



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Simulación de sistemas de propulsión anaeróbica (AIP) para
buques submarinos mediante pilas de combustible, baterías e
hidruros metálicos.*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: José María Gil Carbonell

DIRECTORES: Víctor Alfonsín Pérez

CURSO ACADÉMICO: 2021-2022

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Simulación de sistemas de propulsión anaeróbica (AIP) para
buques submarinos mediante pilas de combustible, baterías e
hidruros metálicos.*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

A efectos prácticos, AIP (*Air Independent Propulsion*) se define como una tecnología que permite a los submarinos no nucleares aumentar su tiempo de permanencia en inmersión sin la necesidad de emerger a la superficie o permanecer a cota periscópica para obtener aire de la atmósfera. Con el auge en el desarrollo de estos sistemas en el ámbito militar, numerosas empresas apuestan por la innovación en multitud de áreas relacionadas con los procesos de generación de hidrógeno, el almacenamiento del recurso energético, la eficiencia de las pilas de combustible, y muchas otras que han propiciado el impulso de ambiciosos proyectos militares como los futuros submarinos S-80 y sus prototipos de sistema AIP basados en el reformado de bioetanol. Es por ello por lo que en las últimas décadas el concepto del hidrógeno como vector energético se ha extendido notablemente, con importantes mejoras en los métodos de obtención, almacenamiento y gestión del recurso y los residuos generados. El presente Trabajo Fin de Grado propone un paso más en la investigación y desarrollo de dichos sistemas mediante el uso de hidruros metálicos para el almacenamiento de hidrógeno y su posterior uso en sistemas AIP. El empleo de hidruros metálicos para el almacenamiento del vector energético supone una propuesta de vanguardia, con capacidades modulares que permiten un aprovechamiento eficiente del hidrógeno en pilas de combustible para la obtención de importantes mejoras del tiempo de inmersión en submarinos, así como una mayor adaptabilidad en cuanto a los requerimientos operativos que dichos vehículos suponen.

PALABRAS CLAVE

AIP, hidruros metálicos, hidrógeno, pila de combustible, submarinos, baterías, lógica difusa.

AGRADECIMIENTOS

A mi padre, que desde que tengo uso de razón me enseñó que una de las cosas más hermosas de este mundo es inventar algo de la nada. Gracias, papá por transmitirme tu pasión por las ciencias y la ingeniería.

A mi madre, que a pesar de separarnos mil kilómetros de distancia siempre estuvo apoyándome para seguir adelante. Gracias, mamá por enseñarme que con paciencia, perseverancia y tiempo, tarde o temprano todo llega.

A mi hermano, que junto con mi padre y mi madre constituyen los pilares que me ayudan a levantarme cada mañana y trabajar en aquello que me apasiona.

La deuda que he contraído con vosotros jamás podrá ser pagada. Os quiero.

CONTENIDO

CONTENIDO	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	8
1 Introducción y Objetivos	9
1.1 Panorama energético actual	9
1.2 El hidrógeno.....	12
1.2.1 Generación	13
1.2.2 Hidrógeno como vector energético.....	14
1.2.3 Pilas de combustible	14
1.3 Almacenamiento del recurso energético	16
1.3.1 Almacenamiento en tanques	16
1.3.2 Almacenamiento bajo licuado	17
1.3.3 Almacenamiento en hidruros metálicos.....	18
1.4 Aplicaciones en transporte	18
1.5 Los sistemas AIP	19
1.5.1 Concepto de los sistemas AIP.....	19
1.5.2 Hidruros metálicos como alternativa de almacenamiento en sistemas AIP	21
1.6 Objetivos del presente trabajo.....	23
2 Estado del Arte	24
2.1 Introducción	24
2.1.1 Reseña histórica, evolución y actualidad de los submarinos	24
2.2 Líneas de desarrollo en sistemas AIP	25
2.2.1 Problemática energética y necesidades.....	26
2.2.2 Líneas de desarrollo españolas: El S-80	26
2.2.3 Otras líneas de desarrollo.....	27
3 Desarrollo del TFG.....	28
3.1 Introducción	28
3.2 Módulo de almacenamiento en Baterías	29
3.2.1 Fundamentos de la batería	29
3.2.2 Caracterización de la batería.....	31
3.2.3 Modelado de la batería.....	32
3.3 Módulo de Pila de Combustible.....	41
3.3.1 Fundamentos de la pila de combustible.....	41

3.3.2 Componentes de una pila de combustible	42
3.3.3 Tipos de pilas de combustible.....	43
3.3.4 Ventajas e inconvenientes.....	47
3.3.5 Modelado de la pila de combustible.	48
3.4 Módulo de almacenamiento en Hidruros metálicos.....	53
3.4.1 Fundamentos de los hidruros metálicos.....	53
3.4.2 Tipos de hidruros metálicos.....	54
3.4.3 Modelado del hidruro metálico.....	55
3.5 Módulo de propulsión eléctrica.....	63
3.5.1 El motor eléctrico	63
3.5.2 Caracterización del motor eléctrico	67
3.5.3 Modelado del motor eléctrico	68
3.6 Módulo diésel generador de emergencia	69
3.7 Módulo de control.....	70
3.7.1 Fundamentos de la lógica difusa.....	71
3.7.2 Base teórica.....	71
3.7.3 Modelado del controlador lógico.....	75
4 Simulación.....	78
4.1 Introducción	78
4.1.1 Modelo AIP y condiciones iniciales	78
4.1.2 Configuraciones planteadas	79
5 Resultados	83
5.1 Resultados	83
5.1.1 Introducción.....	83
5.1.2 Resultados configuración 1.....	83
5.1.3 Resultados configuración 2.....	85
5.1.4 Resultados configuración 3.....	88
5.2 Comparación de resultados	90
6 Conclusiones y Líneas Futuras	93
6.1 Conclusiones	93
6.2 Líneas futuras.....	94
7 Referencias	96
Anexo I: Datos del Fabricante.....	101
Anexo II: Tablas Complementarias.....	104
Anexo III: Funciones de Pertenencia	106

Anexo IV: Superficies de Respuesta	110
Anexo V: Bases de Reglas	114
Anexo VI: Resultados de Simulación	116
Simulación sin empleo de pila de combustible.....	116
Simulación con empleo de 2 pilas de combustible	118
Simulación con empleo de 4 pilas de combustible	121
Resultados simulación de hidruros metálicos	124
Anexo VII: Código Matlab.....	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Demanda mundial energética en escenario de referencia [26].	10
Figura 1-2: Demanda mundial energética por región y fuente de energía empleada, con previsión para el año 2030 [26].	10
Figura 1-3: Diagrama de sectores representativo de los recursos fósiles convencionales. [Fuente propia].	11
Figura 1-4: Diagrama de sectores representativo de los recursos fósiles no convencionales. [Fuente propia].	11
Figura 1-5: Tendencia de evolución de los valores de potencia instalada en instalaciones hidráulicas, nucleares y de geotermia en los últimos 40 años [14].	12
Figura 1-6: Origen del hidrogeno producido en el año 2007 [Fuente propia].	13
Figura 1-7: Metodologías de producción de hidrógeno [Fuente propia].	14
Figura 1-8: Diagrama de operación de una pila de combustible básica [Fuente propia].	15
Figura 1-9: Densidad energética por unidad de masa para distintas fuentes de energía. [Fuente propia].	16
Figura 1-10: Densidad energética por unidad de volumen para distintas fuentes de energía. [Fuente propia].	16
Figura 1-11: Consumo mínimo energético para comprimir hidrogeno desde 1 atm a 20 °C (referido al poder calorífico inferior del hidrógeno) [Fuente propia].	17
Figura 1-12: Esquema representativo de un sistema de propulsión convencional en submarinos [Fuente propia].	20
Figura 1-13: Esquema de planta propulsora de submarino basado en sistemas AIP [Fuente propia].	21
Figura 2-1: Prototipo de submarino "Turtle". [69].	24
Figura 2-2: Primer submarino Peral. [70]	25
Figura 2-3: Sistema AIP por reformado de Metanol en los submarinos S-80 [28].	25
Figura 2-4: Retos tecnológicos planteados por el S-80 [15].	26
Figura 3-1: Esquema modelo AIP diseñado. [Fuente propia].	29
Figura 3-2: Ejemplo curva SOC-OCV para baterías Níquel-Cadmio. [Fuente propia]	32
Figura 3-3: Modelo general módulo de baterías. [Fuente propia].	33
Figura 3-4: Diagrama de bloques general de módulo de baterías. [Fuente propia]	35
Figura 3-5: Esquema básico de una batería. [Fuente propia]	35
Figura 3-6: Submódulo cálculo intensidad de corriente [Fuente propia]	36
Figura 3-7: Modelo resistencia interna módulo de baterías. [Fuente propia].	37
Figura 3-8: Submódulo de cálculo de CRCS [Fuente propia].	38
Figura 3-9: Curva SOC-OCV para baterías Ion-Litio [Fuente propia]	39
Figura 3-10: Submódulo cálculo OCV [Fuente propia]	40

Figura 3-11: Submódulo de calculo SOC [Fuente propia]	40
Figura 3-12: Diagrama cálculo capacidad de Peukert. [Fuente propia]	41
Figura 3-13: Modelo básico de pila de combustible [Fuente propia]	42
Figura 3-14: Esquema de una pila de combustible de geometría plana [Fuente propia]	42
Figura 3-15: Pila de combustible tipo PEMFC. [41]	44
Figura 3-16: Pila de combustible tipo DMFC. [41]	45
Figura 3-17: Pila de combustible tipo SOFC. [41]	45
Figura 3-18: Pila de combustible tipo AFC. [41]	46
Figura 3-19: Pila de combustible tipo MCFC. [41]	46
Figura 3-20: Pila de combustible tipo PAFC. [41]	47
Figura 3-21: Pila de combustible modelo FCvelocity HD-6. [42]	48
Figura 3-22: Esquema de composición pila de combustible modelo FCvelocity HD-6. [43]	49
Figura 3-23: Diagrama de bloques módulo pila de combustible FCvelocity HD-6. [fuente propia]	50
Figura 3-24: Diagrama expandido pila de combustible modelo FCvelocity HD-6. [Fuente propia]	51
Figura 3-25: Curva Potencia-Intensidad modelo FCvelocity HD-6. [Fuente propia]	51
Figura 3-26: Submódulo de cálculo de intensidad de corriente (FCvelocity HD-6). [Fuente propia]	52
Figura 3-27: Submódulo consumo reactantes (FCvelocity HD-6). [Fuente propia]	52
Figura 3-28: Curva consumo-intensidad modelo pila de combustible. [Fuente propia]	53
Figura 3-29: Clasificación de los hidruros metálicos. [Fuente propia]	54
Figura 3-30: Submódulo de balance de masa en hidruros metálicos. [Fuente propia]	57
Figura 3-31: Submódulo de balance de energía en hidruros metálicos. [Fuente propia]	58
Figura 3-32: Submódulo cálculo cinética de reacción en hidruros metálicos. [Fuente propia]	59
Figura 3-33: Submódulo cálculo de presión de equilibrio en hidruros metálicos. [Fuente propia]	60
Figura 3-34: Submódulo ecuación de gases ideales en hidruros metálicos. [Fuente propia]	61
Figura 3-35: Submódulo cálculo porcentaje en peso en hidruros metálicos. [Fuente propia]	62
Figura 3-36: Diagrama combinado del sistema de hidruros metálicos. [Fuente propia]	62
Figura 3-37: Diagrama general para módulo de hidruros metálicos. [Fuente propia]	63
Figura 3-38: Partes de un motor eléctrico. [Fuente abierta]	63
Figura 3-39: Motor DC con escobillas. [Fuente propia]	65
Figura 3-40: Esquemización del funcionamiento básico de un motor DC. [Fuente propia]	65
Figura 3-41: Diagrama compuesto de 3 inducidos en un motor DC brushless. [Fuente propia]	66
Figura 3-42: Esquema básico de un motor de inducción. [Fuente propia]	66
Figura 3-43: Módulo de propulsión eléctrica. [Fuente propia]	68

Figura 3-44: Subsistema de propulsión eléctrica. [Fuente propia]	69
Figura 3-45: Diagrama de bloques módulo generador diésel de emergencia. [Fuente propia]	70
Figura 3-46: Sistema de inferencia difusa. [Fuente propia]	74
Figura 3-47: Diagrama de la herramienta Fuzzy Logic Designer. [Fuente propia]	75
Figura 3-48: Función de pertenencia del porcentaje de fuel restante. [Fuente propia]	75
Figura 3-49: Base de reglas sistema de control difuso. [Fuente propia]	76
Figura 3-50: Diagrama de bloques sistema de control por lógica difusa. [Fuente propia]	77
Figura 3-51: Workspace controlador lógico. [Fuente propia]	77
Figura 4-1: Escenario 1 modelo AIP. [Fuente propia]	80
Figura 4-2: Escenario 2 modelo AIP. [Fuente propia]	81
Figura 4-3: Escenario 3 modelo AIP. [Fuente propia]	82
Figura 5-1: Resultados ciclo de potencia escenario 1. [Fuente propia]	83
Figura 5-2: Estado de carga en baterías simulación 1. [Fuente propia]	84
Figura 5-3: Curva OCV módulo de baterías (simulación 1). [Fuente propia]	84
Figura 5-4: Consumo de fuel simulación 1. [Fuente propia]	85
Figura 5-5: Resultados ciclo de potencia simulación 2. [Fuente propia]	85
Figura 5-6: Temperatura módulo hidruros metálicos. [Fuente propia]	86
Figura 5-7: Presión de equilibrio módulo hidruros metálicos. [Fuente propia]	86
Figura 5-8: Capacidad de descarga de hidrógeno en módulo de almacenamiento en hidruros. [Fuente propia]	87
Figura 5-9: Consumo de pila de combustible escenario 2. [Fuente propia]	87
Figura 5-10: Estado de carga en baterías simulación 2. [Fuente propia]	88
Figura 5-11: Fuel consumido simulación 2. [Fuente propia]	88
Figura 5-12: Resultados ciclo de potencia simulación 3. [Fuente propia]	89
Figura 5-13: Consumo pila de combustible simulación 3. [Fuente propia]	89
Figura 5-14: Estado de carga simulación 3. [Fuente propia]	90
Figura 5-15: Fuel restante simulación 3. [Fuente propia]	90
Figura 5-16: Comparación de autonomía escenarios. [Fuente propia]	91
Figura 5-17: Comparación de consumo de combustible escenarios. [Fuente propia]	91
Figura 5-18: Comparación consumo hidrógeno escenarios. [Fuente propia]	92
Figura A - 1: Datos fabricante pila combustible.	101
Figura A - 2: Datos fabricante baterías.	102
Figura A - 3: Curvas fabricante baterías.	103
Figura A - 4: Nomenclatura datos para modelo hidruro metálico.	104
Figura A - 5: Datos para modelo hidruro metálico.	104
Figura A - 6: Función de pertenencia SOC.	106

Figura A - 7: Función de pertenencia variable hidrógeno restante.	106
Figura A - 8: Función de pertenencia potencia eléctrica requerida.....	107
Figura A - 9: Función de pertenencia fuel restante.	107
Figura A - 10: Función de pertenencia potencia pila de combustible.	108
Figura A - 11: Función de pertenencia potencia en baterías.	108
Figura A - 12: Función de pertenencia diésel generador.....	109
Figura A - 13: Reglas configuraciones 1 y 2.....	114
Figura A - 14: Reglas escritas configuraciones 1 y 2.....	114
Figura A - 15: Base de reglas configuración 3.	115
Figura A - 16: Reglas escritas configuración 3.	115
Figura A - 17: Curva CRCS simulación 1.....	116
Figura A - 18: Curva Intensidad simulación 1.	116
Figura A - 19: Curva OCV simulación 1.	117
Figura A - 20: Curva SOC simulación 1.	117
Figura A - 21: Fuel generador de emergencia simulación 1.	118
Figura A - 22: Curva CRCS simulación 2.....	118
Figura A - 23: Curva de intensidad simulación 2.....	119
Figura A - 24: Curva OCV simulación 2.	119
Figura A - 25: Curva SOC simulación 2.	120
Figura A - 26: Consumo fuel generador de emergencia simulación 2.....	120
Figura A - 27: Consumo pila de combustible simulación 2.....	121
Figura A - 28: Curva SOC simulación 3.....	121
Figura A - 29: Curva CRCS simulación 3.....	122
Figura A - 30: Curva intensidad simulación 3.	122
Figura A - 31: Curva OCV para simulación 3.....	123
Figura A - 32: Curva combustible restante simulación 3.	123
Figura A - 33: Consumo pila de combustible simulación 3.	124
Figura A - 34: Capacidad de descarga.....	124
Figura A - 35: Descarga de hidrógeno.	125
Figura A - 36: Presión de equilibrio.....	125
Figura A - 37: Ratio de reacción.	126
Figura A - 38: Temperatura.....	126

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Principales familias de hidruros metálicos para el almacenamiento de hidrógeno [10].	18
Tabla 1-2: Algunos compuestos Intermetálicos formadores de hidruros [13].	22
Tabla 3-1: Datos batería modelo TAB LiFePo4 25.6-100. [Anexo I]	34
Tabla 3-2: Datos pila de combustible modelo FCvelocity HD-6 [Anexo I]	49
Tabla 3-3: Coeficientes de la curva Potencia-intensidad para el modelo FCvelocity HD-6. [Fuente propia]	52
Tabla 3-4: Coeficientes de la curva Consumo-Intensidad para el modelo FCvelocity HD-6. [Fuente propia]	53
Tabla 3-5: Puntos de funcionamiento MEP 2CMP130-47-12. [34]	69
Tabla 4-1: Datos técnicos baterías modelo NAF1 - S70. [Fuente propia]	79
Tabla A - 1: Superficies de respuesta configuraciones 1 y 2. [Fuente propia]	110
Tabla A - 2: Superficies de respuesta Configuración 3. [Fuente propia]	111

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Con el objetivo de poner en contexto el presente Trabajo Fin de Grado, se comenzará explicando las circunstancias en las que se sitúa. En primer lugar, una introducción será realizada sobre el panorama energético actual, con una serie de pinceladas sobre los diversos desafíos actuales en dicho ámbito. A continuación, se presentará la solución aportada por el hidrógeno en los mecanismos de generación y almacenamiento de energía, que a su vez constituye la base sobre la que se asienta el planteamiento del presente trabajo, ofreciendo una serie de ideas sobre las características de este elemento y sus aplicaciones.

En segundo lugar, serán expuestos los objetivos a perseguir en el presente título. Todos los datos y definiciones expuestos en el siguiente trabajo han sido basados en la recopilación de información procedente de diversos artículos de investigación, libros y diferentes Trabajos Fin de Grado sobre temas similares. Los resultados de la investigación y simulación se han basado de forma íntegra en los resultados obtenidos en el centro de investigación del Centro Universitario de la Defensa, en la Escuela Naval Militar.

Es por tanto objetivo del presente título el ahondar en el estudio de los sistemas AIP y sus aplicaciones en el ámbito militar, así como el estudio de las características que presentan las diferentes partes que componen el sistema. Desde el estudio introductorio del hidrógeno como núcleo y base del funcionamiento del sistema AIP, a lo largo del Trabajo Fin de Grado se profundizará en algunos aspectos específicos del sistema AIP, como es el caso de las pilas de combustible y los hidruros metálicos, de cara a su posterior análisis, simulación y extracción de resultados.

En base a los objetivos previamente planteados, el presente Trabajo Fin de Grado pretende ofrecer una serie de resultados que permitan una posterior ampliación de las líneas de investigación y desarrollo (I+D) relacionadas con el empleo de hidruros metálicos en sistemas AIP y su implementación en tanto submarinos como vehículos sumergibles no tripulados.

1.1 Panorama energético actual

La energía juega un papel crucial en el modelo del mundo como es concebido en la actualidad. Algunos factores como la sostenibilidad, la seguridad de abastecimiento y la competitividad; conllevan intrínsecamente la necesidad y creación de un marco capaz de hacer frente a las cada vez más crecientes demandas de energía [4].

La industria en su conjunto, así como los servicios asociados a esta, giran en torno a un creciente consumo energético que, en el caso de países como España, crece a pasos agigantados. En la Figura 1-1 puede apreciarse un aumento significativo y constante de la demanda energética respecto a las principales energías primarias durante los últimos años.

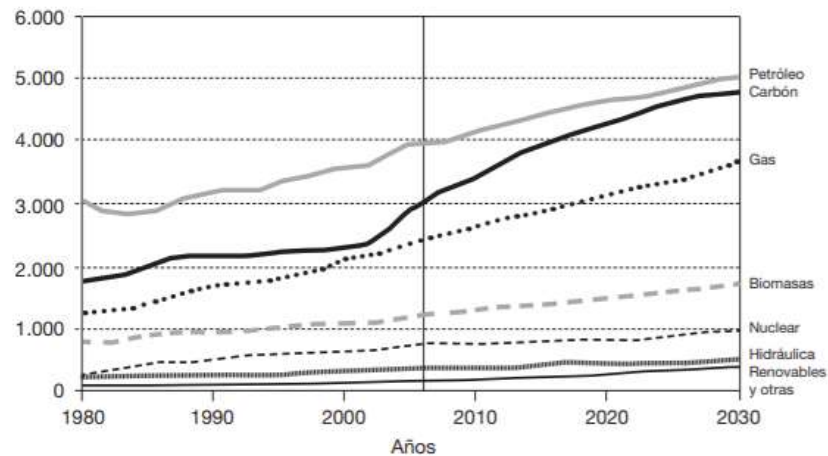


Figura 1-1: Demanda mundial energética en escenario de referencia [26].

Bajo la premisa establecida por el mencionado modelo, la demanda energética global sigue creciendo, en especial los países en proceso de desarrollo tecnológico y económico, lo que conlleva como consecuencia un incremento en la cantidad de recursos energéticos empleados, como se muestra en la Figura 1-2.

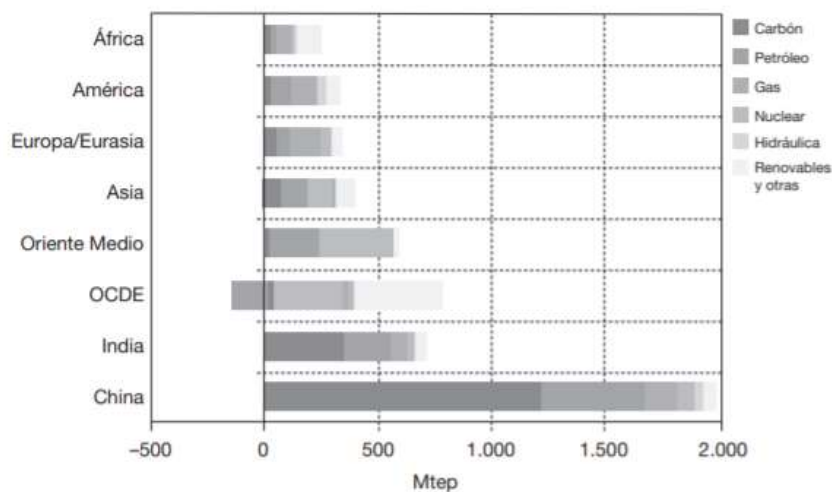


Figura 1-2: Demanda mundial energética por región y fuente de energía empleada, con previsión para el año 2030 [26].

Teniendo en cuenta los datos reflejados en la Figura 1-2, surge la incógnita de que existan recursos suficientes para afrontar la creciente demanda. Se estima que los recursos fósiles convencionales clasificados como reservas rondan valores cercanos a los 70000 quads¹, junto a 1 millón de quads para recursos no convencionales (gas) [7], como puede apreciarse en la Figura 1-3 y Figura 1-4.

¹ 1 quad equivale a $1.055 \cdot 10^{18}$ Julios

Estimación de recursos mundiales (70000 quads
convencionales)

■ Carbón ■ Nuclear ■ Petróleo ■ Gas

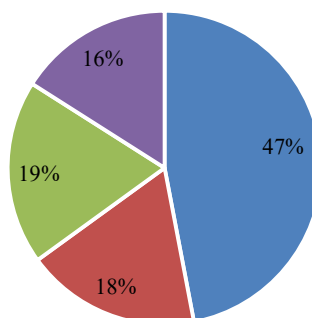


Figura 1-3: Diagrama de sectores representativo de los recursos fósiles convencionales. [Fuente propia].

Estimación de recursos mundiales (1.050.000 quads
sin carbón)

■ Gas no conv. ■ Petróleo ■ Gas ■ Nuclear

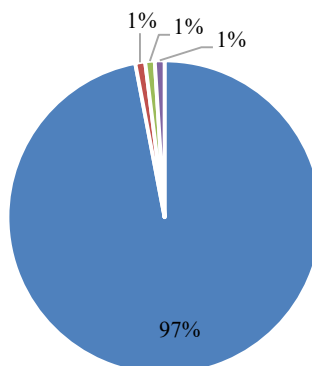


Figura 1-4: Diagrama de sectores representativo de los recursos fósiles no convencionales. [Fuente propia].

Con el objetivo de paliar las devastadoras consecuencias que el uso de combustibles fósiles implica a escala medioambiental, se han propuesto numerosas alternativas energéticas, destacando entre otras, la fusión nuclear, la energía geotérmica, la energía hidráulica, energía nuclear de fisión, energía solar y energía eólica.

En la Figura 1-5 se muestra una grafica comparativa de la potencia instalada a lo largo de los últimos 40 años, de instalaciones de geotermia, energía hidráulica y nuclear:

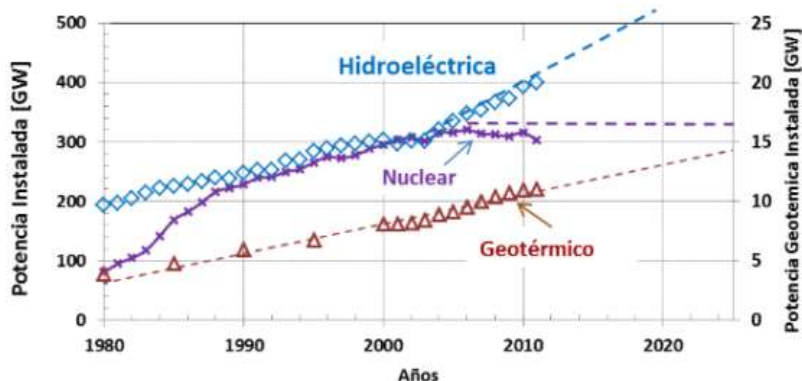


Figura 1-5: Tendencia de evolución de los valores de potencia instalada en instalaciones hidráulicas, nucleares y de geotermia en los últimos 40 años [14].

Si bien la implementación de sistemas renovables de energía se comporta de forma casi exponencial, la extrapolación de estos valores a tendencias futuras, y su comparación con la evolución del consumo de combustibles fósiles indica que es muy probable que para el año 2035 el consumo de combustibles fósiles siga constituyendo la principal fuente de energía a nivel mundial [7]. La razón principal radica, entre otros factores, el hecho de que la energía producida por los sistemas renovables presenta una excesiva variabilidad, lo que conlleva problemas de abastecimiento en muchos casos. Surge como respuesta a esta necesidad, el hidrógeno, como vector energético y compensador de dicha falla.

1.2 El hidrógeno

¿Qué es lo que van a quemar en lugar de carbón? Agua, respondió Pencroft. El agua, descompuesta en sus elementos por la electricidad. Sí, amigos míos, creo que algún día se empleará el agua como combustible, que el hidrógeno y el oxígeno de los que está formada, usados por separado o de forma conjunta, proporcionarán una fuente inagotable de luz y calor.

El agua será el carbón del futuro.

Julio Verne

“La isla Misteriosa” (1874)

El hidrógeno, constituyente esencial de la vida conocida, ya despuntaba su valor como fuente de energía hace casi dos siglos. Siendo el elemento más ligero conocido, representa aproximadamente el 90% de la materia del universo. Posee además una densidad energética muy elevada, tanto es así que un kilogramo de hidrógeno es capaz de liberar valores tres veces superiores a aquellos obtenido a partir de gasolina o gasoil [3]. Es por tanto necesario introducir sobre algunas de las características técnicas asociadas a este elemento, debido a que este constituye el núcleo fundamental en el que se asienta el presente Trabajo Fin de Grado.

En los siguientes apartados se resumirán algunas de las características más importantes del hidrógeno, en lo relativo a la generación, empleo en pilas de combustible, aplicaciones y formas de almacenamiento, destacando entre estas últimas el empleo de hidruros metálicos como alternativa a los medios actuales más desarrollados, y solución en la que se asienta el presente Trabajo Fin de Grado.

1.2.1 Generación

Las notables ventajas energéticas asociadas al uso del hidrógeno, sumado al prácticamente nulo impacto ambiental generado por este, conduce a la posibilidad de obtener hidrogeno para su uso a gran escala, lo que a su vez implica la búsqueda de nuevos modelos de producción. Actualmente los modelos de producción de hidrógeno se pueden dividir en tres tipos:

- Termólisis, basado en la aplicación de calor para la extracción del hidrogeno.
- Electrólisis, donde la molécula de agua es descompuesta en hidrogeno y oxígeno mediante la aplicación de una corriente continua.
- Reformado o gasificación de hidrocarburos solidos, líquidos y gaseosos para la obtención de hidrógeno.

Esta obtención de hidrogeno debería realizarse de la forma menos contaminante posible, garantizando además que la producción de este se realice de la forma más sostenible posible. En la Figura 1-6 se muestra las principales fuentes de las cuales es obtenido el hidrógeno, en la cual se puede apreciar una considerable diferencia con respecto a la cantidad de hidrógeno producido por métodos basados en el empleo de combustible fósiles.

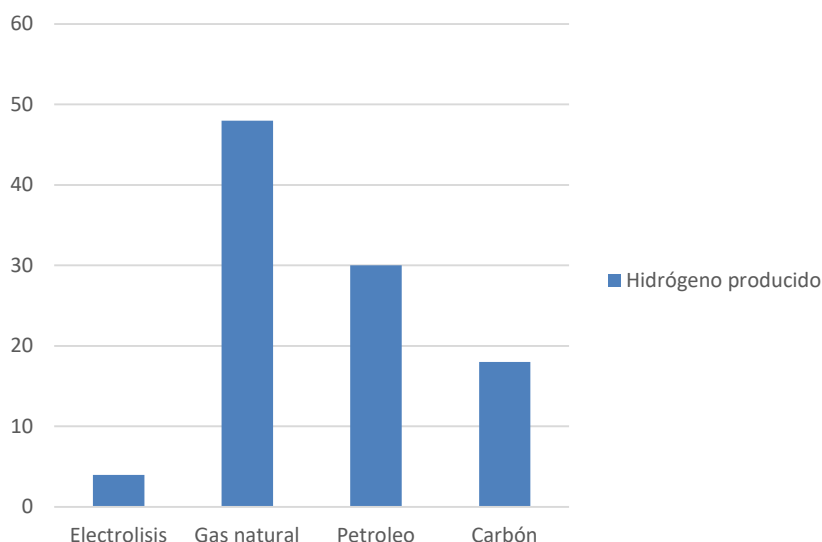


Figura 1-6: Origen del hidrogeno producido en el año 2007 [Fuente propia].

No obstante, la cantidad de procesos y métodos que pueden ser utilizados para la producción de hidrógeno son muy variados, pudiéndose encontrar desde esquematizaciones de plantas de reformado o gasificación de gran tamaño muy centralizadas y masivas; como otros sistemas de menor tamaño e implementados para un uso a menor escala (como los sistemas de reformado por metanol implementados en los sistemas AIP de los submarinos S-80 de la armada española).

Interés especial en la mención de los procesos de electrólisis, los cuales como se puede ver en la Figura 1-7; pueden ser realizados bien a partir de energía nuclear como energía eólica, e incluso energía solar fotovoltaica. Similares sucesos ocurren en el caso de los procesos basados en la termólisis.

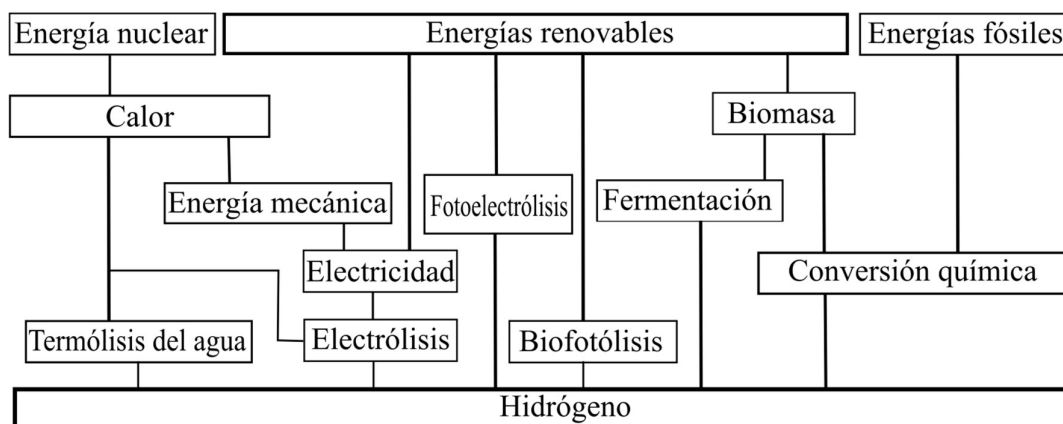


Figura 1-7: Metodologías de producción de hidrógeno [Fuente propia].

1.2.2 Hidrógeno como vector energético

El hidrógeno no puede ser considerado un combustible en el más estricto sentido de la palabra, debido principalmente al hecho de que este no puede encontrarse en la naturaleza en forma de reservas, como en el caso del petróleo o el gas natural. Por lo tanto, es necesario producirlo a partir del aprovechamiento de otras fuentes de energía, ya sean de origen fósil, o por el contrario a partir de energías renovables.

La implementación de sistemas de producción energética basados en el uso del hidrógeno viene impulsada por la necesidad imperante de reducir el consumo de combustibles fósiles, no solo por las ventajas logísticas que ello implica de cara al aprovechamiento para fines distintos de aquellos relacionados con la producción energética; sino también por la necesidad de garantizar una fuente de energía capaz de adaptarse a las necesidades cambiantes según el entorno, así como minimizar el impacto ambiental que el uso de combustibles fósiles genera en el planeta.

Por tanto, la ventaja principal del uso del hidrógeno no viene dada solamente por su elevado poder calorífico, sino por el hecho de que este no es una fuente de energía como tal. Se trata de un portador de otras fuentes de energía como la electricidad, siendo capaz de almacenar y generar energía eléctrica sin que se produzcan descargas mediante el empleo de pilas de combustibles alimentadas por hidrógeno [9], como se muestra en el Apartado 1.2.3.

En esencia, la generación de hidrógeno puede usarse para el aprovechamiento de excedentes energéticos procedentes de otras fuentes de energía renovables y su uso posterior en momentos deficitarios en lo que a requerimientos de energía se refiere, mediante la utilización de sistemas que permitan el aprovechamiento del recurso energético sin la producción de residuos con alto impacto ambiental, como las pilas de combustible; las cuales serán abordadas más en profundidad en los Apartados 1.2.3 y 3.3.

1.2.3 Pilas de combustible

El funcionamiento básico de una pila de combustible podría definirse de forma análoga al de una celda electrolítica. En ambas intervienen elementos similares, así como reactivos y productos similares. En el caso específico de la pila de combustible, tiene lugar una recombinación de H_2 con O_2 , dando como resultado una pequeña corriente eléctrica.

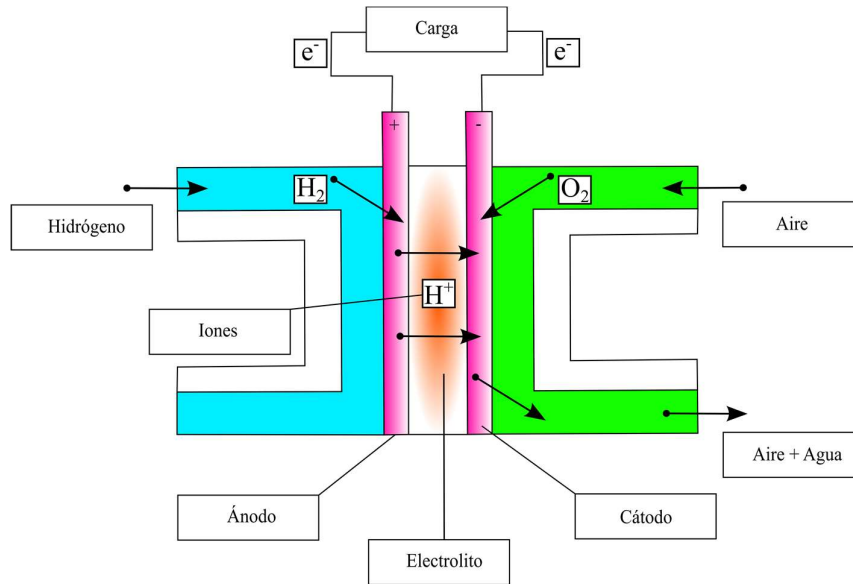


Figura 1-8: Diagrama de operación de una pila de combustible básica [Fuente propia].

La Figura 1-8 muestra de forma esquematizada el funcionamiento de una pila de combustible tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*) donde los iones de hidrógeno (H^+) fluyen hacia el cátodo a través del electrolito, donde reaccionan con el agente oxidante (oxígeno) y generando vapor de agua en el proceso. Paralelamente, en el ánodo se generan electrones, los cuales por su parte circulan a través de un circuito externo para llegar al cátodo. Las reacciones anódica y catódica quedan resumidas de la siguiente forma:



Para garantizar que las reacciones arriba mencionadas se produzcan de forma constante, es necesario que los electrones y los iones H^+ fluyan de forma independiente y separada unos de otros. Esto se logra a partir del electrolito, cuya misión se basa en permitir el paso de los protones hacia el cátodo a través de él, pero a la vez impedir el paso de los electrones forzando a estos a atravesar un circuito externo asociado a una carga.

Los valores de voltaje de trabajo obtenidos mediante este método varían entre 0,5 V y 0,7 V para temperaturas medias de trabajo de 90° C, por lo que es usual la implementación de varios módulos en serie para lograr alcanzar mayores voltajes de trabajo (denominados “stacks”).

Habiéndose hecho patente las características técnicas que ofrece una pila de combustible de cara al consumo de energía y residuos generados en el proceso de obtención de energía, cabe destacar el hecho de que en ultima instancia la eficiencia de este tipo de sistemas viene determinada por la cantidad de hidrógeno que dispone el sistema, lo que en definitiva implica una limitación asociada a cuan efectivo es el sistema utilizado para el almacenamiento del recurso energético. En el apartado 1.3 se mencionarán algunos de los métodos de almacenamiento de hidrógeno más extendidos en la actualidad, con especial relevancia al sistema de almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos que será objeto de estudio del presente Trabajo Fin de Grado.

1.3 Almacenamiento del recurso energético

De forma similar a los diferentes procesos existentes de cara a la producción de hidrógeno, existen además una gran variedad de métodos que permiten el almacenamiento de éste. Si bien todos ellos ofrecen diversas ventajas de uso, todas deben enfrentarse a la misma problemática.

Dicho problema parte del hecho de que el hidrogeno se caracteriza por ser un elemento capaz de almacenar una gran cantidad de energía por unidad de masa (Figura 1-9), pero muy poca por unidad de volumen [10], lo que conlleva como consecuencia que las formas de incrementar la densidad volumétrica (y por tanto la eficiencia en el almacenamiento) sea un campo de estudio en constante auge (Figura 1-10).

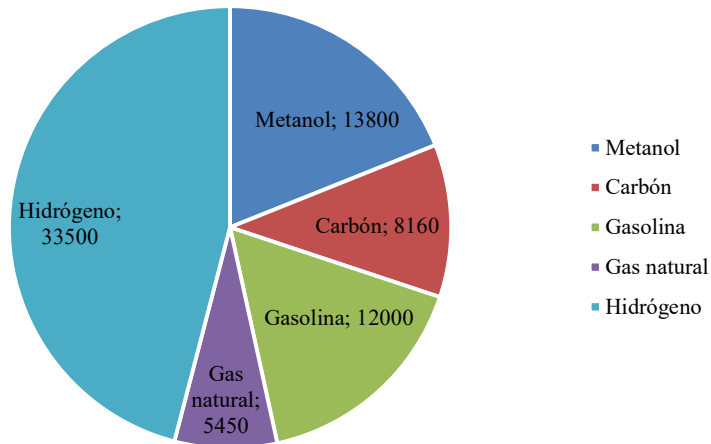


Figura 1-9: Densidad energética por unidad de masa para distintas fuentes de energía. [Fuente propia]

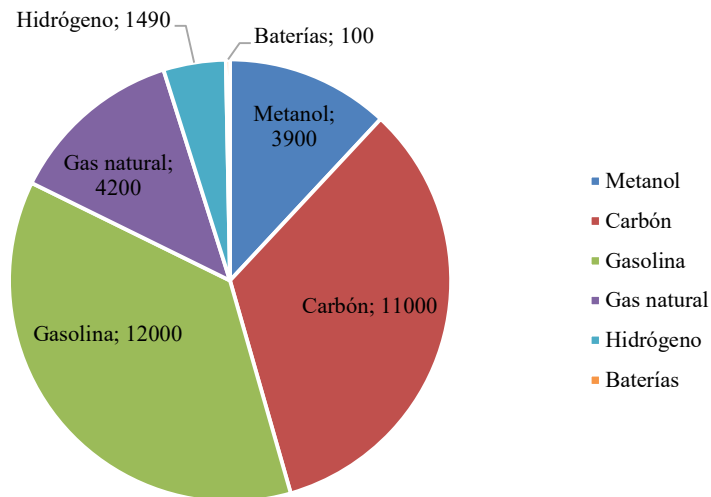


Figura 1-10: Densidad energética por unidad de volumen para distintas fuentes de energía. [Fuente propia]

1.3.1 Almacenamiento en tanques

El almacenamiento del hidrogeno como un gas comprimido constituye la alternativa más sencilla de implementar en cuanto a complejidad. No obstante este método presenta ciertas desventajas técnicas,

entre otras el hecho de que con este método se consiguen las menores eficiencias energéticas a menos que se empleen sistemas auxiliares que permitan elevar la presión de almacenamiento a niveles lo suficientemente altos como para que el hidrógeno almacenado compense las pérdidas surgidas en el proceso.

En estos casos la presión de trabajo tiene una gran importancia en la eficiencia de estos sistemas debido a que la densidad del contenido en tanques depende fundamentalmente de la presión a la que el hidrógeno esté sometido en el interior del recipiente, lo que en última instancia conlleva al incremento del coste de almacenamiento por consumo energético.

El consumo energético es otro de los principales inconvenientes de dicho método, siendo capaz de aumentar a valores de consumo de incluso el 15% de la energía química contenida en el propio hidrógeno para mantener presiones de trabajo medias de en torno a 700 bar (Figura 1-11).

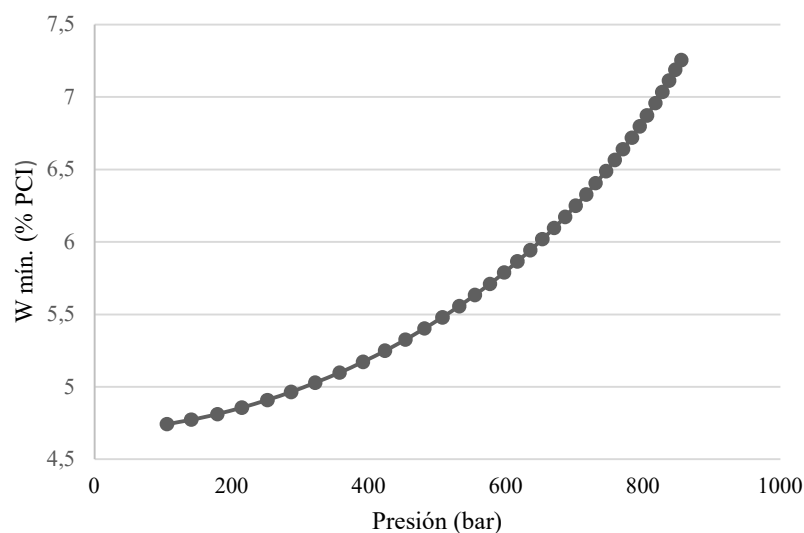


Figura 1-11: Consumo mínimo energético para comprimir hidrógeno desde 1 atm a 20 °C (referido al poder calorífico inferior del hidrógeno) [Fuente propia].

1.3.2 Almacenamiento bajo licuado

Se trata de una tecnología mucho menos extendida con respecto al almacenamiento bajo presión, debido principalmente a la complejidad de uso en ambientes que difieran de aquellos relacionados con la industria y el almacenamiento en grandes cantidades.

Debido a que la temperatura de saturación del hidrógeno a 1 atm es de unos 20 K (-253° C), surgen dos problemas de cara a garantizar que el hidrógeno se mantenga en estado líquido a presión atmosférica: el proceso para alcanzar dicha temperatura, y el proceso que permite mantener el propio hidrógeno a la misma.

El proceso de condensación del hidrógeno utilizado más frecuentemente es el método Linde, basado en el suministro de hidrógeno a temperaturas de en torno a 183 K a partir de nitrógeno líquido (77 K) obtenido en plantas auxiliares. Una vez iniciado el proceso, la temperatura es mantenida mediante el empleo de cámaras de vacío similares a las utilizadas en las cámaras de gas natural (112 K).

Actualmente se emplean métodos combinados de los dos anteriores, denominados “crio-compresión” basado en el empleo de hidrógeno sometido a presión y a temperatura criogénica, lo que permite obtener prestaciones similares a las empleadas en los métodos de hidrógeno licuado, pero con la ventaja de ser capaces de reducir considerablemente las pérdidas por evaporación.

1.3.3 Almacenamiento en hidruros metálicos

Los hidruros metálicos se tratan de compuestos químicos capaces de combinarse de diferentes formas con el hidrógeno bajo determinadas condiciones ambientales mediante procesos reversibles de carga y descarga, denominados procesos de absorción y desorción.

En los procesos de absorción y desorción será necesario disminuir y aumentar la temperatura, respectivamente; favoreciendo así el proceso de absorción y liberación del hidrógeno respecto del hidruro. En la Tabla 1-1 se aprecia un listado de los principales hidruros empleados en la actualidad para almacenar hidrógeno (en la columna izquierda se muestra la expresión general para las diferentes familias de compuestos intermetálicos, junto con ejemplos de hidruros asociados a dichas familias en la columna derecha).

Tabla 1-1: Principales familias de hidruros metálicos para el almacenamiento de hidrógeno [10].

Familia	Compuestos
AB ₅	LaNi ₅ H ₆
AB ₂	ZrV ₂ H _{5,5}
AB ₃	CeNi ₃ H ₄
A ₂ B ₇	Y ₂ Ni ₂ H ₃
A ₆ B ₂₃	Ho ₆ Fe ₂₃ H ₁₂
AB	TiFeH ₂
A ₂ B	Mg ₂ NiH ₄

En lo relativo a las temperaturas de trabajo de los hidruros metálicos (en su cinética de reacción), se habla de hidruros de alta temperatura cuando estas se encuentran situadas en rango aproximados y entre 150 °C y 300 °C, mientras que los hidruros de baja temperatura rondan valores entre los 20 °C y los 90 °C [10]. Paralelamente, los valores de presión medios en los procesos de absorción y desorción oscilan entre valores de 0,7 y 10 bar; y 30 y 55 bar; respecto a los rangos de temperatura anteriormente comentados.

Las características de funcionamiento de este tipo de sistemas será abordada nuevamente y en mayor profundidad en los Apartados 1.5.2 y 3.4.

1.4 Aplicaciones en transporte

Las razones por las que el hidrógeno es considerado una alternativa de interés en el constante desafío de la energía global comprende entre otras, el hecho de que el hidrogeno es ampliamente reconocido como un vector energético polivalente y fácilmente adaptable a diversas necesidades. El aprovechamiento de su elevada capacidad de almacenamiento energético garantiza una integración de los excedentes energéticos procedentes de fuentes de energía renovables consideradas por definición de carácter variable en lo referente a valores de producción de energía respecto al tiempo. Además, aporta soluciones de alta viabilidad respecto a métodos de transporte de alta eficiencia y reducidas emisiones.

Desde el punto de vista medioambiental resulta imprescindible reseñar la capacidad de reducción de las emisiones de CO₂ desde tres frentes diferenciados:

- Una pequeña reducción de emisiones mediante la producción de hidrogeno a partir de combustibles fósiles, y su empleo en pilas de combustible.

- Una drástica reducción de emisiones de CO₂ si se parte del empleo de energías renovables para la producción de hidrógeno y su combustión en motores alternativos.
- Esta reducción se incrementa aproximadamente un 50% si el hidrógeno producido por el método anterior es utilizado en pilas de combustible.

De los puntos anteriormente mencionados queda patente que el hidrógeno puede ser implementado como un método alternativo para la problemática del transporte, si bien es necesario tener un especial control sobre el método empleado para la producción de este, que en esencia conlleva una mayor o menor reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Otros aspectos como la combustión del hidrógeno en motores alternativos genera numerosas líneas de investigación y desarrollo aun sin abordar.

Entre las diferentes alternativas para suministrar hidrógeno en pilas de combustible como método de transporte destacan aquellas basadas en el uso de metanol directo (DMFC), capaz de generar reacciones a partir de metanol mediante el aprovechamiento de las instalaciones de gasolina instaladas actualmente [11].

Desde el punto de vista de producción se plantan numerosas alternativas de producción in situ, basadas en el reformado de gases o hidrólisis de agua en estaciones hidrogeneras; o bien el empleo de estaciones de producción centralizada y su transporte en depósitos a presión o en estado criogénico.

Por otra parte, la implementación del tren de potencia en vehículos ha derivado en proyectos basados en la combinación de sistemas híbridos caracterizados por el empleo de una combinación de pilas de combustible y baterías, consiguiendo rendimientos elevados mediante la combinación de ambos sistemas [6].

Una propuesta alternativa que ha adquirido una considerable importancia en los últimos años se trataría de los sistemas AIP (*Air Independent Propulsion*). Estos sistemas serán tratados con más detalle en el Apartado 1.5.1 pero en esencia ofrecen una solución basada en el empleo de hidrógeno como fuente de energía para la obtención de electricidad en vehículos que carecen de atmósfera.

Constituye una solución considerablemente extendida en el ámbito militar, sobre todo en la propulsión submarina, puesto que mediante el almacenamiento de hidrógeno y oxígeno, el sistema permite obtener energía eléctrica a partir de una pila de combustible, y su almacenamiento en baterías o su uso en propulsión; lo que en definitiva aumenta el tiempo de permanencia en inmersión del submarino.

1.5 Los sistemas AIP

1.5.1 Concepto de los sistemas AIP

La palabra AIP hace referencia al acrónimo de *Air-independent Propulsion*, un sistema de propulsión empleado generalmente en el ámbito marino y que ofrece una ventaja táctica a submarinos de carácter no nuclear al aumentar el tiempo de permanencia de estos en profundidad, evitándose la necesidad de uso de oxígeno procedente de la atmósfera. Paralelamente, también permite aumentar, hasta cierto punto, la eficiencia de los sistemas de propulsión de submarinos convencionales o incluso reemplazarlos completamente.

Si bien se considera un sistema relativamente moderno, sus orígenes podrían remontar hasta el año 1867, con el desarrollo de una de las primeras alternativas de propulsión anaeróbica por parte del ingeniero español Narciso Monturiol como mejora de uno de sus primeros proyectos sumergibles, el *Ictíneo I*, y que consistía en la combinación de un compuesto de magnesio, zinc, cloruro de potasio y peróxido que reaccionaba violentamente en el interior de una cámara de vapor para la obtención de oxígeno y vapor de agua. Este sistema sería implementado posteriormente en las turbinas Walter de los submarinos alemanes V-80 [25].

