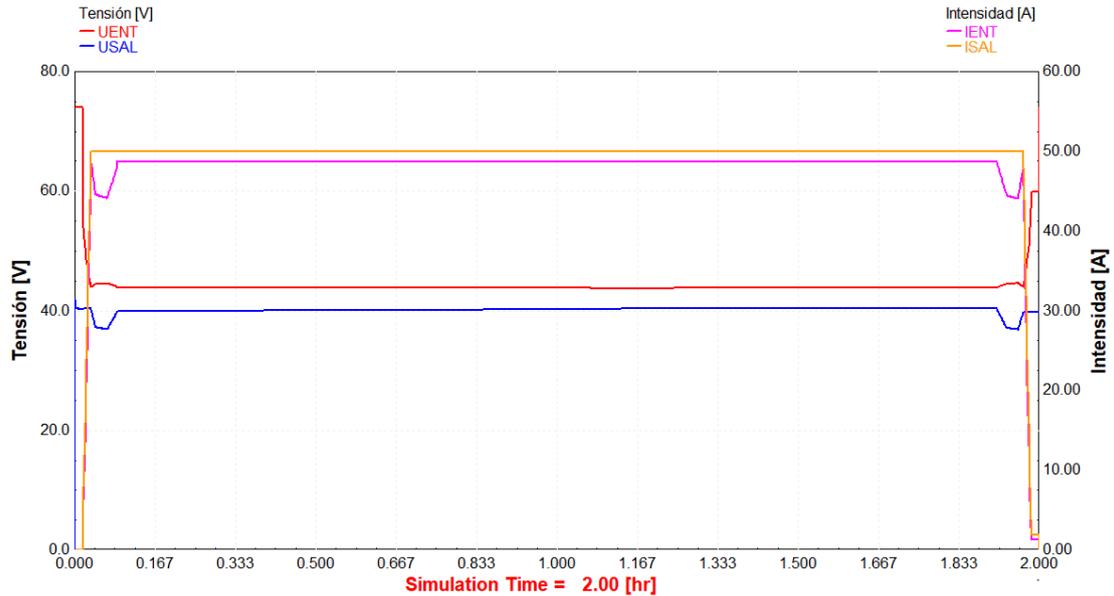


Figura 27. Acción reductora del convertidor de potencia DC/DC (2h).

La Figura 28 establece una relación directa entre la intensidad de corriente que genera la pila de combustible PEMFC y el caudal de hidrógeno según las condiciones de almacenamiento en el depósito ($p = 300\text{bar}$, $T = 25^{\circ}\text{C}$) para un tiempo de simulación de 2h. Para una intensidad de corriente promedio de 50A durante la fase de vuelo estacionario, se requiere un consumo de unos 7 L/h de H_2 .

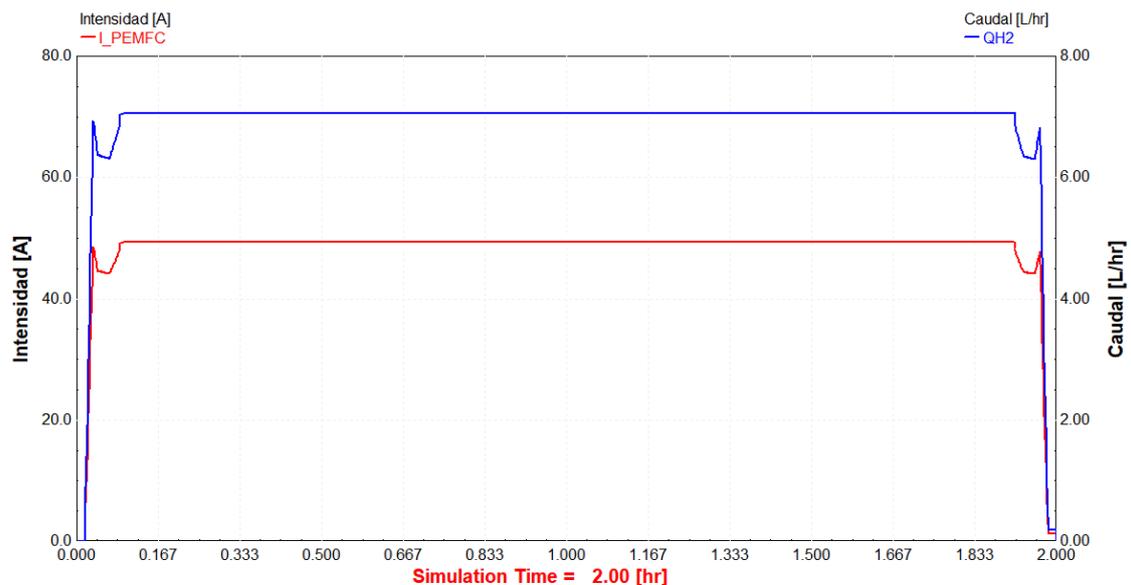


Figura 28. Relación entre la intensidad de corriente y el caudal de H_2 (2h).

Análisis y diseño de un sistema híbrido “pila de combustible – batería”
para alimentación de vehículos aéreos no tripulados

La Figura 29 representa la evolución del consumo de hidrógeno en la pila de combustible PEMFC para un tiempo de simulación de 2h. Para un caudal promedio de 7 L/h y considerando una duración de la fase de vuelo estacionario de 110min, el volumen final de hidrógeno necesario para cumplir con un tiempo de vuelo de 2h resulta en 13,75 L de H₂ según las condiciones de almacenamiento en el depósito de combustible ($p = 300\text{bar}$, $T = 25^{\circ}\text{C}$).

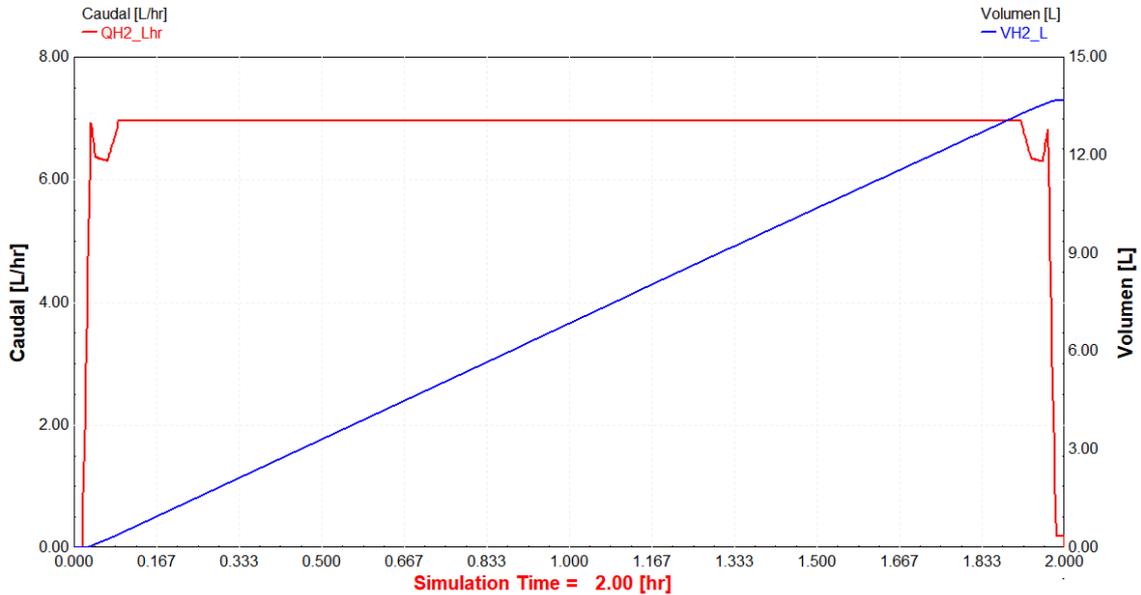


Figura 29. Consumo de hidrógeno en la pila de combustible PEMFC (2h).

En la Figura 30 se observa la respuesta del sistema híbrido eléctrico formado por una pila de combustible PEMFC y una batería LiPo frente a la demanda energética de un dron de gran tamaño, considerando un tiempo de simulación equivalente a 30min de vuelo, permitiendo comprobar que se cumplen las demandas energéticas de vuelo según la curva de demanda en la Figura 21.

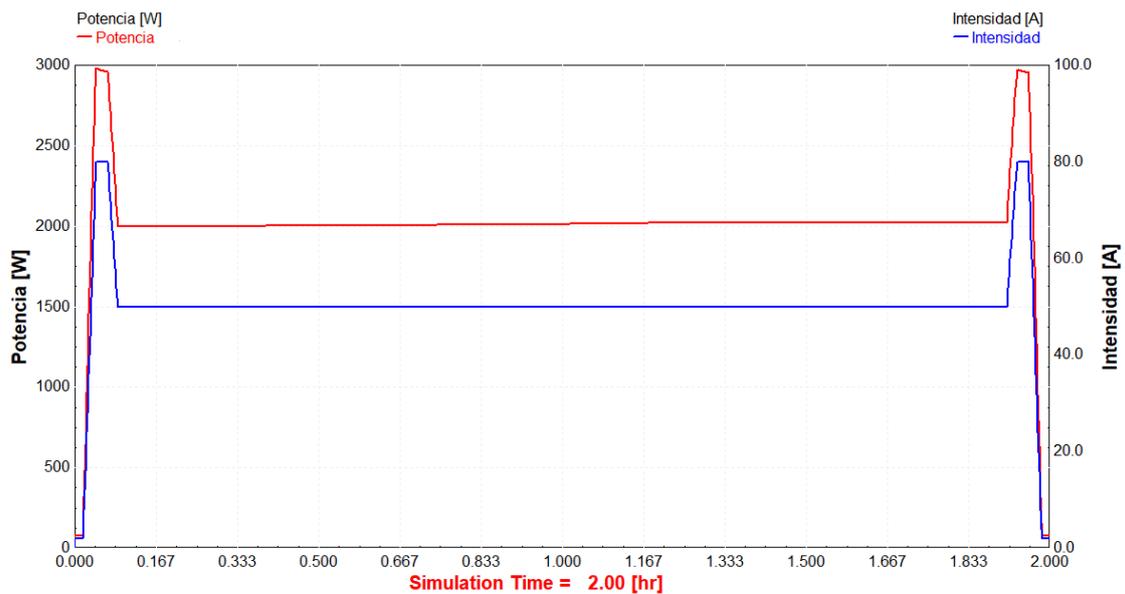


Figura 30. Respuesta del sistema híbrido eléctrico "pila de combustible PEMFC + batería LiPo" frente a la demanda energética de un dron de gran tamaño – 20kg (2h).