En la actualidad se han desarrollado una gran cantidad de alternativas en cuanto a los sistemas de propulsión AIP se refiere, derivando en tres vertientes tecnológicas distintas, pero con una serie de elementos comunes y con el objetivo único de proporcionar energía eléctrica al sistema de propulsión que deben alimentar. Se pueden diferenciar por tanto los sistemas AIP basados en células de combustible, sistemas basados en motores Stirling y sistemas MESMA.

En la Figura 1-12 se muestra el sistema de propulsión típico de un submarino convencional basado en propulsión diésel-eléctrica.

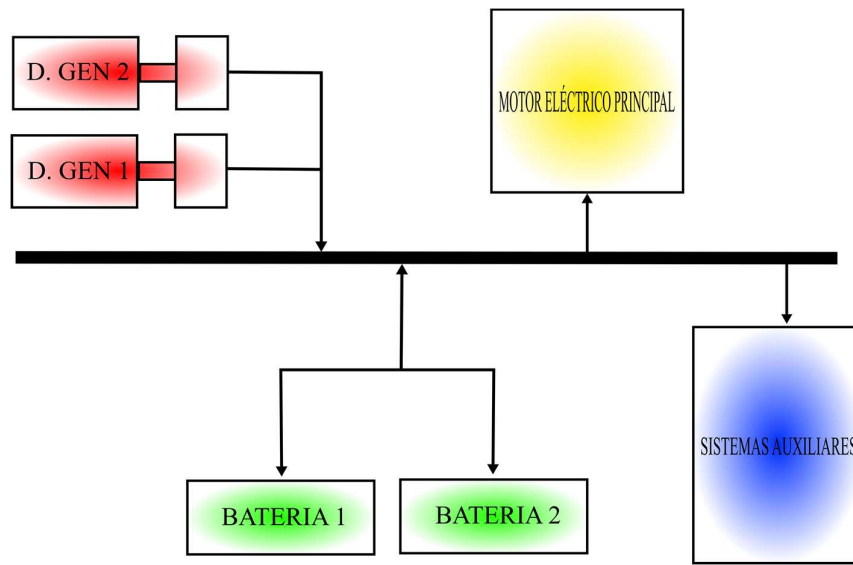


Figura 1-12: Esquema representativo de un sistema de propulsión convencional en submarinos [Fuente propia].

Se puede observar como el sistema consta de una serie de grupos generadores propulsados por motores diésel; los cuales cargan una serie de grupos de baterías, quienes son los encargados de almacenar la energía eléctrica para así poder suministrarla posteriormente al motor eléctrico principal y a los grupos auxiliares.

La problemática radica en el hecho que cuando el submarino se encuentra en inmersión no es posible obtener oxígeno procedente de la atmósfera, por lo que el funcionamiento de los grupos generadores se ve impedido. En consecuencia el tiempo de permanencia en inmersión del submarino está supeditado a la capacidad de almacenamiento permitido en baterías.

Los sistemas AIP pretenden por tanto, dar solución a este problema. Mediante la implementación de un generador extra, el cual está compuesto por una pila de combustible con capacidad de suministrar energía eléctrica de forma constante a los grupos de baterías, y junto con la ventaja de no ser necesario estar en presencia de aire atmosférico para lograrlo.

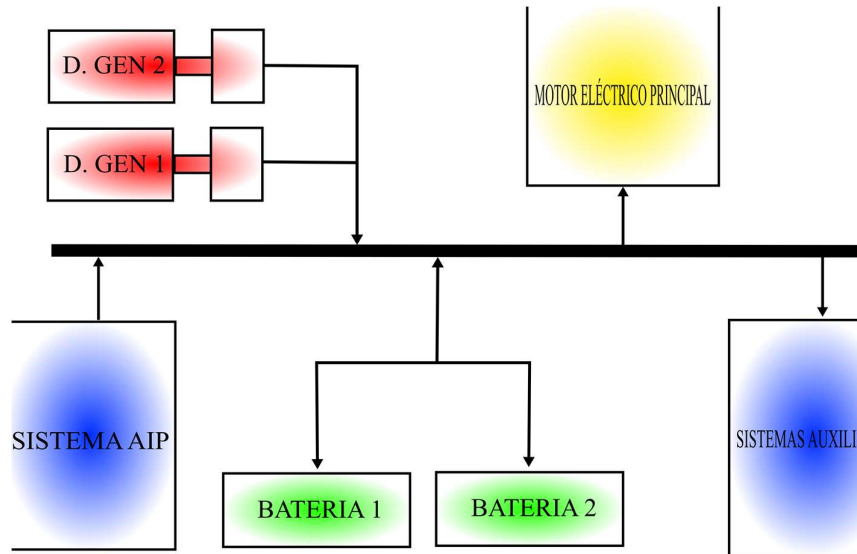


Figura 1-13: Esquema de planta propulsora de submarino basado en sistemas AIP [Fuente propia].

Esta implementación permite incrementar el tiempo de permanencia en inmersión, lo que en definitiva establece una importante ventaja táctica respecto a otros submarinos de la misma clase.

Por otra parte, el sistema AIP basado en motores Stirling ofrece una alternativa basada en el uso de motores de combustión interna que comprime y expande cíclicamente un fluido de trabajo a diferentes temperaturas; generando energía mecánica a partir de la transformación de energía térmica.

Este sistema ofrece una serie de ventajas como las bajas vibraciones en el entorno marino y un elevado rendimiento, si bien presentaba también notables inconvenientes técnicos como la dificultad de mantener la estanqueidad del fluido de trabajo y sus amplias limitaciones para la eliminación de los gases CO₂ producto de la combustión [22].

El sistema AIP MESMA fue desarrollado por el astillero francés DCNS e implementado en submarinos de la clase Agosta para la marina de Pakistán a principios del siglo XXI [24].

El funcionamiento del sistema reside en la obtención de vapor mediante la combustión de etanol y oxígeno criogénico puro almacenado en tanques; obteniendo así una fuente de calor capaz de generar a su vez vapor de alta presión para así efectuar el movimiento de una turbina. Los residuos de la combustión serían desechados por el submarino y la energía eléctrica proveniente de la turbina sería obtenida a partir de un ciclo de Rankine y aprovechada por el submarino para su propulsión y funcionamiento de sistemas auxiliares [23].

Pese a su alta fiabilidad, las bajas densidades energéticas producidas y la elevada firma acústica generada relegaron a este sistema a segundos planos.

1.5.2 Hidruros metálicos como alternativa de almacenamiento en sistemas AIP

El empleo de hidruros metálicos como alternativa a los métodos convencionales de almacenamiento de hidrógeno constituye un campo todavía en desarrollo. Como se ha comentado anteriormente, las técnicas habituales de almacenamiento de hidrógeno se basan principalmente en el empleo de recipientes de elevado volumen para compresión del hidrógeno, lo que conlleva un elevado coste energético.

Otras alternativas de almacenamiento proponen el uso de hidrógeno en estado líquido, pero el elevado coste económico asociado al mantenimiento de las bajas temperaturas necesarias los hace prácticamente inviables para su implementación en la mayoría de las aplicaciones. Es por ello por lo que

en los últimos años la investigación del uso de compuestos intermetálicos para el almacenamiento de hidrógeno en estado sólido ha tomado mayor importancia.

Como se comentó en el Apartado 1.3.3, el almacenamiento en hidruros metálicos se fundamenta en el empleo de determinadas aleaciones metálicas para absorber el hidrógeno en su interior en estado gaseoso. No obstante el funcionamiento de estos compuestos se ve enormemente influenciada por las condiciones de presión y temperaturas de trabajo.

El hidrógeno es absorbido en estado gaseoso y a baja temperatura, con la presión suficiente para permitir que el compuesto se hidrure. Posteriormente, para invertir el proceso, la temperatura a la que se encuentra sometida el hidruro debe ser aumentada para permitir nuevamente la liberación del hidrogeno. Es necesario por tanto el empleo de dispositivos auxiliares que permitan controlar y modificar estas temperaturas a voluntad.

En lo relativo a los valores de estas temperaturas, existen numerosos estándares que fijan estos valores de trabajo de temperatura y presión. Por ejemplo, el Departamento de Energía de Estados Unidos estableció una serie de parámetros característicos tanto económicos como ambientales [18]:

- Capacidad mínima del almacenamiento de hidrógeno: 6,5% en peso y 65 g/L de hidrógeno disponible.
- Temperatura de descomposición entre 60° C y 120° C para la viabilidad comercial.
- Baja temperatura de desorción y baja presión de absorción.
- Transformación no térmica entre sustratos y productos de descomposición.

Una de las desventajas más notables asociadas al empleo de hidruros metálicos es su fragilidad y aumento de volumen asociado a los procesos de absorción y desorción (pudiendo alcanzar valores de aumento de hasta el 25% respecto a los valores de volumen de aleación no hidrurada) [13]. Ello provoca una decrepitación del material tras una serie de ciclos de absorción-desorción lo que en esencia dificulta el ciclo de calor que permite que el proceso mantenga su eficiencia.

En la Tabla 1-2 se pueden observar un listado de hidruros, junto con sus valores de capacidad de almacenamiento, temperatura y presión de equilibrio.

Tabla 1-2: Algunos compuestos Intermetálicos formadores de hidruros [13].

Familia	Metal	Hidruro	wt%	$\frac{\text{Kg}}{\text{H}_2 \text{ m}^{-3}}$	$P_{\text{eq.}}, T$
Elemental	Mg	MgH ₂	7,6	110	1 bar, 573 K
AB ₅	LaNi ₅	LaNi ₅ H _{6,5}	1,37	115	2 bar, 298 K
AB ₂	ZrV ₂	ZrV ₂ H _{5,5}	3,01	-	10 ⁻⁸ bar, 323 K
AB	FeTi	FeTiH _{1,9}	1,89	112	5 bar, 303 K
A ₂ B	Mg ₂ Ni	Mg ₂ NiH ₄	3,59	97	1 bar, 555 K
AB ₂ (b.c.c.)	TiV ₂	TiV ₂ H ₄	2,6	-	10 bar, 313

La capacidad de almacenamiento se encuentra situada en torno al 3% exceptuando el magnesio, cuyo valor de almacenamiento aumenta hasta el 7,6%; pero que genera limitaciones de trabajo debido a la reducida cinética de reacción y la elevada temperatura (del orden de 300 °C) que necesita para liberar hidrógeno.

No obstante, numerosas líneas de investigación apuestan hacia el empleo de hidruros basados en algún compuesto intermetálico de Magnesio aleado mecánicamente con fases catalíticas que permitan disminuir la temperatura de desorción hasta valores cercanos a los 200 °C.

1.6 Objetivos del presente trabajo

El objetivo principal del presente Trabajo Fin de Grado se fundamenta en el análisis de la viabilidad de los sistemas de propulsión anaeróbica basados en el empleo de hidrógeno para la propulsión de vehículos submarinos, todo ello caracterizado por la implementación de pilas de combustible, baterías e hidruros metálicos.

Para ello se establecen a su vez una serie de objetivos secundarios. Por una parte, a partir de los requerimientos técnicos extraídos de los submarinos clase Agosta (S-70) se llevará a cabo la elaboración de diferentes modelos teóricos para los diversos submódulos que componen el sistema AIP en su conjunto. Asimismo, la interconexión y control del funcionamiento de los diferentes submódulos será implementada mediante el diseño de un controlador basado en lógica difusa.

Por otra parte, se realizarán una serie de simulaciones mediante el empleo de software especializado basado en el entorno de Matlab-Simulink ® con el objetivo de estimar la autonomía para cada una de las configuraciones planteadas, culminando en la creación de un modelo funcional que permita el estudio y comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de carga y trabajo.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

En los siguientes apartados se comenzará realizando una introducción sobre la historia de los submarinos, desde sus comienzos hasta la actualidad, destacando algunas características técnicas de importante en sus respectivas épocas. A continuación se desarrollarán brevemente a las necesidades energéticas asociadas a los submarinos, así como las soluciones que plantean los sistemas AIP y el empleo de hidruros metálicos. Finalmente, se comentarán algunas de las características de los nuevos submarinos clase Isaac Peral de la Armada Española, como uno de los proyectos de actualidad.

2.1.1 Reseña histórica, evolución y actualidad de los submarinos

La historia de los submarinos se podría remontar a lo que se conocería como el primer ancestro de éste: la barca de cosaca del siglo XVII “*Chaika*” utilizada bajo el agua para misiones de reconocimiento e infiltración. No obstante, el primer sumergible de cuya creación se tiene información veraz fue construido en 1620 por el holandés Cornelius Jacobszoon Drebbel. Un artilugio propulsado por remos de características similares a una campana sumergible remolcada por una barca.

Numerosos intentos de submarino fueron creados años más tarde con el objetivo de aprovechar sus ventajas para el ámbito militar. Mención especial merecen las creaciones “*Turtle*” del estadounidense David Bushnell, considerado por la historia como el primer submarino militar para una persona con capacidades para realizar operaciones subacuáticas y con movimiento independiente.

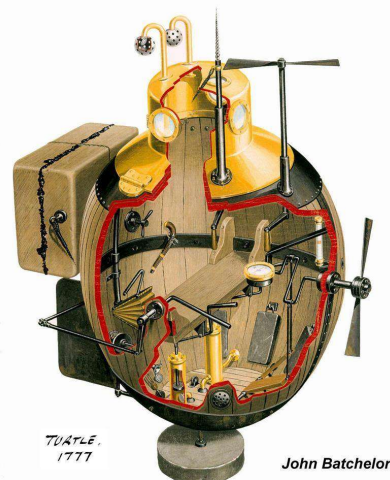


Figura 2-1: Prototipo de submarino "Turtle". [69]

Habría de llegar el año 1863 para la creación el primer submarino cuyo sistema de propulsión no fuese la fuerza humana, en este caso sería la creación del francés *Plongeur* que usaba aire comprimido a 180 psi. Si bien presentaba algunas ventajas constructivas respecto a sus homónimos de la época, no fue hasta el año 1888 en la que el Ingeniero, marino y profesor español de física matemática de la escuela de ampliación de estudios de la Armada, Isaac Peral construiría un nuevo prototipo de submarino con nuevos sistemas de aire, dos torpedos, casco ahusado; así como un propulsor y controles externos en forma de cruz que anticipaban numerosos diseños posteriores [8].

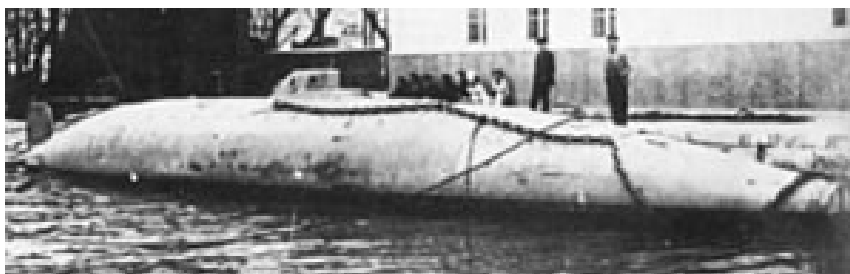


Figura 2-2: Primer submarino Peral. [70]

Con la llegada de la década de 1950, la energía nuclear sustituye parcialmente a la tradicional propulsión diésel-eléctrica. Como consecuencia los viajes y tiempo de permanencia en inmersión aumentaron drásticamente en años posteriores; con viajes que antes se consideraban imposibles como las travesías polares bajo hielo ártico por buques como el *USS Nautilus*.

Pese al considerable auge en la construcción de buques nucleares por parte de grandes potencias bélicas como Estados Unidos o Rusia, los submarinos convencionales han seguido siendo producidos por ciertos países, de cara a ciertas ventajas tácticas respecto a sus homónimos nucleares.

Si bien las ventajas de detección de estos submarinos ha ido decreciendo ante el auge de mejoras de insonorización de cascos en submarinos nucleares, el auge de sistemas de propulsión anaeróbica, como los sistemas AIP, ha ocasionado un nuevo resurgimiento en los submarinos de propulsión diésel-eléctrica.



Figura 2-3: Sistema AIP por reformado de Metanol en los submarinos S-80 [28].

2.2 Líneas de desarrollo en sistemas AIP

El desarrollo de los sistemas de propulsión AIP recibieron un importante auge a raíz de la importante mejora en el tiempo de permanencia de algunos submarinos convencionales en inmersión, como el submarino U212A (U-35), que estableció un récord de permanencia en inmersión de dieciocho días sin realizar paradas ni snorkel. Es por ello por lo que numerosas armadas comenzaron diversas líneas de investigación para el desarrollo que sistemas que permitiesen una mejora sustancial en las características

operativas de sus submarinos y buques. A continuación se muestran algunos de los avances más significativos en el ámbito de propulsión por sistemas AIP y la construcción de submarinos.

2.2.1 Problemática energética y necesidades

En la actualidad las actividades navales pueden ser consideradas hasta cierto punto de alta eficiencia energética. No obstante se estima que el porcentaje de emisiones de gases de efecto invernadero derivados de estas actividades ronda valores aproximados de el 3% respecto a las emisiones globales.

La causa principal de dichos valores se encuentra intrínsecamente relacionada con el consumo asociado a la propulsión, motivo por el cual los esfuerzos principales se ven centrados hacia métodos y soluciones que permiten paliar estas actividades. Entre las numerosas soluciones existentes hoy en día se plantean algunas como el empleo de Pilas de combustible, sistemas de propulsión azimutal o la implementación del concepto de buques eléctricos.

Más concretamente, las grandes ventajas del empleo de pilas de combustible basadas en el empleo de hidrogeno (como el elevado rendimiento, el funcionamiento silencioso, el empleo de energías “limpias” para su producción, etc.) ofrece grandes avances en el ámbito militar de cara a la posibilidad de obtener energía sin estar en contacto con la atmósfera.

Esta característica resalta aun más en submarinos, especialmente aquellos de carácter convencional; puesto que permiten aumentar considerablemente el tiempo de permanencia en inmersión en el caso de submarinos basados en propulsión convencional diésel-eléctrica, y bajo condiciones de silencio superiores a aquellas de las variantes nucleares.

2.2.2 Líneas de desarrollo españolas: El S-80

El S-80 es un submarino desarrollado actualmente por la empresa española Navantia a partir de las especificaciones establecidas por el Estado Mayor de la Armada. Debido a las especificaciones técnicas buscadas y sus características constructivas, el S-80 se ha establecido como uno de los modelos de referencia de los próximos años. Debido a sus numerosas implementaciones entre las que se pueden destacar el empleo de dotaciones reducidas, uso de diversidad de sistemas de armas, mejoras en las comunicaciones submarinas, una plataforma automatizada y la mejora del sistema de propulsión mediante el empleo de un sistema AIP en apoyo al motor eléctrico de imanes permanentes.



Figura 2-4: Retos tecnológicos planteados por el S-80 [15].

Desde el año 2001 se han realizado en las instalaciones de Navantia, tres programas de I+D para el desarrollo y construcción de una planta de propulsión eléctrica mediante el uso de pilas de combustible [1].

El sistema escogido para la propulsión del S-80 se realizará mediante el uso de pilas de combustible de tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*) con electrolito de polímero sólido que ofrece numerosas ventajas tácticas como un fácil ajuste del suministro de potencia según demanda, un peso reducido, una elevada esperanza de vida, baja temperatura de trabajo (que redundará en la seguridad de uso), una baja firma acústica y reducidas pérdidas por calor.

El sistema fue desarrollado por la empresa *Hynergreen Technologies S.A & UTC Power* e impulsado en España en el año 2002 con unos valores de partida de unos 300kW [73].

El sistema almacena oxígeno en estado puro mediante el empleo de un tanque de almacenamiento criogénico. El hidrógeno, por su parte, presentó una serie de inconvenientes durante el proceso de desarrollo debido a su carácter inflamable así como por las necesidades energéticas y de espacio asociadas a los recipientes de alta presión. Como consecuencia de ello se implementó finalmente un sistema de reformado de Bioetanol, un producto de carácter renovable, biodegradable y de emisiones neutras.

No obstante, el empleo de un sistema de reformado genera una serie de gases residuales junto con el hidrógeno que hace necesarios procesos de purificación para el uso de dicho hidrógeno en la pila de combustible que compone el sistema AIP.

2.2.3 Otras líneas de desarrollo

Destacan numerosas compañías de nacionalidades y orígenes muy diversos. Por ejemplo, la compañía *RUBIN* (Rusia) apuesta por el empleo de nuevos sistemas AIP en su línea de submarinos de cuarta generación, con pilas de combustible de tipo PEM basadas en el reformado de bioetanol.

Por otra parte, mencionar la línea de desarrollo francesa, de parte de la empresa *DNCS*, el cual se basa en el reformado de gasóleo para el funcionamiento de las pilas PEM.

Finalmente, existen ciertas líneas de desarrollo relacionadas con el empleo conjunto de pilas de combustible basados en reformado de metanol, con el objetivo de sustituir los anteriores modelos existentes. En la actualidad ciertos proyectos han sido llevados a cabo por parte de la empresa alemana *SENER*. El proyecto fue dirigido por técnicos del sistema de construcción naval *FORAN* perteneciente a la empresa *SENER*. La participación de la empresa en el desarrollo de sistemas AIP en submarinos propició la creación de equipos multidisciplinares de forma conjunta con la empresa *ThyssenKrupp Marine Systems* (TKMS) para el desarrollo de nuevas patentes para optimización del funcionamiento de pilas de combustible basadas en el reformado de metanol.

De este modo, la participación alemana ha propiciado la creación de varias patentes entre las que destacan la unidad desolvedora de CO₂ obtenido durante el reformado del metanol para la obtención de hidrógeno [74]. La ventaja del nuevo sistema permite la expulsión de los gases residuales al medio marino mediante un proceso de disolución por efecto de succión de corrientes marinas en el interior del casco.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Introducción

Los submarinos son considerados elementos de combate de alto valor debido principalmente a su capacidad inherente para navegar tanto en condiciones similares a los buques convencionales como bajo el agua, lo que dificulta notablemente las posibilidades de detección de los mismos, reduce riesgos relacionados con la seguridad operativa en el caso de misiones que impliquen presencia en puertos hostiles, así como ofrecen la ventaja operativa de poder efectuar ataques de gran capacidad destructiva en entornos silenciosos.

No obstante en el caso de los submarinos de propulsión diésel-convencional existen una serie de limitaciones que, como fue mencionado en apartados anteriores, esta íntimamente relacionada con la propulsión y el tiempo de permanencia en inmersión. Dicho tiempo de permanencia esta limitado por la capacidad de las baterías y las complicaciones operativas que implica subir a superficie para la carga de estas (mediante procedimiento Snorkel).

En apartados anteriores se pudo observar como la implementación de un sistema AIP contribuye notablemente en determinadas situaciones al aumento de la eficiencia de submarinos, entendiendo eficiencia como la relación entre el tiempo total de funcionamiento de un submarino en frente al tiempo de inmersión de este.

Los sistemas AIP presentan una gran cantidad de variedades y formas de implementación, lo que supone por consiguiente una mayor diversidad a la hora de abordar los problemas técnicos que implica el transporte de hidrógeno y oxígeno. En el caso particular del presente Trabajo Fin de Grado se realizará un modelado de la planta propulsora, subdividida a su vez en diferentes submódulos:

- Módulo motor eléctrico.
- Módulo de almacenamiento en hidruros metálicos.
- Módulo pila de combustible.
- Módulo diésel generador de emergencia.
- Módulo de control lógico.
- Módulo de almacenamiento en baterías.

La interconexión de los diferentes submódulos y la carga de trabajo asociada a cada parte vendrá determinada por un sistema de control basado en lógica difusa; lo que permitirá adaptar los requerimientos de energía eléctrica a aportar al motor eléctrico en las diferentes situaciones operativas en las que es posible encontrar el sistema de propulsión de un submarino.

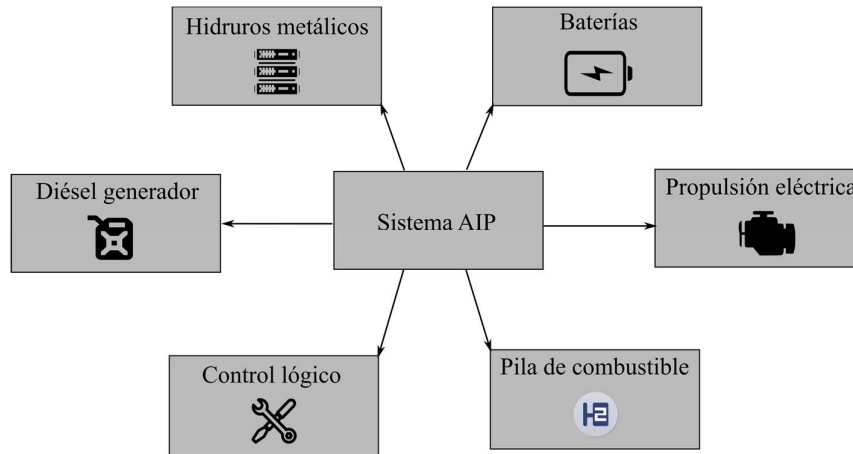


Figura 3-1: Esquema modelo AIP diseñado. [Fuente propia]

En los siguientes apartados se realizará un análisis sobre la dinámica de funcionamiento de cada uno de los módulos que componen el sistema a estudiar en su conjunto, realizándose un modelado mediante la herramienta de simulación Simulink® para el estudio de la respuesta de la propulsión eléctrica ante diferentes requerimientos de potencia, y los efectos ocasionados en las diversas partes que componen el sistema en su conjunto.

3.2 Módulo de almacenamiento en Baterías

El diseño y desarrollo de un modelo de baterías pasa por una serie de requisitos previos. En el presente apartado se desarrollarán los diagramas de bloques que constituyen el modelo de baterías empleado en las simulaciones. Para ello, se realizará un estudio inicial de los tipos y principales características de baterías que se pueden encontrar en la actualidad. Posteriormente, se analizarán los parámetros característicos que influyen en el funcionamiento de una batería, para finalmente generar el modelo de trabajo a partir de dichos parámetros.

3.2.1 Fundamentos de la batería

Una batería consiste en una agrupación de varias celdas las cuales, mediante una serie de reacciones electroquímicas, realizan una transformación de energía química en energía eléctrica. Estas celdas están formadas a su vez por una serie de electrodos que generan electricidad de corriente continua en presencia de un electrolito. En una de las partes tiene lugar una reacción química de reducción-oxidación, basada en la pérdida de electrones de uno de los componentes, mientras se produce una ganancia de dichos electrones por parte del otro componente. La reversibilidad de estas reacciones condiciona el carácter recargable de la batería, dando lugar a la formación de dos grandes grupos de baterías:

- Baterías primarias, donde no es posible renovar la carga una vez agotada.
- Baterías secundarias, que por el contrario sí permiten una regeneración de la carga.

3.2.1.1 Tipos de baterías

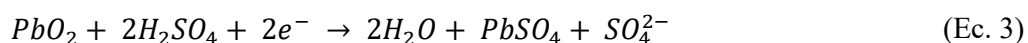
Hoy en día existen una gran variedad de baterías, si bien únicamente un pequeño número de ellas han sido desarrolladas para su uso en vehículos pesados. Algunos de los modelos más conocidos son plomo-ácido, litio-polímero, litio-hierro, níquel-hidruro metálico, níquel-cadmio, sodio-sulfuro y sodio-cloruro metálico [31].

3.2.1.1.1 Baterías de plomo-ácido

Empleadas comúnmente en transporte privado convencional, este tipo de baterías constituyen uno de los grupos más ampliamente utilizados en la actualidad.

Su estructura se fundamenta en una asociación de varias celdas elementales basadas en una agrupación de celdas de plomo sumergidas en una solución de ácido sulfúrico, con capacidad para suministrar voltajes entorno a 2 Voltios, permitiendo así ofrecer voltajes nominales de entre 6 y 12 Voltios.

Durante la reacción de oxidación-reducción, se producen diferentes compuestos químicos dependiendo si la batería esta siendo sometida a un proceso de carga o descarga. En el primer caso, al cargar la batería, se produce una transformación del sulfuro de plomo alojado en el ánodo dando lugar a plomo metálico, mientras que en el cátodo se genera óxido de plomo como material principal. Al invertir el ciclo, el proceso se invierte de forma análoga, de modo que el sulfato de plomo es nuevamente oxidado a partir del plomo metal de ánodo, mientras que el óxido de plomo es reducido de igual manera a sulfato de plomo. Dicha reacción atiende a la siguiente expresión:



Si bien las baterías de plomo aportan ciertas ventajas de uso como la capacidad de ofrecer salidas de tensión altas, alta eficiencia, reducidas perdidas de autodescarga, bajo coste, facilidad de manipulación y potencial para suministrar valores de corriente “pico” en procesos de descarga exigentes; es cierto que las baterías de plomo-ácido también presentan una serie de inconvenientes, como una corta vida útil, la imposibilidad de efectuar cargas rápidas, una baja resistencia a sobrecargas y la necesidad de mantenimiento periódico ante una posible erosión de los electrodos.

3.2.1.1.2 Baterías de Níquel-Cadmio

El funcionamiento de las baterías de Níquel-Cadmio difiere respecto a los materiales utilizados en las baterías de Plomo-Ácido mencionadas en el Apartado 3.2.1.1.1, puesto que este tipo de baterías emplean Hidróxido de potasio junto con un cátodo de hidróxido de Níquel y un ánodo con base Cadmio, lo que permite la posibilidad de lograr tanto ciclos de carga como descarga.

Desde el punto de vista técnico estas baterías presentan una serie de mejoras en cuanto a su comportamiento se refiere. Las baterías de Níquel-Cadmio poseen una gran robustez y fiabilidad de uso, un comportamiento eficiente en un rango amplio de temperaturas (desde los -40 °C hasta los 60 °C), así como una vida útil considerablemente larga (entorno a los 1600 ciclos) con capacidad de resistencia al daño provocado por sobrecarga.

Respecto a los aspectos negativos a considerar, destaca el carácter altamente contaminante de sus componentes (como el Cadmio), su elevado precio, una baja tensión nominal, el envejecimiento prematuro y una complejidad técnica que dificulta su fabricación a gran escala.

3.2.1.1.3 Baterías de Níquel-Hidruro metálico

Las baterías de Níquel-Hidruro metálico ofrecen unas prestaciones similares a sus homólogas basadas en el empleo de Cadmio, si bien estas primeras tienen la ventaja de eliminar en gran medida las complicaciones técnicas que implicaba una adecuada manipulación del Cadmio de cara al reciclaje de dichos materiales, así como el impacto ambiental asociado a estas.

Paralelamente, presentan ciertas mejoras técnicas respecto a las baterías de Níquel-Cadmio, como una mayor densidad energética, un manejo más sencillo y seguro, junto con un menor impacto medioambiental (como fue mencionado en el párrafo anterior).

Por otro lado, su ratio de autodescarga aumenta significativamente respecto a las baterías de Plomo-Ácido, llegando a alcanzar valores de hasta el 20% (frente a valores del 5% para las baterías de Plomo-

Ácido). Además, tanto la vida útil, capacidad de resistencia al daño por sobrecarga, fiabilidad como tiempos de carga disminuyen frente a las baterías de Níquel-Cadmio.

3.2.1.1.4 Baterías de Litio

Como su propio nombre indica, este tipo de baterías emplean compuestos basados en el litio como medio para la obtención de energía. Sus características funcionales son tan variadas como variantes existen en la construcción de este tipo de baterías. Poseen un voltaje nominal situado en el rango de 3.3 V y 3.7 V, una densidad energética muy elevada, un bajo ratio de autodescarga, así como una elevada tasa de envejecimiento y una resistencia estructural muy baja, lo que hace necesario el empleo de circuitos auxiliares de seguridad que permitan mantener el voltaje dentro de unos límites establecidos, así como reforzar la estructura del material.

Entre las diferentes variantes que existen para las baterías de Litio, destacan las baterías de polímero de litio y las baterías de Ion de Litio, esta última a su vez con una serie de variaciones en función del tipo de material empleado en el cátodo. Destacan las baterías de Litio con cátodo de Fosfato de Hierro ($LiFePO_4$), el cual destaca por su toxicidad nula y su elevado rendimiento.

Algunas de sus características se resumen a continuación:

- Elevada energía específica.
- Resistencia a la sobrecarga.
- Elevado tiempo de vida útil (12 años)
- Toxicidad nula.
- Facilidad de manejo.
- Reducido mantenimiento.
- Elevada tensión nominal (hasta 4 Voltios).
- Etc.

3.2.2 Caracterización de la batería.

Desde un punto de vista de diseño, existen multitud de parámetros a considerar de cara a la obtención de los valores de potencia de una batería, así como las variaciones en el rendimiento que estas experimentan en presencia de ciertas condiciones de temperatura, humedad, etc.

Con objeto de posibilitar un uso eficiente y un adecuado mantenimiento, es necesario definir ciertos criterios de diseño, como la energía específica, ratio de descarga, profundidad de descarga, capacidad, voltajes nominales, eficiencia, necesidades de carga y necesidades de refrigeración, entre otros. Algunos de estos parámetros serán abordados en el siguiente apartado [33].

De cara a llevar a cabo la caracterización de una batería, así como para poder generar el diagrama de bloques correspondiente al módulo de baterías, será necesario definir una serie de términos.

- **Celda:** Se trata del elemento básico que compone una batería. En ella tiene lugar la reacción de oxidación-reducción para la obtención de energía. Las celdas pueden agruparse según diferentes configuraciones para lograr un aumento del voltaje de salida (asociación en serie) o para aumentar la corriente de salida (asociación en paralelo).
- **Capacidad:** La capacidad de una batería determina la cantidad de electricidad que puede ser suministrada, previo almacenamiento. La capacidad puede expresarse del siguiente modo.

$$C_{general} = \int_{t_1}^{t_2} i \cdot \delta t \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde i es la intensidad de corriente y t es el tiempo, siendo expresada la capacidad en amperios hora (Ah). Se trata de una expresión general aplicable a todos los casos y suposiciones.

- **Estado de carga / State Of Charge (SOC) %:** Determina el estado de carga de la batería de forma porcentual, de forma que cuando la batería almacena el máximo de su capacidad posible, el estado de carga corresponde al 100%. Este parámetro será clave de cara al modelado del subsistema de baterías.
- **Profundidad de descarga / Depth Of Discharge (DOD) %:** Determina la relación existente entre la capacidad entregada por una batería durante el proceso de descarga, respecto a la capacidad nominal de esta.
- **Tensión de circuito abierto / tensión de vacío:** Se trata del que presenta una batería en sus terminales cuando no existen ningún tipo de carga asociada a estos, es decir, cuando la batería no esta conectada a ningún elemento. Su valor depende de la propia construcción de la batería, y suele ser representada mediante curvas que relacionan OCV (Open Circuit Voltage) frente al estado de carga (SOC).

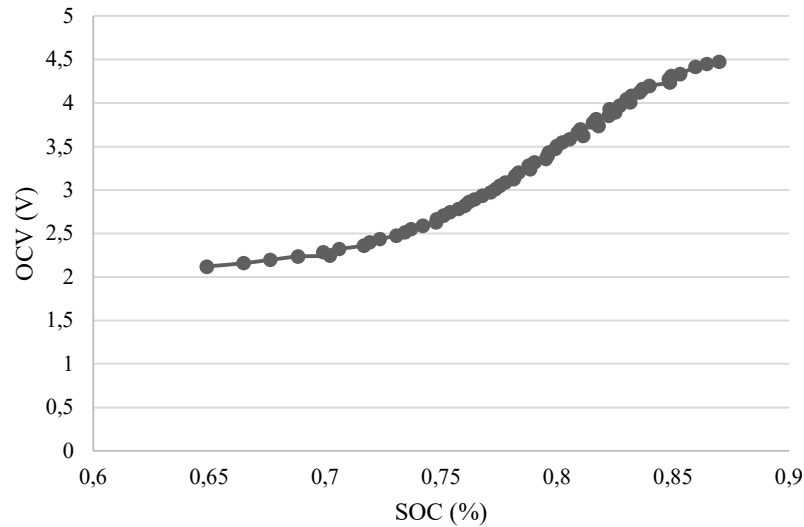


Figura 3-2: Ejemplo curva SOC-OCV para baterías Níquel-Cadmio. [Fuente propia]

- **Resistencia interna:** Establece un valor que permite determinar de forma cuantitativa las pérdidas producidas por las diferentes reacciones químicas que tiene lugar en cada celda de la batería. Esta puede ser calculada a partir de la siguiente expresión:

$$R_{interna} = \frac{(V_0 - V_i)}{I} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde $R_{interna}$ es la resistencia interna de la batería, V_0 es la tensión de vacío de la batería, V_i es la tensión de carga de la batería en un determinado instante e I es la intensidad de corriente suministrada por la batería.

3.2.3 Modelado de la batería.

En el presente apartado se realizará la simulación mediante el software basado en el entorno matemático de Matlab®, de un módulo de baterías, a fin de predecir de forma precisa el comportamiento de estas bajo las diferentes condiciones operativas estipuladas en el funcionamiento de un submarino.

El funcionamiento de un sistema tan complejo, donde tienen lugar tantos subprocesos y reacciones químicas al mismo tiempo y de forma constante, no es tarea sencilla de realizar. Motivo por el cual, de cara a predecir el comportamiento de este tipo de elementos de una forma cuantitativa y fiable, se han desarrollado una serie de modelos generales que permiten estimar datos de consumo energético durante

los procesos de carga y descarga de dichas baterías, a partir de una composición de bloques elementales que modelan parámetros como la intensidad de corriente y la tensión de circuito abierto, entre otros.

Algunos modelos, como el conocido como “Modelo de Shepherd”, permiten la estimación del estado de carga de forma relativamente sencilla, a partir de ciertos parámetros internos de la batería, junto con datos de voltaje que suelen ser ofrecidos por el fabricante en su ficha técnica. No obstante, este método presenta ciertas desventajas relacionadas con la propia simulación, puesto que, dependiendo de las condiciones establecidas en esta, surgen errores de cálculo asociados a bucles matemáticos que impiden la generación de una curva de estado de carga válida.

Por ese motivo se ha optado por utilizar el modelo de Peukert como alternativa en el presente Trabajo Fin de Grado debido a su facilidad de implementación en diversos softwares de simulación, así como el hecho de poder encontrar fácilmente la mayor parte de sus datos tanto en fichas técnicas como en curvas de fabricante de diversos modelos comerciales.

Este modelo se fundamenta en la siguiente expresión:

$$C_{peukert} = I^k \cdot t \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

- $C_{peukert}$ es la Capacidad de la batería en Amperios hora (Ah)
- I es la corriente de descarga en un determinado instante (A)
- t es el tiempo de descarga (h)
- k es la constante de Peukert (adimensional)

De este modo, el modelo de Peukert se asienta bajo la premisa de que es posible conocer los valores de tensión de circuito abierto, resistencia interna de la batería, así como la constante de Peukert.

En la Figura 3-3 se puede observar el diagrama de bloques general que modela el comportamiento del módulo de baterías:

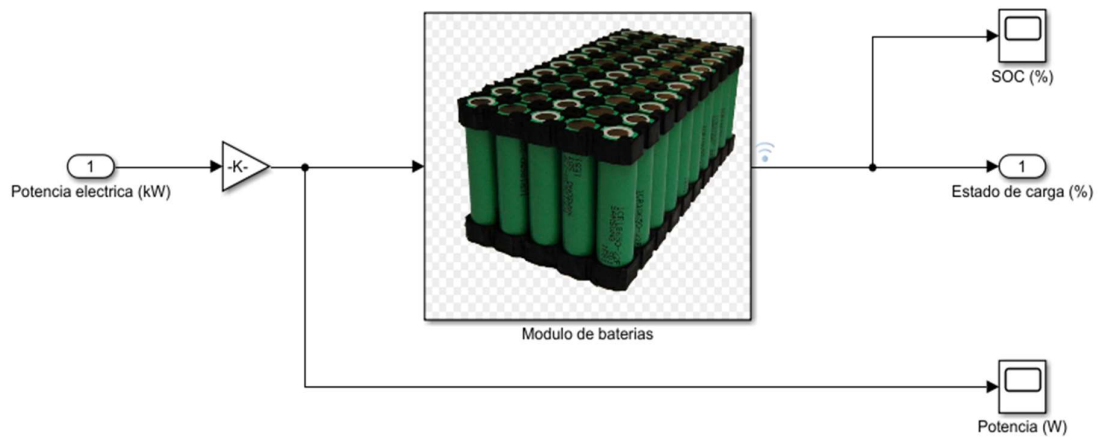


Figura 3-3: Modelo general módulo de baterías. [Fuente propia]

Donde se puede observar como a partir de los valores de potencia eléctrica requerida en el proceso de descarga de la batería (expresados en Kilovatios, kW), se obtiene el estado de carga resultante para dicho requerimiento de potencia.

El modelo de batería seleccionado para el diseño del diagrama de bloques fue el grupo de baterías de Litio-Ion del tipo TAB LiFePo4 25.6-100 de la marca “TAB Batteries”. Este modelo ofrece una serie

de ventajas de diseño que las hacen altamente viables para su uso en submarinos. Algunas de las ventajas que ofrece este modelo respecto a modelos de plomo-ácido de similares características:

- Un mayor numero de ciclos de vida, hasta de 10 veces mayor respecto a modelos de Plomo-ácido.
- Una reducción del peso de hasta el 40%, que permite el aprovechamiento del excedente de peso para la incorporación de un mayor numero de baterías o de una mayor cantidad de hidruros metálicos para uso de hidrógeno en pila de combustible.
- Operan en un amplio rango de temperatura, con valores desde los -20 °C hasta los 60 °C.
- Reduce el riesgo de explosión asociado a impactos balísticos, sobrecarga, cortocircuito, etc.
- Mayor flexibilidad de acoplo: Para lograr alcanzar las potencias deseadas para satisfacer la demanda energética producida por el módulo de propulsión eléctrica abordado en el Apartado 3.5, la flexibilidad y capacidad de modulación de e modelo escogido permite la agrupación de varios elementos en serie o en paralelo para lograr alcanzar los requerimientos de voltaje y corriente deseados.
- Mejor aporte de potencia: Frente a modelos basados en plomo-ácido, las baterías del modelo seleccionado incrementan la potencia producida hasta el doble incluso bajo requerimientos de intensidad de corriente elevados y en condiciones exigentes.

Algunos de los datos obtenidos para el modelo de batería seleccionado se muestran en la Tabla 3-1:

Tabla 3-1: Datos batería modelo TAB LiFePo4 25.6-100. [Anexo I]

Parámetros	Valores
Voltaje nominal (V)	25.6
Capacidad Nominal (Ah)	100
Resistencia Interna (mΩ)	< 20
Ciclos de vida	> 2000
Autodescarga	< 3%
Eficiencia de carga	99%
Eficiencia de descarga	96% - 99%
Intensidad de descarga (A)	50
Pico máximo de descarga (A)	100
Voltaje de descarga (V)	10
Energía (Wh)	2560

Finalmente, el diagrama general del módulo de baterías fue subdividido en cuatro submódulos que permiten determinar los valores de intensidad de corriente y carga eliminada para la obtención de los parámetros requeridos en el modelo de Peukert: Tensión de circuito abierto, resistencia interna de la

batería y la constante de Peukert. La disposición de los submódulos se detalla en la Figura 3-4. El cálculo de estos parámetros será detallado en los Apartados de intensidad de corriente y posteriores.

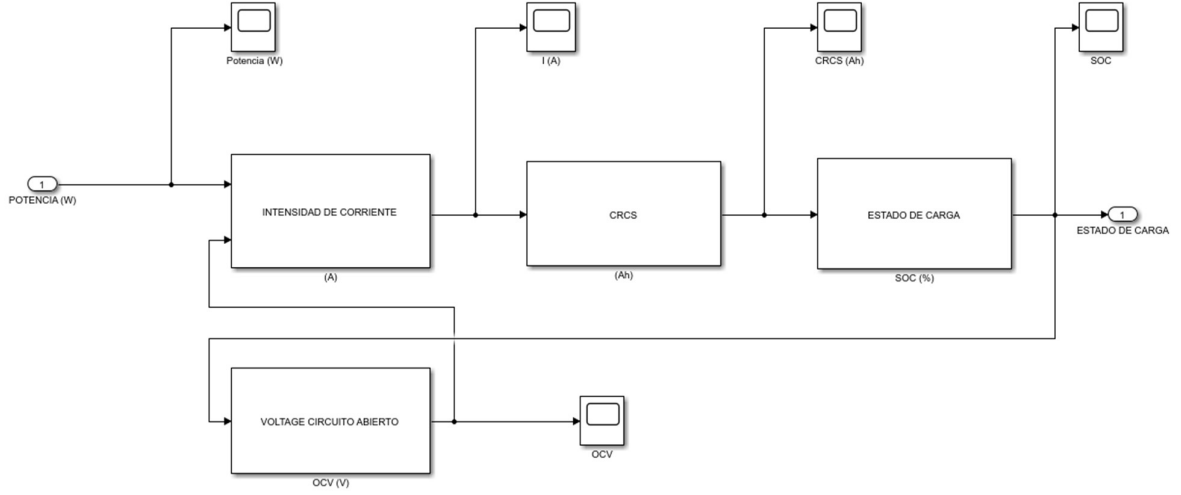


Figura 3-4: Diagrama de bloques general de módulo de baterías. [Fuente propia]

3.2.3.1 Cálculo de la intensidad de corriente

EL módulo secundario de intensidad de corriente permite relacionar los valores de potencia eléctrica requerida de la batería, con el voltaje y la intensidad de corriente. Estos parámetros pueden ser relacionados mediante la Ley de Ohm según la siguiente expresión:

$$P_{\text{eléctrica requerida}} = V \cdot I \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde la potencia es expresada en Vatios [W], la tensión en voltios [V] y la intensidad de corriente en Amperios [A]. Esta expresión es combinada con la ecuación que modela la tensión de la batería. Para entender esta expresión, la Figura 3-5 muestra una esquematización básica que emula el comportamiento de la tensión y la intensidad de corriente de una batería bajo unas condiciones de carga:

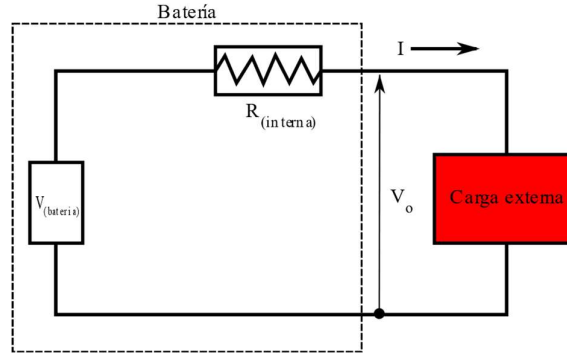


Figura 3-5: Esquema básico de una batería. [Fuente propia]

Donde V_{carga} [V] equivale al voltaje entre bornes de la batería, aquel que es ofrecido a la carga, V_0 [V] es el voltaje de circuito abierto, R_{interna} [Ω] la resistencia interna característica de cada batería e $I_{\text{batería}}$ [A] es la intensidad de corriente que atraviesa el circuito. De este modo, el diagrama puede modelarse conforme a la siguiente expresión:

$$V_{\text{carga}} = V_0 - (I_{\text{batería}} \cdot R_{\text{interna}}) \quad (\text{Ec. 9})$$

Al combinar las expresiones (Ec. 8) y (Ec. 9) se obtiene:

$$P_{electrica\ requerida} = (V_{carga} \cdot I_{bateria}) - (I_{bateria}^2 \cdot R_{interna}) \quad (\text{Ec. 10})$$

Que resulta en la expresión a modelar en el submódulo de intensidad de corriente en el programa de simulación. Despejando el valor de intensidad de corriente $I_{bateria}$ se obtiene:

$$P_{electrica\ requerida} = (V_{carga} \cdot I_{bateria}) - (I_{bateria}^2 \cdot R_{interna}) \quad (\text{Ec. 11})$$

Esta ecuación fue implementada en Simulink® mediante el empleo de bloques de operación aritmética y funciones matemáticas exponenciales [inserte número de imagen inferior], así como una función de conmutación mediante el empleo del bloque función “Switch” que en funciona de la potencia permite diferenciar si la batería esta siendo sometida a un proceso de carga o descarga, modificando así el parámetro de intensidad.

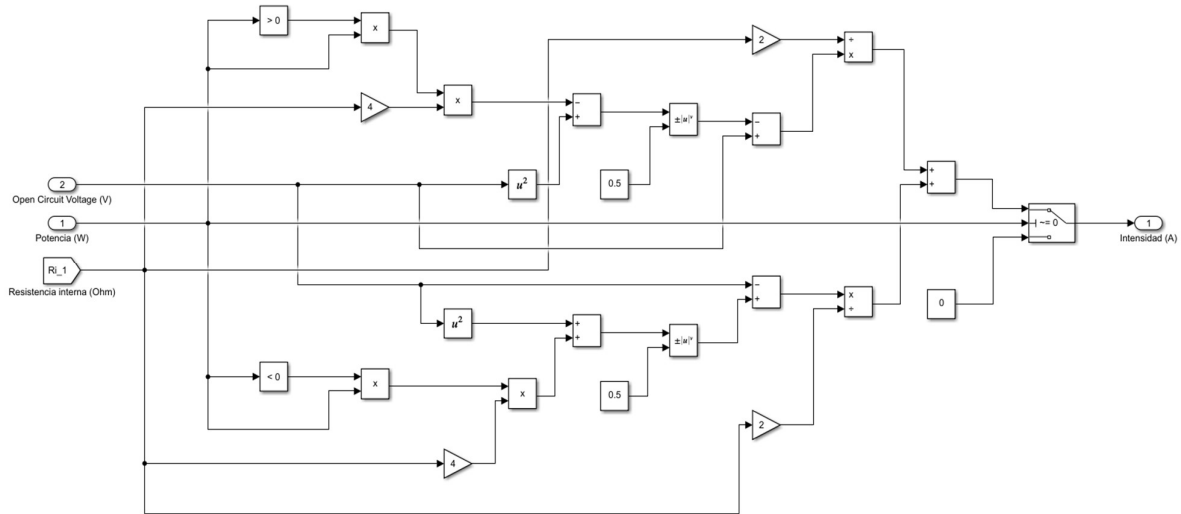


Figura 3-6: Submódulo cálculo intensidad de corriente [Fuente propia]

A diferencia de la entrada que registra la potencia consumida o aportada a la batería, los valores de tensión de circuito abierto y resistencia interna proceden de sendos bloques alternativos que calculan dichas expresiones a partir de los datos de fabricante extraídos para el modelo TAB LiFePo4 25.6-100 cuas especificaciones se encuentran recogidas en el [Anexo I](#).

3.2.3.2 Cálculo de la resistencia interna

La resistencia interna de una batería esta asociada a un concepto físico intrínseco al funcionamiento de la misma, así como la composición de los materiales que conforman la misma. La construcción de los elementos constituyentes de una batería implica el uso de determinados tipos de materiales los cuales poseen cierta resistencia interna, es decir; los materiales se oponen parcialmente al paso de la corriente al no ser completamente conductores.

Este concepto determina en gran medida el rendimiento asociado al rendimiento de una batería, puesto que un aumento de la resistencia interna de los materiales y electrolito asociados a esta implica una mayor oposición al paso de la corriente, obteniéndose perdidas de origen variado y una corriente de salida menor.

Además, el valor asociado a la resistencia interna varía no solamente conforme al tipo de material empleado en la construcción de una batería, sino que esta también viene determinada por otros parámetros como el numero de celdas empleadas, la capacidad de carga, así como el hecho de que la batería este sometida a un proceso de carga o descarga.

Partiendo de los requerimientos y dependencias frente a parámetros para con el valor de resistencia interna de una batería, el diagrama de bloques modelado fue basado en la relación entre la resistencia

interna asociada a un elemento singular del conjunto de celdas que forman el grupo de baterías y la capacidad de carga de el batería en si, de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$R_{int.conjunto} = N_{celdas} \cdot \frac{R_{int.unit}}{C_{batería}} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde $R_{interna}$ [Ω] representa la resistencia interna recogida por el fabricante, N_{celdas} equivale al numero de celdas implementadas y $C_{batería}$ [Ah] representa la capacidad de carga de la batería. El valor diagrama de bloques generado aprovecha dicha expresión para obtener en función de los datos de fabricante del modelo de batería seleccionado, para la obtención del valor de resistencia interna empleado en los subsistemas de calculo de intensidad y carga suministrada (Figura 3-7).

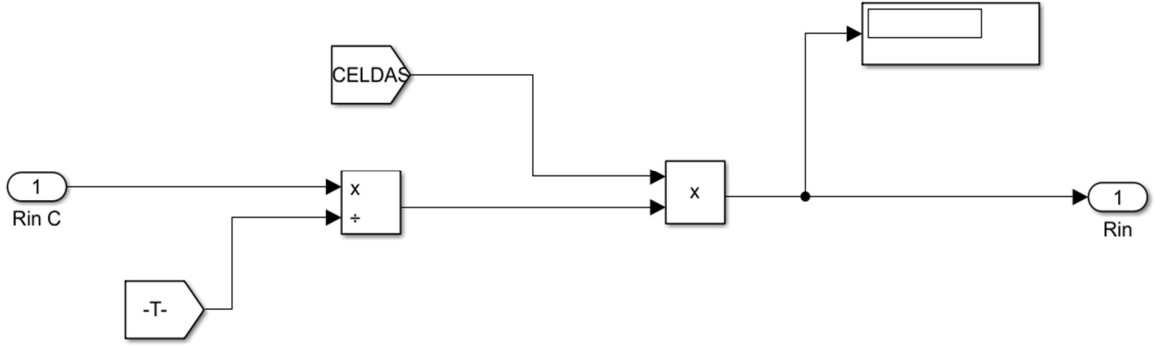


Figura 3-7: Modelo resistencia interna módulo de baterías. [Fuente propia]

3.2.3.3 Cálculo de la carga suministrada

El diagrama de bloques modelado en el siguiente apartado representa la capacidad de carga, expresada en Amperios hora [Ah] que de la batería aporta a la carga conectada entre sus bornes bajo una determinada demanda de corriente y un tiempo concreto. Partiendo de la ecuación (Ec. 7), se puede expresar la CRCS (*Charge Remained Charge Supplied*) de la siguiente forma:

$$CRCS_{bat} = I_{batería}^k \cdot \frac{\delta t}{3600} \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde $I_{batería}^k$ [A] es la intensidad de corriente, t [s] es el tiempo y $CRCS_{bat}$ [Ah] es la carga suministrada por la batería. La implementación de la ecuación (Ec. 13) fue generada mediante el empleo de bloques de producto y división tipo “*Product*” y “*Divide*” así como un conmutador tipo “*Switch*” que permite diferenciar en función del signo asociado al valor de la intensidad de corriente, si la batería realiza un proceso de carga o descarga.

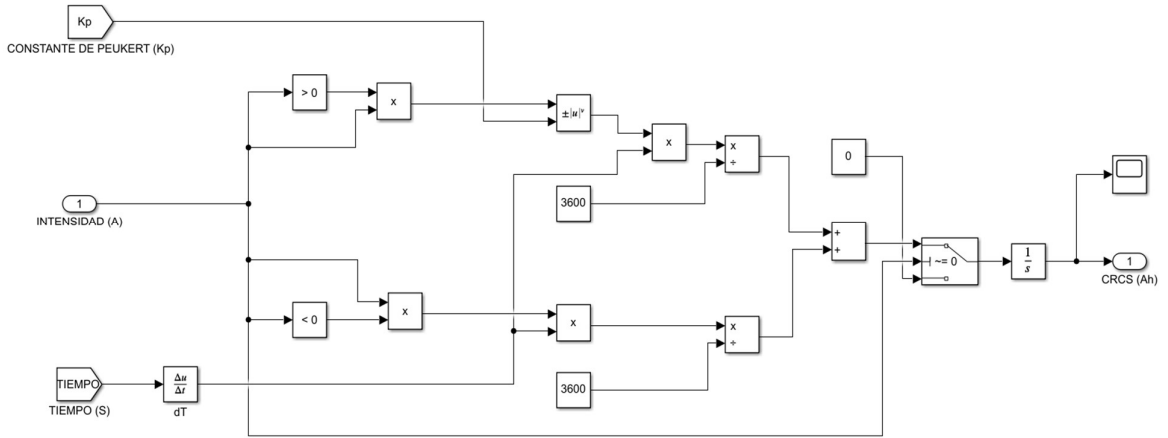


Figura 3-8: Submódulo de cálculo de CRCS [Fuente propia]

En la Figura 3-8 se aprecia la integración del valor $CRCS_{bat}$ respecto al tiempo, así como una variación en la ecuación (Ec. 13) en base a si la batería está sometida a un proceso de carga o descarga. En el caso de efectuarse un proceso de carga, se tiene que es posible despreciar el valor de la constante del coeficiente de Peukert al considerarse este prácticamente despreciable en los procesos de carga de batería. De este modo la expresión recogida en la ecuación (Ec. 13) se modificaría de la siguiente manera:

$$CRCS_{bat} = I_{batería} \cdot \frac{\delta t}{3600} \quad (\text{Ec. 14})$$

3.2.3.4 Cálculo de la tensión de circuito abierto

La tensión de circuito abierto es un valor que, junto con el estado de carga de una batería, permite representar los diversos procesos electroquímicos que afectan a una batería en un determinado instante de tiempo y para un estado de carga específico. Es por ello por lo que numerosos modelos han sido representados en base a la relación existente entre estos dos parámetros.

La función que relaciona el estado de carga con el voltaje de circuito abierto es un concepto representativo para cada tipo de batería, y suele representarse como una función no lineal ampliamente empleado en sistemas de control de baterías (denominados *Battery Management System* (BMS)) para la corrección de los errores de carga (SOC) [37].

Para la obtención de la curva que relaciona el estado de carga (SOC) con el voltaje de circuito abierto (OCV), se escogió como modelo de batería aquella con tecnología Litio-Ion con cátodo de Fosfato de Hierro ($LiFePO_4$) debido, entre las características reseñadas en el Apartado 3.2.1.1.4, a la mejora en cuanto a reducción de peso aportado por el módulo de baterías al sistema en su conjunto, lo que permite una compensación de esta sustracción de peso mediante el empleo de un mayor número de depósitos de hidruro metálico.

Las curvas OCV-SOC genéricas obtenidas para las baterías de Litio-Ion empleadas en el presente Trabajo Fin de Grado fueron obtenidas mediante expresión analítica. Esta solución aportó una mayor eficiencia computacional y permitió obtener una expresión generalizada para diferentes tipos y modelos de baterías de Litio-Ion [71].

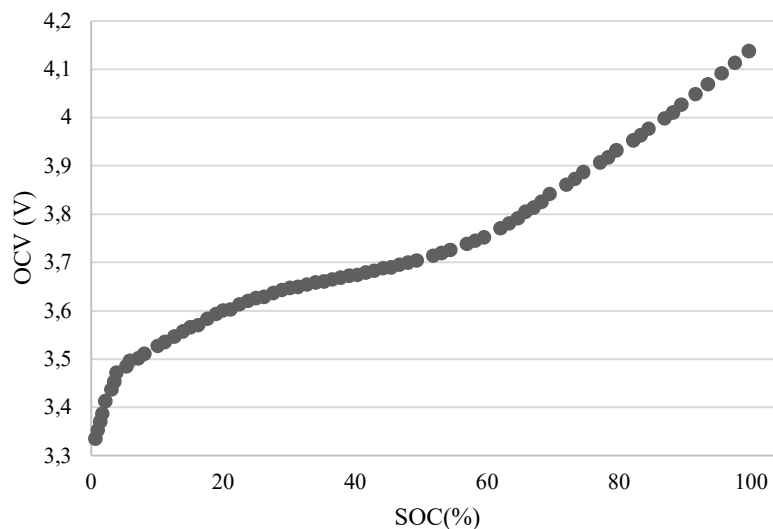


Figura 3-9: Curva SOC-OCV para baterías Ion-Litio [Fuente propia]

Los valores de la curva OCV-SOC reflejada en la Figura 3-9 fueron extraídos mediante el empleo de la herramienta de análisis gráfico WebPlotDigitizer, permitiendo generar una recta de regresión asociada a un polinomio con la siguiente expresión:

$$An^6 + Bn^5 + Cn^4 + Dn^3 + En^2 + Fn + G \quad (\text{Ec. 15})$$

Con un ajuste del 99.74% para los siguientes valores:

Coefficiente	Valor
A	-1E-11
B	4E-09
C	-5E-07
D	4E-05
E	-0.0014
F	0.0302
G	3.3408

Aplicando los valores obtenidos para los coeficientes que constituyen el polinomio característico para las baterías $LiFePO_4$ se construyó el diagrama de bloques a partir de la herramienta de simulación Simulink®, como se puede apreciar en la Figura 3-10:

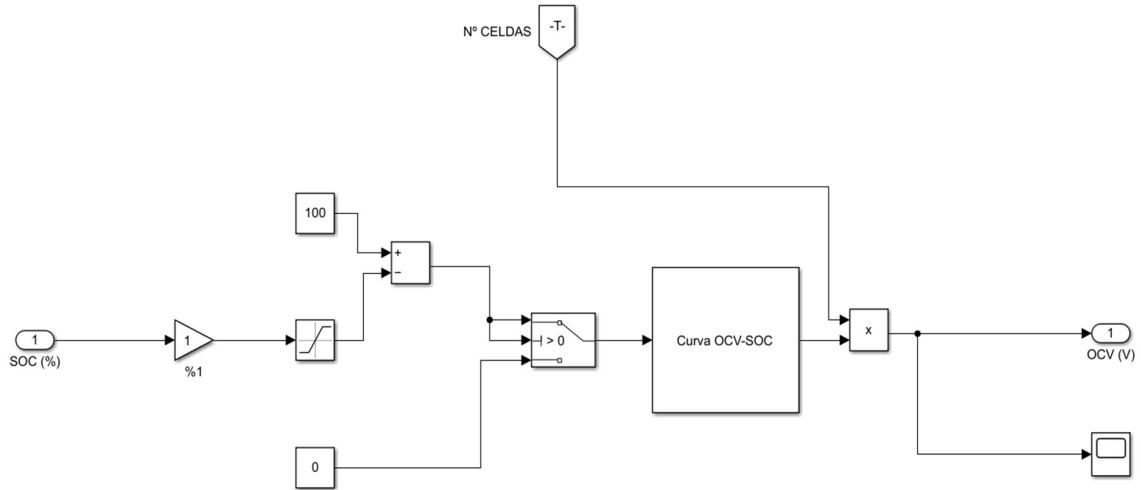


Figura 3-10: Submódulo cálculo OCV [Fuente propia]

Donde, a partir de los datos iniciales de estado de carga para un determinado instante, se obtienen los valores de tensión de vacío multiplicado por el número de celdas que contiene cada elemento singular que compone el grupo de baterías.

El límite de estado de carga fue establecido entre el 0% y el 100% como valores límite de la simulación, junto con un conmutador o “Switch” que genera un valor nulo en caso de obtener un valor de profundidad de descarga (DOD, *Depth Of Discharge*) inferior a cero, entendiendo este valor como el complementario del estado de carga (SOC).

3.2.3.5 Cálculo de estado del estado de carga (SOC)

El submódulo para cálculo del estado de carga parte de la relación entre la profundidad de descarga (DOD) y el estado de carga (SOC) según la siguiente expresión:

$$DOD_{bat} = \frac{CRCS_{bat}}{C_{Peukerts}} \quad (\text{Ec. 16})$$

Que a su vez se relaciona con el estado de carga a partir de la siguiente expresión:

$$SOC = 1 - DOD_{bat} \quad (\text{Ec. 17})$$

Y que queda modelado a partir del siguiente diagrama de bloques:

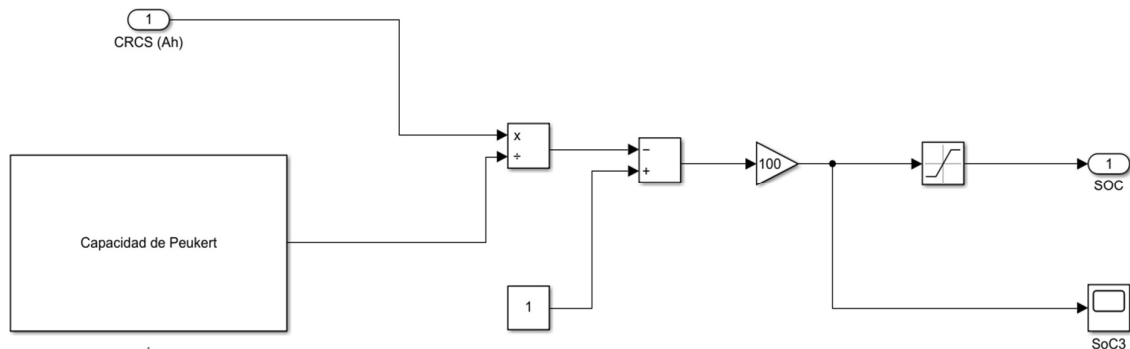


Figura 3-11: Submódulo de calculo SOC [Fuente propia]

Donde se puede apreciar un bloque secundario donde se realiza el cálculo de la capacidad de Peukert conforme a la expresión recogida en la ecuación (Ec. 7) de acuerdo con la Figura 3-12:

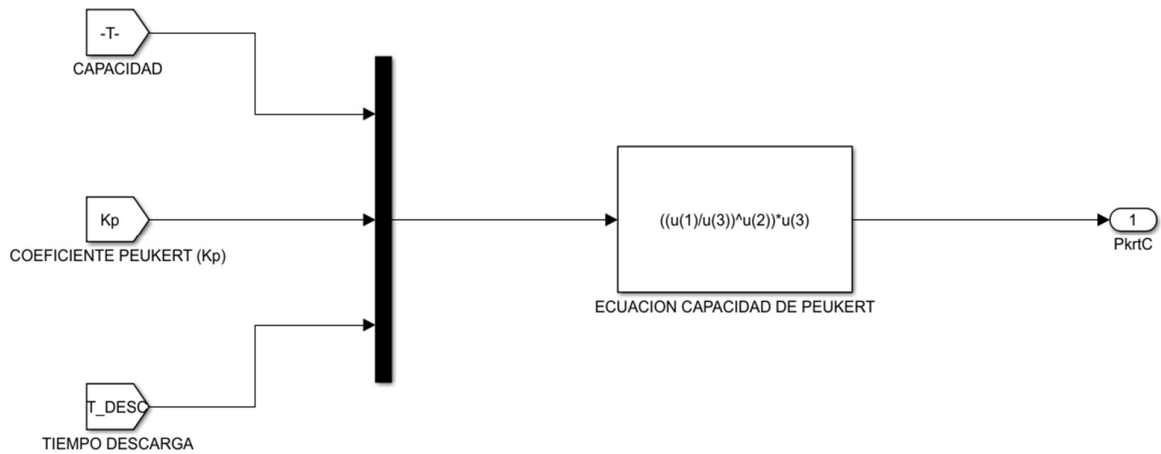


Figura 3-12: Diagrama cálculo capacidad de Peukert. [Fuente propia]

3.3 Módulo de Pila de Combustible

En el presente apartado quedan recogidos los fundamentos en los que se basa el funcionamiento de las pilas de combustible. Éstos, así como los componentes principales que las constituyen, servirán para el estudio de los diferentes modelos de pila de combustible que surgen como consecuencia de el uso de variados componentes para la creación de dichos modelos. Además, se analizarán algunas de las ventajas e inconvenientes asociados a las pilas de combustible como sistema de obtención de energía eléctrica, para finalmente generar y diseñar el modelo de pila de combustible escogido para el presente Trabajo Fin de Grado.

3.3.1 Fundamentos de la pila de combustible.

De acuerdo con la definición genérica de pila de combustible, se trata de un dispositivo que realiza la conversión de energía química en energía eléctrica a partir del intercambio electrónico obtenido mediante una serie de reacciones de oxidación-reducción. Este tipo de dispositivo presenta una serie de similitudes con respecto a otros tipos de sistemas que también aprovechan las cualidades de las reacciones redox, como las baterías.

No obstante la principal diferencia con respecto a este tipo de dispositivos radica en el hecho de que las reacciones de oxidación-reducción en el caso de las pilas de combustible emplean el hidrógeno como combustible principal para la obtención de energía, además del hecho que pese que ambos dispositivos producen energía eléctrica, el principio de funcionamiento que los rige varía. En el caso de las pilas de combustible, su funcionamiento las convierte en sistemas de transformación de energía, con capacidad de proporcionar energía eléctrica siempre que se disponga de combustible [36].

Las baterías por el contrario, son considerados como dispositivos almacenadores de energía puesto que en base a una serie de compuestos químicos generados por interacción de los electrodos y el electrolito, cierta cantidad de energía es almacenada, de modo que una vez agotada esa reserva de almacenamiento, la batería no es capaz de producir más energía.

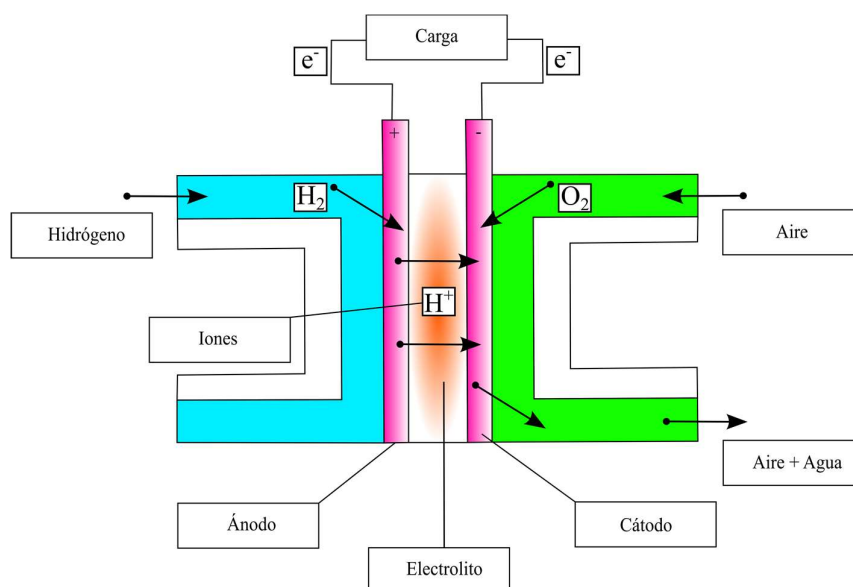


Figura 3-13: Modelo básico de pila de combustible [Fuente propia].

En la Figura 3-13 se puede apreciar una esquematización básica de una pila de combustible. En ella se puede apreciar por una parte el cátodo (+) que se encuentra en contacto en el agente oxidante, mientras que el ánodo (-) presenta contacto con el agente reductor. La separación entre ambos reactivos generados en los respectivos electrodos tiene lugar a partir de un electrolito, el cual permite únicamente el paso de los iones ya separados de sus respectivos electrones. Estos últimos se ven forzados a atravesar un circuito externo al electrolito, generando así una corriente eléctrica continua.

El sentido de la circulación de los electrones puede variar en función del tipo de celda de combustible construida y del tipo de electrolito utilizado, factores que influyen en el tipo de reacciones generadas en ambos electrodos y por tanto, el tipo de reactivos empleados, como se verá en el Apartado 3.3.3.

La composición básica de una pila de combustible [35] emplea varias capas difusoras que conforman a su vez una serie de canales de conducción. Estos permiten la correcta conducción de los reactivos y el electrolito a través de la superficie conformada por las placas que constituyen los electrodos (Figura 3-14).

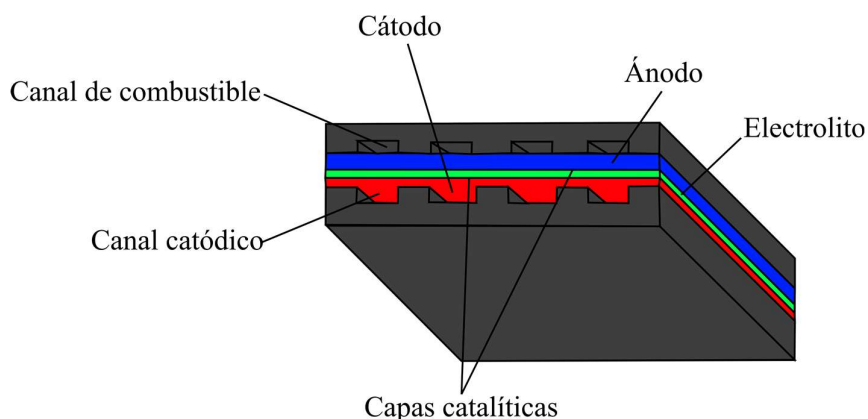


Figura 3-14: Esquema de una pila de combustible de geometría plana [Fuente propia]

3.3.2 Componentes de una pila de combustible

A continuación se expone los diferentes componentes que componen las partes principales de una pila de combustible. Cabe reseñar que existen ligeras variaciones en función del tipo de pila de

combustible configurada, con lo que en este caso se abordarán las partes principales que componen una pila de combustible del tipo PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) ya que este será el modelo escogido para el sistema planteado en el presente Trabajo Fin de Grado [38]:

- **Capa catalítica:** Se tratan de capas que constituyen tanto el cátodo como el ánodo encargados de efectuar las reacciones químicas de oxidación-reducción. Generalmente las capas catalíticas están formadas a partir de platino distribuido en una superficie de carbono porosa, todo ello mezclado con un polímero capaz de conducir los iones.
- **Capas difusoras:** constituyen parte del conjunto de los electrodos, siendo localizadas a ambos lados de las capas catalíticas anteriormente mencionadas. Están formadas por un material poroso y altamente conductor, de manera que estas permitan distribuir los gases reactantes de forma uniforme por toda la superficie de las capas catalíticas, a fin de maximizar el área de contacto de estos materiales respecto al electrodo. Además, estas son las encargadas de expulsar el exceso de combustible y agua fruto de las reacciones redox en los electrodos.
- **Membrana de intercambio protónico (PEM):** Una membrana de polímero con la capacidad de conducir iones positivos procedentes del hidrógeno, mientras que paralelamente bloquea el flujo de electrones por su través. Las membranas de intercambio de protones poseen una elevada conductividad iónica elevada a fin de maximizar el transporte de carga.
- **Canales de flujo:** Se tratan de una serie de placas metálicas compuestas por grafito o acero resistente a la oxidación que realizan varias funciones relacionadas con el transporte de carga y la distribución de reactivos y productos. Por una parte, las placas con canales de flujo realizan una distribución del combustible y oxidante hacia el grupo de membrana y electrodos. Además, estas canalizan la corriente eléctrica generada por la reacción de oxidación-reducción, participan activamente en los procesos de disipación de calor durante las reacciones químicas, aporta solidez estructural al diseño de la pila de combustible.
- **Colectores de corriente eléctrica:** Estos están compuestos de materiales altamente conductores como el cobre o aluminio, parcialmente conectadas con las placas con canales de flujo, tendiendo la función de canalizar la corriente eléctrica para dirigirla a la carga que debe ser alimentada.
- **Placas terminales:** Sirven como elementos selladores situados en los extremos finales de la pila de combustible, además de aportar solidez a la estructura.
- **Placas de refrigeración:** Estas poseen un diseño similar a las ya mencionadas placas con canales de conducción, siendo implementadas estas para lograr una mayor eficiencia en la extracción de calor asociado a las reacciones químicas del interior del grupo membrana-electrodo.
- **Sellos:** Son membranas conformadas a partir de materiales aislantes como el teflón encargados de mantener un estado de estanqueidad en la pila de combustible, manteniendo un flujo sin pérdidas y una presión equivalentemente distribuida.

3.3.3 Tipos de pilas de combustible.

Existen diferentes métodos para establecer una clasificación entre los diferentes tipos de pilas de combustible empleadas en la actualidad. Por una parte estas se pueden clasificar en función del tipo de electrolito empleado, con lo que se establecen los grupos de pilas de combustible alcalinas y las pilas ácidas. Paralelamente, si la clasificación se realiza en función de la temperatura de trabajo, surgen dos grupos: Pilas de combustible de baja temperatura (60 °C a 200 °C) y de alta temperatura (600 °C a 1000 °C). En base a estos criterios de clasificación, se pueden distinguir seis tipos principales de pilas de combustible [39].

3.3.3.1 PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

Las pilas de combustible con membrana de intercambio protónico se caracterizan por estar formadas por una membrana que permite únicamente el paso de los iones procedentes del combustible, mientras fuerza a los electrones a seguir un circuito externo del que se extrae la energía. Este tipo de pilas emplea electrodos de geometría plana basados en carbono combinado con platino. El contacto del hidrógeno con el ánodo provoca la formación de iones y electrones que seguirán rutas distintas para converger en el cátodo con el oxígeno, para dar lugar a la formación de agua y corriente eléctrica.

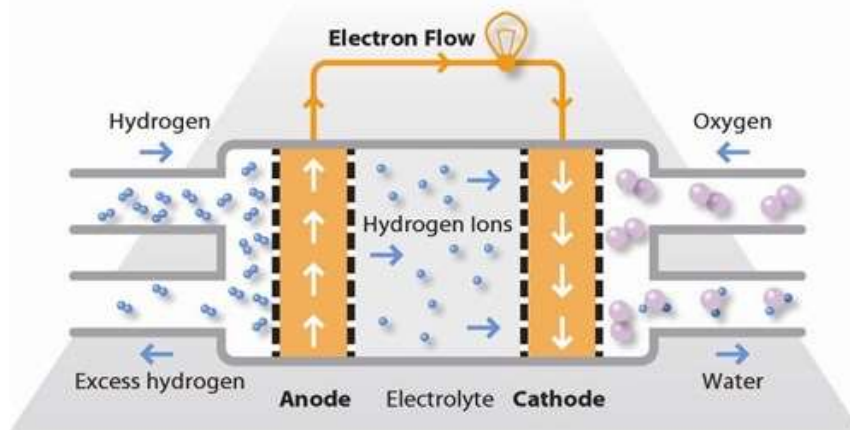


Figura 3-15: Pila de combustible tipo PEMFC. [41]

Este tipo de pilas de combustible se caracteriza por operar en rangos de temperaturas entre los 60 °C y los 80 °C, facilitando su sellado y reduciendo la complejidad. No obstante, debido a que el agua obtenida como producto de la reacción química es empleada para la humidificación de la membrana, es necesario un control continuo del flujo de agua en la membrana para garantizar el correcto funcionamiento de esta.

3.3.3.2 DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)

Como su propio nombre indica, las pilas de combustible tipo DMFC poseen la particularidad de poder emplear metanol como fuel sin la necesidad de hidrógeno. En este caso el rango de temperaturas se eleva ligeramente, con valores situados entre los 60 °C y los 130 °C. No obstante, presenta ciertas ventajas asociadas al almacenamiento del recurso energético, debido a que, a diferencia del hidrógeno, el metanol se puede almacenar y transportar de forma relativamente sencilla bajo condiciones ambientales normales.

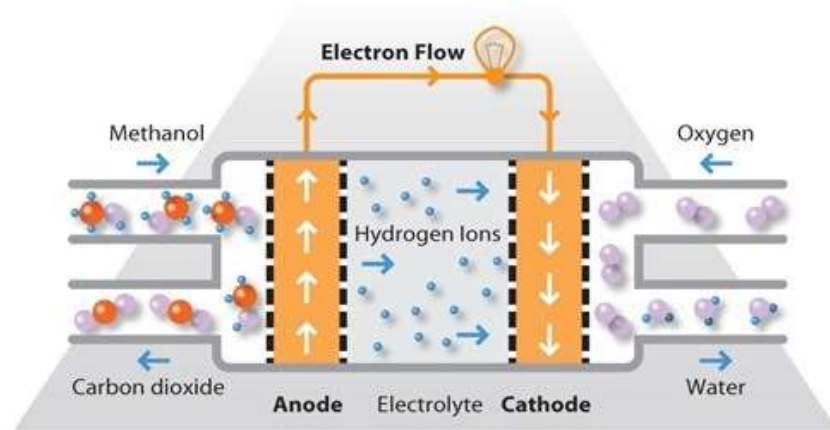
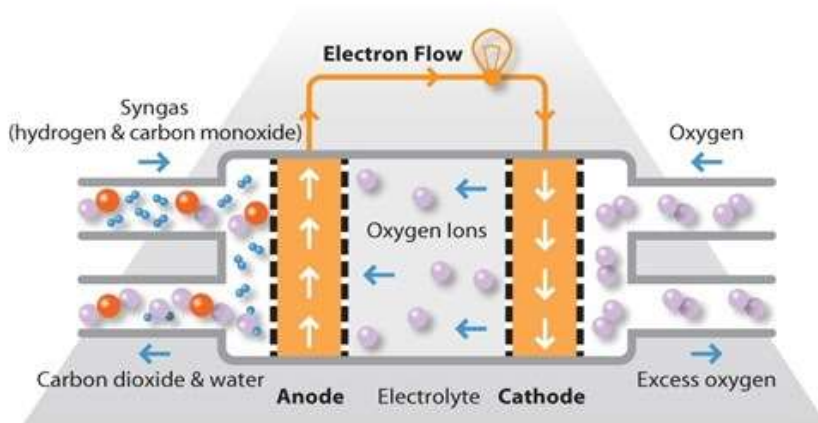


Figura 3-16: Pila de combustible tipo DMFC. [41]

No obstante, este sistema presenta algunas desventajas técnicas asociadas con la elevada solubilidad del metanol en el agua, que supone una elevada probabilidad de que el propio combustible atraviese la membrana de intercambio protónico sin haberse desprendido de los electrones previamente, reduciendo considerablemente el rendimiento de estos sistemas ante requerimientos de potencia elevados.

3.3.3.3 SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)

Este tipo de pilas de combustible son consideradas como la variante que mayor temperatura de operación presenta, situándose este entre los 800 °C y los 1000 °C, logrando rendimientos aproximados entre el 60% y el 80%.

**Figura 3-17: Pila de combustible tipo SOFC. [41]**

Las pilas de combustible tipo SOFC utilizan un electrolito sólido con base cerámica de óxido de Zirconio que, debido a las elevadas temperaturas de operación, unifica al mismo tiempo el proceso de reformado de gases para la obtención de hidrógeno, junto con las reacciones redox para obtención de energía. Además, debido a las elevadas condiciones de temperatura existentes, la cinética de reacción se ve notablemente mejorada, lo que elimina la necesidad de utilizar catalizadores como el platino.

No obstante, sus características de operación y su elevada temperatura de trabajo únicamente viabiliza su uso para estaciones de generación estacionarias de mediano y gran tamaño.

3.3.3.4 AFC (Alkaline Fuel Cell)

Las pilas de combustible alcalinas se basan en el uso de un electrolito como el hidróxido de potasio diluido en agua, junto con hidrógeno y oxígeno como combustible y oxidante. Su funcionamiento tiene lugar bajo condiciones de temperatura de aproximadamente 70 °C, lo que implica la eliminación de metales preciosos como catalizadores y el uso de otras variantes para la aceleración de las reacciones químicas como el níquel.

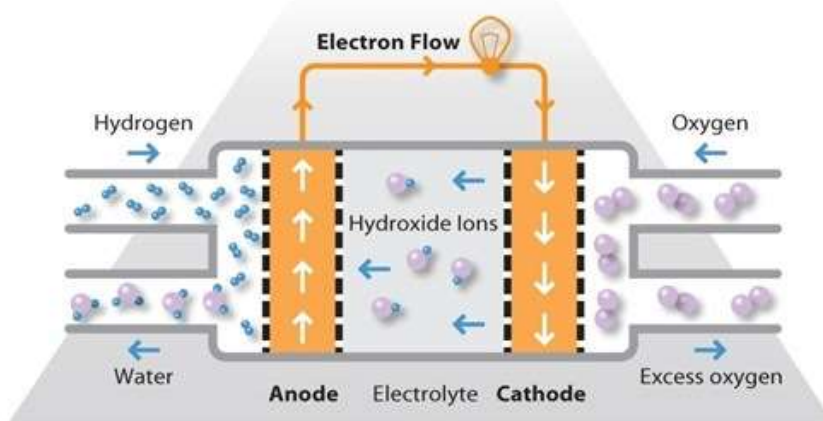


Figura 3-18: Pila de combustible tipo AFC. [41]

No obstante, el ratio asociado a la cinética de reacción de este tipo de pilas de combustible las hace capaces de producir rendimientos máximos del 60%.

3.3.3.5 MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)

Esta variante de pila de combustible emplea como membrana una asociación de sales con base carbonato de litio, carbonato de potasio y carbonato de sodio suspendidas sobre una matriz porosa de tipo cerámico. Su temperatura de trabajo ronda valores aproximados de 650 °C, lo que mejora la cinética de reacción y elimina la necesidad de utilizar metales preciosos a modo de catalizador para acelerar las reacciones químicas.

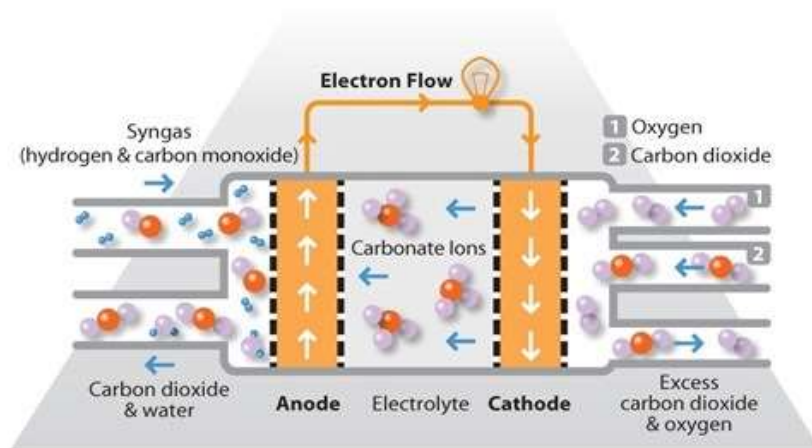


Figura 3-19: Pila de combustible tipo MCFC. [41]

Su elevada temperatura de trabajo las hace viables para el uso de diferentes tipos de combustibles como el gas natural, metano, etc.

Por otra parte, las desventajas asociadas a este tipo de modelos de pila de combustible radican en el hecho de ser necesario utilizar un aporte externo de dióxido de carbono en el cátodo debido al consumo de parte de los reactivos en el propio ánodo, lo que disminuye la eficiencia de la reacción. Además, existen ciertos problemas de corrosión que disminuyen notablemente el tipo de vida útil de los elementos.

3.3.3.6 PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)

Las pilas de combustible de ácido fosfórico constan de un ánodo y un cátodo formados a partir de una fina capa de planito esparcida en una estructura compuesta de carbono y sílica que aloja a su vez un electrolito basado en ácido fosfórico.

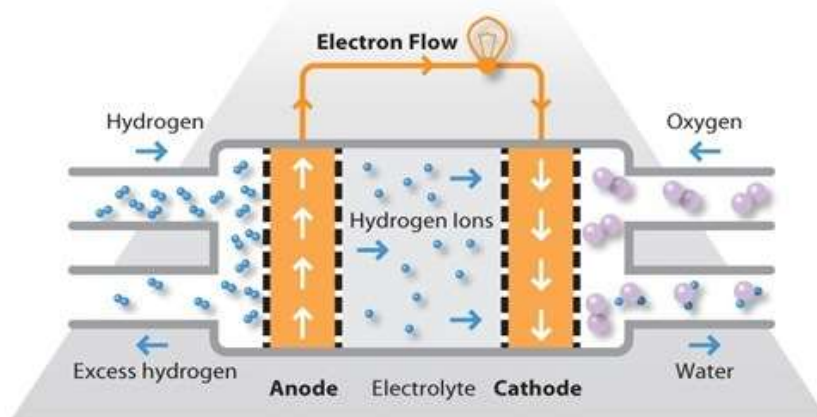


Figura 3-20: Pila de combustible tipo PAFC. [41]

Algunas características de este tipo de pilas de combustible las hace aptas para su uso en procesos de cogeneración de energía y generación estacionaria con valores medios situados entre los rangos de 100 kW y 400 kW. Su temperatura de trabajo se sitúa sobre los 180 °C, logrando alcanzarse en algunos casos eficiencias de hasta el 80%.

3.3.4 Ventajas e inconvenientes

Partiendo de la base que la energía eléctrica es la fuente de energía más utilizada en la actualidad debido a su diversidad de uso y disponibilidad, la utilización de pilas de combustible supone una gran ventaja debido a que estas permiten la conversión de la energía química recogida en un elemento tan abundante como el hidrógeno sin necesidad de pasos intermedios para realizar dicha transformación en energía eléctrica.

La ausencia de pasos intermedios para la transformación de energía química en eléctrica supone una menor pérdida energética asociada a procesos de transformación intermedios, lo que en definitiva aumenta la eficiencia del sistema en su conjunto. De este modo, la eficiencia de una pila de combustible puede alcanzar valores de hasta el 80% con aprovechamiento del calor excedente del sistema. Esto implica una gran mejora de la eficiencia respecto a sistemas convencionales basados en el ciclo de Carnot con valores de eficiencia que raramente alcanzan más del 40%.

Ora de las ventajas asociadas al empleo de estos sistemas se basa en las emisiones nulas resultantes de las reacciones redox generadas en el interior de las pilas de combustible. Pese a que la contaminación de dichos sistemas está ligada a los métodos de obtención del hidrógeno, el empleo de pilas de combustible en sí mismas establece un precedente nuevo en cuanto a la generación energética limpia.

Paralelamente, al tratarse de un dispositivo electroquímico carente de partes móviles, su funcionamiento carece de ruidos, lo que abre nuevos campos de uso en aplicaciones que requieren un bajo nivel de ruido durante el funcionamiento de sus sistemas de obtención de energía. Además, la capacidad de construcción modular de estos sistemas abre la posibilidad de asociar múltiples módulos elementales para lograr grandes valores de potencia para aplicaciones altamente demandantes de energía: en esencia, su carácter modular dota a las pilas de combustible de flexibilidad.

No obstante, existen también una serie de factores que dificultan el desarrollo e implementación de esta tecnología en la actualidad, y que hace que estos sistemas poco maduros. Algunos de ellos son la elevada complejidad de los procesos de producción y almacenamiento de hidrógeno, el elevado precio de fabricación debido al empleo de metales raros como el Platino, así como la corta vida útil de los equipos, entre otros.

3.3.5 Modelado de la pila de combustible.

La pila de combustible a emplear en el presente Trabajo Fin de Grado debe poseer una serie de características que garanticen su uso como parte de un sistema AIP en submarinos. En primer lugar, es necesario garantizar una potencia mínima necesaria para poder alimentar el motor eléctrico modelado en el Apartado 3.5.3 en sus diferentes condiciones de acoplo, garantizado por otro lado un consumo de hidrógeno suficiente tal que sea posible el almacenamiento de las cantidades requeridas en el espacio permitido por la estructura del submarino.

Actualmente existen pocos modelos comerciales que puedan funcionar en un rango de potencias tan altas como las que son requeridas para el funcionamiento de un submarino en sus diferentes situaciones operativas. Por consiguiente, la solución reside en la modulación y asociación de diferentes grupos generadores por pila de combustible. La mayor o menor potencia que producir por parte de la pila de combustible vendrá determinada, además de los requerimientos operativos en una situación dada por parte del submarino, por el grado de hibridación de esta tecnología con respecto al porcentaje de potencia aportado por el módulo de baterías utilizado en la simulación.

De este modo, la necesidad de información referente al uso de una pila de combustible en situaciones reales pasa a ser un aspecto clave de cara a su elección. Debido a la necesidad de obtención de modelos de pilas de combustible que ofrezcan parámetros suficientes para su implementación en los diagramas de bloques que componen la simulación; se ha escogido como modelo de pila de combustible el módulo FCvelocity HD-6 procedente de la empresa Ballard.

El modelo FCvelocity HD-6 cumple una serie de requisitos esenciales que ha valido para que sea utilizado como modelo de simulación en el presente Trabajo Fin de Grado.



Figura 3-21: Pila de combustible modelo FCvelocity HD-6. [42]

En primer lugar, debido al hecho de que dicho modelo ha sido utilizado en estudios de investigación previos, existen una gran cantidad de datos y parámetros que permiten simular de forma más precisa el comportamiento de dicho modelo en funcionamiento [43]. Las características de potencia producida (con valores de hasta 150 kW) le permite funcionar en entornos altamente exigentes, habiendo sido probados en vehículos pesados de diversa índole, como se muestra en [44].

En la Tabla 3-2 se puede apreciar algunos de los parámetros de funcionamiento de la pila de combustible escogida para una potencia neta de 150 kW.

Tabla 3-2: Datos pila de combustible modelo FCvelocity HD-6 [Anexo I]

Parámetros	Valores
Potencia (kW)	150
Voltaje (V)	465 – 730
Intensidad de corriente (A)	0 - 300
Peso (Kg)	404
Dimensiones (mm)	1530 x 871 x 495
Numero de celdas	762
Voltaje nominal (V)	568
Intensidad nominal (A)	267
Presión nominal (Pa)	2.06
Eficiencia media	55%
Flujo de aire nominal (lpm)	3653
Temperatura de operación	63 °C

En la Figura 3-22 se puede observar la composición interna del modelo de pila de combustible seleccionado, junto con los diferentes filtros que componen los circuitos de comunicación entre la pila de combustible y los sistemas auxiliares.

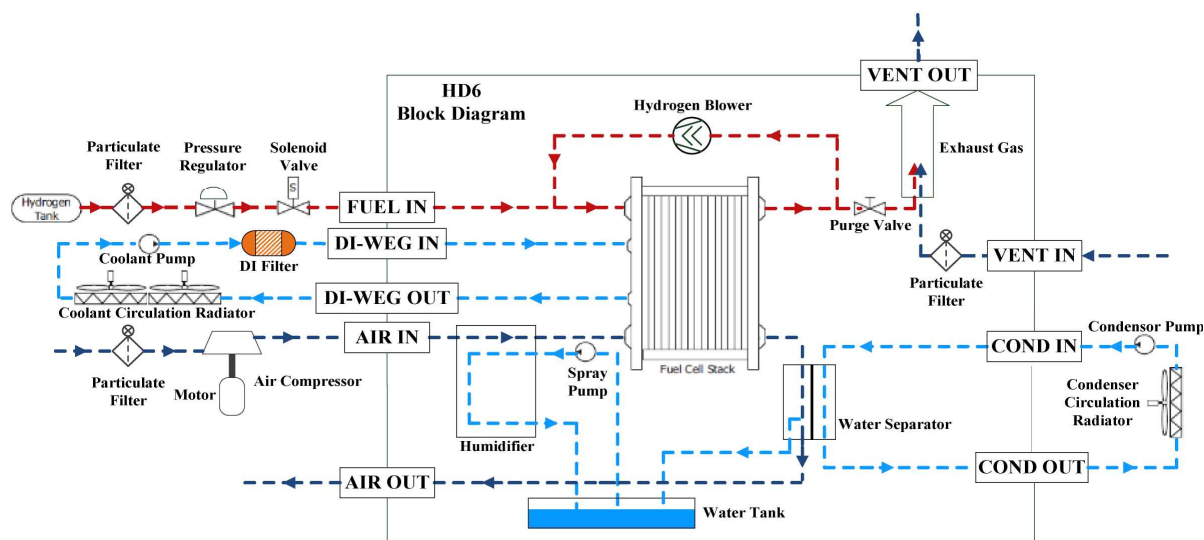


Figura 3-22: Esquema de composición pila de combustible modelo FCvelocity HD-6. [43]

Respecto a los sistemas auxiliares, el modelo FCvelocity HD-6 funciona con una serie de módulos auxiliares para garantizar una correcta gestión de la presión, el calor generado en la pila, y un voltaje de

salida continuo. Por una parte, el sistema consta de un módulo auxiliar de refrigeración basado en una disolución de agua y etileno glicol (WEG) que aporta un flujo constante a l módulo de la célula de combustible para funciones de refrigeración. Consta además de una válvula de control de presión, protección contra congelación, así como una bomba de presión propia para impulsar el refrigerante hacia la célula de combustible.

Paralelamente, el sistema consta de un módulo auxiliar encargado de aportar aire a presión para garantizar que las reacciones electroquímicas tienen lugar de forma estable y continua. Dicho subsistema consta de un compresor para el aporte de aire según determinados valores de flujo de aire, un sensor de caudal y un controlador para modificar el flujo de aire y adaptar a los parámetros requeridos en la reacción en un determinado instante.

Ambos sistemas son alimentados por un convertidor que opera junto con la pila de combustible, que además permite la salida de tensión según las características requeridas por la carga eléctrica establecida por el módulo de propulsión eléctrica descrito en el Apartado 3.5.

Partiendo de las características mencionadas en este apartado para con el modelo de pila de combustible seleccionado, la consideración o no de estas para con el funcionamiento del modelo generado en el software de simulación suponen una variación notable respecto a las necesidades de computación y diseño, así como la precisión obtenida en los resultados. Por ello, las siguientes hipótesis fueron tomada en cuenta de cara al diseño del modelo y su simulación [45]:

- Los gases que intervienen en las reacciones de oxidación-reducción son considerados como gases ideales.
- Se desprecian las pérdidas de estanqueidad asociadas a la celda de combustible.
- Se desprecian las pérdidas asociadas al sistema auxiliar de refrigeración.
- Se desprecian las pérdidas asociadas al sistema auxiliar de control de flujo de oxidante.
- Los valores de resistencia eléctrica de la pila de combustible no varían en función de la temperatura o la presión.
- No se consideran pérdidas asociadas a ningún proceso que no este íntimamente relacionado con la cinética de reacción.
- No se consideran pérdidas de conductividad en el electrolito de ningún tipo.
- Se considera que la alimentación de la pila de combustible se realiza única y exclusivamente mediante hidrógeno y oxígeno.

Bajo estas suposiciones, se generó un modelo basado en diagrama de bloques que simula el comportamiento de la pila de combustible ante una demanda constante y estable de energía. En la Figura 3-23 se puede observar una imagen general del módulo representativo de la celda de combustible, donde se obtiene un determinado valor de consumo de hidrógeno [kg] para un determinado requerimiento de potencia [kW].

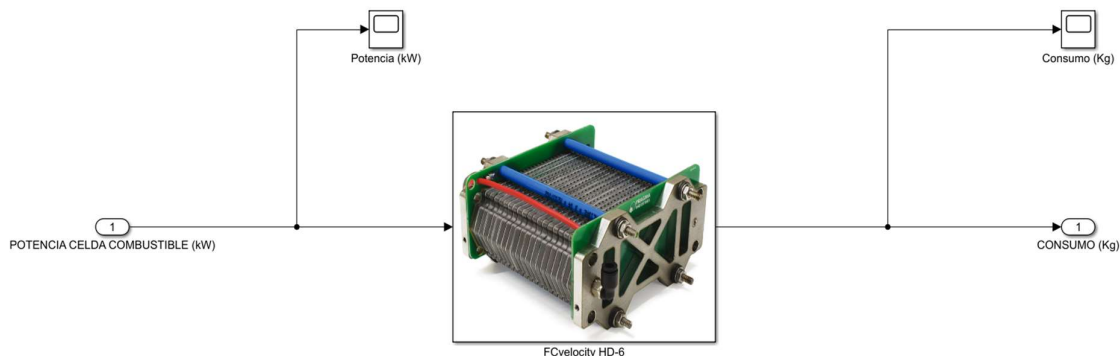


Figura 3-23: Diagrama de bloques módulo pila de combustible FCvelocity HD-6. [fuente propia]

Dicho modelo consta internamente de dos subsistemas, en los cuales fueron empleadas una serie de variantes de las curva de polarización obtenidas para el modelo de pila de combustible estudiado (Figura 3-24).

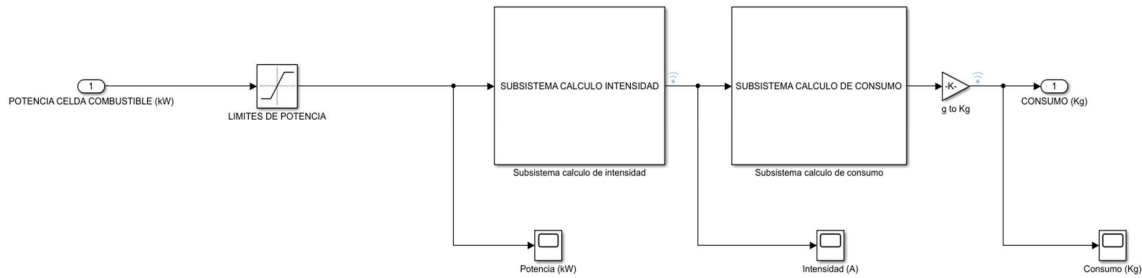


Figura 3-24: Diagrama expandido pila de combustible modelo FCvelocity HD-6. [Fuente propia]

Se puede apreciar como existen dos submódulos que realizan por una parte el cálculo de la intensidad de corriente en función de la potencia requerida, para seguidamente obtener el consumo de reactantes a partir de la intensidad de corriente.

El submódulo de cálculo de intensidad de corriente (Figura 3-26) a partir de potencia requerida fue engendrado a partir del uso de un bloque polinómico que recoge los valores de los coeficientes que rigen la curva que relaciona los valores de intensidad de corriente en la pila de combustible, y la potencia requerida en la misma.

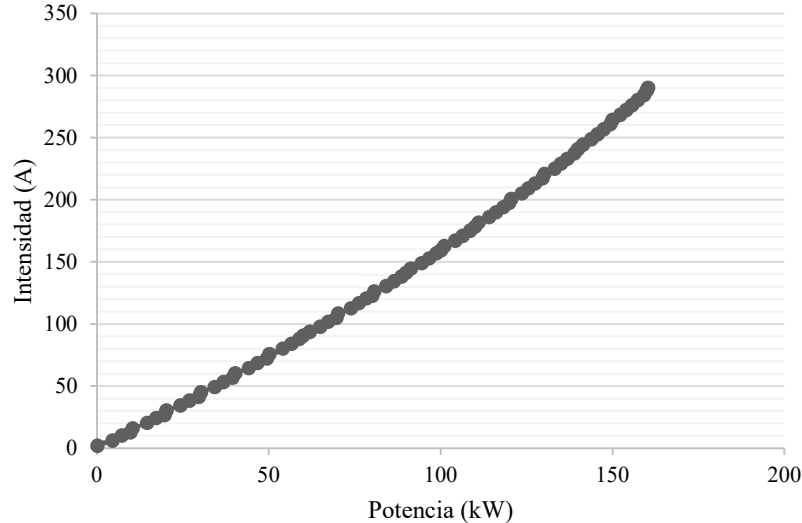


Figura 3-25: Curva Potencia-Intensidad modelo FCvelocity HD-6. [Fuente propia]

Esta curva fue obtenida a partir de los datos de la investigación realizada en [43], extrayendo dichos datos mediante la herramienta de análisis gráfico “*WebPlotDigitizer*” y generando los coeficientes del polinomio a partir de una recta de regresión que responde a un polinomio del siguiente orden:

$$An^2 + Bn + C \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde se obtuvo un ajuste del 99.98%. Los valores de los coeficientes quedan recogidos en la Tabla 3-3:

Tabla 3-3: Coeficientes de la curva Potencia-intensidad para el modelo FCvelocity HD-6. [Fuente propia]

Coeficiente	Valor
A	0.0032
B	1.2529
C	2.2464

Los valores de los coeficientes fueron implementados en un bloque función tipo polinómica y un bloque conmutador que devuelve un valor nulo en caso de que los valores de potencia sean negativos. El subsistema de cálculo de intensidad de corriente se puede observar en la Figura 3-26.

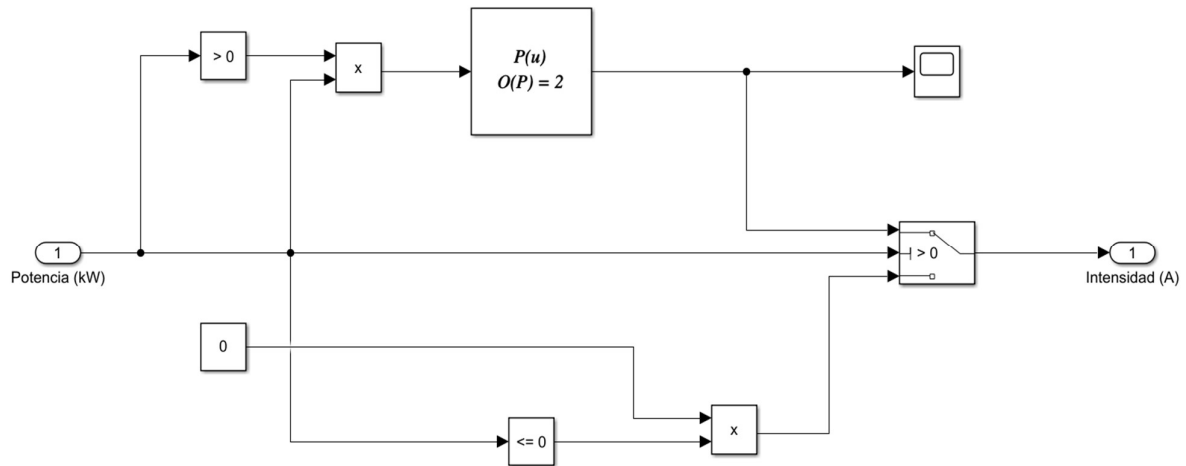


Figura 3-26: Submódulo de cálculo de intensidad de corriente (FCvelocity HD-6). [Fuente propia]

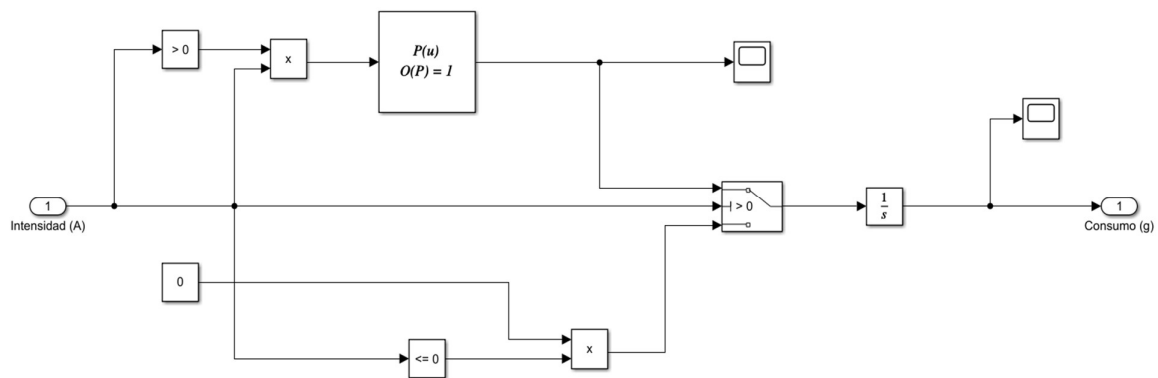


Figura 3-27: Submódulo consumo reactantes (FCvelocity HD-6). [Fuente propia]

En la Figura 3-27 se puede observar el submódulo encargado de realizar el cálculo del consumo del reactante. Este posee una configuración similar a la anterior, con un conmutador como sistema de seguridad para limitar los valores obtenidos a aquellos provenientes de datos de intensidad e corriente positivos, que implican un consumo de potencia en lugar de un aporte de esta. La curva de consumo de reactante fue generada igualmente mediante el empleo de las herramientas utilizadas en el cálculo de la curva reflejada en la Figura 3-25. En este caso la curva obtenida fue la siguiente:

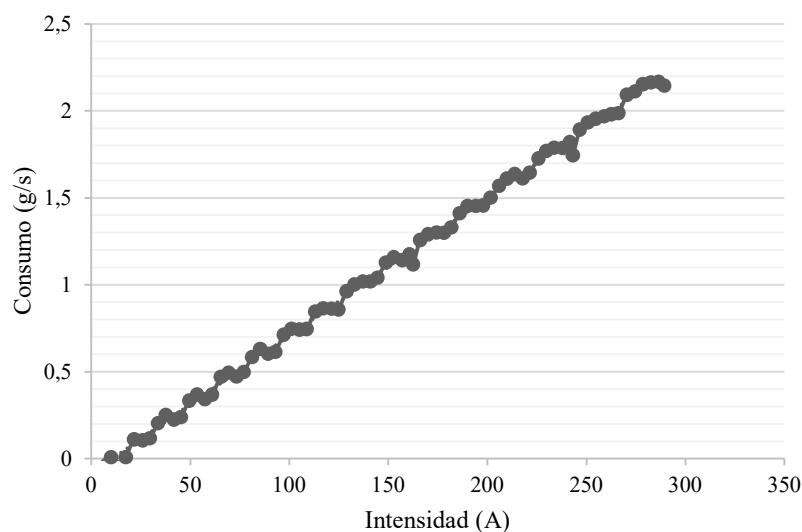


Figura 3-28: Curva consumo-intensidad modelo pila de combustible. [Fuente propia]

Logrando un ajuste del 99.78%. En este caso se obtuvo un polinomio de grado 1 para unos valores de los coeficientes como los reflejados en la Tabla 3-4:

Tabla 3-4: Coeficientes de la curva Consumo-Intensidad para el modelo FCvelocity HD-6. [Fuente propia]

Coefficiente	Valor
A	0.0079
B	-0.0843

3.4 Módulo de almacenamiento en Hidruros metálicos

3.4.1 Fundamentos de los hidruros metálicos

Como se ha mencionado en el Apartado 1.2 y posteriores, el hidrógeno presenta una serie de desventajas con respecto a lo que a su proceso de almacenaje y transporte se refiere. En el Apartado 1.3 se detallaban algunos de los métodos más empleados y conocidos en la actualidad para llevar a cabo dicha tarea. No obstante, pese que se han llegado a implementar sistemas a gran escala basados en algunos de los mencionados métodos, como el almacenamiento en tanques a presión o el uso de hidrógeno criogénico, existen notables desventajas asociadas a la necesidad de mantener presiones muy elevadas y temperaturas muy reducidas, lo que sin duda supone un riesgo para la seguridad del personal y del material; más aun en entornos operativos exigentes como los que presenta un submarino.

Efectivamente, debido a la necesidad de alcanzar un elevado nivel de presión en los sistemas basados en almacenamiento de hidrógeno por gas presurizado, al cansar el nivel necesario de eficiencia volumétrica para propósitos industriales implica un consumo de energía adicional que puede alcanzar valores de hasta el 50% en algunos casos.

Los métodos alternativos más extendidos basados en el almacenamiento de hidrógeno criogénico eleva considerablemente la eficiencia volumétrica hasta más del doble (desde $40 \frac{kg}{m^3}$ hasta $70.8 \frac{kg}{m^3}$) en algunos casos [47]. No obstante, el empleo de estos métodos requiere del uso de temperaturas aproximadas de unos 21.2 K a presión ambiente para lograr los resultados deseados.

Bajo el pretexto de la necesidad de obtener nuevos métodos que permitan subsanar algunas de las desventajas asociada a los medios convencionales de almacenamiento de hidrógeno, numerosos estudios de investigación han sido llevados a cabo sobre sistemas de almacenamiento de hidrógeno mediante hidruros metálicos.

Como fue observado en el Apartado 1.3.3 y Apartado 1.5.2, el funcionamiento asociado a los hidruros metálicos les dota de una serie de ventajas [46] como una mayor densidad de volumen, una estructura compacta y la ausencia de partes móviles asociadas a los métodos encargados de realizar los procesos de compresión o licuefacción del hidrógeno para su almacenamiento en métodos convencionales.

Es por tanto que los sistemas de almacenamiento de hidrógeno basados en hidruros metálico apuntan a ser la opción más segura, debido a las condiciones de presión y temperatura relativamente moderadas en las que estos sistemas trabajan, con respecto a los métodos mencionados en los Apartados 1.3.1 y 1.3.2, así como en los párrafos anteriores. Paralelamente, algunos de los compuestos que conforman ciertos hidruros metálicos tienen la capacidad de llevar a cabo los procesos de absorción y desorción de hidrógeno a partir de condiciones operativas que difieren de las condiciones de equilibrio del propio material, en cuanto a presión y temperatura se refieren. Es por ello por lo que algunos son considerados como sistemas de almacenamiento de energía calorífica, ya que aprovechan los efectos generados por las reacciones endotérmicas y exotérmicas experimentadas por el propio material.

En apartados posteriores se realizará una alusión a algunos de las investigaciones realizadas en cuanto al funcionamiento de hidruros metálicos (Apartado 3.4.2).

3.4.2 Tipos de hidruros metálicos

Las clasificación o separación de los hidruros metálicos es un concepto considerablemente difuso, debido a que hoy en día, existe limitada información relativa a sus características y funcionamiento. Hasta la fecha, se han realizado numerosos experimentos e investigaciones sobre el funcionamiento de numerosas aleaciones de hidruros metálicos debido a sus elevados resultados de densidad gravimétrica y densidad volumétrica.

Algunos ejemplos comprenden modelos de hidruro metálico como BMH_4 [48 - 51] y AlH_3 [52] así como compuestos basados en MgH_2 con adiciones de metales realizando la función de catalizador, como óxidos metálicos, aleaciones metálicas varias (Mg_2NiH_4) [53] o incluso metales transitorios para dar lugar a hidruros ternarios como Mg_2CoH_5 [54]. En el caso más sencillo de hidruro metálico se establece la nomenclatura de compuesto ternario tipo $A_xB_yH_z$, donde A suele representar un metal raro o metal de transición que componen un hidruro metálico estable. B por otra parte constituye generalmente un metal de transición sin capacidad de formar compuestos estables por si solo. Las principales familias pueden ser observadas en la Tabla 1-2. En la Figura 3-29 se puede observar un esquema ampliatorio sobre la clasificación de los principales modelos de hidruros metálicos descubiertos en la actualidad.

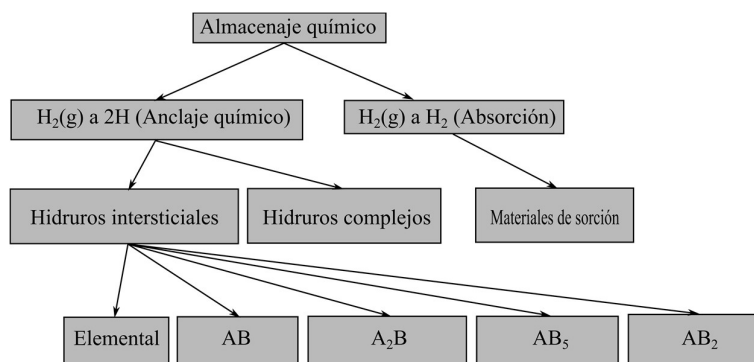


Figura 3-29: Clasificación de los hidruros metálicos. [Fuente propia]

En los siguientes apartados se abordarán algunas de las características de las aleaciones tipo AB_5 y AB_2 como modelos más importantes de cara a las prestaciones requeridas para el modelado del hidruro metálico del presente Trabajo Fin de Grado.

3.4.2.1 Hidruros metálicos tipo AB_5

En base a la información contenida en la Figura 3-29, algunos modelos como los hidruros metálicos tipo AB_5 han sido estudiados más en profundidad durante los últimos años debido a su elevado potencial para ser utilizados en aplicaciones prácticas.

Este tipo de compuestos se caracteriza por poseer una cinética de reacción reversible respecto a los procesos de absorción y desorción, a la vez que una elevada velocidad de reacción a temperaturas ambientales o ligeramente superiores. Sus procesos de activación simples y unas condiciones de presión y temperatura modernamente bajas, permiten un proceso de control eficiente sobre el material y el flujo de hidrógeno obtenido del hidruro.

Sin embargo, su principal desventaja radica en el hecho que su capacidad de descarga se ve reducida considerablemente frente a hidruros metálicos de otro tipo.

3.4.2.2 Hidruros metálicos tipo AB_2

La composición de este tipo de hidruros metálicos los dota de ciertas ventajas frente a las aleaciones AB_5 . El empleo de algunas aleaciones basadas en Circonio permite obtener unas capacidades de descarga relativamente superiores frente a los modelos basados en $LaNi_5$. Además, presentan cinéticas de reacción superiores a los modelos AB_5 , una esperanza de vida elevada y un coste de fabricación inferior a aquel de las aleaciones tipo AB_5 .

No obstante, presentan la desventaja de ser extremadamente sensibles a la presencia de impurezas, así como una elevada estabilidad de la estructura cristalina que conforma la aleación, lo que evita el desprendimiento del hidrógeno contenido en la estructura y reduce la reversibilidad de las reacciones de absorción y desorción.

3.4.3 Modelado del hidruro metálico

De cara a la generación de un modelo de hidruro metálico que sea capaz de responder a los requerimientos exigidos por un sistema AIP para su uso a gran escala, existen una serie de necesidades a cumplir por parte de este:

- Capacidad de ofrecer un flujo mínimo de hidrógeno requerido por unidad de hidruro metálico.
- Baja temperatura de desorción de hidrógeno para las condiciones típicas de funcionamiento de una pila de combustible.
- Ratios de absorción elevados.
- Ratios de desorción elevados.
- Costes de implementación aceptables.
- Capacidad de almacenamiento de hidrógeno superiores al límite mínimo establecido por el Departamento Americano de Energía (DOE) (este valor queda fijado en un 6% en peso) [57].

Esto se añade a una necesidad extra asociada a la relativamente poca información comercial existente respecto al funcionamiento de los hidruros metálicos: La existencia de parámetros y datos suficientes para cuantificar el funcionamiento de un determinado modelo de hidruro metálico en una simulación.

Bajo las premisas mencionadas en los párrafos anteriores, se escogió $LaNi_5$ como modelo de aleación para la construcción del diagrama de bloques utilizado en la simulación del módulo de almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos. Este se trata de un modelo de hidruro del tipo AB_5

cuyas características quedan reseñadas en el Apartado 3.4.2.1. Paralelamente, los parámetros y datos utilizados para el modelado de los elementos básicos conformantes del módulo de hidruros metálicos fueron obtenidos a partir de las investigaciones realizadas en [55] y [56].

El diagrama de boques fue creado a partir de la consideración de un elemento unitario de tipo cilíndrico con $LaNi_5$ con carácter modular, el cual se puede replicar el numero de veces necesario para obtener el flujo de hidrógeno necesario para su uso en la pila de combustible. El control de las reacciones de absorción y desorción de dicho modelo se realizó mediante una modificación de la temperatura externa del depósito a partir del uso de agua destilada en la superficie externa de las paredes que lo conforman. Paralelamente, las hipótesis mencionadas a continuación fueron tenidas en consideración de cara al desarrollo del modelo matemático:

- La presión y temperaturas del flujo de hidrógeno generado coinciden con los valores dentro del propio depósito.
- La porosidad de la aleación se considera homogénea e isotrópica.
- Los valores de temperatura y presión del depósito se mantienen uniformes durante el proceso de desorción.
- Se considera únicamente el calor transmitido por conducción y convección.
- Los volúmenes de las diferentes fases del hidrógeno al interactuar con el hidruro se consideran constantes y uniformes.
- Las propiedades físicas de la aleación son independientes de las condiciones de presión y temperaturas del hidrógeno.
- Los gases son considerados ideales.

Partiendo de las asunciones ya mencionadas, se generó un modelo matemático basado en diferentes submódulos, los cuales a su vez fueron regidos por una serie de ecuaciones diferenciales que serán desarrolladas en los apartados siguientes. Cabe destacar además que, las ecuaciones implementadas en los diferentes bloques del diagrama únicamente representan los procesos asociados a la desorción del hidrógeno, tomando como prima el hecho que la carga del hidrógeno en los tanques del sistema AIP se realiza con el submarino en puerto.

3.4.3.1 Cálculo del balance de masa

Los procesos que rigen la conservación de masa en el diagrama de bloques fueron realizados de forma dividida en dos submódulos:

$$\frac{\delta m_{H_2,g}}{\delta t} = f_{out.H_2} - \frac{MW_{H_2} \cdot SC}{MW_{MH_{alloy}}} \quad (Ec. 19)$$

Donde:

- $f_{out.H_2} [\frac{kg}{s}]$ representa el flujo de salida del hidrógeno.
- $MW_{H_2} [\frac{kg}{mol}]$ representa la masa molecular del hidrógeno.
- $MW_{MH_{alloy}} [\frac{kg}{mol}]$ equivale a la masa molecular del hidruro metálico.
- SC es el coeficiente estequiométrico.
- $m_{H_2,g} [kg]$ representa la masa del hidrógeno.

Por una parte, la expresión que rige la conservación e masa para la masa del hidrógeno (reflejado en la ecuación (Ec. 19)) fue desarrollada juntamente con el submódulo que rige la ecuación de los gases ideales para con el comportamiento del hidrógeno.

Paralelamente, respecto al balance de masa para con el hidruro metálico, se definió la expresión (Ec. 20) para establecer la conservación de masa en la aleación, tanto para los procesos de absorción como de desorción:

$$\frac{\delta m_{MH_{alloy}}}{\delta t} = r m_s \quad (\text{Ec. 20})$$

Donde a su vez:

- $m_{MH_{alloy}}$ [kg] representa la masa del hidruro metálico.
- r [$\frac{kg_{MH}}{kg_{H_2} \cdot s}$] equivale al ratio de reacción.
- m_s [kg] es la masa sólida.

El diagrama de bloques construido a partir de la ecuación (Ec. 20) queda detallado en la Figura 3-30:

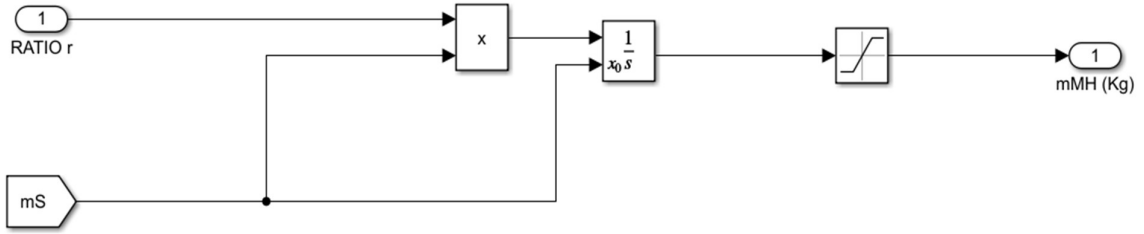


Figura 3-30: Submódulo de balance de masa en hidruros metálicos. [Fuente propia]

Donde los valores resultantes fueron limitados al máximo establecido por la masa sólida. Se puede apreciar como son necesarios valores de entrada relativos al ratio de la reacción para obtener los valores de masa de hidruro metálico en un determinado instante. Estos valores son obtenidos a partir del submódulo que rige la cinética de reacción, que se puede apreciar en el apartado de cálculo de cinética de reacción (Apartado 3.4.3.3).

3.4.3.2 Cálculo del balance de energía

Para el cálculo del diagrama que rige el balance de energía, se asumió el hecho de que la temperatura en todas las fases que intervienen en las reacciones de desorción y absorción son similares. Como consecuencia, la expresión de la conservación de energía queda expresada del siguiente modo:

$$\begin{aligned} & \frac{\delta T}{\delta t} \cdot (c_{p.H_2} \cdot m_{H_2.g} + c_{p.s} \cdot m_s) \\ & = A \cdot U \cdot (T_{water} - T) + \Delta H_{desorption} \cdot m_s \cdot \frac{r \cdot SC}{MW_{MH_{alloy}}} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 21})$$

Donde:

- $c_{p.H_2}$ [$\frac{J}{kg \cdot K}$] representa el calor específico del hidrógeno.
- T_{water} [K] equivale a la temperatura del fluido refrigerador.
- $\Delta H_{desorption}$ [$\frac{J}{mol}$] es la entalpía de desorción
- $c_{p.s}$ [$\frac{J}{kg \cdot K}$] representa el calor específico asociado a la aleación.
- T [K] es la temperatura del sistema en un instante de tiempo concreto.
- A [m^2] representa el área de intercambio de calor.
- U [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$] equivale al coeficiente de transmisión de calor.

Aplicando bloques de operación aritmética y bloques de integración de tipo “Integrator” se generó el submódulo de balance de energía de acuerdo con el diseño siguiente:

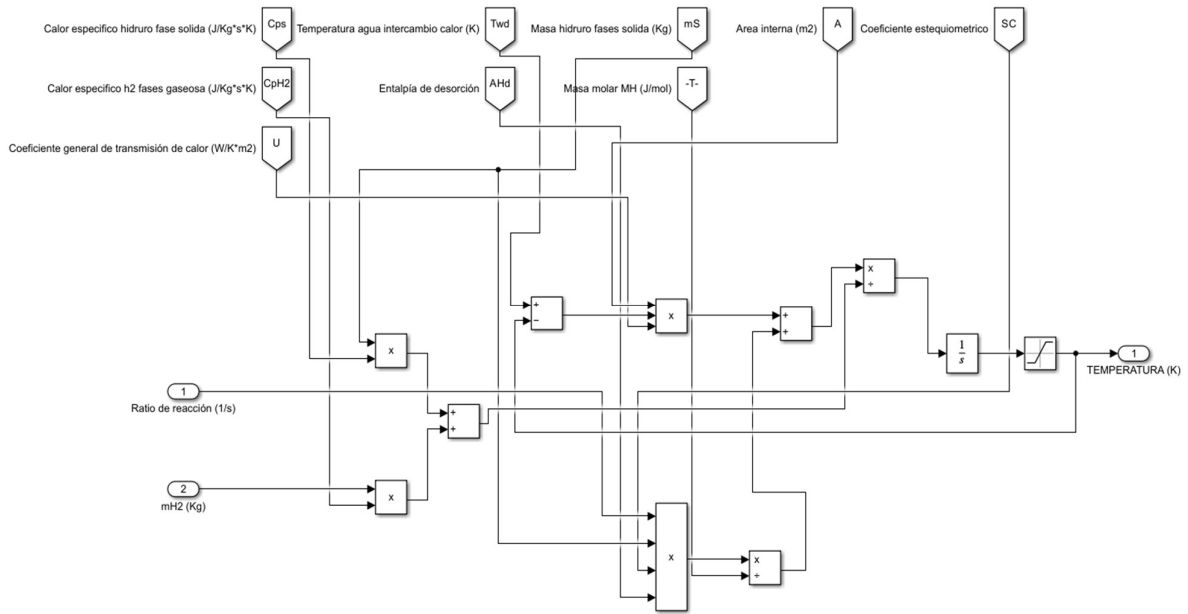


Figura 3-31: Submódulo de balance de energía en hidruros metálicos. [Fuente propia]

En la Figura 3-31 se observa como los valores de temperatura del sistema parten de la necesidad de conocer en todo momento los datos de ratio de reacción y masa del hidrógeno, los cuales son calculados independientemente en los submódulos de cinética de reacción (Apartado 3.4.3.3) y ecuación de los gases ideales (Apartado 3.4.3.5). Paralelamente, los valores situados en la parte superior de la imagen representan parámetros característicos de la aleación utilizada, los cuales se pueden encontrar en el [Anexo II](#). Como datos iniciales para la simulación se estableció como límite inferior de temperatura en el proceso de desorción la temperatura del fluido refrigerante en las condiciones iniciales, también reflejado en al [Anexo II](#).

3.4.3.3 Cálculo de la cinética de reacción

El modelado de los diagramas que replican el funcionamiento de la cinética de las reacciones asociadas a los procesos de absorción y desorción de hidrógeno presentan ciertas complicaciones que suponen la aparición de multitud de expresiones diferentes para adaptarse a las necesidades y características de cada tipo de hidruro metálico. Esto es debido al hecho de que las reacciones que tienen lugar entre el hidrógeno gaseoso y los compuestos que conforman las aleaciones formadoras de hidruros metálicos consisten en una considerable cantidad de reacciones parciales secundarias que tiene lugar en periodos de tiempo similares.

$$r = \left(C_{desorption} \cdot e^{\left[\frac{-E_{desorption}}{RT} \right]} \right) \cdot \left(\frac{P_{desorption}}{P_{equilibrium}} \right) \cdot \left(\frac{m_{MH}}{m_s} \right) \quad (\text{Ec. 21})$$

Para la conformación del bloque de cinética de reacción se empleó la expresión de la ecuación (Ec. 21), donde se puede apreciar como la velocidad de la reacción se calcula a partir de los valores de:

- $C_{desorption} \left[\frac{1}{s} \right]$ es la constante cinética de desorción.
- $-E_{desorption} \left[\frac{J}{mol} \right]$ representa la energía de activación en el proceso de desorción.
- $R \left[\frac{J}{mol \cdot K} \right]$ es la constante universal de los gases ideales.

- $T [K]$ es la temperatura del sistema en un determinado instante.
- $P_{desorption} [bar]$ representa la presión de desorción del sistema.
- $P_{equilibrium} [bar]$ refleja la presión de equilibrio en el sistema en un determinado instante.

Para la incorporación de la ecuación (Ec. 21) al software de simulación, se implementaron los bloques reseñados en la Figura 3-32, donde se puede apreciar como las entradas del bloque representan datos en tiempo real de los valores de temperatura, masa de aleación y presión de equilibrio. Estos son combinados con los bloques de constantes que se encuentran encadenados a su vez con los bloques tipo “From” al submódulo de constantes.

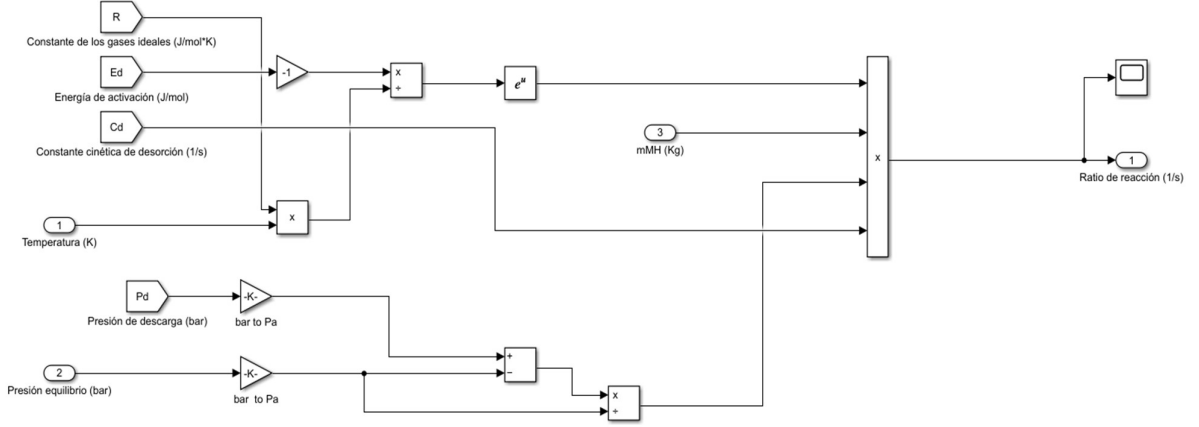


Figura 3-32: Submódulo cálculo cinética de reacción en hidruros metálicos. [Fuente propia]

Reseñar que el módulo de datos de constantes almacena los valores que permanente inalterados durante el transcurso de las reacciones. Estos conforman un bloque separado que conecta a todos los submódulos que componen el sistema.

3.4.3.4 Cálculo de la presión de equilibrio

Los métodos de cálculo de la presión de equilibrio comprenden diferentes variantes. Por una parte las curvas PCI (*Pressure Composition Isotherms*) permiten determinar el comportamiento de la aleación en función de valores de temperatura y la relación entre hidrógeno y hidruro metálico. Estas curvas implican aproximaciones a polinomios de grado superior a 6 con la desventaja que aporta la imposibilidad de obtener curvas para modelos concretos de hidruro metálico.

Por dicho motivo, se escogió como alternativa para el presente Trabajo Fin de Grado el uso de la ecuación de Van't Hoff (Véase ecuación (Ec. 23)).

$$P_{equilibrium} = P_o \cdot e^{\left[-\left(\frac{\Delta H_{desorption}}{RT} \right) + \left(\frac{\Delta S_{desorption}}{R} \right) + sl \cdot \left(\frac{m_{MH}}{m_s} - \varepsilon \right) \right]} \quad (\text{Ec. 23})$$

Que modela el comportamiento de la presión de equilibrio en la aleación de forma más generalista pero con la capacidad de adaptarse a las regiones de baja y elevada concentración que suele presentar datos de sobreestimación de la temperatura en el caso de los cálculos efectuados con curvas PCI.

En la ecuación [26]:

- $\Delta S_{desorption} \left[\frac{J}{mol \cdot K} \right]$ representa la entropía de la reacción de desorción.
- ε refleja la porosidad del material.
- $P_o [bar]$ es la presión de referencia.
- sl es el coeficiente de Plateau.

Una vez generada la expresión que modela el comportamiento del submódulo estudiado, se generó el consiguiente diagrama de bloques, quedando representado del siguiente modo (Figura 3-33):

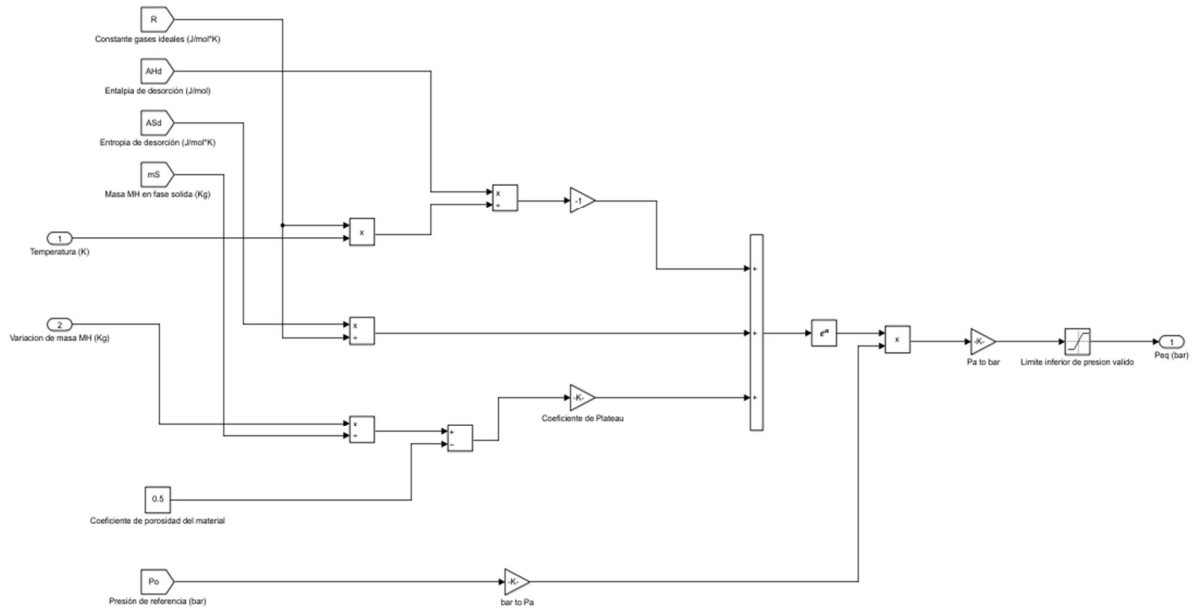


Figura 3-33: Submódulo cálculo de presión de equilibrio en hidruros metálicos. [Fuente propia]

El diagrama aplica el coeficiente de Plateau como un bloque “Gain” junto con el bloque “Constant” con un valor de 0.5, que refleja un valor constante representativo de la porosidad del material, conforme a las hipótesis establecidas en el apartado de modelado de hidruros metálicos (Apartado 3.4.3).

3.4.3.5 Cálculo de la ecuación de los gases ideales.

La ecuación de los gases ideales fue implementada como una ecuación auxiliar que permitía aplicar la hipótesis generada en el Apartado 3.4.3. La ecuación de los gases ideales quedó expresada del siguiente modo:

$$\frac{PV_g}{RT} \cdot MW_{H_2} = m_{H_2.g} \quad (\text{Ec. 24})$$

Donde $V_g [m^3]$ representa el volumen interno del depósito. Nótese que como el resto de variables que intervienen en la ecuación (Ec. 24) fueron definidas en apartados anteriores.

Teniendo en cuenta esta expresión, junto con la ecuación representativa del cálculo del balance de masa en el hidrógeno gaseoso, el diagrama de bloques resultante fue diseñado del siguiente modo:

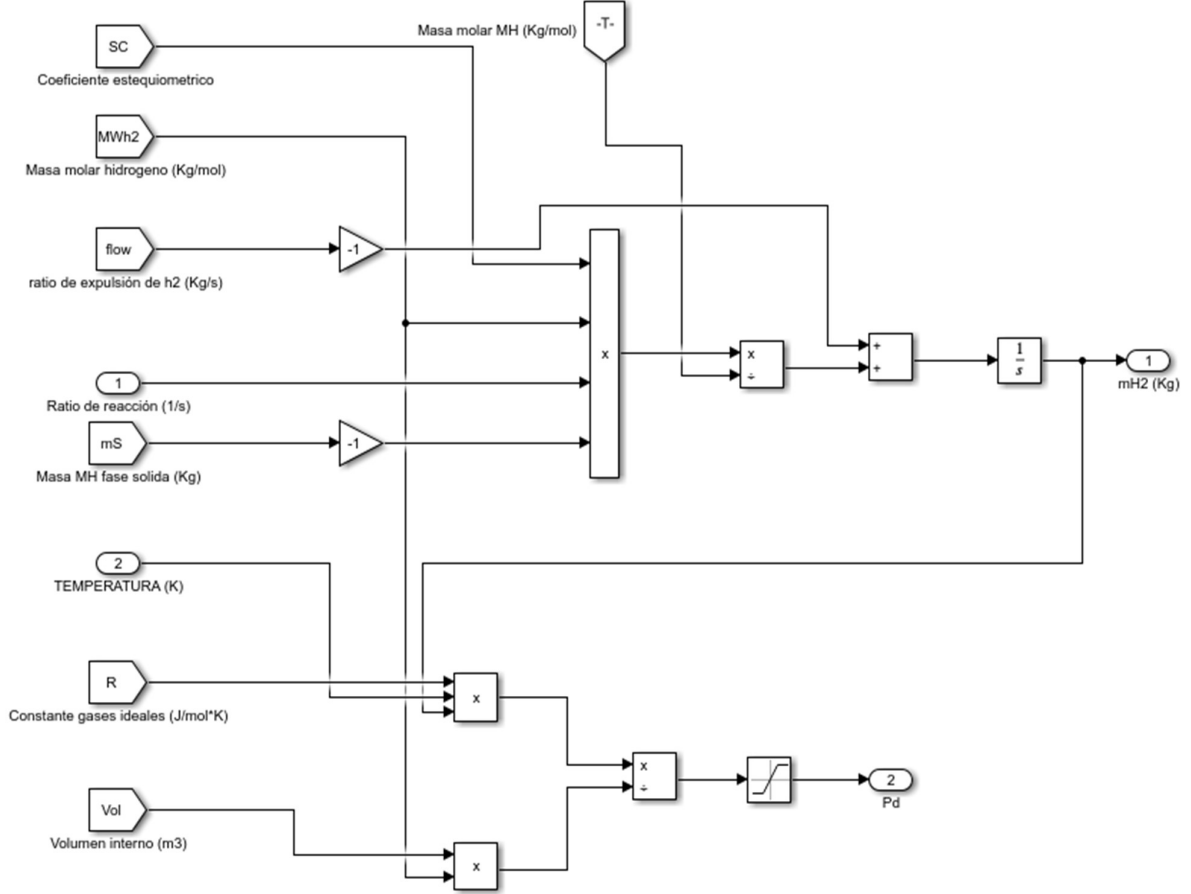


Figura 3-34: Submódulo ecuación de gases ideales en hidruros metálicos. [Fuente propia]

En la Figura 3-34 el cálculo de la masa del hidrógeno gaseoso, junto con la presión de descarga se realizan a partir de los valores de entrada de temperatura y ratio de reacción, con sendos cálculos efectuados en los Apartados 3.4.3.2 y 3.4.3.3.

3.4.3.6 Cálculo de la capacidad de descarga

La capacidad de descarga fue realizada a partir del ratio entre la masa del hidruro metálico y la masa del hidrógeno gaseoso, según la siguiente expresión:

$$wt\% = 100 \cdot \left(\frac{m_{MH}}{m_s} \right) \cdot \left(\frac{MW_{H_2} \cdot SC}{MW_{MH_{alloy}}} \right) \quad (\text{Ec. 25})$$

Donde wt% representa el porcentaje restante de hidrógeno. El diagrama de bloques fue estructurado conforme se muestra en la Figura 3-35:

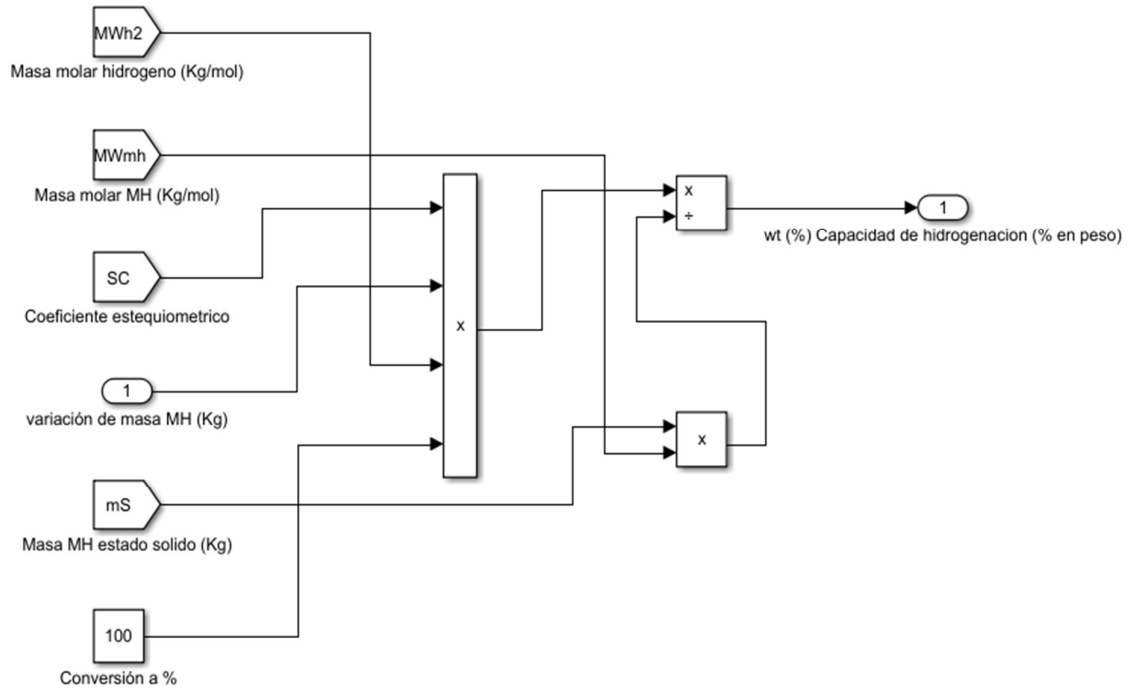


Figura 3-35: Submódulo cálculo porcentaje en peso en hidruros metálicos. [Fuente propia]

3.4.3.7 Modelo conjunto

En el siguiente apartado se muestra la configuración de todos los submódulos desarrollados anteriormente, con las conexiones entre diferentes entradas y salidas de datos.

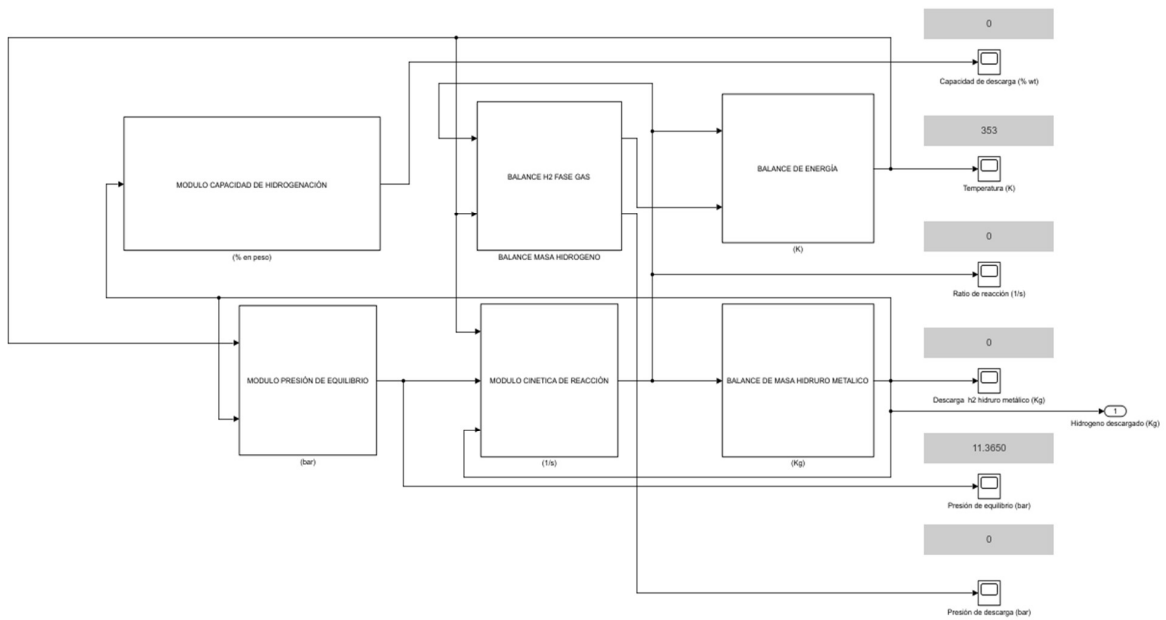


Figura 3-36: Diagrama combinado del sistema de hidruros metálicos. [Fuente propia]

Paralelamente, se configuró un bloque de constantes conteniendo los diferentes datos y parámetros utilizados por todos los submódulos. Finalmente, el módulo de hidruros metálicos quedó configurado conforme a la Figura 3-37, donde partiéndose obtiene un valor decreciente de masa de hidrogeno respecto al tiempo.

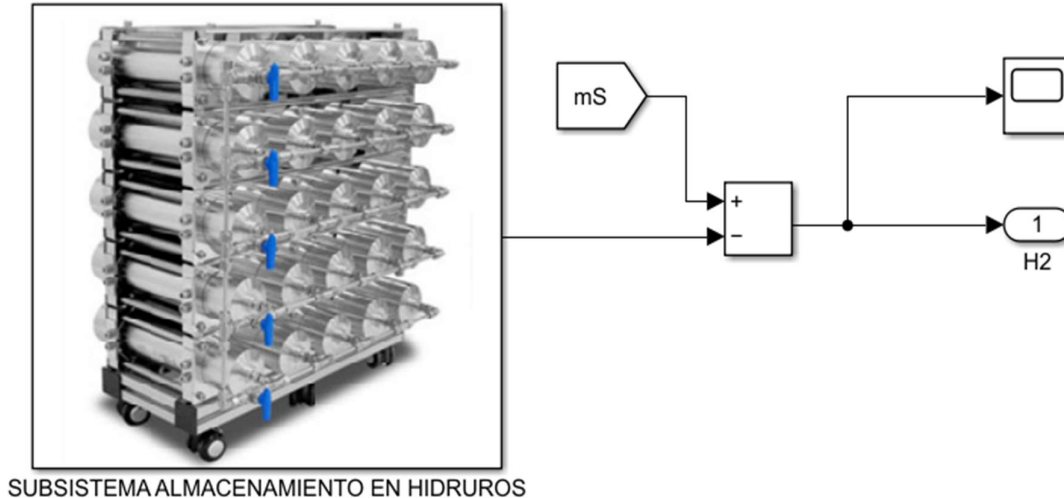


Figura 3-37: Diagrama general para módulo de hidruros metálicos. [Fuente propia]

3.5 Módulo de propulsión eléctrica

3.5.1 El motor eléctrico

La propulsión eléctrica utiliza lo que se considera como un amplio rango de diferentes tipos de motores electricos. En este y los siguientes apartados se profundizará en algunos de los motores eléctricos más utilizados, así como en el análisis de los fundamentos del motor eléctrico DC (Direct Current, de corriente continua) e inducción para el modelado el sistema de propulsión de un submarino convencional al uso.

En esencia, un motor eléctrico es una maquina capaz de transformar la energía eléctrica procedente de otra fuente, en energía mecánica, mediante una serie de interacciones de carácter eléctrico y magnético. En el interior de estos se genera un campo magnético inducido como consecuencia del principio de inducción electromagnética, el cual establece que es posible generar una corriente eléctrica en el interior de un conductor bajo la premisa de que dicho conductor efectúa un movimiento en el seno de un campo magnético. La presencia de corriente eléctrica en el interior de un conductor, como consecuencia del principio de Ampere, genera una fuerza electromotriz en dicho conductor, lo que en ultimo lugar provoca un torque en el motor e induce el movimiento en el mismo. Para cumplir ambos principios, el motor eléctrico se encuentra dividido en varias partes.

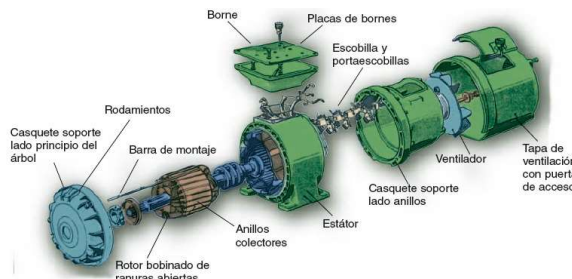


Figura 3-38: Partes de un motor eléctrico. [Fuente abierta]

Por un lado el estator, encargado de generar el campo magnético en el interior del motor eléctrico. Existen numerosas variantes de fabricación de estos, que generalizan en un núcleo estructural de carácter metálico envuelto en un bobinado de material altamente conductor. El rotor, por otro lado, es la parte encargada de proporcionar el giro del eje del motor. Dicho eje consta de un núcleo magnético acompañado de un embobinado conjunto de material conductor. Existe numerosas variedades de esta parte, destacando entre otros la jaula de ardilla, rotor de anillos, etc. Otras partes como el ventilador, la carcasa, los rodamientos y la placa de bornes configuran la totalidad del motor eléctrico.

Atendiendo al tipo de corriente y a las características constructivas de los mismos, los motores eléctricos se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Motores de corriente continua (DC). Se trata de motores monofásicos que utilizan corriente continua para generar un par motor proporcional a esta. Su velocidad depende de las condiciones de tensión aplicada al circuito y como consecuencia de esta característica, los motores DC poseen un mayor control sobre las prestaciones de velocidad con respecto a los motores AC. Estos se subdividen a su vez en dos grupos:
 - Motores DC con escobillas, basadas en una serie de espiras de cable conductor unidas para conformar una armadura, unida a las escobillas a través de sendos anillos segmentados por cada una de las espiras utilizadas en el rotor (Figura 3-39). Estos se dividen a su vez en dos variantes:
 - Motores de imanes permanentes, aquellos que generan el campo magnético por acción de los imanes permanentes alojados en el estator.
 - Motores de campo devanado, donde es el estator el que genera el campo magnético por acción de un bobinado el cual, según el tipo de conexión entre devanados, atiende a dos clasificaciones distintas:
 - Motores con excitación independiente. En ellos la alimentación de los devanados se realiza de forma separada e independiente.
 - Motores auto excitados, pudiendo realizarse varias conexiones de los devanados:
 - Devanado en serie.
 - Devanado en paralelo.
 - Devanado compuesto.
 - Motores DC sin escobillas, los cuales eliminan el uso de escobillas para lograr la conmutación de la corriente, lo que mejora el rendimiento ante la reducción de la fricción producida por las escobillas. Sus características serán descritas en el Apartado 3.5.1.2.
- Motores de corriente alterna (AC), que atienden a dos subcategorías:
 - Motores AC síncronos, que proporcionan velocidades constantes y equivalente a la velocidad de sincronismo, con dependencia directa de la frecuencia de la corriente eléctrica. Debido a sus características constructivas, estos no se aplican en el presente Trabajo Fin de Grado.
 - Motores AC asíncronos o de inducción, descritos en el Apartado 3.5.1.3.

3.5.1.1 Motores de corriente continua con escobillas (“Brushed”)

Esta se podría considerar como la forma más básica de motor eléctrico. Este tipo de motor es ampliamente utilizado en una gran variedad de aplicaciones tanto en el ámbito doméstico como industrial. Su funcionamiento se basa en el empleo de un conmutador en forma de anillo que asegura que la corriente que atraviesa las espiras que componen el rotor, este cambiando constantemente, lo que genera una fuerza en los conductores que conforman las espiras en base al principio de Ampere, generando un torque y por consiguiente el giro.

La característica principal de este tipo de motores reside en el hecho que el valor máximo del torque se consigue con velocidad nula, puesto que la relación entre ambos valores es de carácter lineal: la velocidad disminuye a medida que aumenta el par motor.

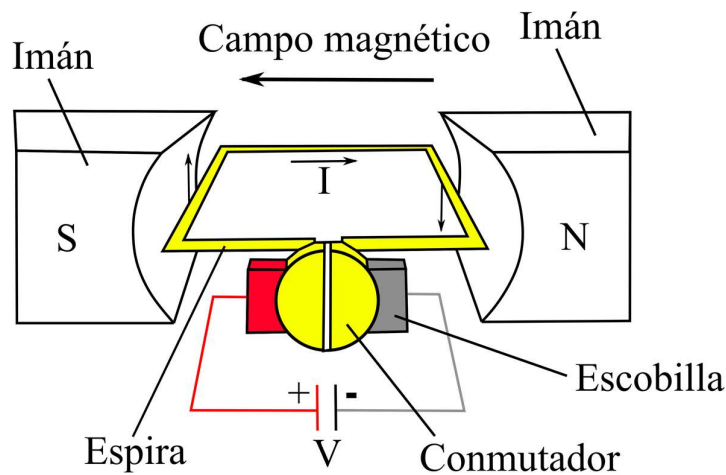


Figura 3-39: Motor DC con escobillas. [Fuente propia]

3.5.1.2 Motor eléctrico DC sin escobillas (“Brushless”)

El motor de corriente continua sin escobillas es ampliamente utilizado en una gran variedad de aplicaciones como herramientas portátiles y objetos de uso doméstico. No obstante, estos también poseen un amplio uso como motores de tracción si bien existen numerosas alternativas que establecen mejoras de rendimiento en base al uso de corriente alterna.

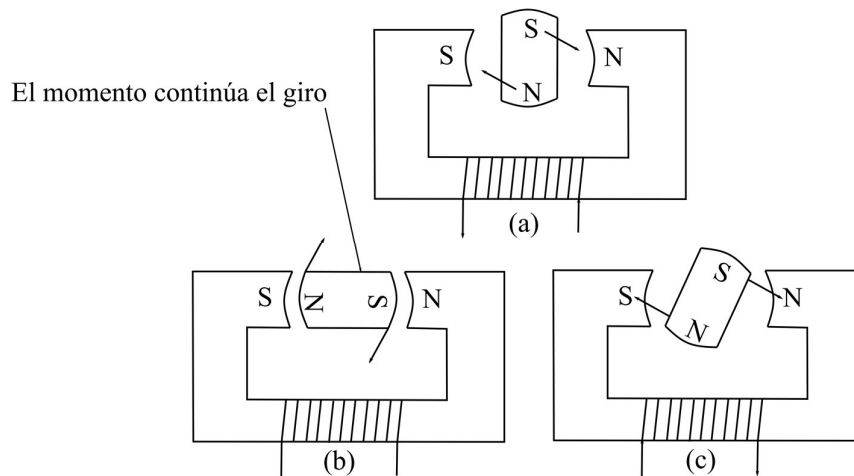


Figura 3-40: Esquematización del funcionamiento básico de un motor DC. [Fuente propia]

En la Figura 3-40 se puede observar una esquematización básica de un motor DC que consta de imanes permanentes y sin escobillas. Los motores DC sin escobillas (brushless) podrían ser considerados como motores de corriente alterna debido a que la corriente que circula por el varía conforme al tiempo.

El funcionamiento del motor sin escobillas se basa en la magnetización del estator debido al paso de la corriente por su través, lo que induce un movimiento en el rotor. Al llegar el rotor a la posición entre los polos del estator, la corriente cesa momentáneamente. El rotor continúa su movimiento giratorio como consecuencia del efecto del momento hasta que la corriente es nuevamente activada pero ahora revertida, lo que conlleva a que nuevamente el rotor sea empujado en la misma dirección nuevamente. La concatenación de este proceso permite obtener un giro constante [31].

Cabe destacar que el cambio de corriente debe ser realizado con la ayuda de sensores que permitan sincronizar la posición del rotor en un determinado momento respecto al estator. Algunos de los problemas que plantean estos motores radica en la elevada inestabilidad que presenta el torque producido. Esto se soluciona mediante el empleo de tres o más inducidos frente al rotor.

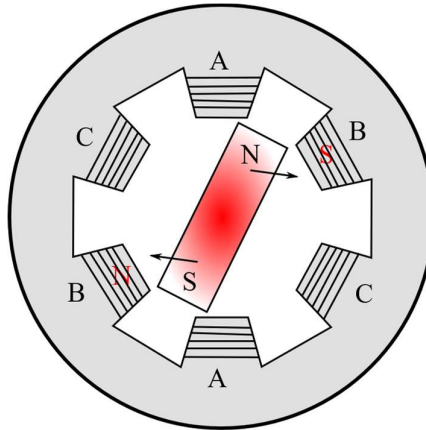


Figura 3-41: Diagrama compuesto de 3 inducidos en un motor DC brushless. [Fuente propia]

3.5.1.3 Motor eléctrico de inducción

Este tipo de motor eléctrico es ampliamente utilizado en gran variedad de aplicaciones industriales. Estos requieren de un suministro constante de corriente alterna (AC, Altern Current) lo que pese que en un principio podrían considerarse no aptos para su uso en sistemas basados en la generación de corriente continua; el uso de inversores permite la obtención de corriente alterna con la única complicación que plantea la implementación de circuito de inversión en si.

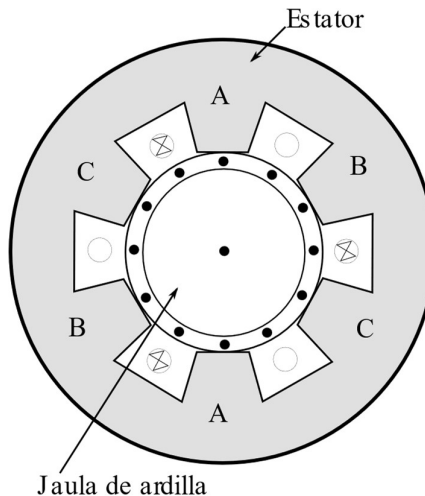


Figura 3-42: Esquema básico de un motor de inducción. [Fuente propia]

Este tipo de motores consta de un devanado trifásico en el que se induce un campo electromagnético por parte de las bobinas del estator. La composición de el campo magnético resultante de la combinación de los campos individuales generados por el paso de la corriente eléctrica en las bobinas genera un torque en el rotor que produce su movimiento giratorio con una velocidad algo inferior a la velocidad de sincronismo.

Debido a que la velocidad del rotor se encuentra por debajo de aquella de sincronismo, es necesario el uso de arrancadores capaces de modificar la frecuencia de alimentación en la corriente eléctrica, lo que en definitiva permite actuar sobre la velocidad del motor [30].

3.5.2 Caracterización del motor eléctrico

De cara a la caracterización de los motores eléctricos es necesario determinar la eficiencia asociada al funcionamiento de este, a fin de poder calcular las pérdidas de potencia existentes en el mismo. En el caso del tipo de motor eléctrico que ha sido implementado en el módulo de propulsión, las pérdidas pueden distribuirse de la siguiente forma [29]:

3.5.2.1 Pérdidas en el cobre.

Estas están asociadas a la resistencia eléctrica presente en los conductores que conforman tanto cables como escobillas del motor. Esta resistencia implica la transformación de parte de la energía eléctrica presente en el sistema en energía calorífica en lugar de energía mecánica. Estas pérdidas atienden a la siguiente expresión:

$$P = (I)^2 \times R \quad (\text{Ec. 26})$$

No obstante, teniendo en cuenta que la corriente es proporcional al torque, la ecuación anterior puede reescribirse de la siguiente manera:

$$P_{\text{cobre}} = k_c \times T^2 \quad (\text{Ec. 27})$$

Donde T es el torque y k_c es una constante dependiente de la resistencia de las escobillas y el flujo magnético.

3.5.2.2 Pérdidas en el entrehierro.

Las pérdidas en el entrehierro surgen como consecuencia de los efectos magnéticos generados por el núcleo metálico situado en el rotor. Debido al carácter constantemente cambiante del campo magnético, las pérdidas en el entrehierro derivan en:

- Pérdidas por histéresis, como consecuencia de la energía requerida para magnetizar de forma constante los dipolos que componen el núcleo de hierro.
- Pérdidas por corrientes de Foucault, que resultan de la aparición de pequeñas corrientes eléctricas en el entrehierro mediante los métodos de inducción magnética mencionados en el Apartado 3.5.1.

Estas pérdidas son proporcionales a la frecuencia con la que varía el campo magnético, que a su vez depende de la velocidad de giro del rotor. De forma generalizada, las pérdidas en el entrehierro se pueden definir del siguiente modo:

$$P_{\text{entrehierro}} = k_{\text{hierro}} \times \omega \quad (\text{Ec. 28})$$

Donde k_{hierro} es una constante asociada a las pérdidas en el entrehierro, y ω responde a la velocidad de giro del rotor.

3.5.2.3 Otras pérdidas

Dentro de este apartado, las pérdidas pueden dividirse en pérdidas por fricción, pérdidas por ventilación, y pérdidas constantes.

- Pérdidas por fricción. Estas pueden aproximarse según la siguiente expresión:

$$P_{\text{fricción}} = T_{\text{fricción}} \times \omega \quad (\text{Ec. 29})$$

- Pérdidas por ventilación, las cuales se representan del siguiente modo:

$$P_{\text{ventilación}} = k_{\text{ventilación}} \times \omega^3 \quad (\text{Ec. 30})$$

- Pérdidas constantes. Estas pérdidas son representadas como una constante, debido a que estas no varían con el torque o la velocidad, sino que permanecen uniformes con independencia de si el propio motor se encuentra parado o en funcionamiento.

Por consiguiente, las pérdidas totales se pueden expresar como la suma de todas las mencionadas anteriormente:

$$P_{\text{totales}} = k_{\text{hierro}} \cdot \omega + k_{\text{ventilación}} \cdot \omega^3 + T_{\text{fricción}} \cdot \omega + k_c \cdot T^2 + C \quad (\text{Ec. 31})$$

Siendo entonces el rendimiento:

$$\eta = \frac{T \cdot \omega}{T \cdot \omega + k_{\text{hierro}} \cdot \omega + k_{\text{ventilación}} \cdot \omega^3 + T_{\text{fricción}} \cdot \omega + k_c \cdot T^2 + C} \quad (\text{Ec. 32})$$

3.5.3 Modelado del motor eléctrico

El motor eléctrico es el encargado de generar la potencia de propulsión que es necesaria en el submarino para lograr su desplazamiento tanto en superficie como en inmersión. De este modo las necesidades a cubrir por parte del motor eléctrico (y por consiguiente la elección de este), vienen determinadas por las necesidades operativas que debe poseer el submarino.

Los submarinos convencionales logran su propulsión en base al uso de grupos generadores diésel, grupos de baterías y motores eléctricos capaces de suministrar energía para alcanzar velocidades altas (con valores aproximados de entre 14 y 16 nudos; 1 nudo ≈ 1.852 km/h) y bajas (entre 4 y 6 nudos).

Por tanto la potencia total a suministrar al submarino esta subdividida en dos categorías, siendo por un lado la carga útil asociada a los sistemas auxiliares y la carga de propulsión. Se puede determinar la potencia asociada a la propulsión como la relación entre el desplazamiento del submarino y la velocidad de este [32]:

$$P_{\text{propulsión}} = 0.0026 \times \left(\frac{D}{1000}\right)^{2/3} \times \left(\frac{u}{1.852}\right)^3 \quad (\text{Ec. 33})$$

Donde u determina la velocidad del submarino mientras que D refleja el desplazamiento en la condición de navegación establecida. De este modo el pico de potencia requerida por el submarino viene determinado por la velocidad máxima a alcanzar por este.

En base a las características constructivas presentadas por el modelo de submarino clase Augusta como base de trabajo para las simulaciones, se realizó el modelado del módulo de propulsión eléctrica mediante la herramienta de simulación Simulink®.

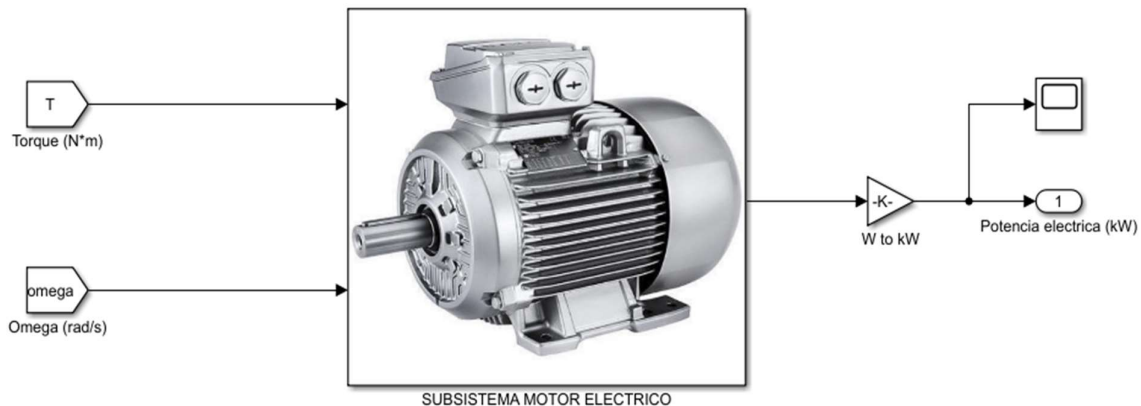


Figura 3-43: Módulo de propulsión eléctrica. [Fuente propia]

Dicho modelo fue creado en base a las características de construcción del motor eléctrico principal de los submarinos clase Augusta, con capacidad de arrastre de una línea de ejes equipada con una hélice de 5 palas [34]. El motor eléctrico principal (MEP) esta concebido para permitir la realización de maniobras ligeras y rápidas. Se trata del modelo 2CMP130-47-12 de la sociedad “JEUMONT-SCHNEIDER” con capacidad de cambiar el sentido de giro y con excitación independiente y un campo serie acumulativo. Sus características eléctricas le permiten efectuar varias condiciones de acoplo al eje principal:

Tabla 3-5: Puntos de funcionamiento MEP 2CMP130-47-12. [34]

Potencia (kW)	Velocidad de giro (rpm)	Voltaje (V)	Acoplo
2200	300	550	Gran acoplo
663	200	320	Mediano acoplo
235	140	160	Pequeño acoplo

A partir de dichas características, los valores de torque y velocidad de giro fueron extraídos para el modelado del subsistema de propulsión eléctrica a partir de diagramas de bloques en Simulink®.

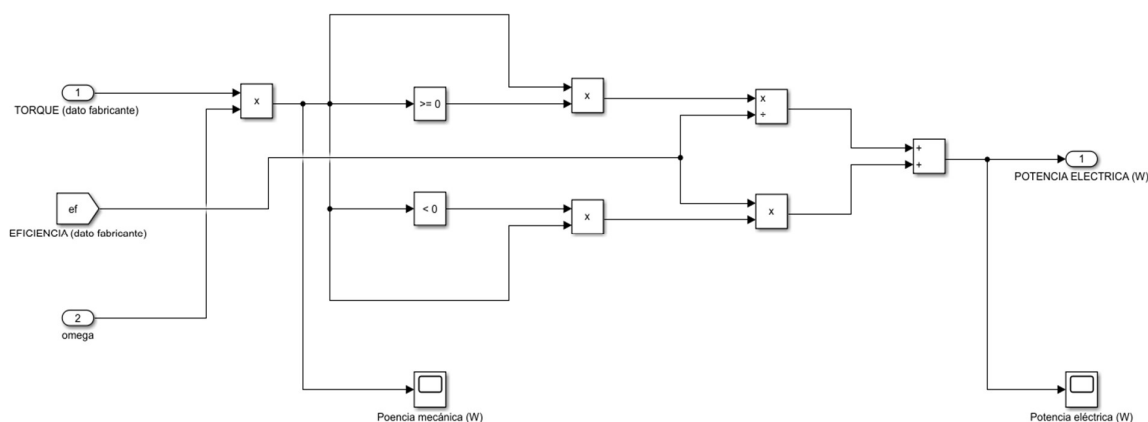


Figura 3-44: Subsistema de propulsión eléctrica. [Fuente propia]

Como se puede observar en el diagrama de bloques de la Figura 3-44, se realizó un calculo continuo de la potencia eléctrica que fue necesario aportar al motor eléctrico principal para obtener los valores de potencia deseados en base a las necesidades exigidas por el tipo de acople del submarino en una determinada situación.

Las entradas del diagrama de bloques son, a parte de la eficiencia del motor en un determinado momento, los valores de torque expresados en $N \cdot m$ (Newtons por metro) junto con la velocidad angular expresada en radianes por segundo. El cálculo del valor de la eficiencia del conjunto fue realizado en base a los procedimientos efectuados en el apartado de caracterización del motor eléctrico (Apartado 3.5.2).

3.6 Módulo diésel generador de emergencia

El módulo diésel generador constituye un medio de emergencia con la capacidad de aportar la energía necesaria al módulo de propulsión eléctrica en caso de que los módulos de baterías y pila de

combustible no sean capaces de proveer de la energía necesaria para garantizar el funcionamiento del motor eléctrico.

El modelado del sistema de emergencia fue generado como un diagrama de bloques que calcula el consumo de fuel a partir de la potencia requerida. Una forma de calcular la relación entre el consumo medio de un generador diésel y la potencia requerida se realiza a partir de curvas aproximadas de consumo con un rango de potencia aproximado de entre 20 kW y 200 kW [61].

Para los casos estudiados en el presente Trabajo Fin de Grado, se optó por la utilización de dos módulos de emergencia capaces de suministrar un total de 1700 kW, siendo capaz de abastecer plenamente al sistema de propulsión en las condiciones de medio acople e inferiores (Apartado 3.5.3).

El modelado de la relación potencia-consumo también se puede realizar conforme a la expresión siguiente [62] [63]:

$$F_d = (a \cdot P_d) - (b \cdot P_d^{rated}) \quad (\text{Ec. 34})$$

Donde:

- $a = 0.246 \left[\frac{L}{h}\right]$ es un coeficiente de consumo.
- $b = 0.0845 \left[\frac{L}{h}\right]$ es un coeficiente de consumo.
- $F_d \left[\frac{L}{h}\right]$ es el consumo de combustible del generador.
- $P_d [kW]$ es la potencia generada por el sistema de emergencia.
- $P_d^{rated} [kW]$ es el ratio de potencia.

A partir de los requerimientos de potencia para implementación del sistema, junto con la precisión de los resultados obtenidos, se optó por el uso de las curvas de potencias obtenidas empíricamente en las investigaciones realizadas en [61], generando el siguiente diagrama de bloques (Figura 3-45):

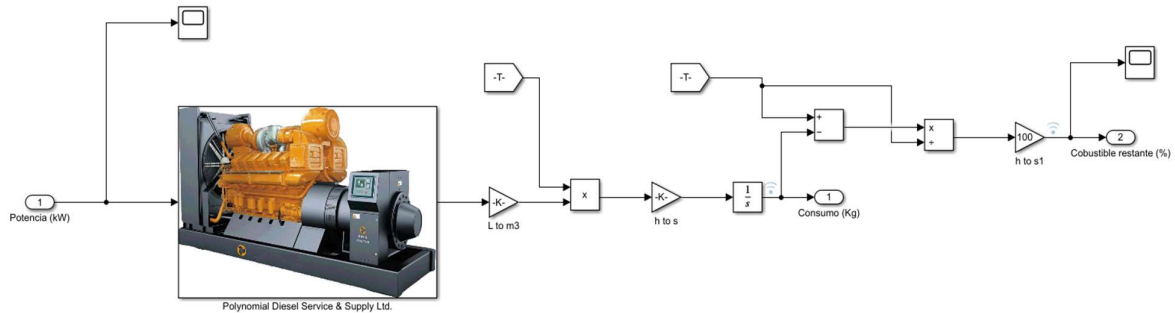


Figura 3-45: Diagrama de bloques módulo generador diésel de emergencia. [Fuente propia]

3.7 Módulo de control

Si bien existen multitud de soluciones que permiten un control relativamente preciso sobre el un sistema que debe ser automatizado, la base sobre la que se asienta el presente apartado recae en el hecho de ser necesario un sistema que sea capaz de simular el comportamiento de un operario en cuanto a las decisiones a tomar de cara a los niveles de hidrógeno, combustible, e incluso la potencia requerida en el motor eléctrico.

Algunos sistemas como los controladores proporcionales, integrales o derivativos permiten, ya sea por si solos o bien por una combinación de estos (PID), aplicar un lazo de retroalimentación para reajustar los valores requeridos en base a las desviaciones respecto de una señal de control. No obstante, pese a que este tipo de sistemas son ampliamente utilizados en multitud de aplicaciones, resultan poco efectivos en situaciones en las que se prevén cambios importantes al funcionamiento del sistema (algo que sucede en las situaciones tácticas en las que funciona un sistema AIP integrado en un submarino).

Además, cabe destacar que estos sistemas son susceptibles de ser afectados negativamente por el ruido del sistema (en la parte derivativa), lo que en consecuencia empobrece el desempeño del controlador.

Paralelamente, algunas propuestas como el empleo de arboles de decisión también son consideradas como válidas, debido a su sencillez de implementación y su simplicidad de diseño y uso. Si bien estos sistemas son prometedores por su simplicidad, esta también supone un desempeño simple en sí mismo, debido al hecho de que las decisiones tomadas por estos se basan en los resultados obtenidos tras comparaciones con valores de conjuntos de tipo booleano (“un valor puede pertenecer a un conjunto u otro distinto, pero no existe término medio entre ambos”).

Por consiguiente, con el objetivo de generar un sistema robusto pero que a la vez se asimile de la forma más clara posible al pensamiento humano, se optó por el empleo de controladores basados en lógica difusa. Este tipo de controladores permiten aplicar una base de conocimientos previamente configurada, permitiendo así un primer acercamiento al concepto de redes neuronales para control de sistemas.

En los siguientes apartados se discutirán varios conceptos relacionados, entre otros: Las definiciones de lógica difusa, la base teórica en la que dicho concepto se fundamenta, algunas definiciones necesarias para el correcto manejo de la *toolbox* implementada en el software de simulación Simulink®, algunas ventajas y desventajas que aporta el empleo de la lógica difusa en comparación a los controladores PID. Finalmente, se abordará el diseño del controlador lógico implementado en el presente Trabajo Fin de Grado.

3.7.1 Fundamentos de la lógica difusa

El concepto de lógica difusa se encuentra íntimamente relacionado con la forma en la que las personas perciben el medio que les rodea. Numerosos conceptos pueden ser evaluados y comparados de esta manera. Por ejemplo, la temperatura de un establecimiento puede ser interpretada como baja o alta, mientras que la intensidad lumínica de un foco de luz puede ser vista como muy brillante o poco brillante. Es por tanto que las características físicas de dichos fenómenos son interpretadas de forma ambigua en función de la interpretación llevada a cabo por el individuo que ha percibido el fenómeno físico en sí.

Es en dicho momento donde los conjuntos difusos cobran gran importancia, ya que estos, al ser una extensión de la teoría clásica de conjuntos, permiten definir dichas ambigüedades. La teoría clásica de conjuntos define la pertenencia o no pertenencia a un determinado conjunto, estableciendo la existencia única de dos posibilidades que eliminan a su vez la presencia de ambigüedades en el proceso de pertenencia a dichos conjuntos. Definir dichas ambigüedades es la función de la lógica difusa.

La incorporación de la lógica difusa a los sistemas de control conforma lo que se conoce como sistemas de control difuso, el cual se ramifica en dos pilares:

- Modelado e identificación de sistemas de control difuso.
- Control directo.

3.7.2 Base teórica

En el presente apartado se describirán de forma simplificada los principales conceptos empleados para el desarrollo de los sistemas de control por lógica difusa, como los conjuntos borrosos, las funciones de membresía, las reglas de inferencia, el proceso de defusificación, las operaciones borrosas y los procesos de toma de decisión, principalmente.

3.7.2.1 Conjuntos borrosos

Los conjuntos borrosos se definen como una extensión de los conjuntos clásicos, conjuntos que presentan límites perfectamente establecidos y que garantizan que un determinado elemento pueda o no pertenecer a dichos conjuntos. En los conjuntos clásicos no existen ambigüedades relacionadas con la pertenencia.

Los conjuntos borrosos eliminan dicha limitación al establecer un valor situado entre 0 y 1, y que define cual es el grado de pertenencia de un determinado elemento a un conjunto en concreto. Estos valores son lo que se conoce como funciones de pertenencia. Para cada conjunto existente se define un valor lingüístico que es representativo de una función de pertenencia concreta que indica en qué grado la variable que esta función evalúa pertenece al conjunto regido. Por tanto, si el valor de dicha función es igual a 1, entonces la variable se encuentra incluida en el conjunto, mientras que ante un valor de 0, la variable no pertenecería a dicho conjunto.

En la Figura 3-48 se puede apreciar una demostración de las funciones de pertenencia a un determinado conjunto, diferenciándose tres grados distintos de pertenencia en función de los valores asociados a la variable estudiada (bajo, medio y alto).

3.7.2.2 Funciones de membresía

Las funciones de membresía, también conocidas como funciones de pertenencia, definen el grado de pertenencia de una variable a un conjunto previamente establecido. Algunas de las más empleadas se mencionan a continuación:

- Trapezoidal
- Singleton
- Triangular
- Tipo S

3.7.2.3 Operaciones borrosas

Son, como su propio nombre indica, una serie de operaciones que son aplicables sobre conjuntos, de modo que se obtengan nuevos conjuntos como resultado. Son el pilar fundamental para la creación y el diseño de controladores lógicos basados en el método estudiado.

Algunas de las operaciones borrosas más empleadas se mencionan a continuación:

- Complemento:

$$\mu_A(x) = 1 - \overline{\mu_A(x)} \quad (\text{Ec. 35})$$

- Unión:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (\text{Ec. 36})$$

- Intersección:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (\text{Ec. 37})$$

3.7.2.4 Fuzzificación

La Fuzzificación es un proceso que se realiza para cada instante de tiempo en el que se evalúa la pertenencia de una variable a un conjunto. En dicho proceso tiene lugar un proceso matemático en el que el valor de la variable analizada en un determinado instante de tiempo es asociado a un valor por cada función de membresía a las que pertenece.

Utilizando nuevamente la Figura 3-48 se puede observar como para un instante de tiempo determinado, la variable puede pertenecer a una o hasta dos funciones de membresía, con sus respectivos grados de pertenencia en función del valor de la variable en un instante de tiempo dado.

3.7.2.5 Fuzzy Rules

Las Fuzzy Rules, también conocidas como reglas borrosas, son utilizadas en los controladores difusos conformando una serie de “premisas” que combinan uno o más conjuntos borrosos de entrada. Las “premisas” tiene a su vez otros conjuntos difusos de salida conocidos como “consecuencias”.

Las reglas borrosas son proposiciones del tipo “*si sucede esto, entonces ocurre lo otro*” que establecen una relación causa efecto entre los conjuntos que conforman las premisas y los conjuntos que dan lugar a las consecuencias. Estas reglas son conformadas mediante bases de reglas, donde varias de ellas abarcan el comportamiento general del sistema estudiado.

Existen varios tipos de reglas empleadas en la toolbox de Matlab Simulink®, como las reglas de Sukeno o las reglas de Mamdani, siendo estas últimas escogidas para el propósito del presente Trabajo Fin de Grado.

Las reglas de Mamdani presentan la ventaja de ser muy intuitivas, tener una consensuada aceptación respecto a su uso, y permite una aplicación fácil y sencilla del conocimiento asociado al funcionamiento del sistema que debe ser controlado. Las reglas de Mamdani se pueden expresar del siguiente modo:

$$IF \ x_1 \text{ is } A \text{ AND } x_2 \text{ is } B \text{ AND } x_3 \text{ is } C \text{ THEN } u_1 \text{ is } D, u_2 \text{ is } E \quad (\text{Ec. 38})$$

Donde x_1, x_2 y x_3 son las variables de entrada, A, B y C son las funciones de membresía que reflejan las premisas, u_1 y u_2 son las acciones de control sobre el sistema, y D y E son las funciones de membresía asociadas a las consecuencias.

3.7.2.6 Inferencia difusa y agregado

La inferencia difusa es un proceso realizado despues de haber asignado información a las variables de entrada que conforman las premisas, con el objetivo de calcular el resultado asociado a las variables de salida en las consecuencias. Los resultados obtenidos comprenden un amplio rango de conjuntos difusos asociados a la base de reglas implementada.

Existen diferentes métodos de inferencia difusa, destacando los siguientes:

- Método de inferencia de Mamdani por mínimos:

$$R_M = \min[\mu_w(z), \mu], \forall z \quad (\text{Ec. 39})$$

- Inferencia de productos de Larsen:

$$R_L = [\mu_w(z) \cdot \mu], \forall z \quad (\text{Ec. 40})$$

- Inferencia del producto drástico:

$$R_{DP} = \begin{cases} \mu & \text{para } \mu_w(z) = 1 \\ \mu_w(z) & \text{para } \mu = 1 \\ 0 & \text{para } \mu < 1 \text{ y } \mu_w(z) < 1 \end{cases} \quad (\text{Ec. 41})$$

- Inferencia de producto limitado:

$$R_{BP} = \max[\mu + \mu_w(z) - 1, 0] \quad (\text{Ec. 42})$$

Donde $\mu_w(z)$ representa la función de pertenencia del conjunto de salida.

Por otra parte, tras la evaluación de las reglas para la obtención de conjuntos consecuencia, es necesario agrupar cada uno de los conjuntos resultado de las diferentes reglas para llevar a acabo la defusificación. Este proceso se denomina agregado, siendo uno de los criterios más empleados la utilización de la operación “*max*”.

3.7.2.7 Defusificación

Debido a que los procesos de inferencia difusa generan datos de salida en forma de conjuntos difusos, es necesario por tanto un proceso posterior que permita transformar dichos resultados en valores numéricos capaces de ser utilizados en el proceso de toma de decisiones del sistema de control. Para ello, se realiza la defusificación de los conjuntos resultados. La defusificación es un proceso que permite obtener a partir de los conjuntos difusos obtenidos en los resultados, los valores numéricos representativos del conjunto completo, encuadrados en el dominio de los números reales.

Como consecuencia de dicha transformación de los conjuntos en números reales, existen diferentes métodos de defusificación, entre los que destacan los mencionados a continuación:

- **Defusificación por centro de gravedad:** También conocido como “centroide”, que obtiene valores numéricos como los valores del eje de abscisas asociado al centro de gravedad de los conjuntos difusos de salida.
- **Defusificación por centro de área:** Una aproximación por el centro de gravedad de una serie de masas puntuales que son a su vez centros de gravedad de cada conjunto de salida asociado a una regla.
- **Criterio del máximo:** El valor de salida es aquel para el cual la función de membresía alcanza su máximo valor.
- **Método de la media en el máximo:** La salida obtenida equivale al valor medio de los valores cuya función de membresía alcanza el valor máximo.
- **Método del máximo más pequeño:** Aquel en el que el valor de salida obtenido es el mínimo de todos los valores que generan el valor más alto de la función de membresía.
- **Método del máximo más grande:** En este método el valor de salida es el máximo valor de todos aquellos que generan un máximo en la función de membresía.
- **Bisector de área:** Genera un valor de respuesta tal que este separa el área bajo la curva de respuestas en dos áreas iguales.

3.7.2.8 Toma de decisión

El proceso de toma de decisiones emplea el valor numérico obtenido en el proceso de defusificación y realiza una modificación en los parámetros de control del sistema para ajustarlo a las condiciones requeridas en el sistema. Se puede definir un esquema genérico de toma de decisiones según la Figura 3-46:

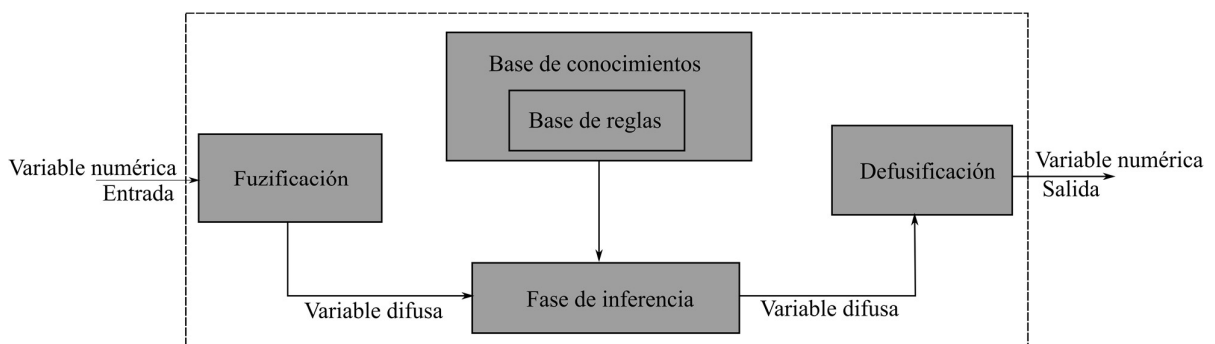


Figura 3-46: Sistema de inferencia difusa. [Fuente propia]

3.7.3 Modelado del controlador lógico

Partiendo de la información contenida en el marco teórico de los controladores de lógica difusa, para realizar la implementación de dicho sistema de control se empleó la “toolbox” con la que cuenta el software de simulación Matlab Simulink®.

El diseño de l controlador fue realizado a partir de la interfaz de diseño denominada “*Fuzzy Logic Designer*” para implementación de sistemas de lógica difusa en Matlab. El diseño del controlador empleado en el control de los módulos que conforman el sistema AIP del presente Trabajo Fin de Grado se aprecia en la Figura 3-47:

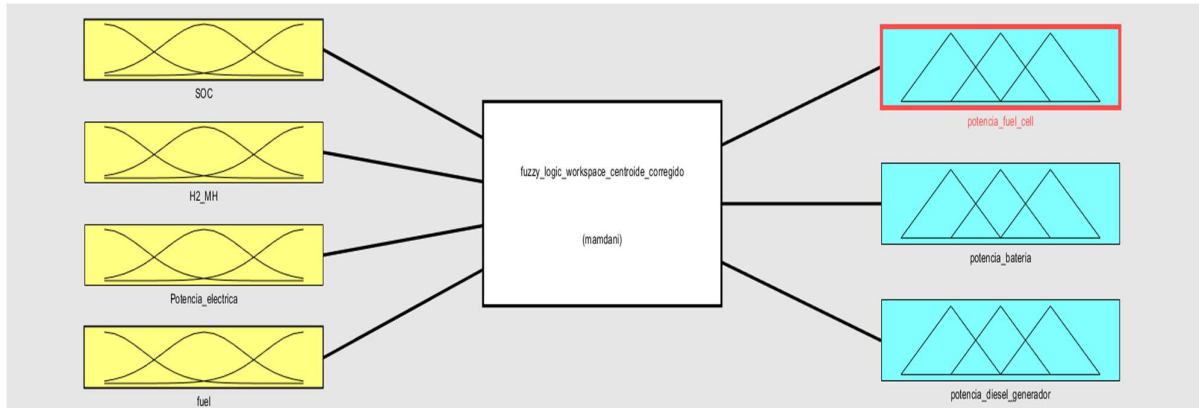


Figura 3-47: Diagrama de la herramienta Fuzzy Logic Designer. [Fuente propia]

En el diagrama se puede observar como para el diseño del controlador se emplearon las reglas difusas de Mamdani, estableciendo como valores de entrada los subconjuntos generados a partir de las variables de entrada pertenecientes a los porcentajes de hidrógeno gaseoso, porcentaje de fuel del módulo de emergencia por diésel generador, la potencia eléctrica requerida por el módulo de propulsión eléctrica, y el estado de carga de módulo de baterías.

Paralelamente, en el módulo de salidas se observan los valores de potencia eléctrica requerida en cada uno de los subsistemas capaces de proporcionar energía al módulo de propulsión eléctrica: El módulo de baterías, el módulo de pila de combustible, y el módulo de emergencia diésel generador.

A partir del diagrama de la Figura 3-47, se generaron las funciones de pertenencia, las cuales se encuentran disponibles en el [Anexo III](#). A modo de ejemplo se muestra la función de pertenencia asociada al porcentaje de fuel restante (Figura 3-48):

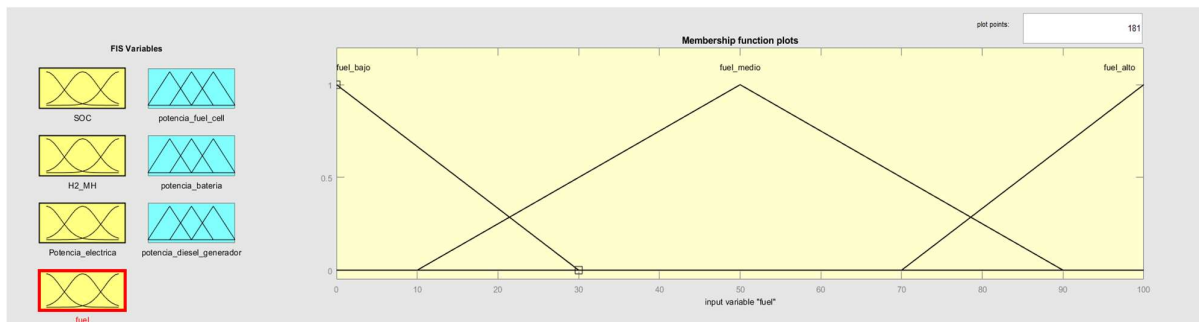


Figura 3-48: Función de pertenencia del porcentaje de fuel restante. [Fuente propia]

En el diseño y configuración de las funciones de membresía se utilizaron principalmente funciones tipo trapezoidal y triangular.

Por otra parte, la aplicación del funcionamiento deseado en el sistema AIP en función de las condiciones de propulsión y los porcentajes de fuel e hidrógeno presentes, diferentes bases de reglas fueron generadas conforme a las que se observan en la Figura 3-49:

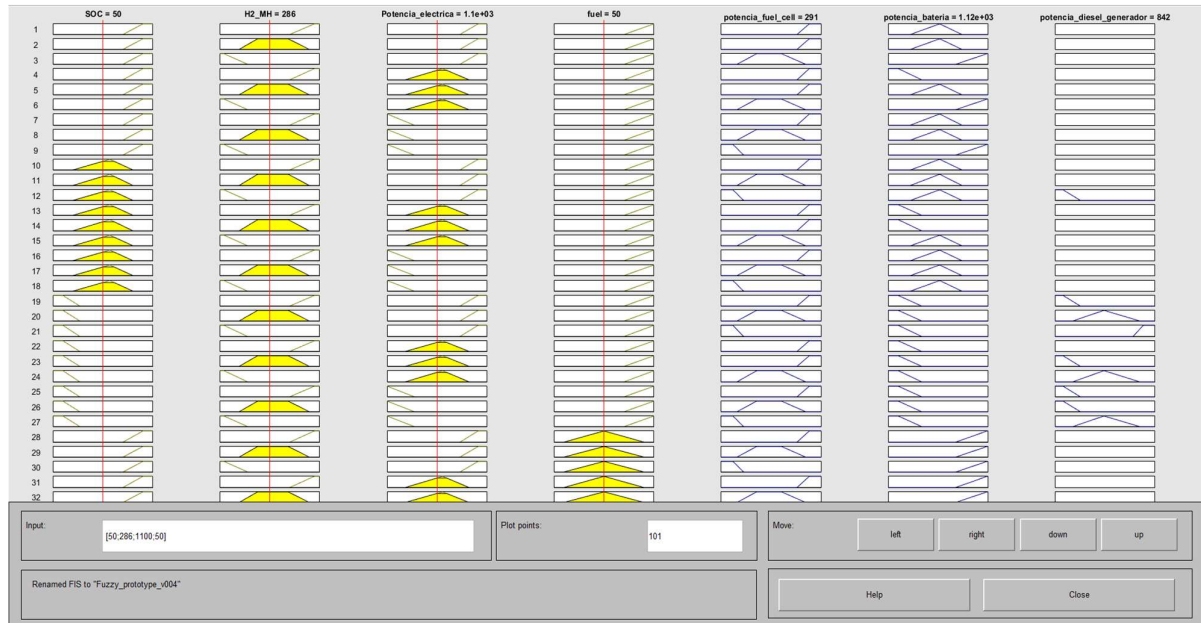


Figura 3-49: Base de reglas sistema de control difuso. [Fuente propia]

Cabe mencionar que como se menciona en el Apartado 4.1.2, debido a la implementación y simulación de diferentes escenarios de funcionamiento, del mismo modo diferentes bases de reglas se generaron para adaptarse a las características y necesidades de dichos escenarios. Las bases de reglas y su escritura quedan reflejadas en el [Anexo V](#). Paralelamente, las superficies de respuesta asociadas a los conjuntos de las variables de entrada y salida quedan reflejadas en el [Anexo IV](#).

Posteriormente a la obtención de las bases de reglas y superficies de respuesta, se empleó un proceso de defusificación siguiendo el criterio SOM (*Smallest Of Maximum*) o criterio del máximo más pequeño. Finalmente se generó el siguiente diagrama de bloques asociado al módulo de control en base al bloque “Fuzzy Inference System” (Figura 3-50):

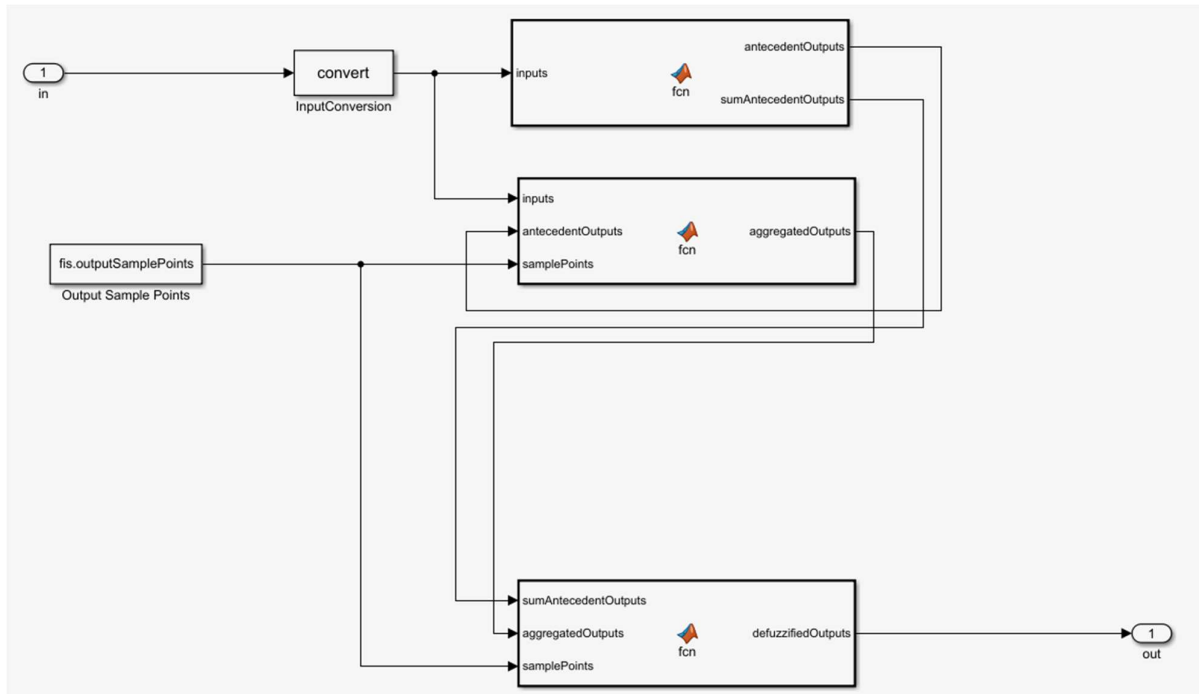


Figura 3-50: Diagrama de bloques sistema de control por lógica difusa. [Fuente propia]

Mientras que la relación entre los datos de entrada y salida del controlador se puede observar en la Figura 4-1, donde fueron colocados dos bloques de conexión tipo “mux” para separar las variables de entrada al controlador. Dicha separación se realizó de la misma manera en las variables de salida para generar señales de control sobre los módulos de baterías, módulo diésel generador de emergencia y módulo de energía por pila de combustible.

La información contenida en el bloque “Fuzzy Inference System” de la Figura 3-50 fue cargada al exportar los datos contenidos en el archivo tipo sistema de interferencia difusa (FIS) como variables en el “Workspace” implementado en el software de simulación, conforme a lo especificado en la Figura 3-51:

Name ▾	Value
tout	60001x1 double
logout	1x1 Dataset
fuzzy_logic_workspace_som_v004	1x1 mamfis
fuzzy_logic_workspace_som_v003	1x1 mamfis
fuzzy_logic_workspace_som_v002	1x1 mamfis
fuzzy_logic_workspace_som	1x1 mamfis
fuzzy_logic_workspace_mom_v004	1x1 mamfis
fuzzy_logic_workspace_mom	1x1 mamfis
fuzzy_logic_workspace_lom	1x1 mamfis
fuzzy_logic_workspace_centroid	1x1 mamfis
fuzzy_logic_workspace_bisector	1x1 mamfis

Figura 3-51: Workspace controlador lógico. [Fuente propia]

4 SIMULACIÓN

4.1 Introducción

En el presente apartado se abordarán las condiciones iniciales en las que se asientan los diferentes escenarios y simulaciones realizadas. Posteriormente se definirán los escenarios de trabajo del sistema AIP modelado, en concordancia con las necesidades estipuladas para el submarino. Finalmente se reflejarán las condiciones en las que se han llevado a cabo las simulaciones, así como los métodos de computación empleados durante las mismas.

4.1.1 Modelo AIP y condiciones iniciales

Con el objetivo de poder establecer una diferencia comparativa en el funcionamiento del sistema AIP bajo diversas condiciones de trabajo, tres escenarios diferentes fueron recreados, en los que el grado en el que el módulo de pila de combustible aporta potencia al módulo de propulsión eléctrica varía respecto a los valores de potencia otorgados por el módulo de baterías y el módulo diésel generador de emergencia.

Para el correcto análisis de dichos escenarios, todas las simulaciones fueron realizadas para con un mismo régimen de funcionamiento del módulo de propulsión. La potencia establecida en el módulo de propulsión eléctrica fue obtenida a partir de los datos de acoplo² proporcionados por los manuales de funcionamiento de los submarinos clase Agosta S-70.

Los datos de acoplo se pueden encontrar en la Tabla 3-5. Para el desarrollo de las simulaciones en los escenarios planteados se utilizaron los datos de potencia requerida para obtener una condición de medio acoplo, con una velocidad aproximada de 7 nudos.

Paralelamente, el módulo de baterías fue configurado a partir de los datos de potencia ofrecidos por el modelo de baterías implementado en los submarinos S-70. Se establecieron dos grupos independientes de baterías situados en compartimentos distintos del submarino, dividiendo la potencia aportada por cada grupo a la mitad. Para el cálculo del número de baterías a utilizar, los siguientes datos del modelo de baterías NAF1 S70, obtenido de [34]:

² Los modos de acoplo son configuraciones de trabajo del módulo de propulsión eléctrica, que implican un determinado régimen de potencia.

Tabla 4-1: Datos técnicos baterías modelo NAF1 - S70. [Fuente propia]

Parámetros	Valores numéricos
Capacidad nominal [Ah]	10000
Elementos (por grupo)	160
Grupos	2
Voltaje nominal (de cada elemento) [V]	2
Peso (de cada elemento) [kg]	480
Volumen base [m ³]	31
Volumen expandido [m ³]	81
Potencia específica [kW/kg]	180
Densidad específica [kWh/L]	110
Energía específica [kWh/kg]	42

Partiendo de los datos de la Tabla 4-1, se obtuvo que, bajo las condiciones de funcionamiento establecidas por un régimen de gran acople (2200 kW), el tiempo estimado de funcionamiento era de 1,45 horas. Bajo dicho requerimiento de tiempo y en las condiciones de potencia anteriores, el número aproximado de unidades a utilizar en cada grupo de baterías fue de 624, generando un espacio medio de 17,7 m³ frente a los 31 m³ ocupados por los grupos de baterías NAF1 – S70 anteriores [34]. De este modo se garantiza que las capacidades de la batería modelada cumplen con los requisitos ya establecidos por el modelo de baterías tipo NAF1 – S70 actualmente empleadas en los submarinos.

Por otra parte, el sistema AIP consta además de una serie de elementos externos que ejercen sus funciones a modos de sistemas auxiliares para garantizar un correcto funcionamiento de los módulos que componen el sistema AIP. Entre otros cabe mencionar los convertidores empleados para la transformación de voltajes, los sistemas de refrigeración empleados en el módulo de almacenamiento en hidruros, el módulo de compresión de oxidante a la pila de combustible, etc. Dichos sistemas auxiliares ejercen un efecto tal que supone la aparición de pérdidas de potencias asociadas a los sistemas a los que apoyan. Para modelar el comportamiento de estos sistemas, en el diagrama representativo del sistema AIP fueron implementados diversos bloques tipo “Gain” cuyos valores introducen las diversas pérdidas de potencia en el sistema.

En el caso del módulo de almacenamiento en hidruros, se establecieron como condiciones iniciales una masa inicial de 143 kg de hidrógeno almacenado, una presión de descarga inicial de 6 bar, además de un flujo de salida de 2 [$\frac{kg}{h}$] de hidrógeno.

Finalmente, se considera que los porcentajes de hidrógeno y fuel se encuentran en su máxima capacidad al iniciar la simulación, donde se establece un tiempo medio de 30000 segundos para el análisis de todos los escenarios planteados.

4.1.2 Configuraciones planteadas

Para el análisis del funcionamiento, respuesta y autonomía del sistema AIP, tres configuraciones diferentes fueron planteadas, bajo las condiciones de potencia ya mencionadas en el apartado de condiciones iniciales (Apartado 4.1.1).

4.1.2.1 Configuración 1: Empleo de generador diésel y baterías

En la presente configuración se plantea un modo de funcionamiento en el que no existe aporte de potencia ninguno por parte del módulo de pila de combustible. Únicamente es posible aportar potencia al módulo de propulsión eléctrica bien sea mediante el módulo de baterías o mediante el generador de emergencia. En el caso del modelo empleado para el módulo diésel generador de emergencia, el empleado en los actuales submarinos clase S-70 se trata del modelo SEMT -PIELSTICK 16 PA4-V-185 con capacidad para 850 kW.

Partiendo de las condiciones mencionadas en el Apartado 4.1.1, se plantea el diagrama de bloques de la Figura 4-1:

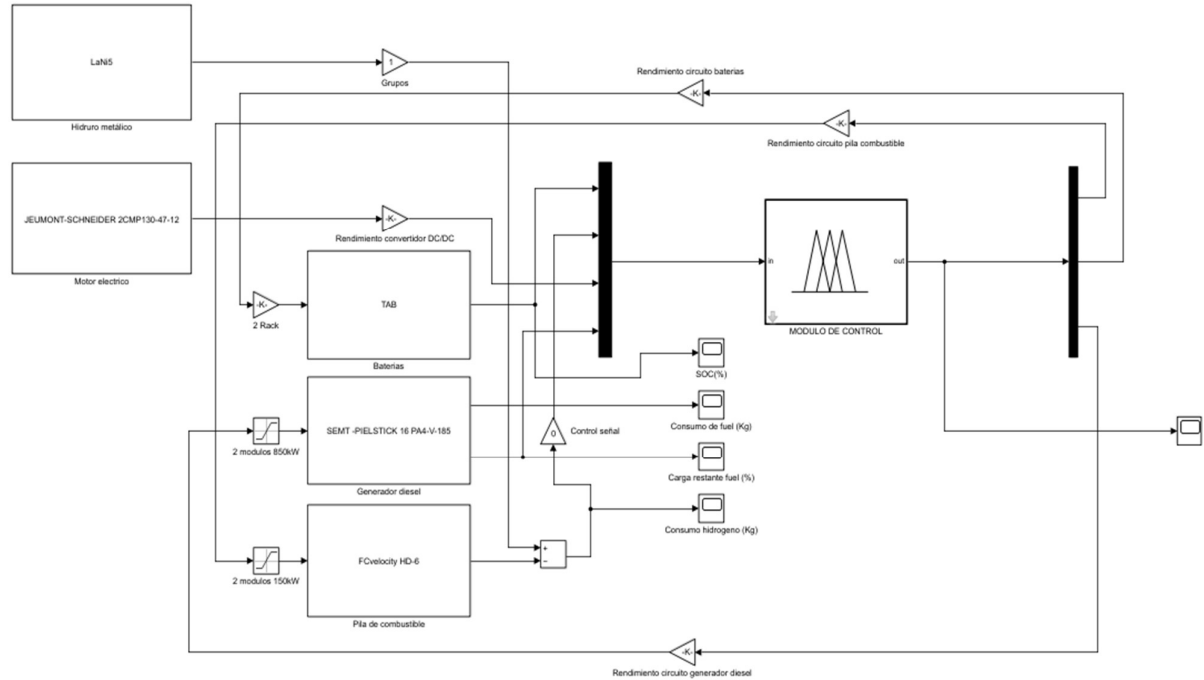


Figura 4-1: Escenario 1 modelo AIP. [Fuente propia]

Donde se aprecia como el valor de entrada relativo al módulo de celda de combustible es nulo durante la simulación. Respecto a las reglas de inferencia empleadas en el controlador, estas responden a la base de reglas relativas a la configuración basada en el empleo de baterías y generador de emergencia, las cuales se encuentran planteadas en el [Anexo V](#). La configuración de la base de reglas queda reseñada en el apartado de base teórica del controlador de lógica difusa (Apartado 3.7.2).

Por otra parte, las superficies de respuesta responden de la misma manera a la actual configuración de trabajo, donde se aprecia la relación entre la respuesta de las diferentes variables que rigen el comportamiento del controlador. Estas quedan recogidas en el [Anexo IV](#).

Las bases de reglas empleadas fueron configuradas con el objetivo inicial de adaptar el comportamiento del sistema a las características de funcionamiento de los submarinos convencionales. Como consecuencia, en la configuración 1 (empleo único de baterías y generador de emergencia), y configuración 2 (empleo de pila de combustible, baterías y diésel generador) existe una dependencia considerablemente mayor de la energía aportada por el módulo de baterías y el módulo diésel generador de emergencia.

4.1.2.2 Configuración 2: Empleo de 2 módulos de pila de combustible

En la configuración 2 se empleó por primera vez el módulo de potencia basado en pila de combustible junto con el módulo de almacenamiento por hidruros metálicos. No obstante, los valores de

potencia máxima fueron limitados a 300 kW, equivalente a dos módulos de pila de combustible de 150 kW cada uno.

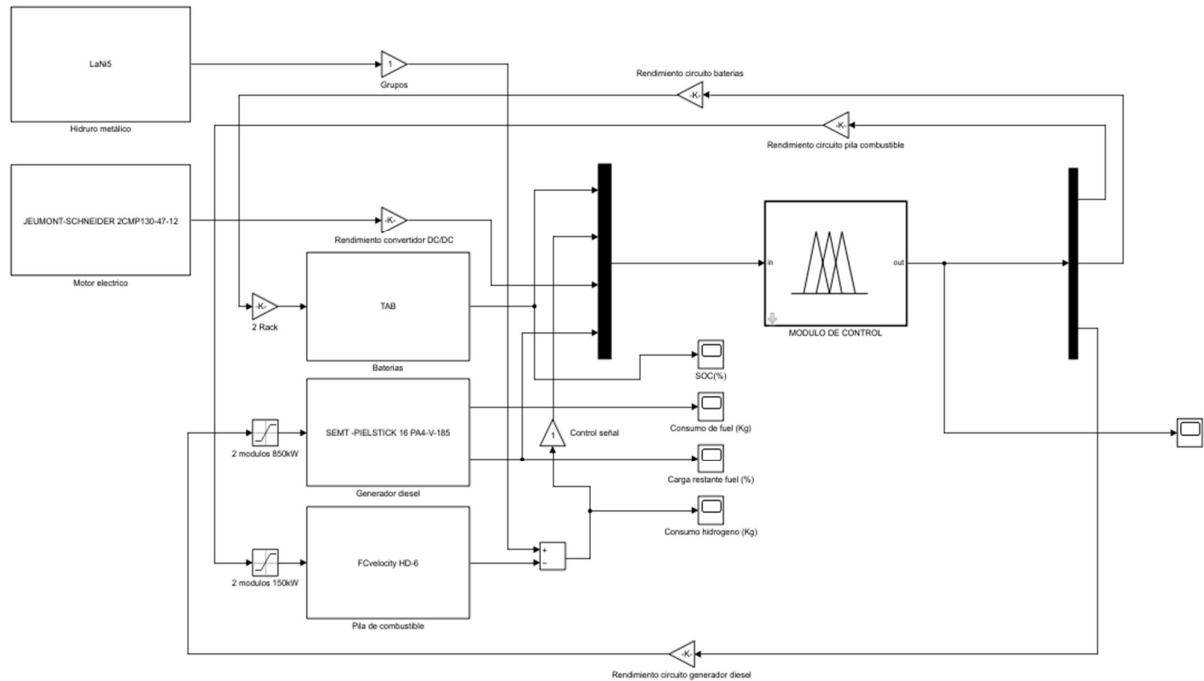


Figura 4-2: Escenario 2 modelo AIP. [Fuente propia]

La potencia de la pila de combustible fue obtenida a partir del aporte de hidrógeno gaseoso contenido en un grupo de almacenamiento de hidruros metálicos con capacidad inicial establecida según las condiciones del Apartado 4.1.1. Además, se mantienen los dos módulos diésel generadores de emergencia con capacidad para 850 kW modelo SEMT -PIELSTICK 16 PA4-V-185.

Respecto a la configuración establecida en la base de reglas empleada y las superficies de respuesta, estas coinciden con aquellas utilizadas en la simulación 1. No obstante, en esta nueva configuración, al contar con el uso de las pilas de combustible, se produce una hibridación parcial entre los distintos métodos de producción energética al módulo de propulsión eléctrica. No obstante, cabe destacar que en la presente configuración las reglas fueron establecidas para depender mayoritariamente del aporte de energía ofrecido por el módulo de baterías.

4.1.2.3 Configuración 3: Empleo de 4 módulos de pila de combustible

En el último escenario analizado, las condiciones de funcionamiento reflejan ciertas similitudes a las establecidas en la simulación anterior, en lo que a uso de módulos de aporte de energía combinados se refiere. En la configuración 3 se combinan nuevamente todos los módulos de generación energética.

No obstante, en la presente simulación se propusieron ciertas diferencias respecto a la forma en la que se produjo la combinación de módulos, así como la asignación de potencias a cada uno de ellos. Los cambios realizados se detallan a continuación:

- Aumento del número de pilas de combustible empleadas a 4.
- Aumento de la potencia máxima generada en el módulo de energía por pila de combustible a 600 kW.
- Aumento del número de grupos de almacenamiento de hidrógeno a 4.
- Aumento de la capacidad de almacenamiento de hidrógeno a 572 kg.

Partiendo de estos cambios, el sistema fue rediseñado y ajustado según la configuración establecida en la Figura 4-3:

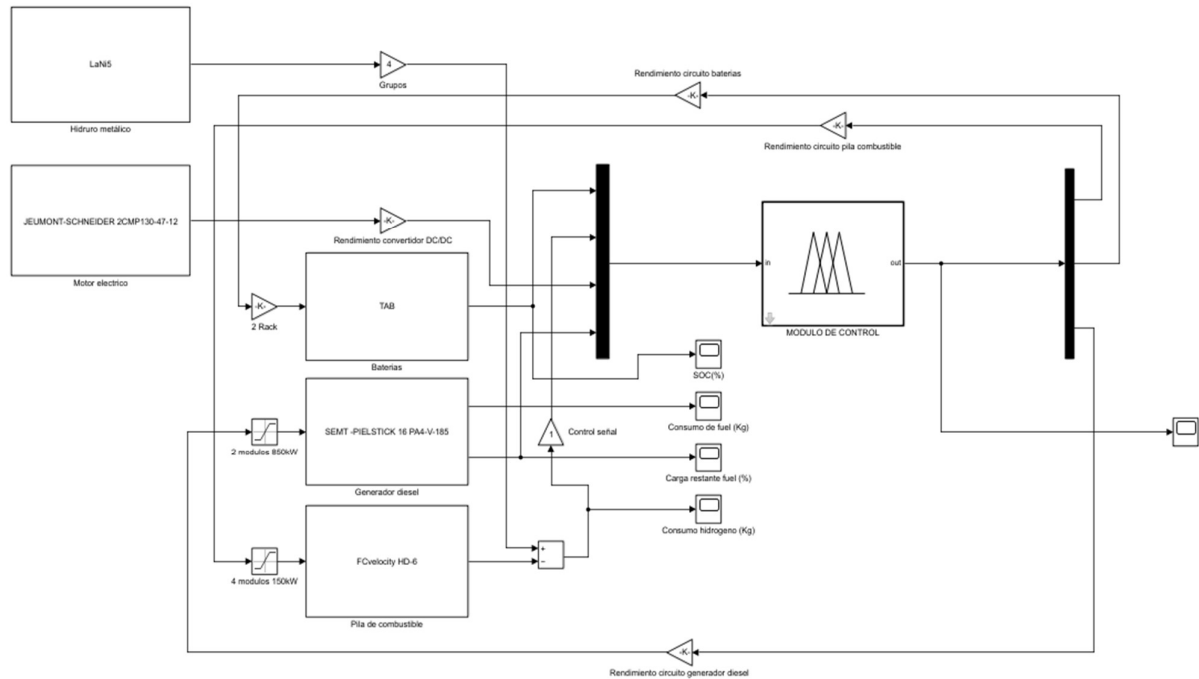


Figura 4-3: Escenario 3 modelo AIP. [Fuente propia]

Además de los cambios ya mencionados se realizó una modificación de la base de reglas, así como de las superficies de respuesta, con el objetivo de lograr un mayor porcentaje de hibridación de tecnología de pila de combustible en el sistema. De este modo, el comportamiento del controlador fue parcialmente modificado para reducir el porcentaje de uso de energía procedente del módulo de baterías, disminuyendo de igual manera el consumo asociado al generador de emergencia.

La base de reglas empleada en la configuración actual se encuentra reflejada en el [Anexo V](#), mientras que las nuevas superficies de respuesta se encuentran en el [Anexo IV](#).

5 RESULTADOS

5.1 Resultados

5.1.1 Introducción

En los siguientes apartados se representarán los resultados obtenidos para los distintas configuraciones de funcionamiento planteadas para el modelo de sistema AIP estudiado.

5.1.2 Resultados configuración 1

En la simulación 1 fue fijado un tiempo máximo de simulación de 8 horas (30000 segundos), donde se obtuvo un ciclo de potencia combinado de los valores de potencia de baterías y generador de emergencia (Figura 5-1).

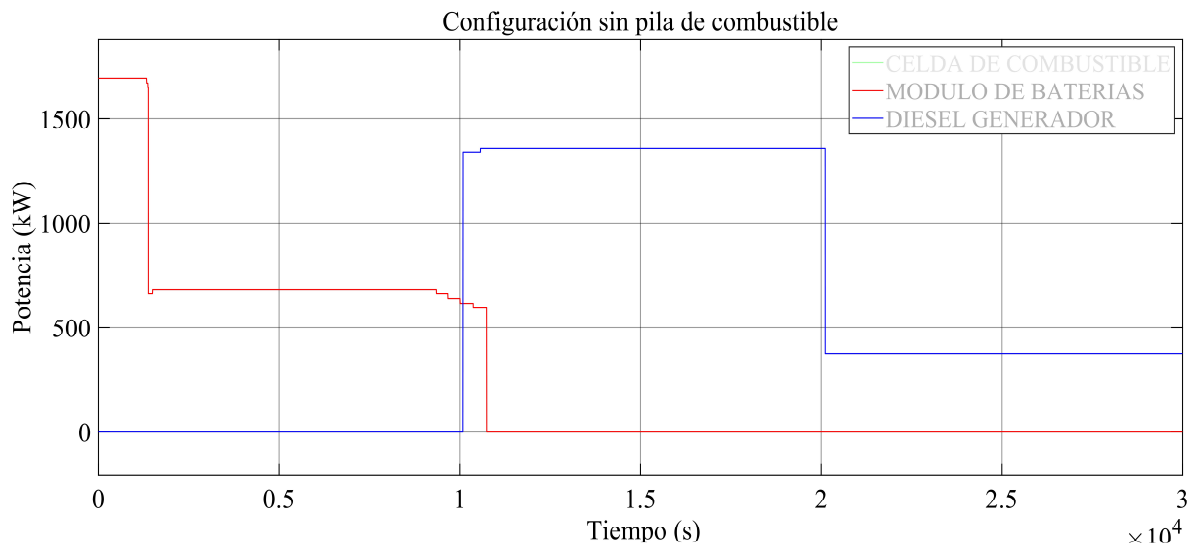


Figura 5-1: Resultados ciclo de potencia escenario 1. [Fuente propia]

En la Figura 5-1 se puede apreciar el funcionamiento del sistema bajo las condiciones estipuladas en el escenario 1. En primer lugar, el módulo de propulsión eléctrica es alimentado mediante el módulo de baterías, provocando una descarga de la energía almacenada en estas conforme a las características de potencia requerida de ella. Los valores de estado de carga resultantes de la simulación se muestran en la Figura 5-2

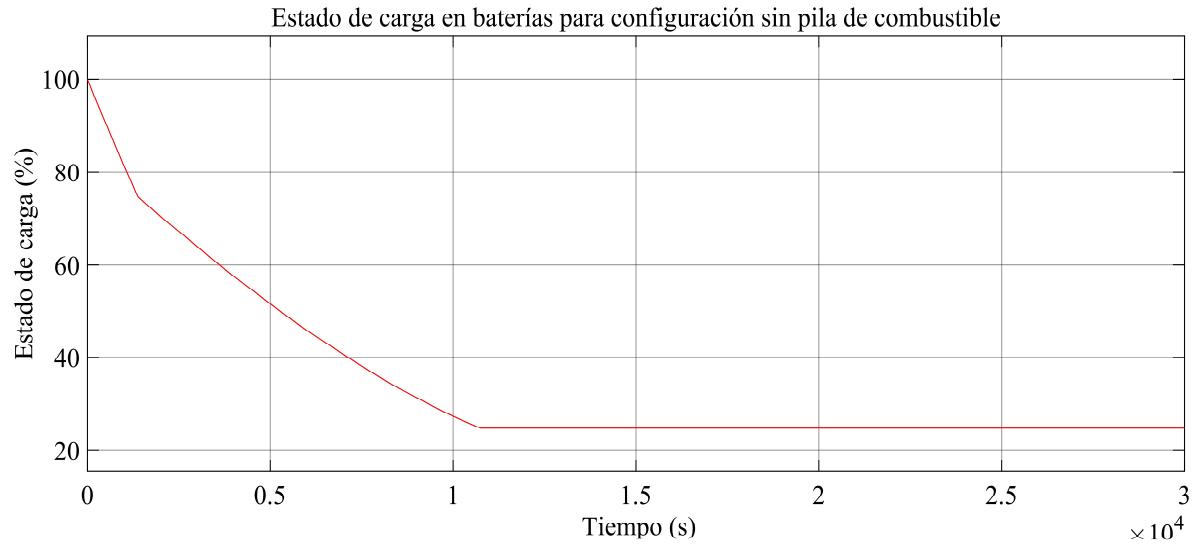


Figura 5-2: Estado de carga en baterías simulación 1. [Fuente propia]

Al analizar la gráfica contenida en la Figura 5-2 se determinó un tiempo de funcionamiento de 10748 segundos, el equivalente a más de 3 horas de funcionamiento antes de necesitar del uso del módulo diésel generador de emergencia para realizar la propulsión. Se puede apreciar como el estado de carga del módulo de baterías disminuye hasta un valor del 20%, momento en el que el módulo de control considera que el estado de carga de la batería se encuentra lo suficientemente bajo como para requerir del uso del generador diésel de emergencia.

En la Figura 5-3 se refleja el comportamiento del voltaje de circuito abierto del módulo de baterías a medida que se produce la descarga de este. Se aprecia un aumento del voltaje desde 10 Voltios iniciales hasta 19,3 V en el momento de la desactivación del módulo. En el caso de la intensidad de corriente, esta experimenta una disminución considerable desde 129 Amperios hasta 50 Amperios, para disminuir de forma semi lineal hasta alcanzar el valor de 25 Amperios en el momento de la desactivación.

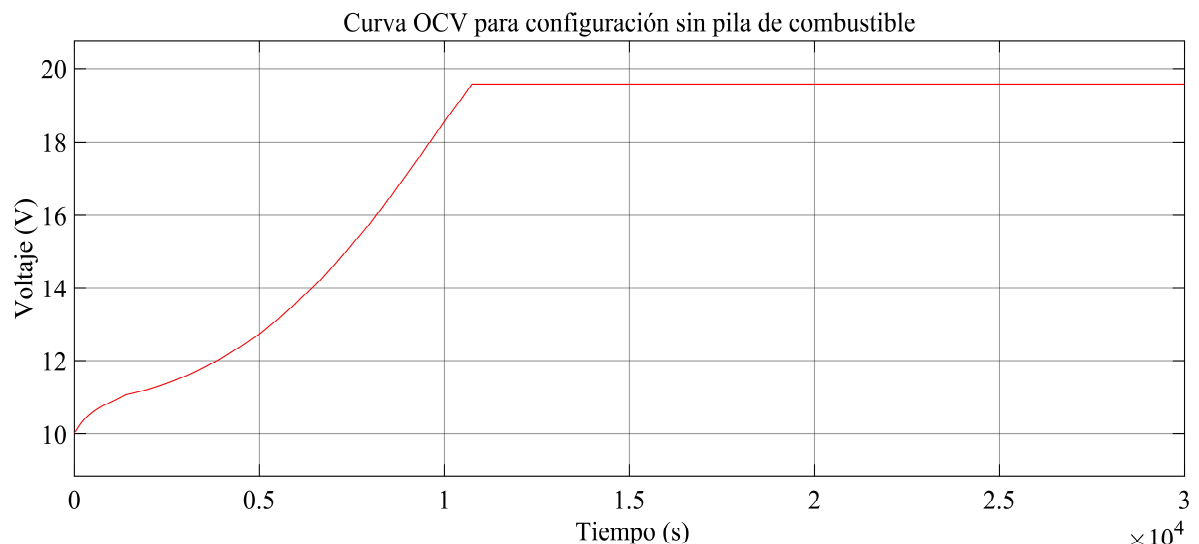


Figura 5-3: Curva OCV módulo de baterías (simulación 1). [Fuente propia]

Cabe mencionar que los datos reflejados han sido expresados a cada elemento de baterías de forma individual. Los gráficos de voltaje e intensidad quedan reflejadas en el [Anexo VI](#).

Paralelamente a los valores de estado de carga, en baterías, en la Figura 5-4:

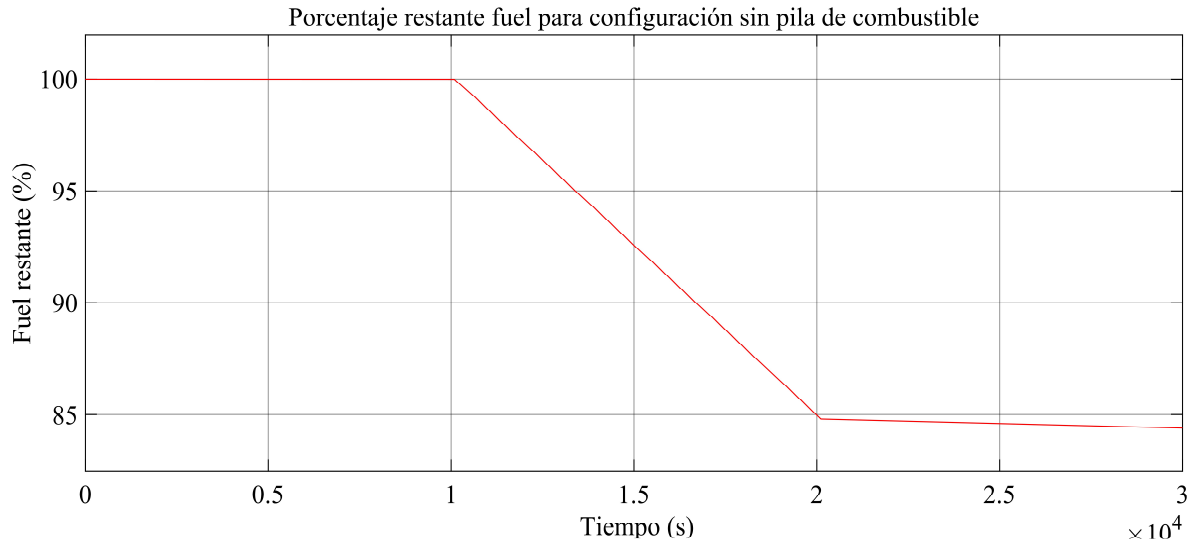


Figura 5-4: Consumo de fuel simulación 1. [Fuente propia]

Se aprecia como el consumo de combustible comienza al producirse la activación del módulo ante una señal de bajo estado de carga del módulo de baterías. El combustible se reduce desde el máximo inicial hasta el 84,9%, momento en el que el controlador detecta que el porcentaje restante de combustible ha disminuido por debajo del límite fijado como alto, modificando así la potencia ofrecida al sistema.

5.1.3 Resultados configuración 2

La incorporación de una pila de combustible al sistema probó un aumento del tiempo de funcionamiento del motor eléctrico sin necesidad de depender el generador de emergencia. Los valores conseguidos a partir de la base de reglas generada en el controlador supuso un aumento del tiempo de funcionamiento del 18,24% respecto a los datos obtenidos en la configuración 1 (Figura 5-5)

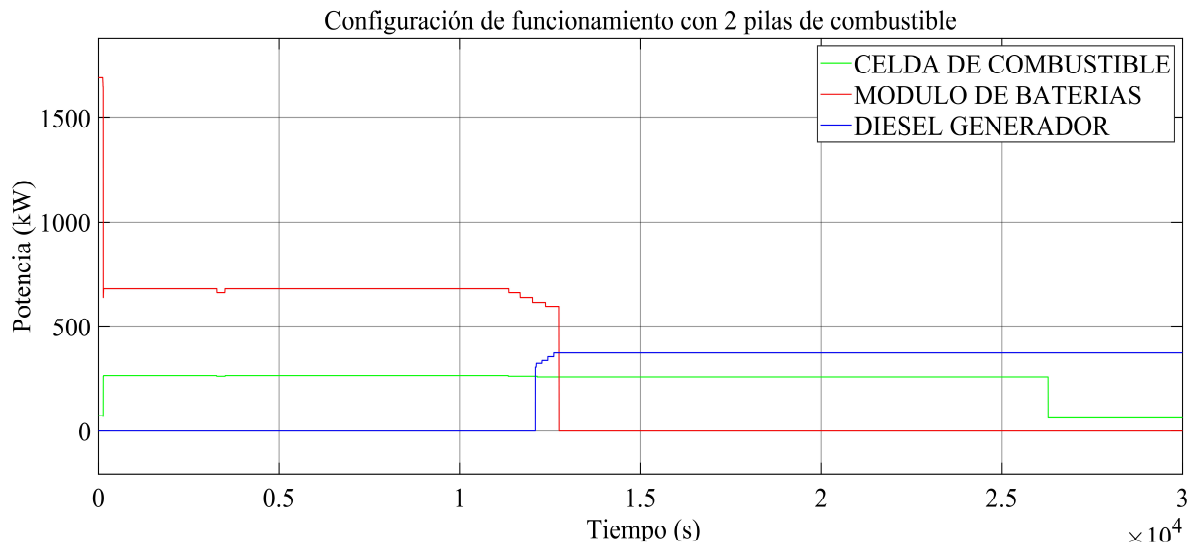


Figura 5-5: Resultados ciclo de potencia simulación 2. [Fuente propia]

La autonomía del sistema se prolongó hasta un tiempo de simulación de 12751 segundos, lo que corresponde a 3,6 horas hasta el empleo del generador de emergencia. Debido a la configuración de las reglas de Mamdani establecidas en el controlador lógico, la configuración 2 muestra un funcionamiento

más dependiente de la potencia ofrecida por los módulos de baterías y por el generador diésel, que de los valores ofrecidos por el módulo de pila de combustible.

El módulo de almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos fue configurado con una presión de descarga de 6 bar. En el proceso de desorción del hidruro, se produjo una reacción endotérmica que, junto con la transmisión de calor realizada en el sistema de refrigeración, generó un aumento de temperatura hasta 355 K durante un tiempo medio de descarga de 1000 segundos.

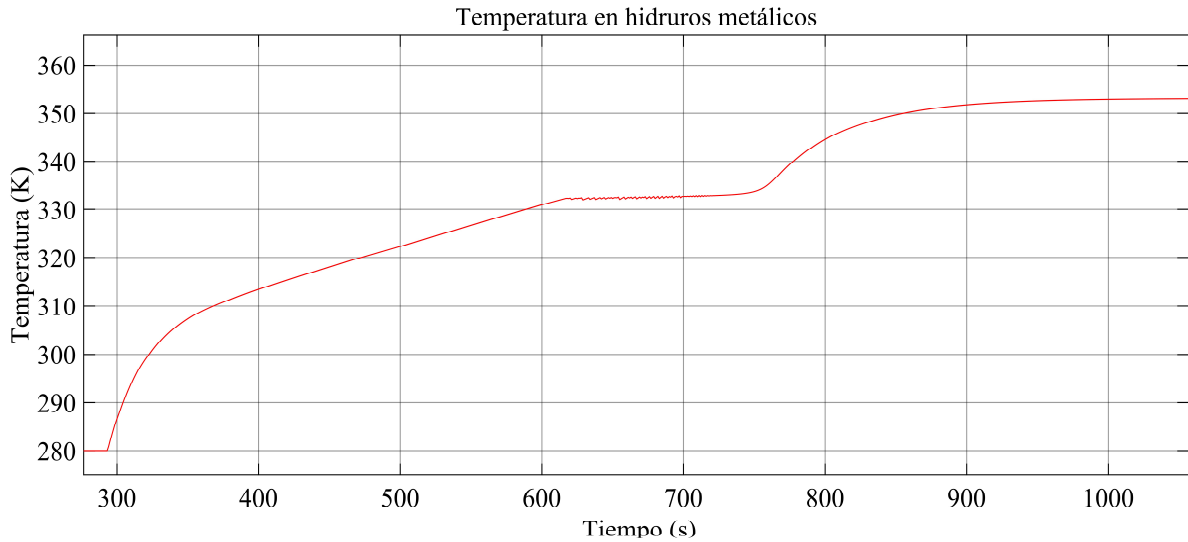


Figura 5-6: Temperatura módulo hidruros metálicos. [Fuente propia]

En la Figura 5-7 se observa la evolución de la presión de equilibrio en el módulo de hidruros metálicos durante el proceso de desorción. En ella se aprecia como se parte de una presión de descarga de 6 bar, que aumenta a medida que tiene lugar la descarga del hidrógeno gaseoso hasta llegar a 11,3 bar en el momento de la descarga completa del hidruro.

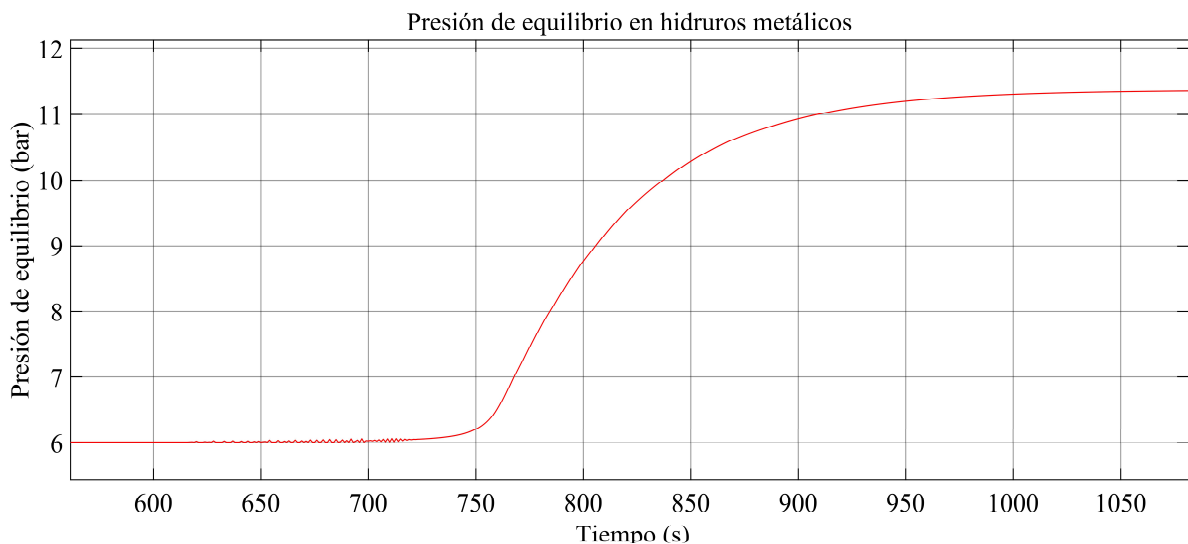


Figura 5-7: Presión de equilibrio módulo hidruros metálicos. [Fuente propia]

Durante la simulación, la descarga de hidrógeno del módulo de almacenamiento de combustible se realizó de acuerdo con los resultados de la Figura 5-8:

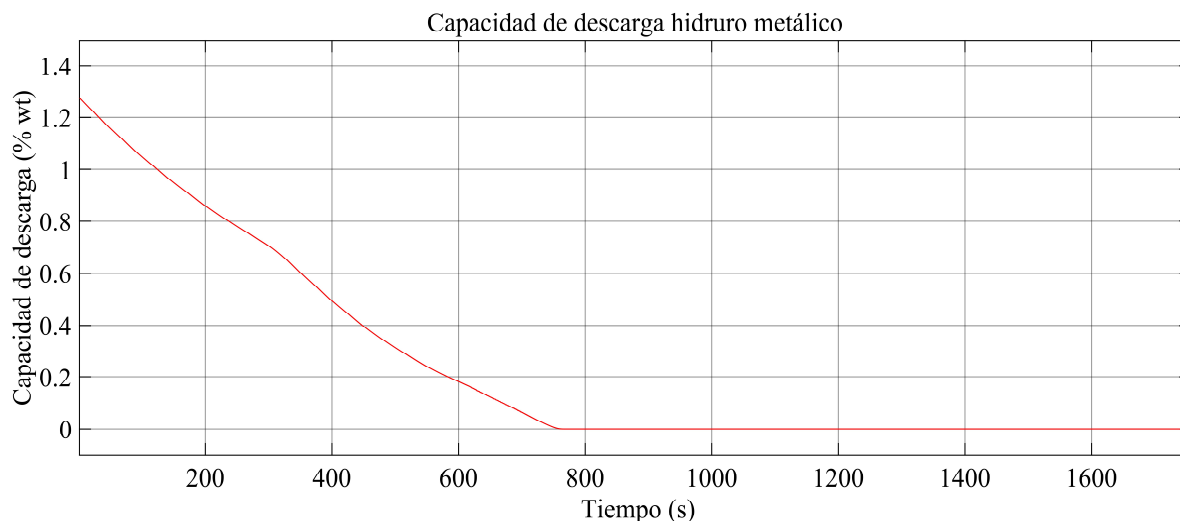


Figura 5-8: Capacidad de descarga de hidrógeno en módulo de almacenamiento en hidruros. [Fuente propia]

En la Figura 5-8 se puede observar como durante un tiempo de simulación de 800 segundos se produjo la descarga del hidrógeno con las características establecidas en los Apartados 3.4.3 para el proceso de desorción. Este comportamiento constituye el comportamiento de cada elemento de almacenamiento que compone el grupo de hidruros metálicos, de forma que bajo unas condiciones constantes de flujo de salida de hidrógeno, temperatura y presión de descarga, se tiene que el comportamiento del módulo en el escenario actual coincidió con los resultados observados en la configuración 3 desarrollada en el Apartado 5.1.4.

Por otra parte, el consumo generado por la pila de combustible alcanzó un valor de 110,8 kg durante el tiempo de simulación establecido. En la Figura 5-9 se observa como la curva de consumo experimenta un cambio de pendiente a partir de los 25000 segundos (7 horas), como consecuencia de haber alcanzado un porcentaje restante bajo de hidrógeno, donde el controlador lógico genera una señal de control ajustando la potencia de salida de la pila de combustible y del generador de emergencia paralelamente.

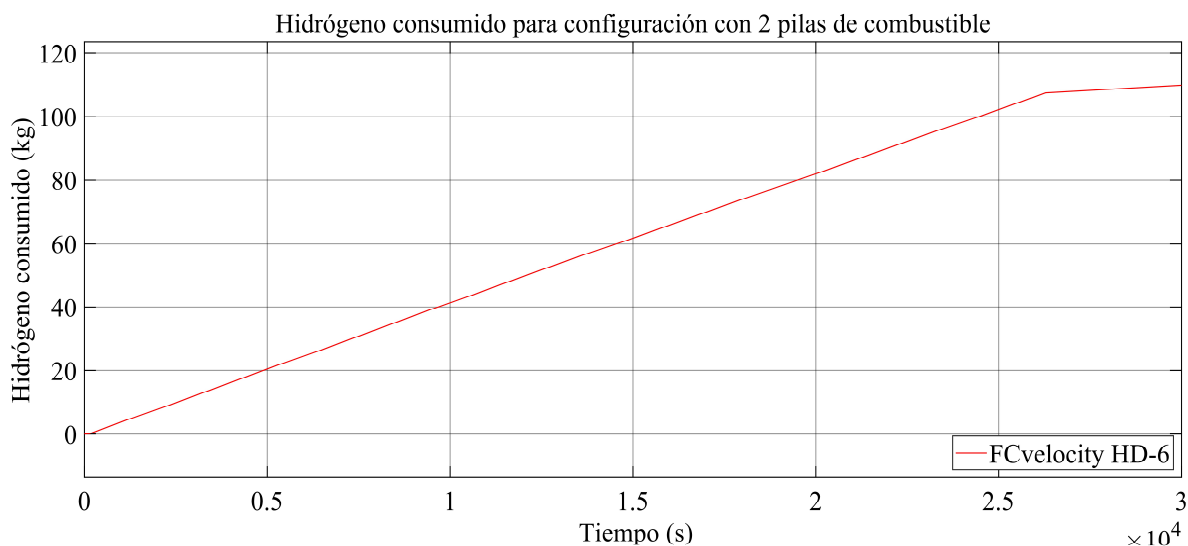


Figura 5-9: Consumo de pila de combustible escenario 2. [Fuente propia]

Respecto al módulo de baterías, el estado de carga de estas se vio incrementado conforme a lo reflejado en la ciclo de potencia, como se puede observar en la Figura 5-10.

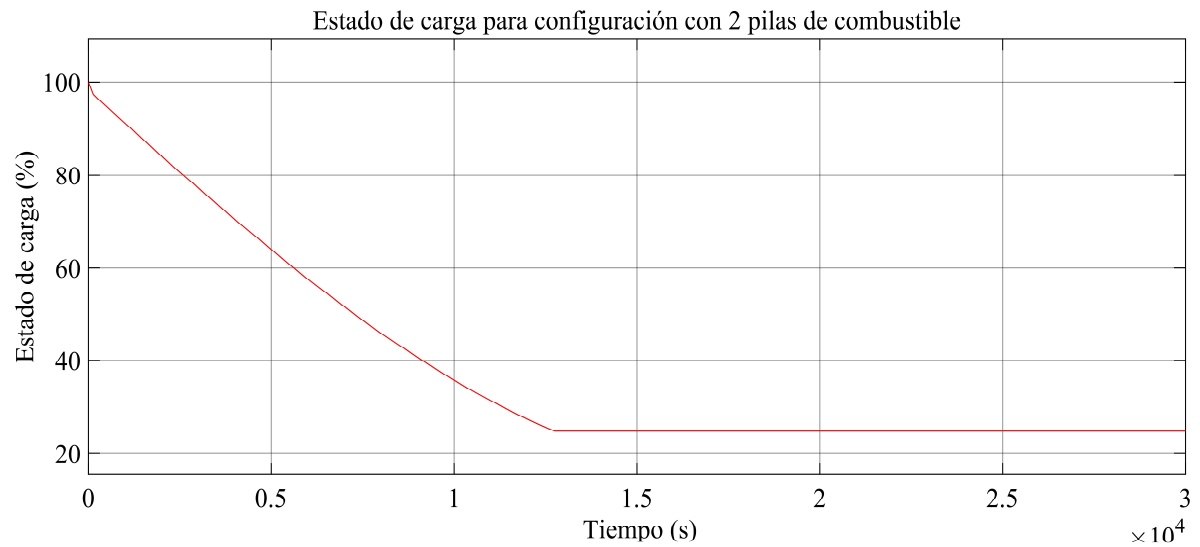


Figura 5-10: Estado de carga en baterías simulación 2. [Fuente propia]

Finalmente, el combustible consumido por el generador diésel de emergencia queda representado en la Figura 5-11, donde se aprecia como el consumo de combustible ha disminuido respecto a los datos obtenidos en la simulación 1, en este caso obteniéndose un porcentaje restante del 99,3%.

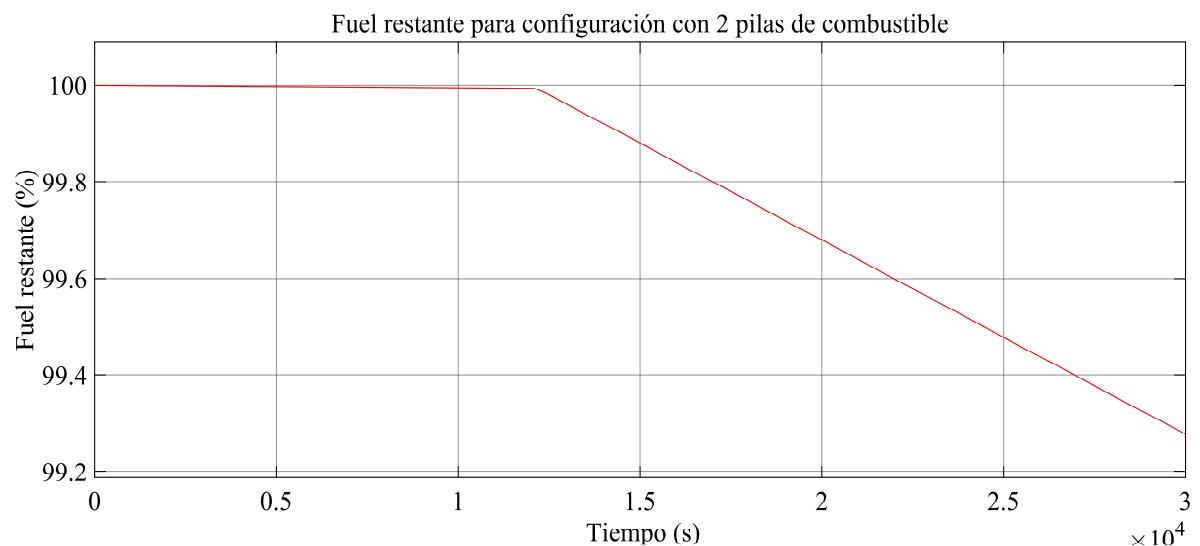


Figura 5-11: Fuel consumido simulación 2. [Fuente propia]

5.1.4 Resultados configuración 3

La configuración 3 constituye el escenario más prometedor respecto al resto de simulaciones planteadas en el presente Trabajo Fin de Grado. De acuerdo con lo estipulado en el Apartado 4.1.2.3, las reglas de Mamdani empleadas en el controlador lógico fueron adaptadas para lograr un mayor aprovechamiento y empleo del módulo de energía basado en pilas de combustible.

Paralelamente a la modificación de la base de reglas, el número de grupos de almacenamiento de hidrógeno fueron aumentados, al igual que el número de pilas de combustible empleadas para la obtención de potencia.

Como consecuencia de estas modificaciones, los resultados arrojados por las curvas que conforman el ciclo de potencia (Figura 5-12) demuestran un aumento de la autonomía de la propulsión de hasta 5 veces el tiempo de autonomía conseguido en la configuración 1 discutido en el Apartado 5.1.2.

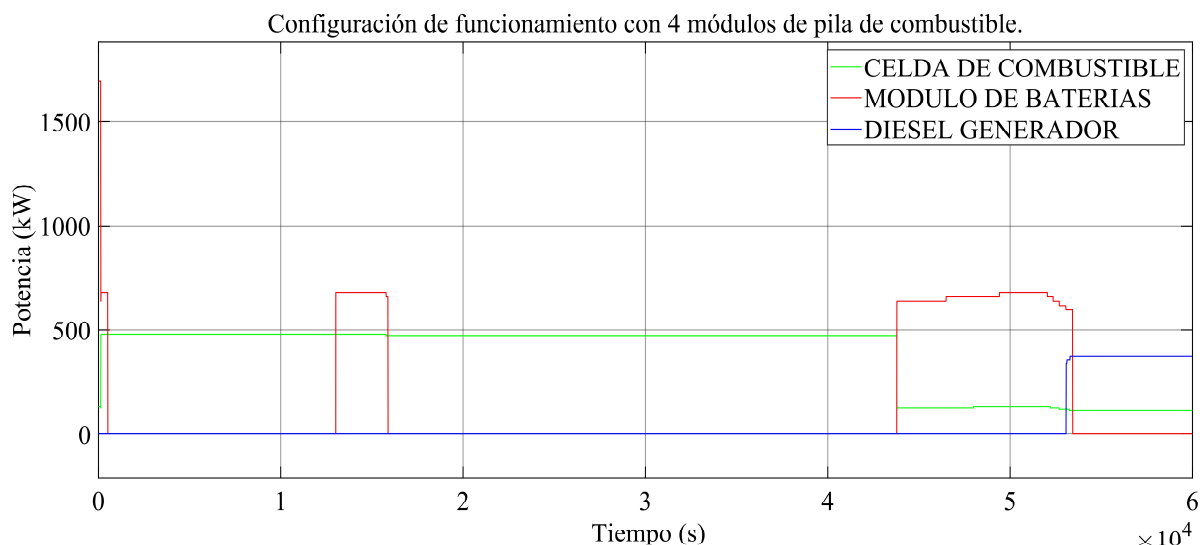


Figura 5-12: Resultados ciclo de potencia simulación 3. [Fuente propia]

El tiempo de simulación para la configuración 3 fue establecido en 17 horas (60000 segundos). El tiempo de funcionamiento del sistema combinado de baterías y pila de combustible fue extendido hasta un tiempo de simulación de 53291 segundos, equivalente a unas 14,8 horas.

No obstante, el consumo de combustible también se vio incrementado en consonancia con la potencia generada por la pila de combustible.

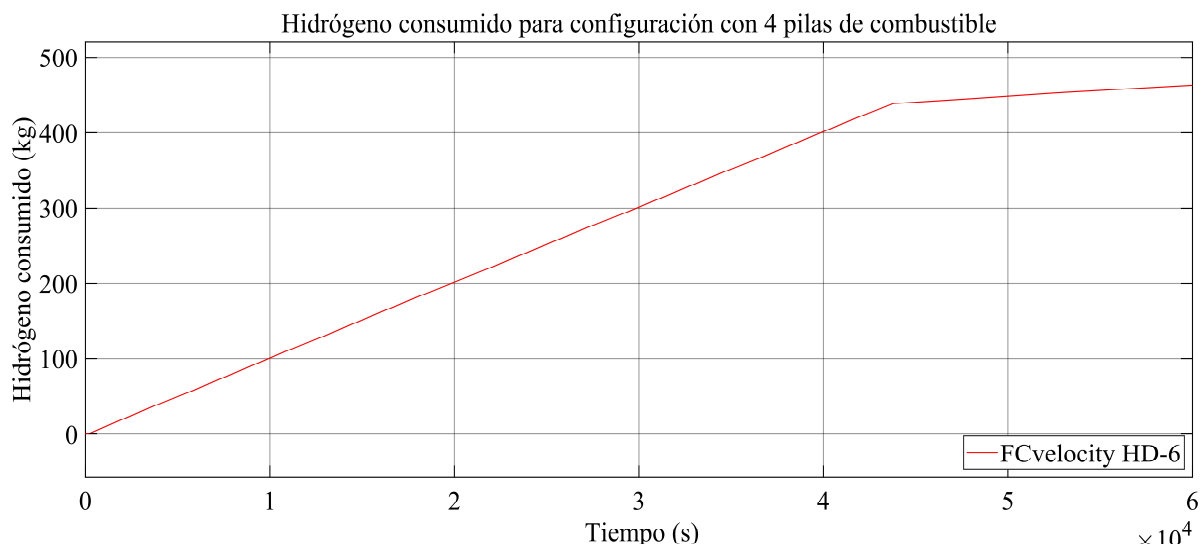


Figura 5-13: Consumo pila de combustible simulación 3. [Fuente propia]

La Figura 5-13 muestra el consumo del módulo de energía por pila de combustible. Se generó por consiguiente un consumo de 430 kg de hidrógeno en un tiempo de 43000 segundos (12 horas), que aumentó a un valor de 470 kg en el momento de finalización de la simulación. El cambio de pendiente observado en la parte superior derecha de la gráfica de consumo de hidrógeno muestra, al igual que en

el caso del escenario 2, una disminución del consumo como consecuencia de la reducción de potencia aplicada como medida de control por el controlador por lógica difusa.

Respecto al funcionamiento del módulo de baterías, su funcionamiento quedó dividido en dos fases de funcionamiento: Una descarga de la batería de un 20% en un intervalo de tiempo situado entre los 10000 y 20000 segundos (equivalente a un rango entre 3 y 6 horas); y una descarga de batería de un 50% a partir de 40000 segundos (11 horas) de simulación.

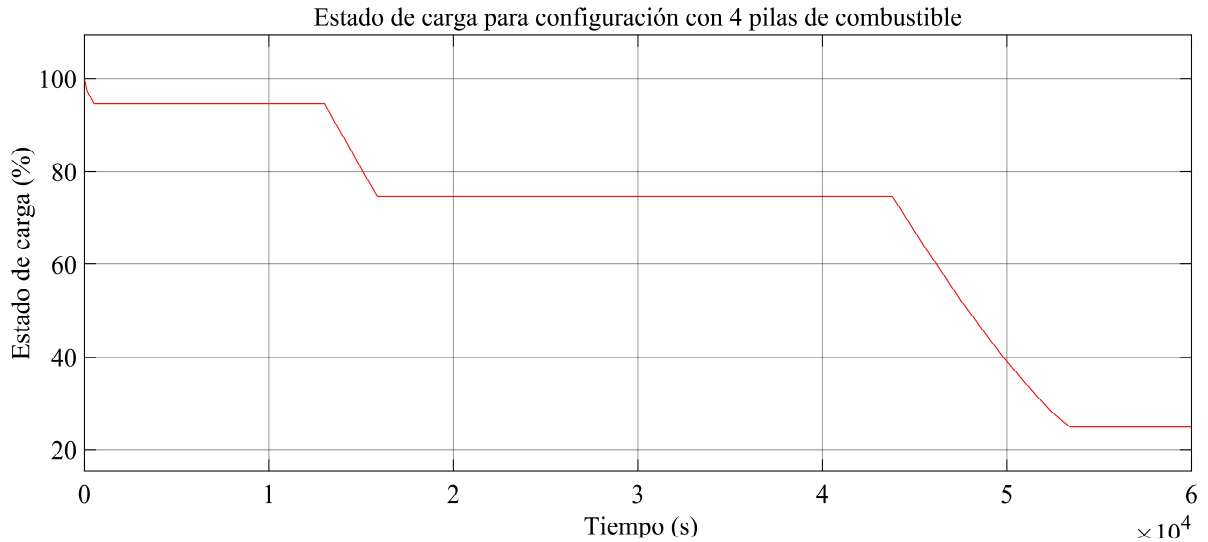


Figura 5-14: Estado de carga simulación 3. [Fuente propia]

En relación con el funcionamiento del módulo de emergencia, este se vio drásticamente reducido durante la simulación, alcanzando un valor del 99,7% de combustible restante, como se puede observar en la Figura 5-15:

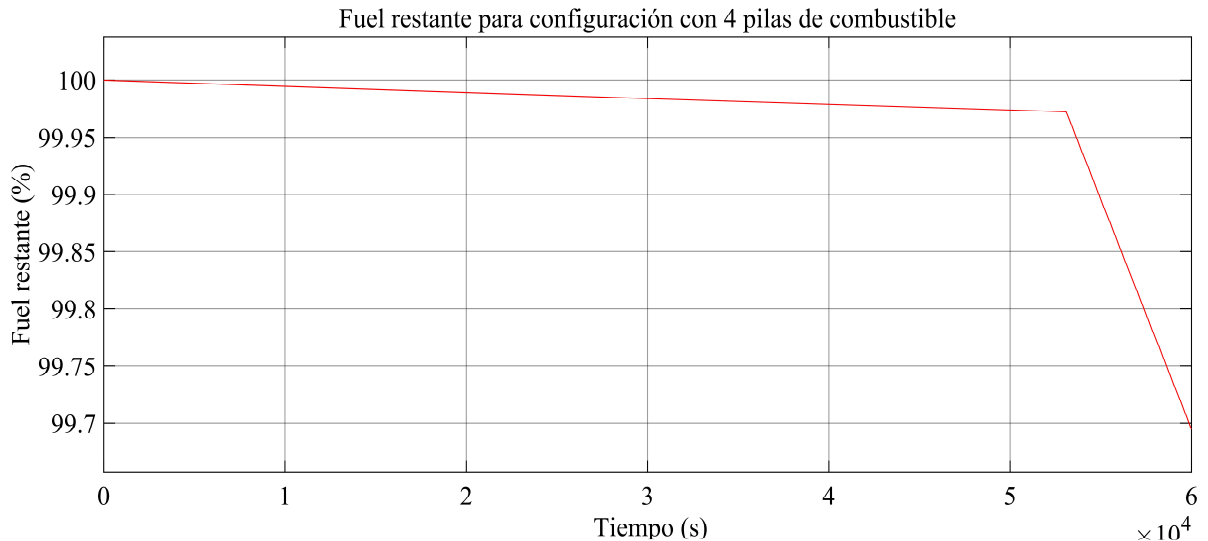


Figura 5-15: Fuel restante simulación 3. [Fuente propia]

5.2 Comparación de resultados

Al realizar la comparación entre las diferentes simulaciones, se pudo apreciar un aumento no lineal del tiempo de autonomía a medida que se aumentó el número de elementos de almacenamiento en hidruros, así como el número de pilas de combustible empleadas. A modo de comparación se muestra el

aumento del tiempo de autonomía en función del número de elementos empleados en el módulo de almacenamiento y módulo de energía por pila de combustible:

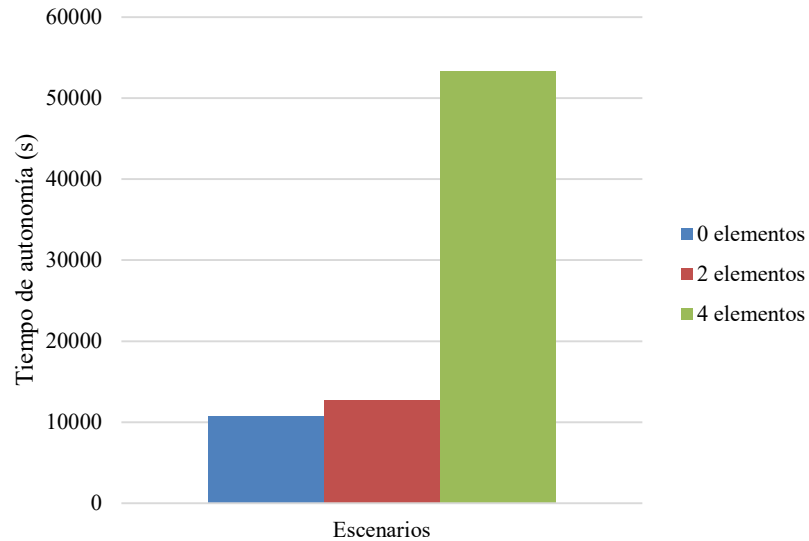


Figura 5-16: Comparación de autonomía escenarios. [Fuente propia]

En la grafica comparativa se produjo un aumento del tiempo de autonomía del 18,24% en el segundo escenario, mientras que el aumento obtenido en la configuración final alcanzó valores de 5 veces el tiempo de funcionamiento de la simulación 1.

Por otra parte, el consumo de combustible se vio reducido en gran medida en el caso de los dos últimos escenarios en comparación con el primero analizado. Así se obtuvo un consumo de fuel del 15,1% en el primer escenario, que se vio reducido al 0,7% en el escenario dos, y un valor del 0,3% en el último escenario.

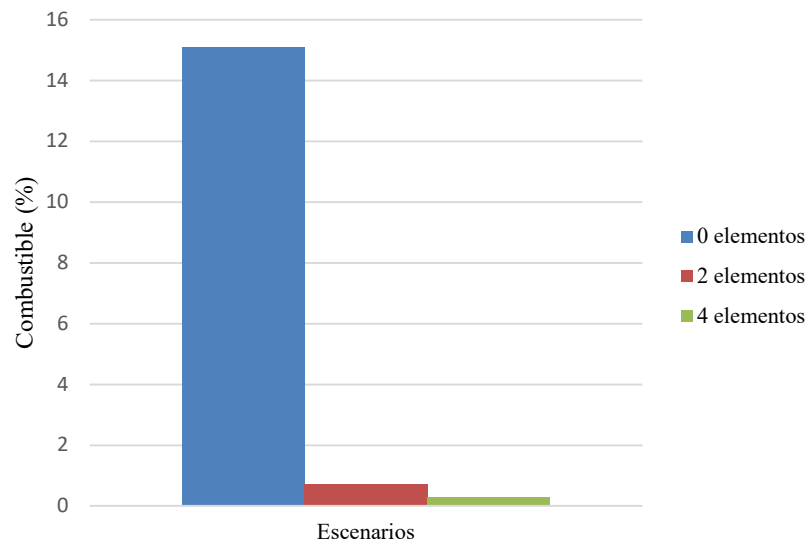


Figura 5-17: Comparación de consumo de combustible escenarios. [Fuente propia]

Finalmente, el consumo de combustible se vio incrementado ante el aumento del numero de elementos empleados en los módulos d almacenamiento en hidruros y pilas de combustible. En la grafica

comparativa del consumo de hidrógeno se aprecia como el consumo se cuadruplica en el caso de la configuración 3, con unos valores de consumo de 470 kg de hidrógeno frente a los valores del escenario 2.

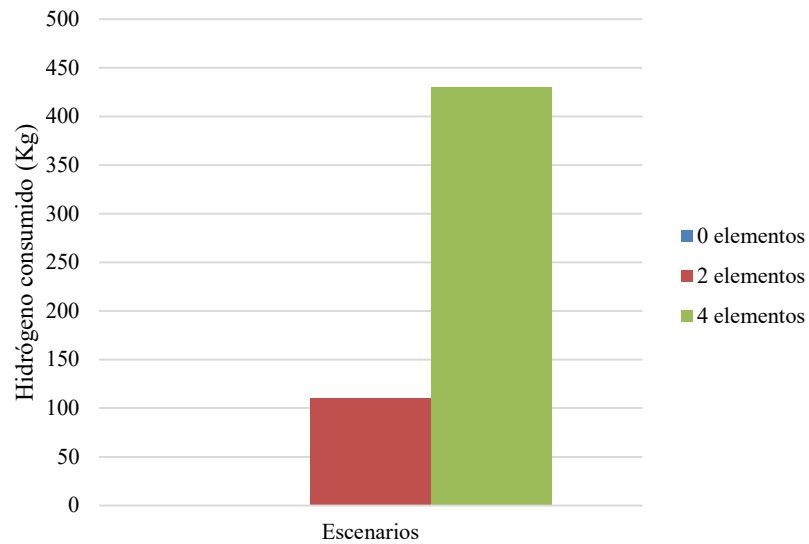


Figura 5-18: Comparación consumo hidrógeno escenarios. [Fuente propia]

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 Conclusiones

El presente Trabajo Fin de Grado propuso como principal objetivo el estudio de la viabilidad de los sistemas basados en propulsión independiente del aire (AIP) caracterizados por el almacenamiento del recurso energético mediante hidruros metálicos, y su implementación en submarinos convencionales. Para realizar dicha implementación se escogió como plataforma submarina el modelo de submarino convencional clase Agosta (S-70).

Para la realización de las simulaciones, se diseñó un sistema de propulsión con características similares a aquellas pertenecientes a la plataforma de combate seleccionada, donde se combinaron deferentes subsistemas en el entorno de trabajo del software Matlab Simulink® para la obtención de resultados. Tras la implementación del modelo y la realización de las pruebas analíticas pertinentes, las siguientes conclusiones fueron extraídas:

Fase de investigación: Se efectuó una búsqueda de información de cara a la elaboración de los diferentes subsistemas constituyentes del modelo final a partir de la literatura existente. Se optó por dar una mayor prioridad en el diseño y búsqueda de parámetros para el modelado del sistema AIP a aquellos datos procedentes de fuentes comerciales con experiencia previa en el sector. En los casos en los que no se disponía de información comercial suficiente, la información fue obtenida a partir de la literatura contenida por autores de investigación o modelos de comportamiento generalista.

Modelo empleado: Mediante el entorno Matlab Simulink® se desarrollaron los modelos de baterías, pila de combustible, generador de emergencia, almacenamiento en hidruros metálicos y propulsión eléctrica. El funcionamiento de cada uno de los modelos mencionados fue comprobado de forma independiente, obteniendo de cada uno de ellos resultados coherentes y esperados conforme a las previsiones realizadas. El modelo resultante fue generado a partir de la implementación de cada uno de los submódulos en un único sistema. Para controlar el funcionamiento de cada uno de los modelos empleados, se creó un controlador por lógica difusa, cuyas prestaciones fueron comprobadas previamente, obteniéndose resultados esperados y coherentes.

Tres condiciones de funcionamiento fueron analizadas durante las simulaciones, con el objetivo de demostrar las mejoras de autonomía proporcionadas por el empleo del sistema AIP en sus diferentes niveles de hibridación con los sistemas no-AIP.

Primera simulación: En primer lugar se realizó un primer análisis del comportamiento del sistema, donde el propio sistema AIP fue inhabilitado, y únicamente se generó energía mediante módulo de baterías y generador de emergencia. El sistema fue configurado para ofrecer una salida de potencia en el módulo de propulsión eléctrica acorde con la condición de medio acople existente en los modelos de

submarino clase Agosta. Como resultado se obtuvo una autonomía de 3 horas bajo dicho régimen de funcionamiento.

Segunda simulación: En la segunda configuración se realizó una evaluación del desempeño del módulo de baterías, pila de combustible y generador de emergencia. Se estableció una mayor preferencia de uso al módulo de baterías que al módulo de pila de combustible, cuya potencia de salida fue limitada a 300 kW. Tras la realización de la simulación, se obtuvo una disminución del consumo de combustible del 14.4%, junto con un incremento del tiempo de autonomía del 18.2% bajo las mismas condiciones de potencia. Se obtuvo un tiempo de funcionamiento de 3.55 horas.

Tercera simulación: En la tercera configuración se realizó una modificación en el módulo de control por lógica difusa para priorizar el empleo de la pila de combustible respecto al módulo de baterías. La potencia del sistema AIP fue aumentada hasta 600 kW bajo el mismo régimen de potencia. Como resultado, el consumo de combustible fósil se redujo en un 0.6% respecto al segundo escenario analizado (20% respecto al escenario inicial). La autonomía del sistema se vio incrementada en 5 veces el tiempo de autonomía del escenario inicial (14,8 horas). No obstante, el consumo de hidrógeno se vio cuadruplicado, lo que supuso un incremento del número de grupos de almacenamiento n hidruros metálicos y pilas de combustible.

En definitiva, el empleo de los sistemas de propulsión AIP basados en hidruros metálicos constituyen una alternativa altamente recomendada debido a las considerables mejoras ofrecidas en relación con la autonomía de estos, a la vez que la reducción del consumo de combustible obtenida al implementar dichos sistemas. Si bien su empleo supondría una ocupación mayor del espacio en submarinos para incorporación de nuevos sistemas, a la vez que un mayor coste de diseño y construcción, las mejoras mencionadas, junto con aquellas derivadas de su escasa producción de ruido en entornos severos, y la mayor seguridad de almacenamiento del hidrógeno; dota a estos sistemas de unas características que los hacen seguros y atractivos para su empleo en submarinos.

6.2 Líneas futuras

Actualmente el empleo de sistemas AIP es un campo en constante desarrollo. Resulta evidente que dicho sistema aporta considerables ventajas tanto técnicas como operativas a los submarinos convencionales, y les permiten cerrar una gran brecha (pero que cada vez es más pequeña) respecto a sus parientes los submarinos nucleares. Pese a las ventajas ofrecidas por el sistema AIP, otros tantos aspectos requieren de una exhaustiva investigación y desarrollo para poder ser capaces de paliar las desventajas que todavía presentan dichos sistemas.

A lo largo del presente Trabajo Fin de Grado se han observado diferentes aspectos cuyo abordaje promete ser un punto de mejora notable respecto a los resultados obtenidos en el presente título.

Por una parte, se propone una mayor investigación en el ámbito de estudio de las aleaciones conformadoras de hidruros metálicos. El empleo de hidruros metálicos proporciona mejoras de seguridad que son de gran importancia para los entornos submarinos. No obstante, el control de las condiciones de presión y temperatura en las que se encuentra sometido la aleación supone una serie de desventajas asociadas a la necesidad de un estricto control de la temperatura para lograr un aporte constante de hidrógeno, lo que repercute en sistemas auxiliares voluminosos y consumos adicionales de energía. La solución a este problema radica en una exhaustiva investigación en busca de nuevas aleaciones y compuestos intermetálicos que mantengas sus capacidades en cuanto a almacenamiento del recurso energético, pero que permitan paliar los aspectos negativos asociados al control de su temperatura y/o presión.

Desarrollo de métodos alternativos de almacenamiento de oxidante. Pese a no haber sido abordado en el presente Trabajo Fin de Grado, el almacenamiento de oxígeno supone un aspecto a considerar, debido a las condiciones de presión y temperatura que suponen su almacenamiento en tanques a presión, así como los problemas de seguridad que ello puede acarrear en caso de avería. En línea con las

propuestas de almacenamiento del recurso energético a partir de hidruros metálicos, se propone el almacenamiento del agente oxidante mediante sistemas de almacenamiento químico, como los empleados en los sistemas VIKa (SFOG) que generan oxígeno a partir de Litio Perclorato.

Finalmente, la mejora y optimización del sistema empleado supone un interesante punto de investigación de cara a líneas futuras. El modelo diseñado en el presente Trabajo Fin de Grado modula el comportamiento de los diferentes módulos que lo constituyen en unas condiciones de potencia constante en lo que únicamente se es posible generar energía hasta que el sistema agote sus recursos energéticos. De este modo, se propone reasignar las entradas y salidas del sistema para que el módulo de baterías aproveche parte de la energía proporcionada por el generador diésel de emergencia para la carga de energía.

7 REFERENCIAS

- [1] Alonso, N. M. *El S-80, un programa en construcción*.
- [2] Alonso, N. M., & Berges, F. J. C. (2011). El cambio climático y la eficiencia energética. El futuro de una flota verde. El caso español. *Pre-Bie3*, (2), 30.
- [3] Cecilia González Alberdi. (2020). CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO BASADO EN HIDRUROS METÁLICOS. 9(10) http://www.wanfangdata.com.cn/details/detail.do?_type=perio&id=msj-xia202010017
- [4] Colino Martínez, A. (2010). Modelo energético actual mundial. *La Nueva Geopolítica de la Energía* (pp. 55-66) Ministerio de Defensa: Instituto Español de Estudios Estratégicos. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/oaiart?codigo=4548656>
- [5] Duarte Avilés, A. (2021). Energía en los hogares: Análisis y estudio del panorama socioeconómico actual con el sistema energético chileno.
- [6] Gil, J. E. G., Rey, Á O. D., & González-Estrada, O. A. (2018). Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna. *Revista UIS Ingenierías*, 17(1), 143-154.
- [7] Gil, S., & Dutt, G. (2015). *Energía, Panorama global* Unpublished. doi:10.13140/rg.2.1.3392.8165 Retrieved from <https://explore.openaire.eu/search/other?orpid=cd5d9f8d0f8318a9b4a6ab0d8958f62b>
- [8] Granados, F. (2010). “DESARROLLO TECNOLÓGICO EN LA HISTORIA DE LA HUMANIDAD: INVENTORES E INVENTOS. DREBBEL Y EL SUBMARINO”. *Málaga, España. Recuperado De https://Www.Csi-Csif.Es/Andalucía/Modules/Mod_ense/Revista/Pdf/Numero_27/Francisco_M_PORCEL%20GRANADOS_1.Pdf*.
- [9] Guerra, C. F., Rodríguez, E. A., & Ferrera, D. F. (2010). El hidrógeno: vector energético del futuro. *Energía & Minas: Revista Profesional, Técnica Y Cultural De Los Ingenieros Técnicos De Minas*, (8), 20-27.
- [10] Hurtado, J. I. L., & Soria, B. Y. M. (2007). *El hidrógeno y la energía*. Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI.
- [11] JIMENEZ, F. P. (2018). Diseño y construcción de una celda de combustible de metanol directo de bajo impacto ambiental.

- [12] Marcelo, P. S. (1995). Los sistemas anaeróbicos de generación de energía y su aplicación a los submarinos. *Los Sistemas Anaeróbicos De Generación De Energía Y Su Aplicación a Los Submarinos*.
- [13] Martins, M. E., Peretti, H. A., Spinadel, E., Zinola, C. F., & Visintin, A. (2008). Conversión y almacenamiento de energía basados en hidrógeno: Estado del arte y propuesta de estrategias en el Mercosur. *Revista Técnica De La Facultad De Ingeniería Universidad Del Zulia*, 31(2), 99-114.
- [14] Petroleum, B. (2009). Statistical review of world energy 2009. *BP, London*.
- [15] Revista General de Marina.
- [16] Romero González, J. *DISEÑO DE UN GENERADOR ELÉCTRICO MEDIANTE HIDRÓGENO EÓLICO Y PILA DE COMBUSTIBLE EN LA ENM*.
- [17] Rosa Iglesias, M. F. (2008). Hidrógeno como vector energético: Elementos y usos.
- [18] Rusman, N., & Dahari, M. (2016). A review on the current progress of metal hydrides material for solid-state hydrogen storage applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(28), 12108-12126
- [19] Sintra, Ana Carolina dos Reis. (2021). Estudio comparativo dos diferentes sistemas AIP existentes utilizando lógica difusa. *Estudio Comparativo Dos Diferentes Sistemas AIP Existentes Utilizando Lógica Difusa*.
- [20] Turner, J. A. (1999). A Realizable Renewable Energy Future. *Science*, 285(5428), 687-689. 10.1126/science.285.5428.687.
- [21] Villalba Herreros, A., Santiago Carretero, O., D Amore Domenech, R., Abad Arroyo, R., & Leo Mena, T. J. (2017). *Pila de combustible de metanol directo aplicada a vehículos autónomos submarinos*. E.T.S.I. Navales (UPM).
- [22] Muñoz Hernández, G. A., & MUÑOZ HERNANDEZ, G. A. (2016). *Reconfiguración De Un Motor Stirling Para Generación De Energía Basada En Combustión Limpia*.
- [23] “DCNS group,” [Online]. Available: <http://www.dcnsgroup.com/files/pdf/Mesma.pdf>. [Acceso 11 enero 2022].
- [24] Gamboa García, F., Ángel, M., Rodríguez, G., & Gil, AG (2015). Estudio de los sistemas de propulsión AIP y sus líneas de desarrollo. Análisis y propuesta de aplicación en la Armada
- [25] Puig-Pla, C., & i Rosell, A. R. (2009). Narcís Monturiol (1819-1885), pioneer of submarine navigation. *Contributions to Science*, 147-157.
- [26] IEA – International Energy Agency. IEA. <https://www.iea.org>
- [27] Asociación Nacional de Ingenieros de ICAI. Asociación/Colegio Nacional de Ingenieros ICAI. <https://www.icaei.es/>
- [28] *Acerca de Grupo Edefa, S.A. - Noticias Defensa*. (2015). Defensa.com. <https://www.defensa.com/quienes-somos/acerca-de-grupo-edefa-sa>
- [29] García Ruíz, M. (2015). Pasado, presente y futuro de vehículos eléctricos.
- [30] Kosow, I. L. (2021). *Máquinas eléctricas y transformadores*. Reverté.
- [31] Larminie, J., & Lowry, J. (2003). *Electric Vehicle Technology Explained*. John Wiley & Sons, Ltd. 10.1002/0470090707

- [32] Ghosh, P. C., & Vasudeva, U. (2011a). Analysis of 3000T class submarines equipped with polymer electrolyte fuel cells. *Energy (Oxford)*, 36(5), 3138-3147. 10.1016/j.energy.2011.03.003
- [33] Bertran, J. M. *Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas MEMORIA Autor: Escola Técnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona*
- [34] *CONOCIMIENTOS GENERALES DE LOS SUBMARINOS "SERIE 70" SECRETARIA TECNICA*
- [35] Bove, R., & Ubertini, S. (2008). *Modelling solid oxide fuel cells: methods, procedures and techniques*. Springer Science & Business Media.
- [36] Zamora Belver, I., Ignacio, J., Martín, S., Eguía, P., Kevin, J., & Muñoz, M. *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE PEMFC*
- [37] Zhang, C., Jiang, J., Zhang, L., Liu, S., Wang, L., & Loh, P. (2016). A Generalized SOC-OCV Model for Lithium-Ion Batteries and the SOC Estimation for LNMCO Battery. *Energies (Basel)*, 9(11), 900. 10.3390/en9110900
- [38] Universidad Carlos III de Madrid. (2020). *Modelado de una pila de combustible del tipo PEM para el uso en la automoción*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10016/15940>.
- [39] Delgado, E., Serrano, D., Montoya, L., Peralta, J., & Moreira, C. (2017). *ESTUDIO Y MODELIZACIÓN DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE SOFC*. Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions. 10.18687/laccei2017.1.1.320
- [40] *The Fuel Cell Industry Review 2012 ACKNOWLEDGEMENTS*
- [41] *Fuel Cell Power Module for Heavy Duty Motive Applications*
- [42] *Fuel Cell Today*. (2014). <http://www.fuelcelltoday.com/>
- [43] Li, Q., Chen, W., Liu, Z., Li, M., & Ma, L. (2015). Development of energy management system based on a power sharing strategy for a fuel cell-battery-supercapacitor hybrid tramway. *Journal of Power Sources*, 279, 267-280.
- [44] Živanović, Z. (2017). Perspectives of application of fuel cell electric buses—some experiences from their operation.
- [45] SN, M., & Tremblay, O. (2009). M. Ieee, L. Dessaint, and SM Ieee, “A Generic Fuel Cell Model for the Simulation of Fuel Cell Vehicles,” 2009 IEEE Veh. Paper presented at the *Power Propuls. Conf*, 1722-1729.
- [46] Rabienataj Darzi, A. A., Hassanzadeh Afrouzi, H., Alizadeh, E., Shokri, V., & Farhadi, M. (2017). Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer during Absorption of Hydrogen in Metal Hydride Tank. *Heat Transfer, Asian Research*, 46(1), 75-90. 10.1002/htj.21199
- [47] Lys, A., Fadonougbo, J. O., Faisal, M., Suh, J., Lee, Y., Shim, J., Park, J., & Cho, Y. W. (2020). *Enhancing the Hydrogen Storage Properties of AxBy Intermetallic Compounds by Partial Substitution: A Short Review*. MDPI AG. 10.3390/hydrogen1010004
- [48] Afonso, G., Bonakdarpour, A., & Wilkinson, D. P. (2013). Hydrogen storage properties of the destabilized 4NaBH₄/5Mg₂NiH₄ composite system. *The Journal of Physical Chemistry C*, 117(41), 21105-21111.
- [49] Dolotko, O., Gupta, S., Kobayashi, T., McDonald, E., Hlova, I., Majzoub, E., Balema, V. P., Pruski, M., & Pecharsky, V. K. (2019). Mechanochemical reactions and hydrogen storage capacities in MBH₄–SiS₂ systems (MLi or Na). *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(14), 7381-7391.

- [50] Duan, C., Cao, Y., Hu, L., Fu, D., Ma, J., & Youngblood, J. (2019). An efficient mechanochemical synthesis of alpha-aluminum hydride: synergistic effect of TiF₃ on the crystallization rate and selective formation of alpha-aluminum hydride polymorph. *Journal of Hazardous Materials*, 373, 141-151.
- [51] Javadian, P., Zlotea, C., Ghimbeu, C. M., Latroche, M., & Jensen, T. R. (2015). Hydrogen storage properties of nanoconfined LiBH₄–Mg₂NiH₄ reactive hydride composites. *The Journal of Physical Chemistry C*, 119(11), 5819-5826.
- [52] Severa, G., Rönnebro, E., & Jensen, C. M. (2010). Direct hydrogenation of magnesium boride to magnesium borohydride: demonstration of > 11 weight percent reversible hydrogen storage. *Chemical Communications*, 46(3), 421-423.
- [53] Su, W., Zhu, Y., Zhang, J., Liu, Y., Yang, Y., Mao, Q., & Li, L. (2016). Effect of multi-wall carbon nanotubes supported nano-nickel and TiF₃ addition on hydrogen storage properties of magnesium hydride. *Journal of Alloys and Compounds*, 669, 8-18.
- [54] Vajo, J. J., Mertens, F., Ahn, C. C., Bowman Jr, R. C., & Fultz, B. (2004). Altering hydrogen storage properties by hydride destabilization through alloy formation: LiH and MgH₂ destabilized with Si. *The Journal of Physical Chemistry B*, 108(37), 13977-13983.
- [55] Aruna, R., & Christa, S. J. (2020). Modeling, system identification and design of fuzzy PID controller for discharge dynamics of metal hydride hydrogen storage bed. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 4703-4719.
- [56] Talaganis, B. A., Meyer, G. O., & Aguirre, P. A. (2011). Modelling and simulation of absorption–desorption cyclic processes for hydrogen storage-compression using metal hydrides. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(21), 13621-13631.
- [57] DOE, U. S. (2017). *Technical System Targets: Onboard Hydrogen Storage for Light-Duty Fuel Cell Vehicles*
- [58] Gamboa García, F., Ángel, M., Rodríguez, G., & Gil, A. G. (2015). *Estudio de los sistemas de propulsión AIP y sus líneas de desarrollo. Análisis y propuesta de aplicación en la Armada*
- [59] Maleki, A., & Askarzadeh, A. (2014). Optimal sizing of a PV/wind/diesel system with battery storage for electrification to an off-grid remote region: A case study of Rafsanjan, Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7, 147-153. 10.1016/j.seta.2014.04.005
- [60] Mikhaylov, K. (2012). Development of Energy Efficiency Aware Applications Using Commercial Low Power Embedded Systems. *IntechOpen*. 10.5772/38171
- [61] Gan, L. K., Shek, J. K., & Mueller, M. A. (2015). Hybrid wind–photovoltaic–diesel–battery system sizing tool development using empirical approach, life-cycle cost and performance analysis: A case study in Scotland. *Energy Conversion and Management*, 106, 479-494.
- [62] Lan, H., Wen, S., Hong, Y., David, C. Y., & Zhang, L. (2015). Optimal sizing of hybrid PV/diesel/battery in ship power system. *Applied Energy*, 158, 26-34.
- [63] Maleki, A., & Askarzadeh, A. (2014a). Optimal sizing of a PV/wind/diesel system with battery storage for electrification to an off-grid remote region: A case study of Rafsanjan, Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7, 147-153.
- [64] Brighton, D. R., Mart, P. L., Clark, G. A., & Rowan, M. (1994). The use of fuel cells to enhance the underwater performance of conventional diesel electric submarines. *Journal of Power Sources*, 51(3), 375-389.

- [65] Garcia, P., Torreglosa, J. P., Fernandez, L. M., & Jurado, F. (2013). Optimal energy management system for stand-alone wind turbine/photovoltaic/hydrogen/battery hybrid system with supervisory control based on fuzzy logic. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(33), 14146-14158.
- [66] Harris, J. (2000). *An introduction to fuzzy logic applications*. Springer Science & Business Media.
- [67] Li, Q., Chen, W., Li, Y., Liu, S., & Huang, J. (2012). Energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle based on fuzzy logic. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 43(1), 514-525.
- [68] Tanaka, K., & Tanaka, K. (1997). *An introduction to fuzzy logic for practical applications*. Springer.
- [69] *First Submarine Turtle, Robot Transparent Png*. Pngset.com. <https://pngset.com/download-free-png-xhsqq>.
- [70] S.L, E. P. *Del submarino Isaac Peral al S-80, la revolucionaria tecnología de las 'pilas' fabricadas por Tudor*. Murciaplaza. <https://murciaplaza.com/del-submarino-isaac-peral-al-s-80-la-revolucionaria-tecnologia-de-las-pilas-fabricadas-por-tudor>.
- [71] Baccouche, I., Essoukri, N., Amara, B., Baccouche, I., Jemmali, S., Mlayah, A., Manai, B., Essoukri, N., & Amara, B. (2018). *Implementation of an Improved Coulomb-Counting Algorithm Based on a Piecewise SOC-OCV Relationship for SOC Estimation of Li-Ion Battery*
- [72] Motores Eléctricos Monofásicos y Trifásicos: Tipos de Motores Trifásicos. (2014, jueves, 19 de junio de). <https://proyectoelectricidadindustria.blogspot.com/2014/06/tipos-de-motores-trifasicos.html>
- [73] Digital, C. (2015). *La Armada busca en Francia una solución para evitar que España se quede sin submarinos*. Confidencial Digital. <https://www.elconfidencialdigital.com/articulo/defensa/Armada-Francia-solucion-Espana-submarinos/20150821152940078375.html>
- [74] *Sistemas AIP en submarinos - Noticias SENER* (2015).

ANEXO I: DATOS DEL FABRICANTE



BALLARD®
SMARTER SOLUTIONS FOR A CLEAN ENERGY FUTURE





➤ **FCvelocity-HD6**

Ballard Experience
Since 1992, Ballard Power Systems has developed and demonstrated five generations of heavy duty fuel cell modules for bus applications. Demonstration programs and field trials have been held in the US, Canada, Western Europe, Iceland, Australia and China. Ballard powered buses have accumulated more than 200,000 hours of operation, covering more than three million kilometers and transporting more than seven million passengers.

6th Generation Module
Based on the state of the art automotive fuel cell stack, Ballard's FCvelocity-HD6 fuel cell module offers a design ideal for integration into bus applications.

With the next-generation Ballard fuel cell at its core, the FCvelocity-HD6 establishes a new standard for cost, through design for volume manufacturing, and compatibility with customer system requirements. The heavy duty power-module features a control unit that can interface with a system controller, making it a plug and play product for any fuel cell or hybrid fuel cell bus platform.

This next-generation module also offers significant advances in durability, power density and fuel efficiency.

Availability
Please contact any of the following Ballard representatives for discussions regarding Ballard's next- generation heavy duty fuel cell module.

- Daljit Bawa (daljit.bawa@ballard.com)
- Jeff Grant (jeff.grant@ballard.com)

➤ **PRODUCT SPECIFICATIONS**

Gross Power:		75 kW	150 kW
Performance:	DC voltage	230 – 365V	465 – 730V
	Maximum current	300A	300A
Physical:	Weight (dry)	350 kg (772 lbs)	404 kg (891 lbs)
	Length x width x height (including controller box)	1530 x 871 x 495 mm (60 x 34 x 19 in)	
Fuel:	Gaseous hydrogen	Commercial grade (per SAE J2719)	
Oxidant:	Air		
Coolant:	50/50 Pure Ethylene Glycol and Water		
Operating Conditions:	Coolant Temperature (nominal)	63°C (149°F)	
	Fuel pressure (minimum)	16 barg	
	Air pressure (nominal)	1.2 barg	
Additional Features:	Control interface	CANbus	
	Enclosure	IP53	

Specifications and descriptions in this document were in effect at the time of publication. Ballard Power Systems, Inc. reserves the right to change specifications, product appearance or to discontinue products at any time (04/2011)

BALLARD®, Ballard®, Powered by Ballard®, FCgen® and FCvelocity® are trademarks of Ballard Power Systems Inc.
SPCS101744-0H

Ballard Power Systems, Inc.
9000 Glenlyon Parkway
Burnaby, British Columbia
Canada, V5J 5J8

TEL: (+1) 604.454.0900
FAX: (+1) 604.412.4700
www.ballard.com

Figura A - 1: Datos fabricante pila combustible.



Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) Battery

25.6-100(25.6V, 100AH)

Especificaciones batería LiFePO₄

- **Más ciclos de vida:** Ofrece una vida útil en ciclos hasta 10 veces mayor y una vida útil en flotación/nominal cinco veces mayor que baterías de plomo ácido convencionales, lo que ayuda a minimizar el costo de reemplazo y reducir el costo total de propiedad.
- **Menor peso:** Alrededor el 40% del peso de una batería de plomo ácido comparable. Un sustituto 'directo' para las baterías de plomo.
- **Más potencia:** Proporciona el doble de potencia que una batería de plomo ácido, incluso con altas intensidades de descarga mantiene una capacidad de energía elevada.
- **Mayor rango de temperatura de trabajo:** : -20°C~60°C.
- **Más seguridad:** La tecnología LiFePO₄ elimina el riesgo de explosión o combustión por impacto, sobrecarga o cortocircuito.
- **Mayor flexibilidad:** El BMS permite hasta dos baterías en serie o cuatro baterías en paralelo para incrementar la capacidad.

Aplicaciones

- Vehículos eléctricos y movilidad eléctrica en general
- Sistemas solares/eólicos
- Sistemas SAI
- Telecomunicaciones
- Equipamiento médico
- Caravanas

Especificaciones

Características eléctricas	Voltaje nominal	25.6V
	Capacidad nominal	100
	Energía	2560Wh
	Resistencia interna	≤ 20mΩ
	Ciclos vida	>2000 ciclos @ 0.2C 80%DOD
	Autodescarga por mes	<3%
	Eficiencia de carga	99% @0.5C
Valores carga	Eficiencia de descarga	96~99% @1C
	Voltaje de carga	14.6±0.2V
	Forma de carga	0.3C hasta 14.6V, después 14.6V, I carga hasta 0.02C (CC/CV)
	Intensidad de carga	30A
	Intensidad máx. de carga	50A
Valores descarga	Voltaje fin de carga	15.6V±0.2V
	Intensidad continua	50A
	Pico máx. descarga	100A
	Voltaje fin de descarga	10V
Condiciones ambientales	Rango temp. de carga	0 °C to 55 °C (32F to 113F) @60±25% Humedad relativa
	Rango temp. de descarga	-10 °C to 60 °C (-4F to 140F) @60±25% Humedad relativa
	Temp. de almacenamiento	0°C to 25 °C (32F to 104F) @60±25% Humedad relativa
	Protección	IP56
Dimensiones	Celdas & conexionado	32650 8S16P
	Recipiente plástico	ABS
	Dimensiones (in./mm.)	520*269*203mm
	Peso (lbs./kg.)	28kg
	Terminal	M8
	Bluetooth	SI
	SOC	0-100% APP Bluetooth



Figura A - 2: Datos fabricante baterías.

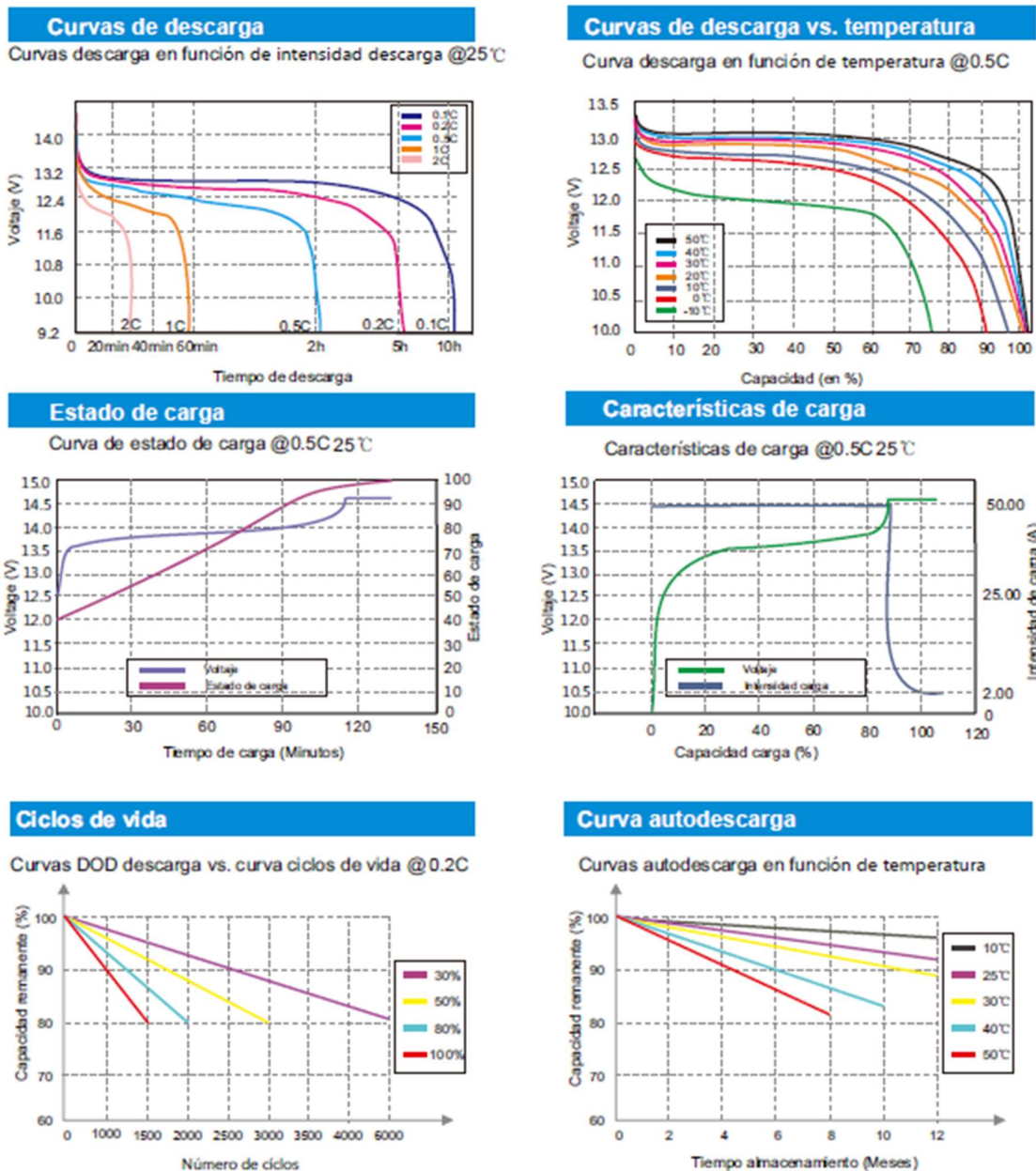


Figura A - 3: Curvas fabricante baterías.

ANEXO II: TABLAS COMPLEMENTARIAS

Nomenclature		SC	stoichiometric coefficient
t	time, s	sl	plateau slope coefficient
m	mass, g or kg	ϵ	porosity
f	hydrogen flow, g s^{-1} or kg s^{-1}	Subscripts	
r	reaction rate, $\text{g}_{\text{MH}} \text{g}_{\text{S}}^{-1} \text{s}^{-1}$	a	absorption
T	temperature, K	d	desorption
P	pressure, bar	heat	heating
A	heat interchange area, m^2	cool	cooling
V	volume, m^3	eq	equilibrium
U	overall heat transfer coefficient, $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	H ₂	hydrogen
λ	thermal conductivity, $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	MH	metal hydride
h	conductance, $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	Al	Aluminum
ΔH	enthalpy, J mol^{-1}	S	solid
ΔS	entropy, $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$	g	gas
C	kinetic constant, s^{-1}	w	refrigerating/heating water
E	activation energy, J mol^{-1}	out	outlet
c_p	specific heat, $\text{J g}^{-1} \text{K}^{-1}$ or $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	in	inlet
R	universal gas constant, $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$	ini	initial
wt%	hydrogenation capacity in weight percent	fin	final
MW	molecular weight, g mol^{-1} or kg mol^{-1}		

Figura A - 4: Nomenclatura datos para modelo hidruro metálico.

	Parameter	Case 1	Case 2	Units	Reference
	Material	LaNi ₅	LaNi ₅		
Hydride physicochemical properties	ΔH_a	-30,478	-30,478	$\text{J mol}_{\text{H}_2}^{-1}$	[20,24]
	ΔH_d	30,800	30,800	$\text{J mol}_{\text{H}_2}^{-1}$	
	ΔS_a	-108	-108	$\text{J mol}_{\text{H}_2}^{-1} \text{K}^{-1}$	[25]
	ΔS_d	108	108	$\text{J mol}_{\text{H}_2}^{-1} \text{K}^{-1}$	
	E_a	21,170	21,170	$\text{J mol}_{\text{H}_2}^{-1}$	
	E_d	16,420	16,420	$\text{J mol}_{\text{H}_2}^{-1}$	
	C_a	59.2	59.2	s^{-1}	[20]
	C_d	9.6	9.6	s^{-1}	
	c_{ps}	355	355	$\text{J kg}^{-1} \text{s K}^{-1}$	
	λ	0.66	0.66	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	
	sl	0.13	0.13		[20]
	MW_{MH}	0.432	0.432	$\text{kg}_{\text{MH}} \text{mol}^{-1}_{\text{MH}}$	
	$\text{wt\%}_{\text{max}}$	1.39	1.39		
Reactor design	V_g	0.0172	0.013	$\text{m}_{\text{H}_2}^3$	
	A	5.4	4.147	m^2	
	h	500	500	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	
	U	243	243	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	
	m_b	143	109.3	kg_s	
	length	1	1	m	
	n° of tubes	68	52		
	diameter	0.0254	0.0254	m	
Operating conditions	P_a	5	5	bar	
	P_d	6	6	bar	
	T_{wa}	298	298	K	
	T_{wd}	353	353	K	
	T_{in}	290	290	K	
	t_a	1440	720	s	
	t_{heat}	360	180	s	
	t_d	1440	720	s	
	t_{cool}	360	180	s	
Other parameters	$c_{p\text{H}_2}$	14,300	14,300	$\text{J kg}_{\text{H}_2}^{-1} \text{K}^{-1}$	
	MW_{H_2}	0.002	0.002	$\text{kg}_{\text{H}_2} \text{mol}_{\text{H}_2}^{-1}$	
	R	8.314	8.314	$\text{J mol}_{\text{H}_2}^{-1} \text{K}^{-1}$	
	SC	3	3	$\text{mol}_{\text{H}_2} \text{mol}_{\text{MH}}^{-1}$	
	P_0	1	1	bar	
	ϵ	0.5	0.5		

Figura A - 5: Datos para modelo hidruro metálico.

ANEXO III: FUNCIONES DE PERTENENCIA

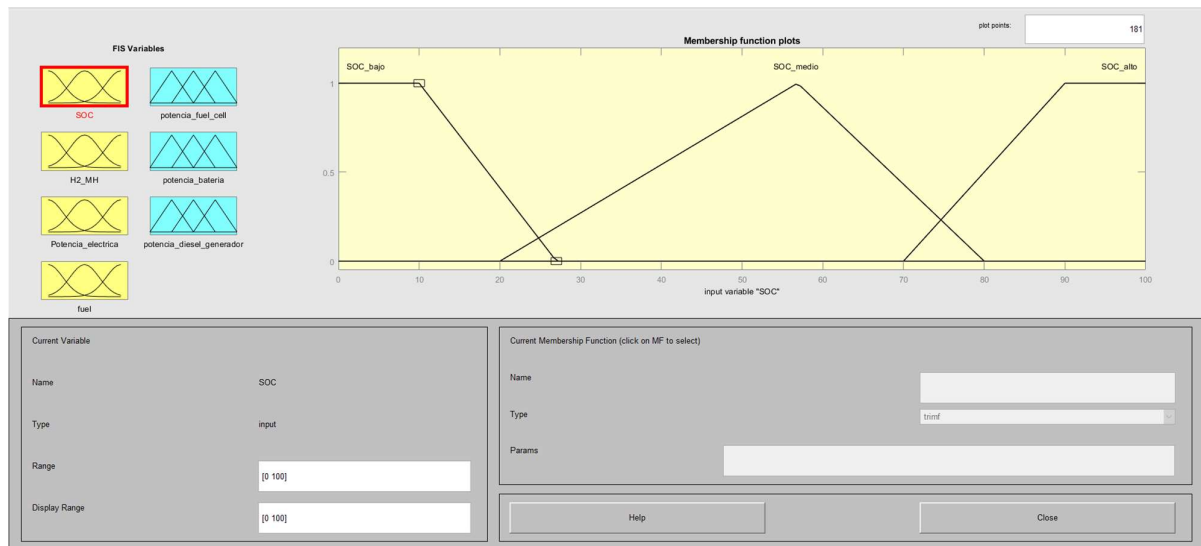


Figura A - 6: Función de pertenencia SOC.

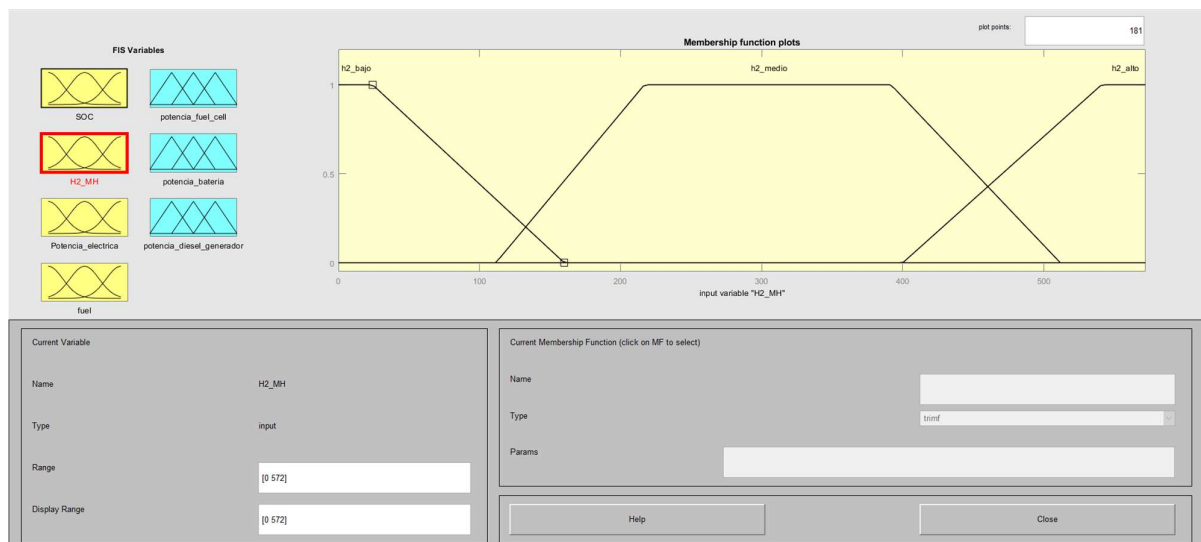


Figura A - 7: Función de pertenencia variable hidrógeno restante.

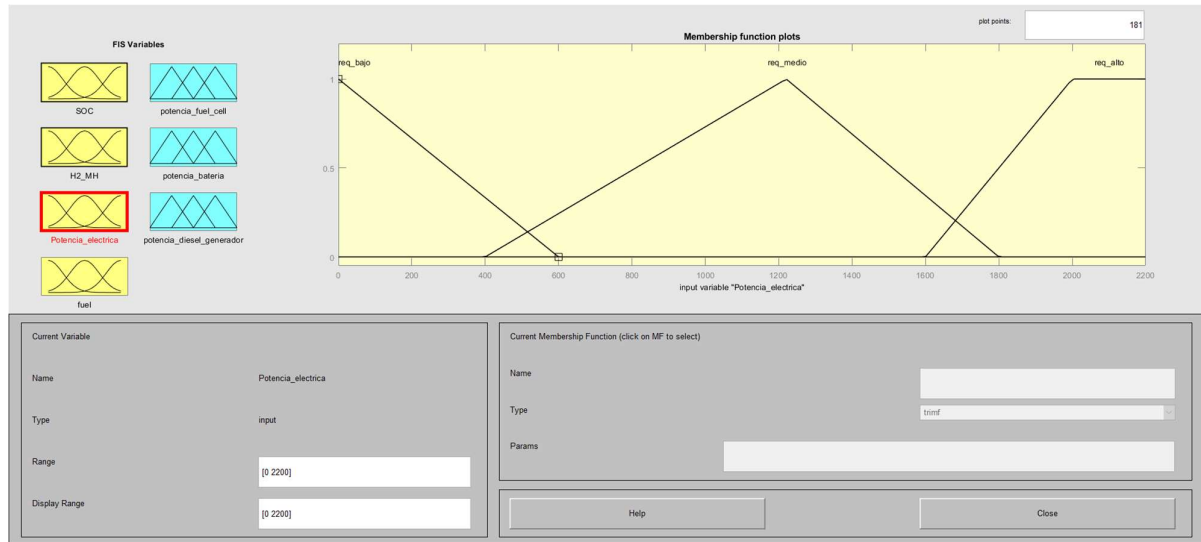


Figura A - 8: Función de pertenencia potencia eléctrica requerida.

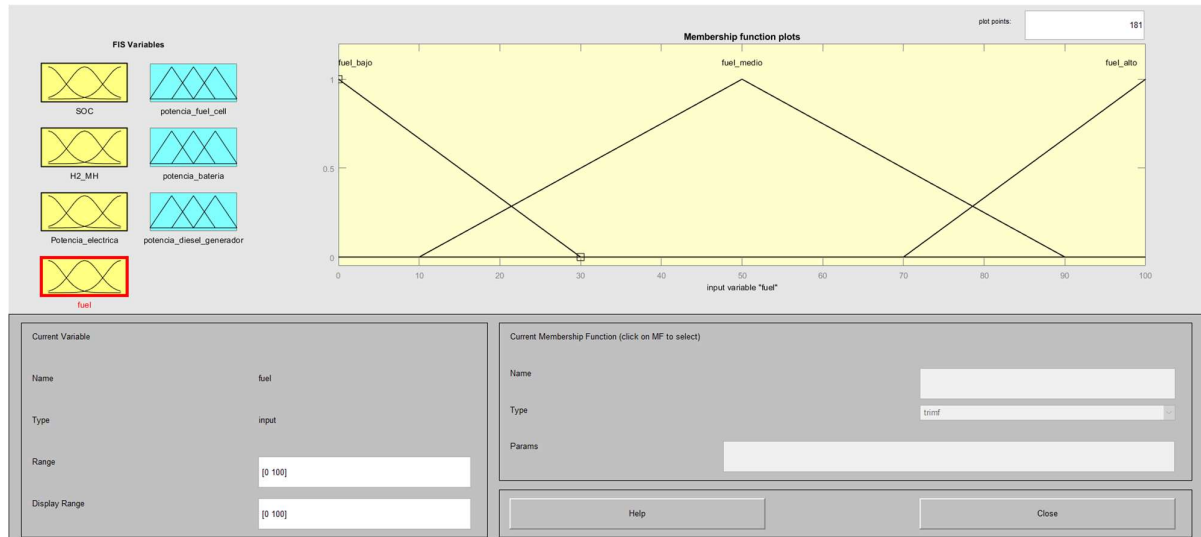


Figura A - 9: Función de pertenencia fuel restante.

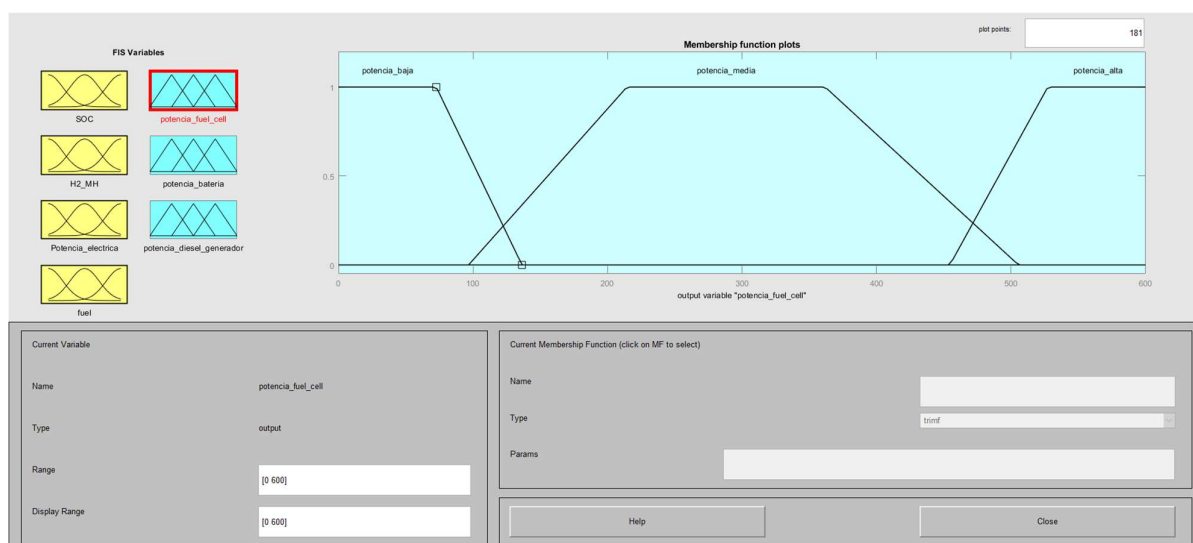


Figura A - 10: Función de pertenencia potencia pila de combustible.

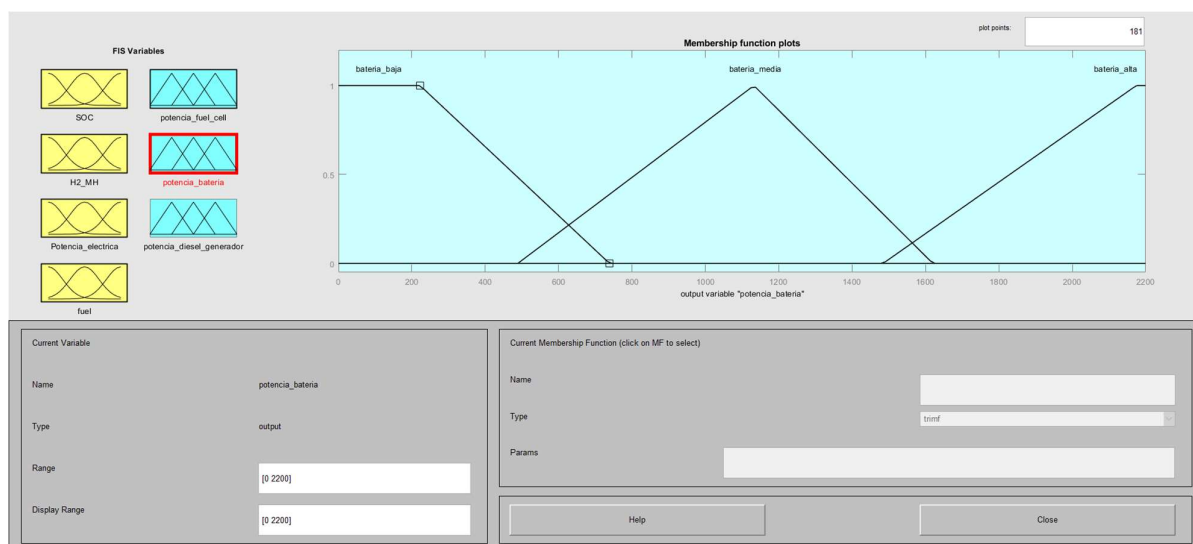


Figura A - 11: Función de pertenencia potencia en baterías.

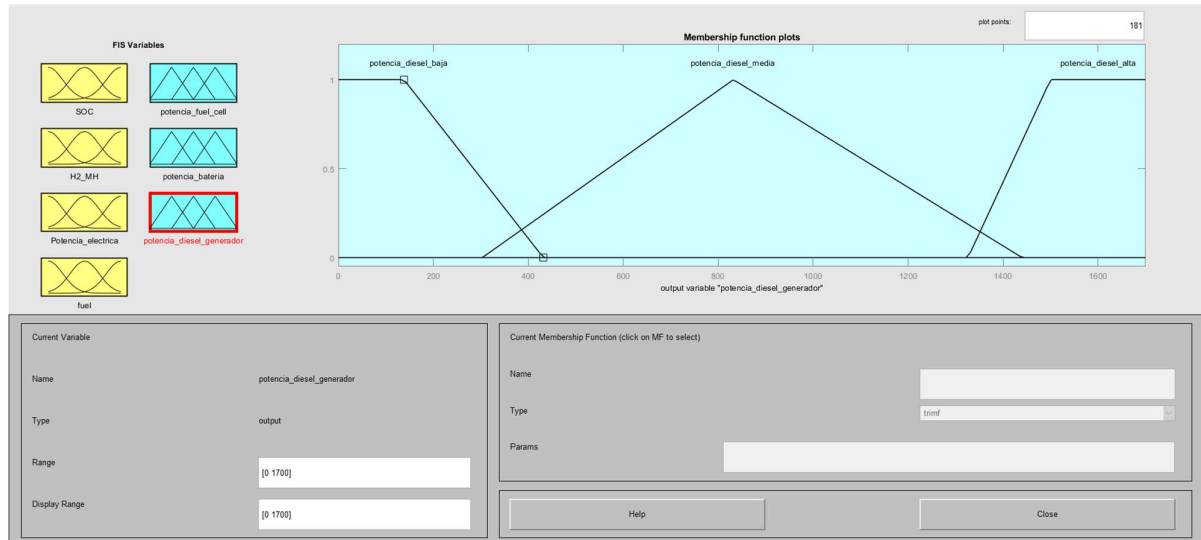
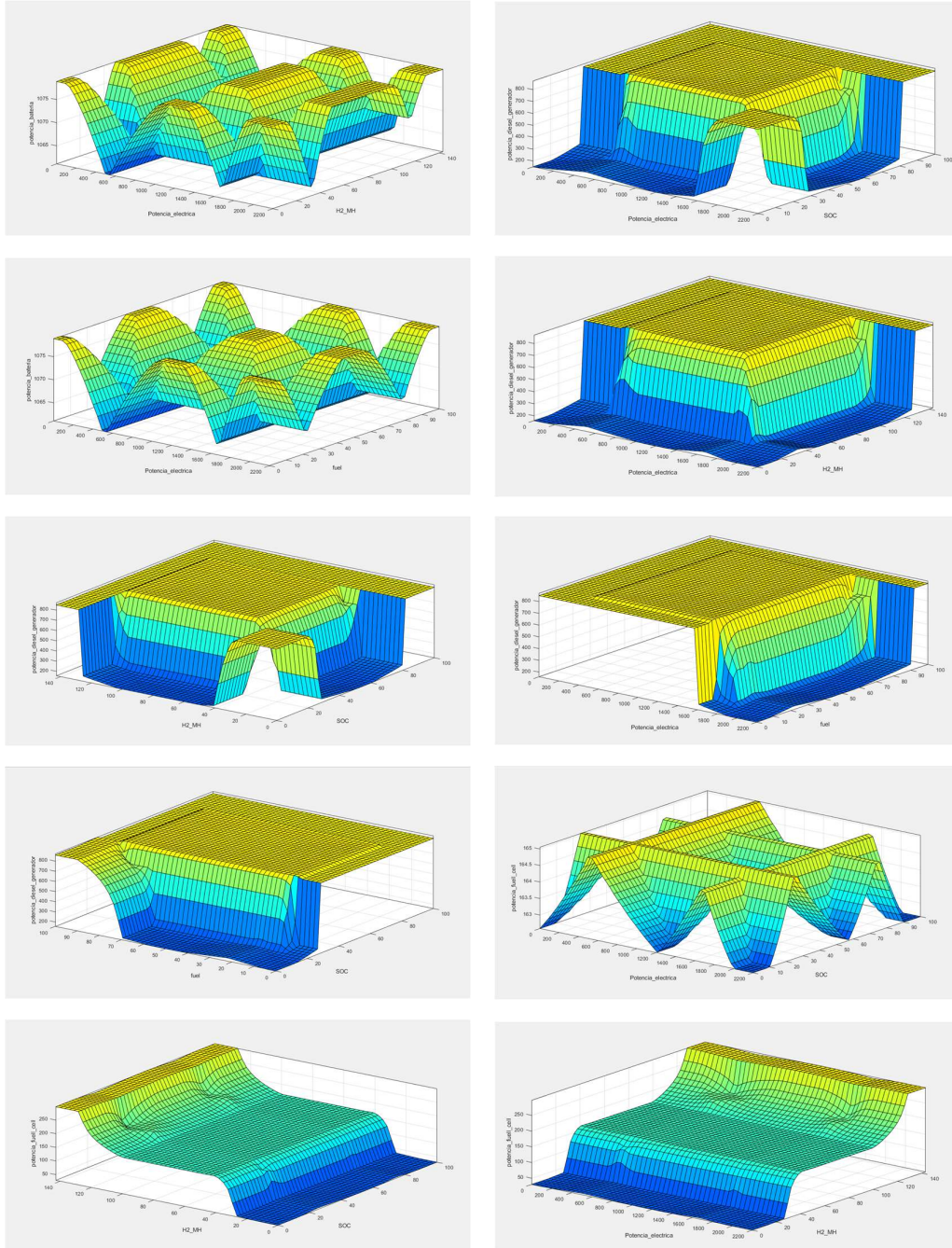


Figura A - 12: Función de pertenencia diésel generador.

ANEXO IV: SUPERFICIES DE RESPUESTA

Tabla A - 1: Superficies de respuesta configuraciones 1 y 2. [Fuente propia]



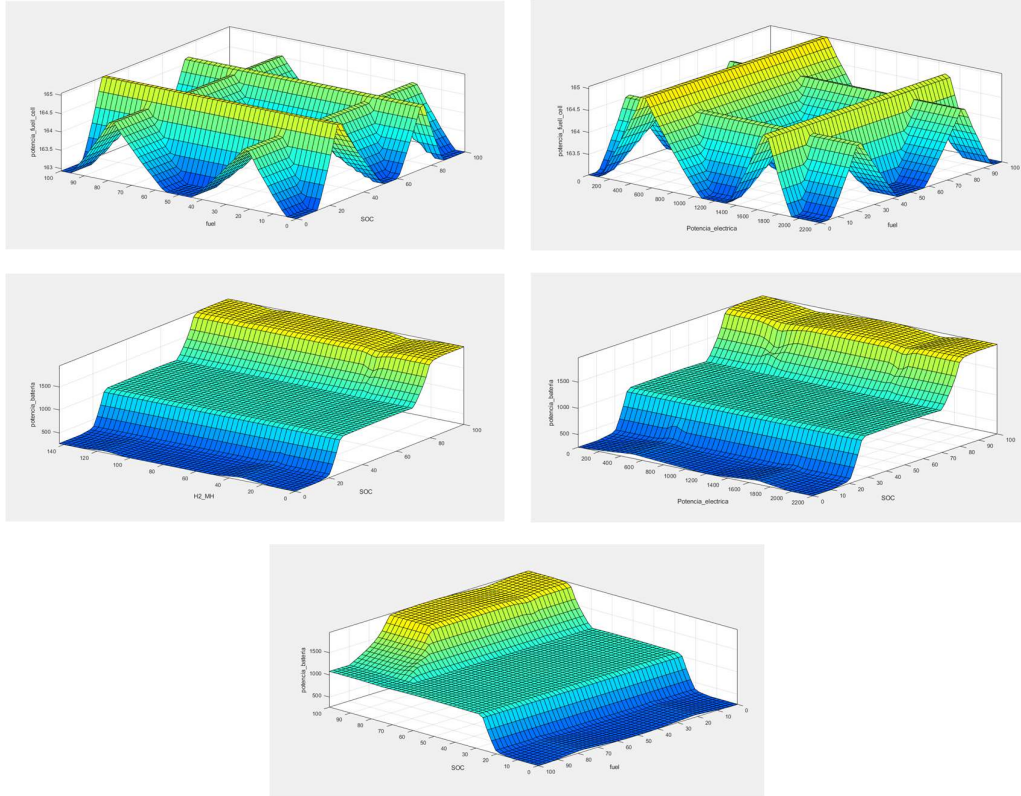
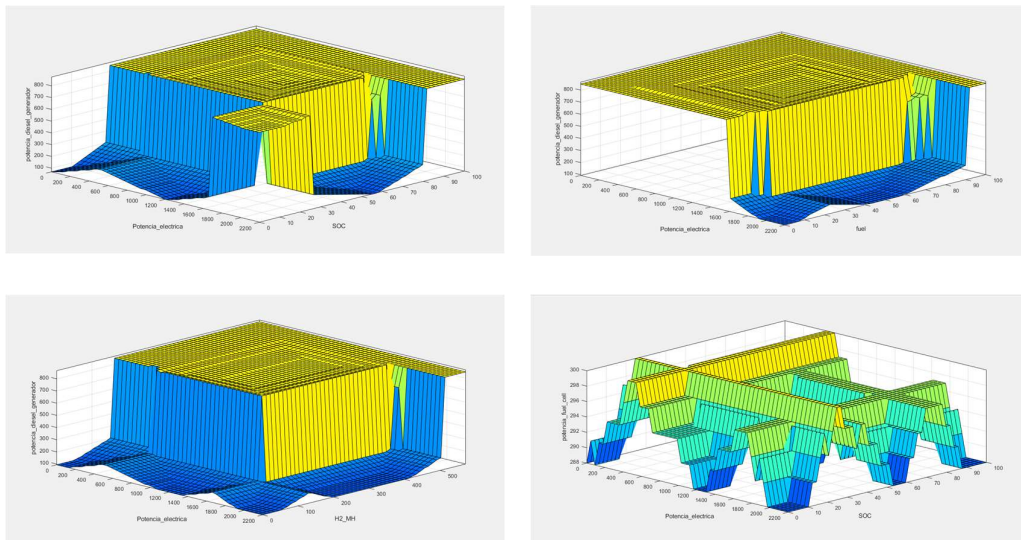
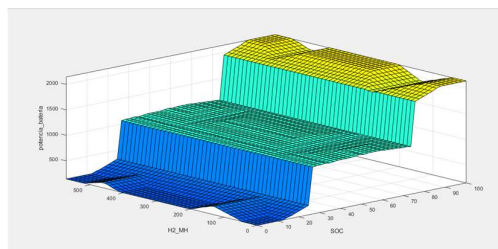
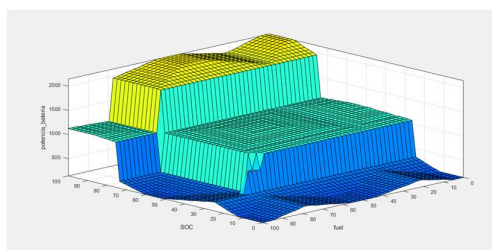
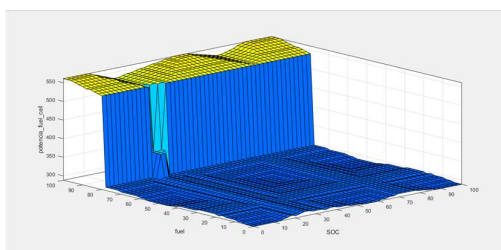
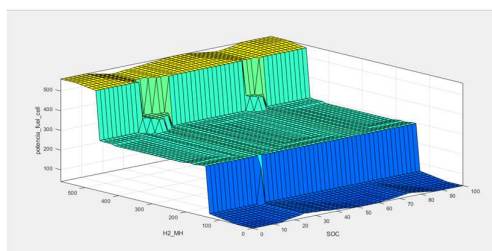
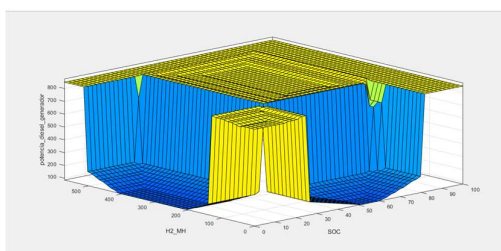
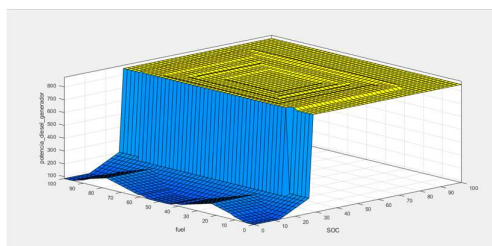
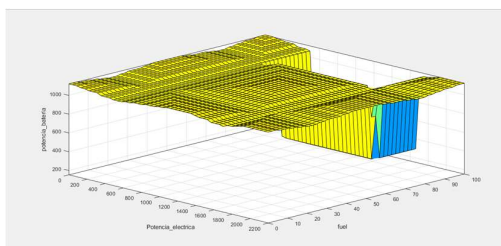
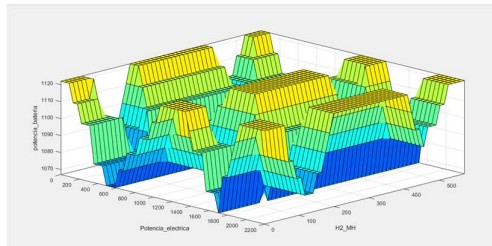
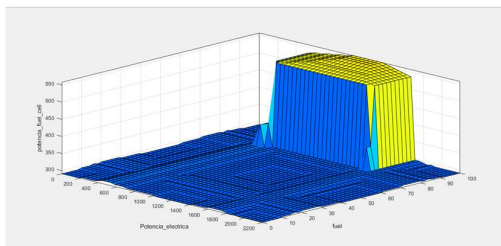
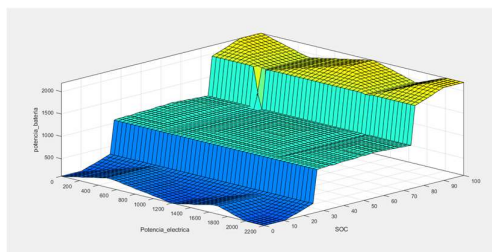
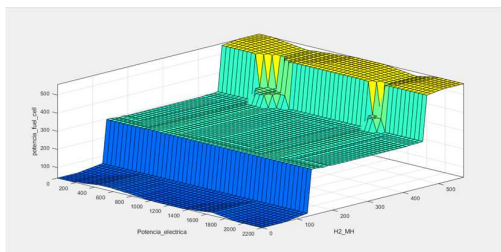


Tabla A - 2: Superficies de respuesta Configuración 3. [Fuente propia]





ANEXO V: BASES DE REGLAS

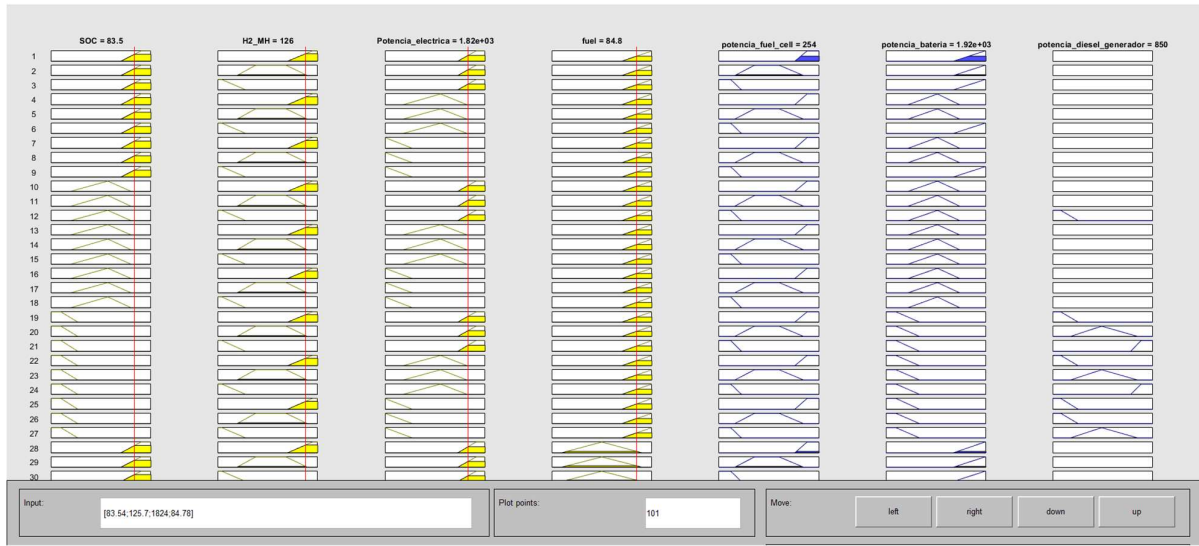


Figura A - 13: Reglas configuraciones 1 y 2.

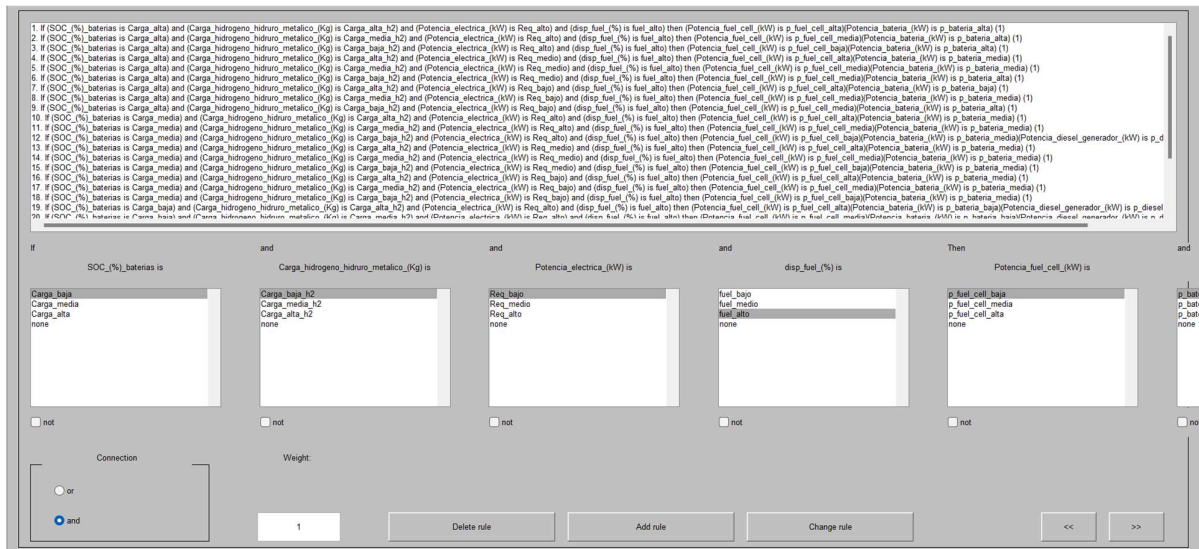


Figura A - 14: Reglas escritas configuraciones 1 y 2.

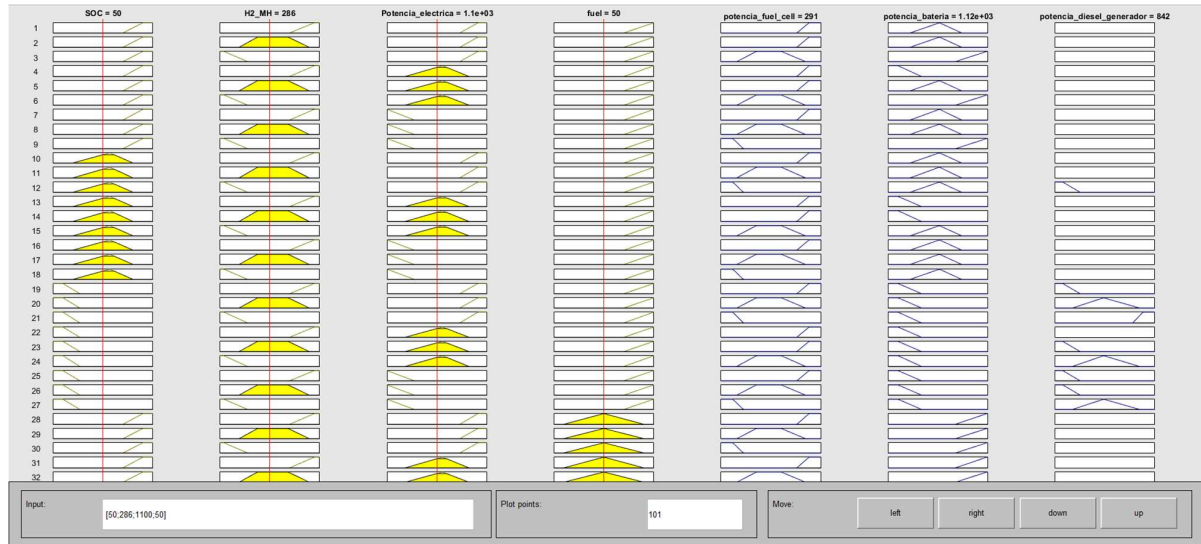


Figura A - 15: Base de reglas configuración 3.

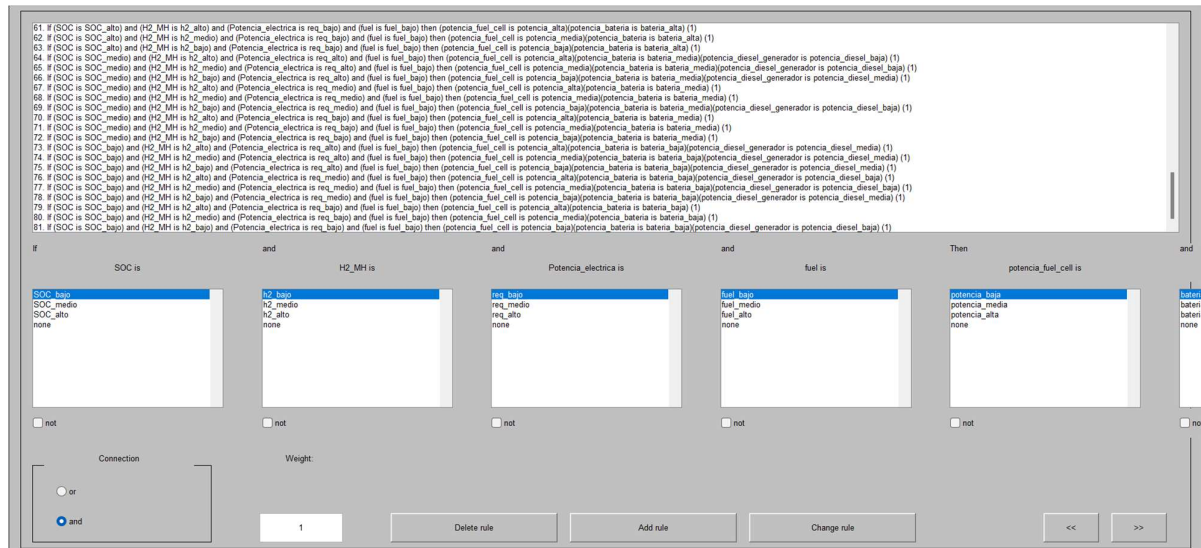


Figura A - 16: Reglas escritas configuración 3.

ANEXO VI: RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Simulación sin empleo de pila de combustible

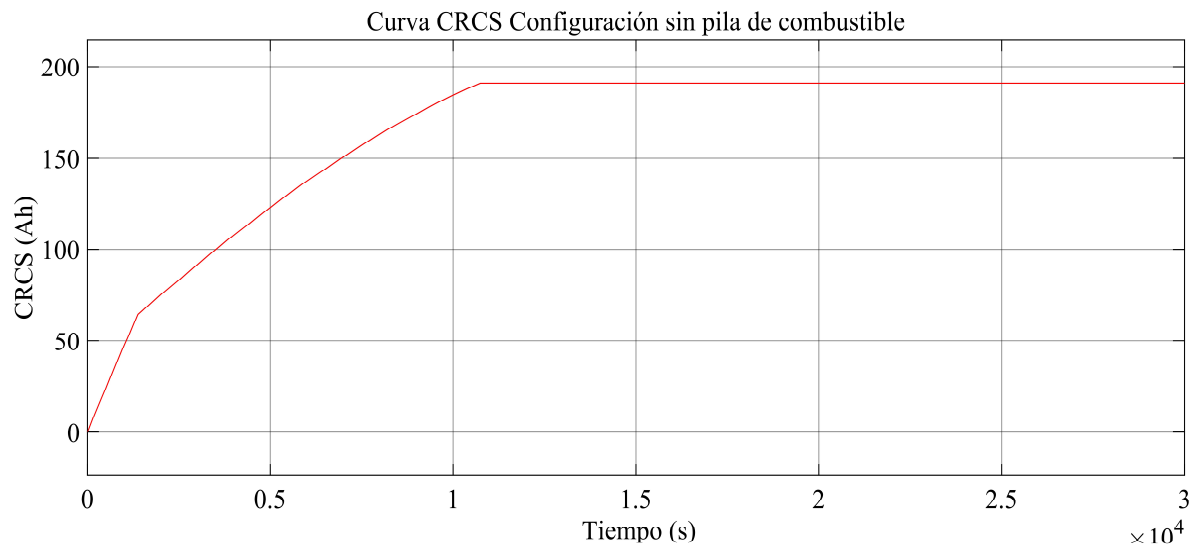


Figura A - 17: Curva CRCS simulación 1.

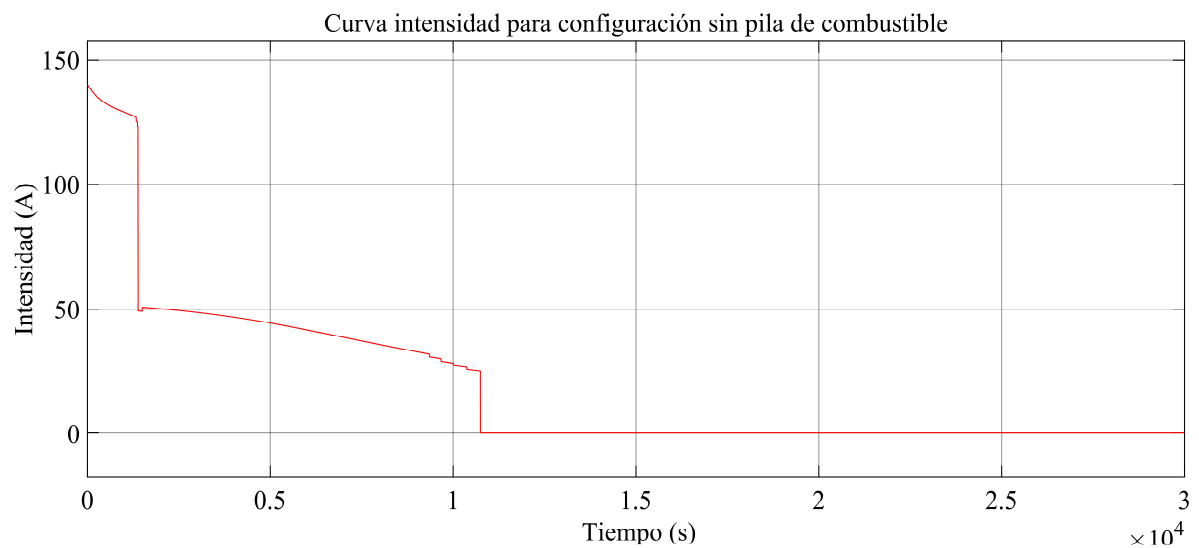


Figura A - 18: Curva Intensidad simulación 1.

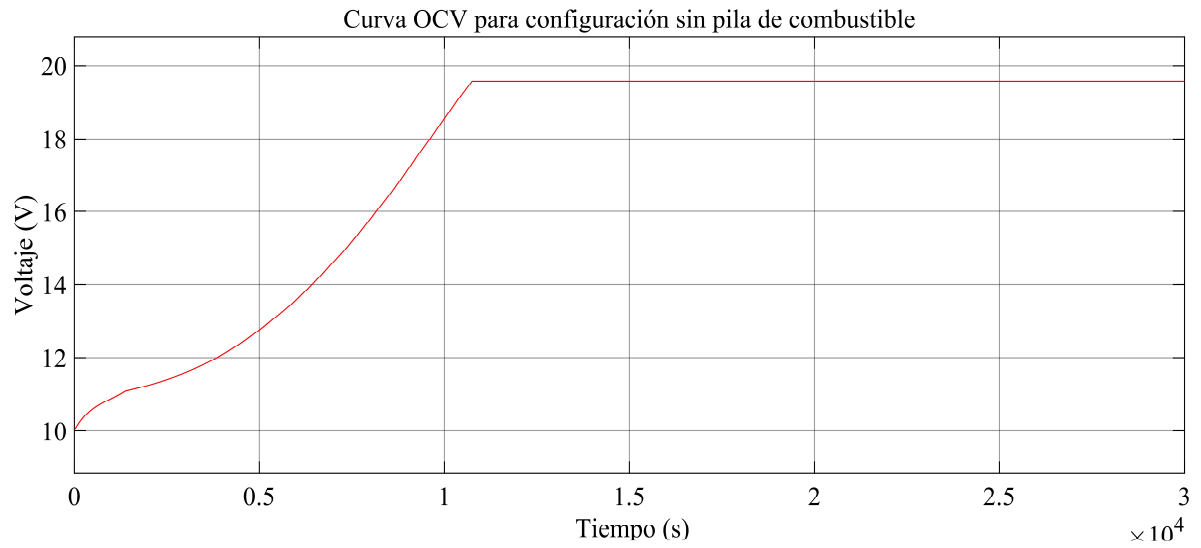


Figura A - 19: Curva OCV simulación 1.

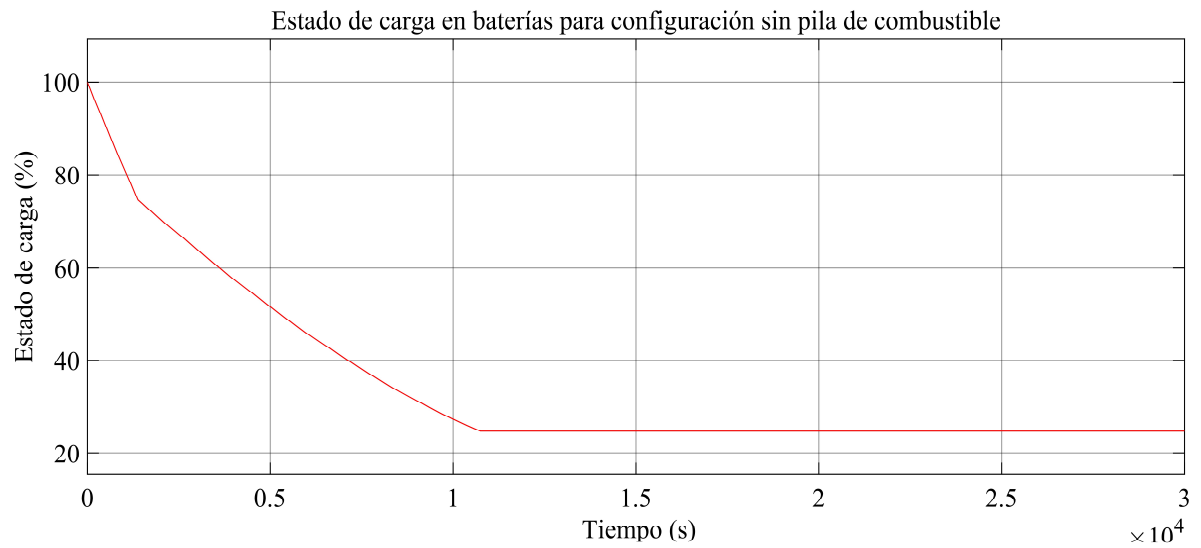


Figura A - 20: Curva SOC simulación 1.

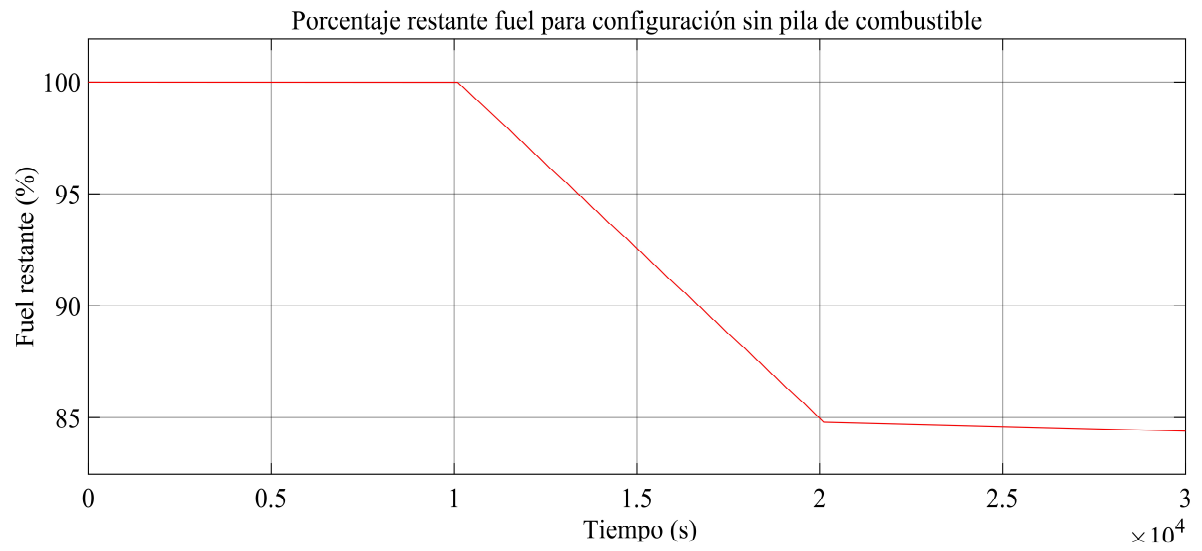


Figura A - 21: Fuel generador de emergencia simulación 1.

Simulación con empleo de 2 pilas de combustible

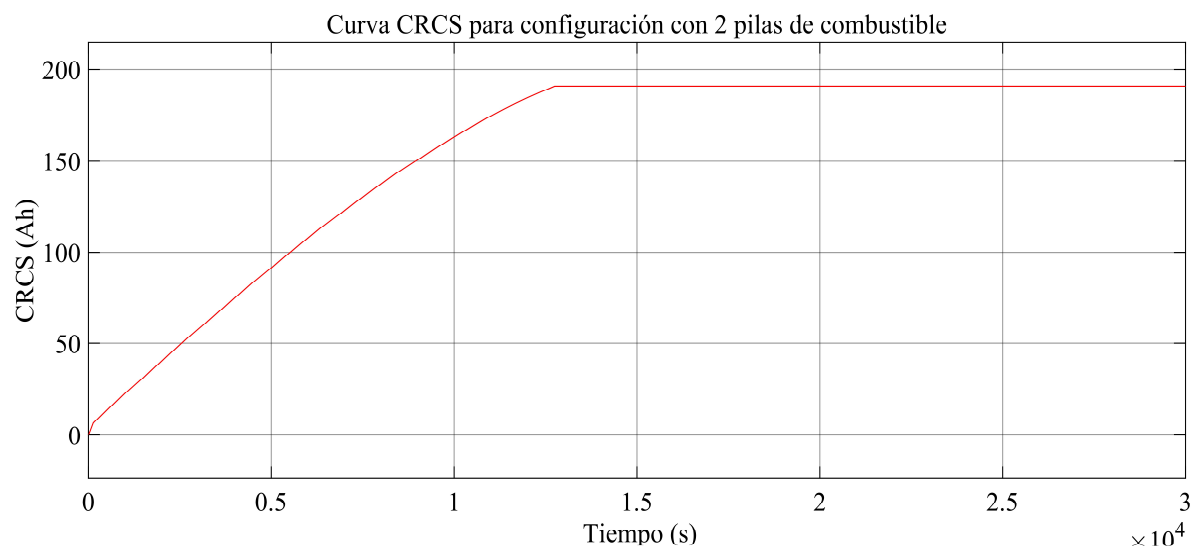


Figura A - 22: Curva CRCS simulación 2.

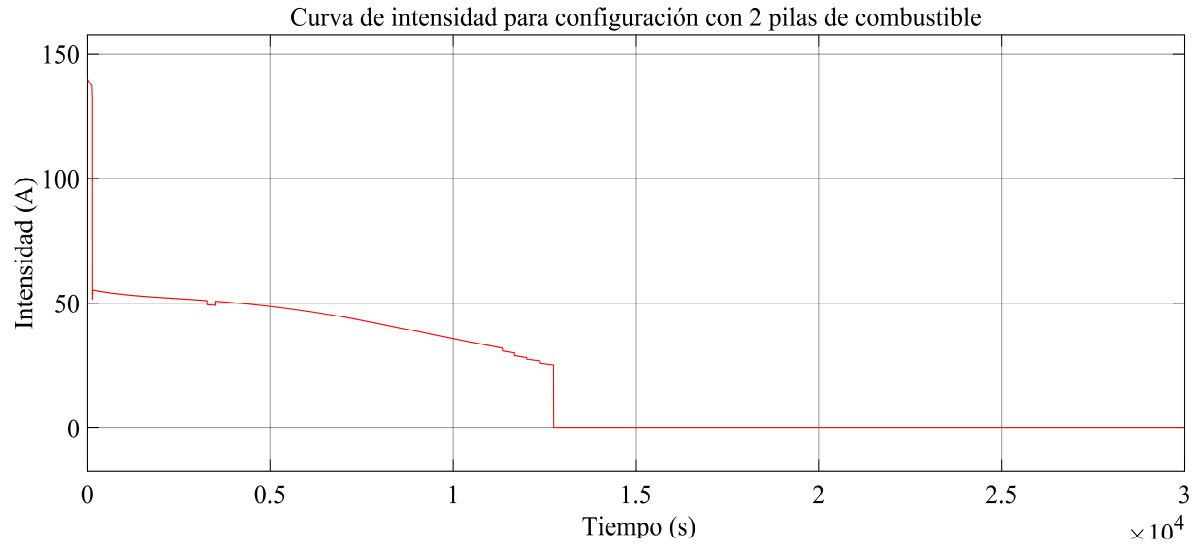


Figura A - 23: Curva de intensidad simulación 2.

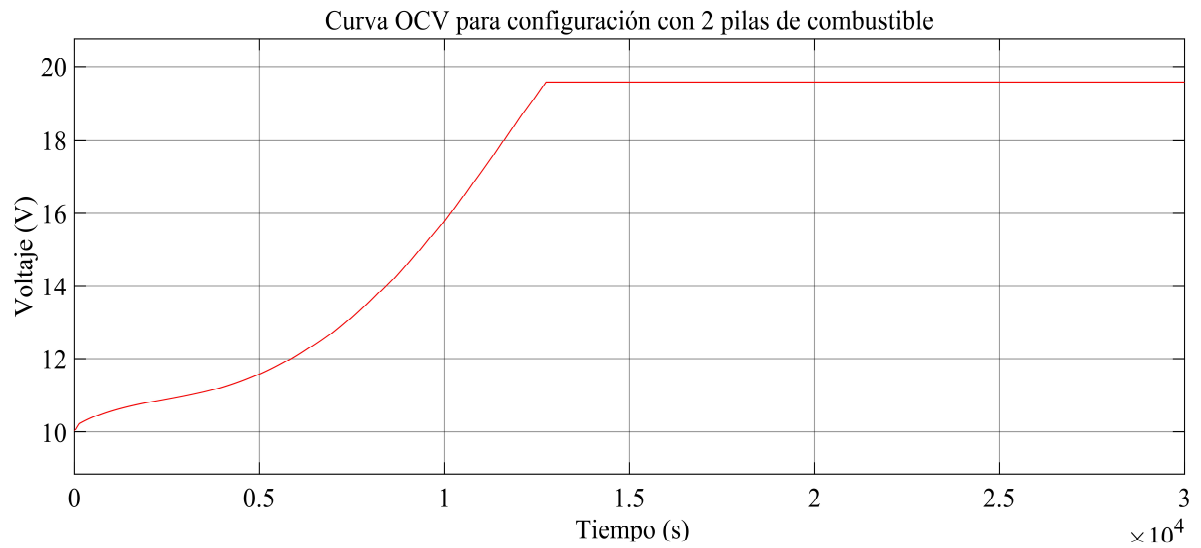


Figura A - 24: Curva OCV simulación 2.

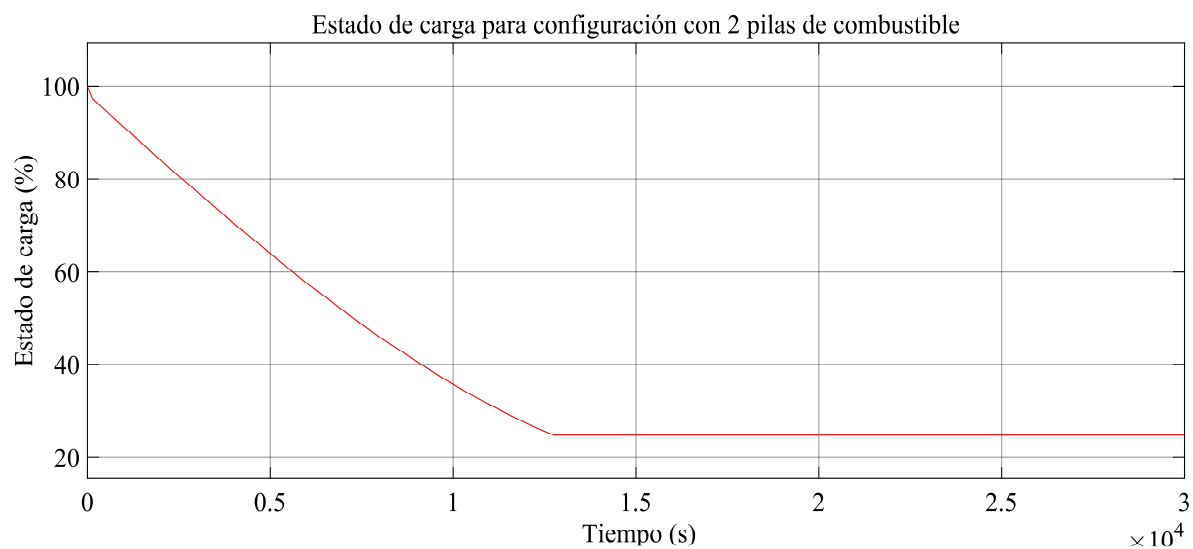


Figura A - 25: Curva SOC simulación 2.

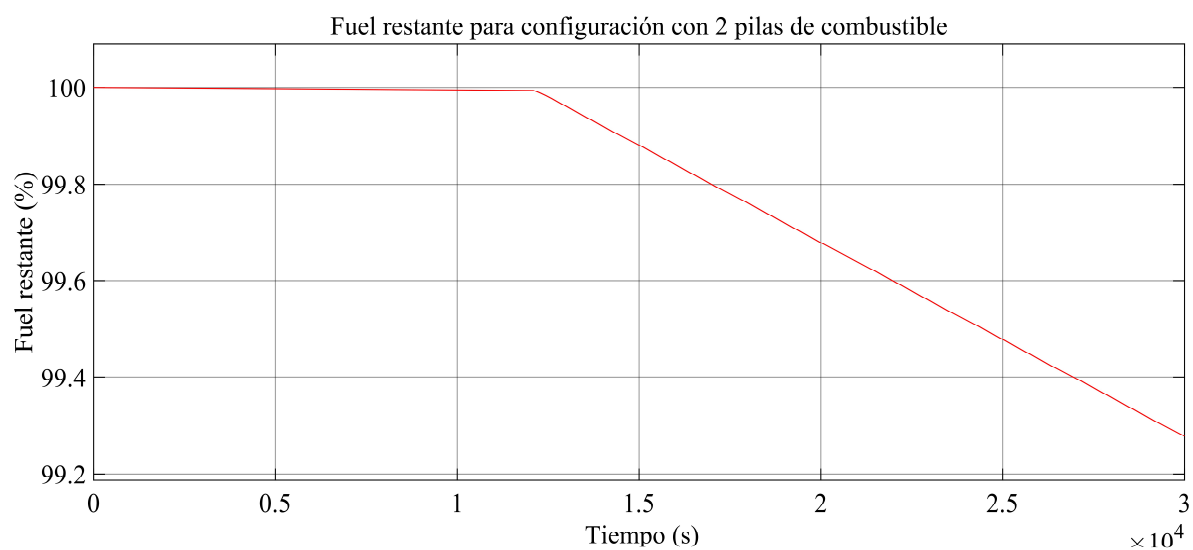


Figura A - 26: Consumo fuel generador de emergencia simulación 2.

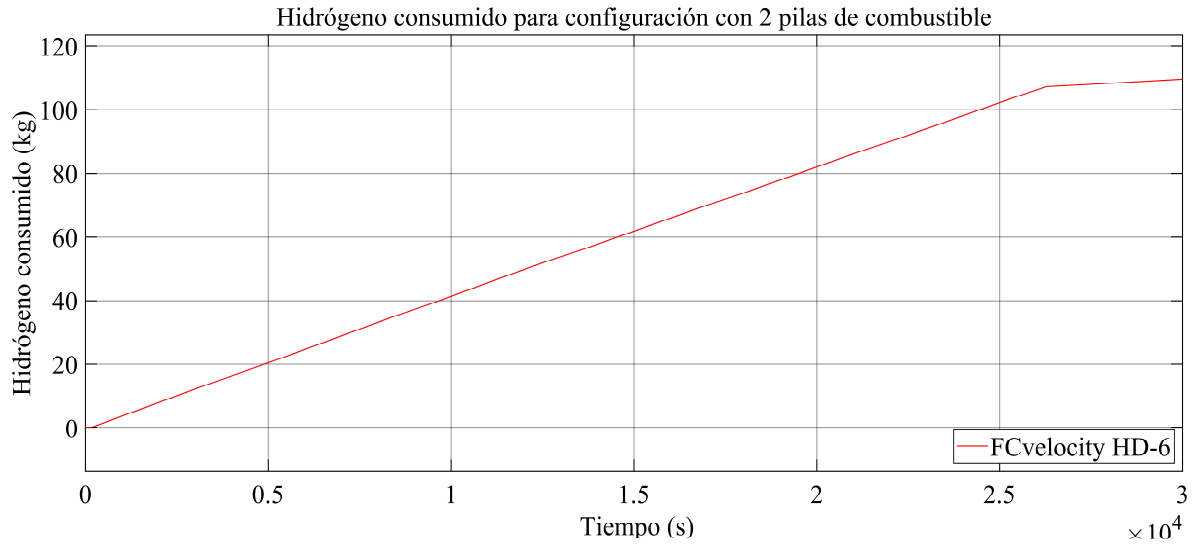


Figura A - 27: Consumo pila de combustible simulación 2.

Simulación con empleo de 4 pilas de combustible

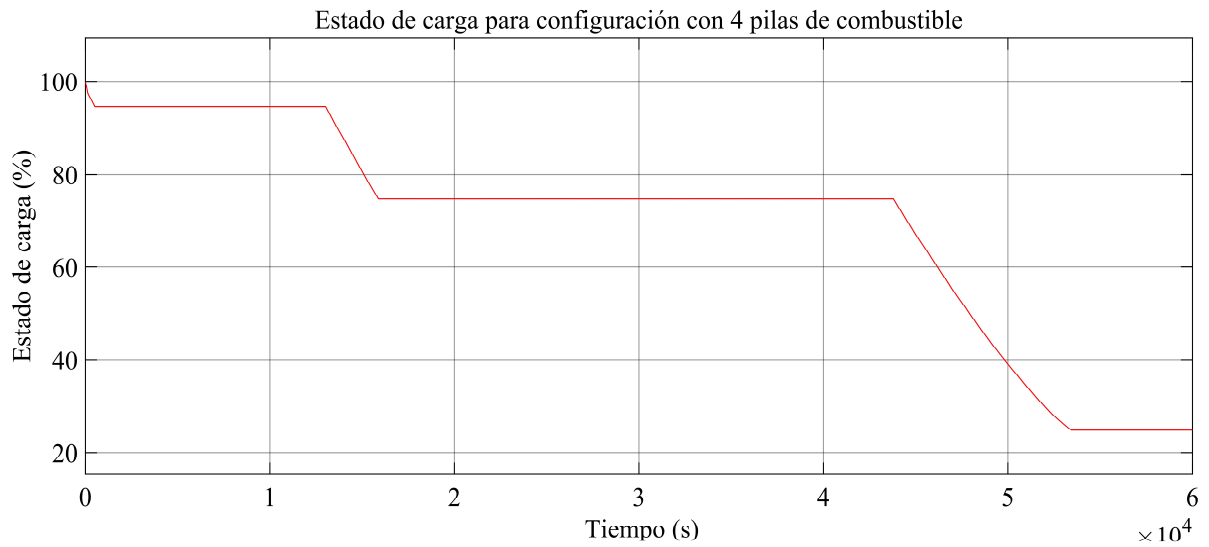


Figura A - 28: Curva SOC simulación 3.

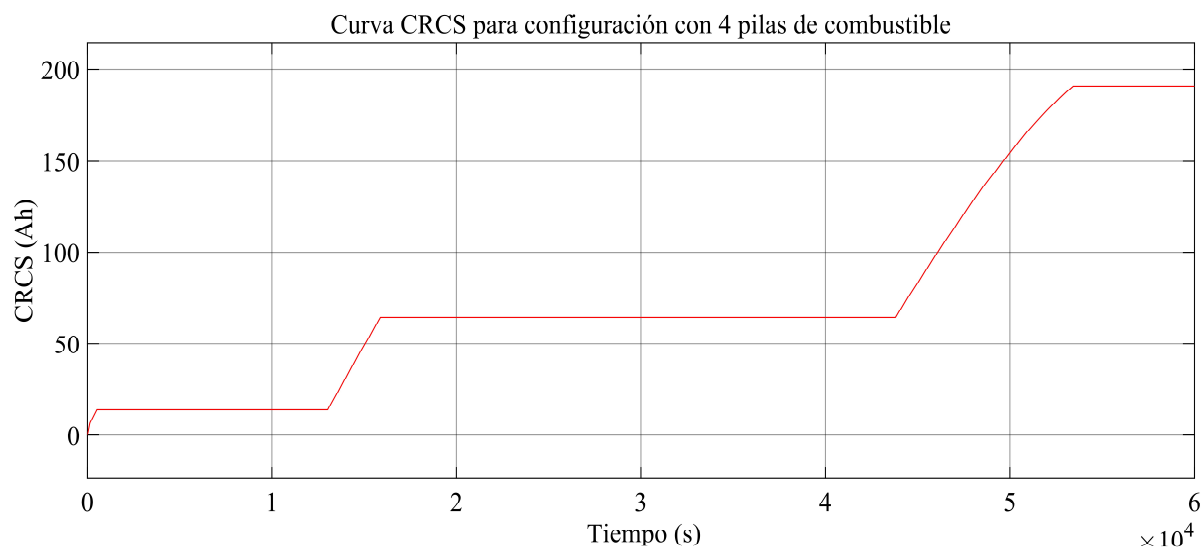


Figura A - 29: Curva CRCS simulación 3.

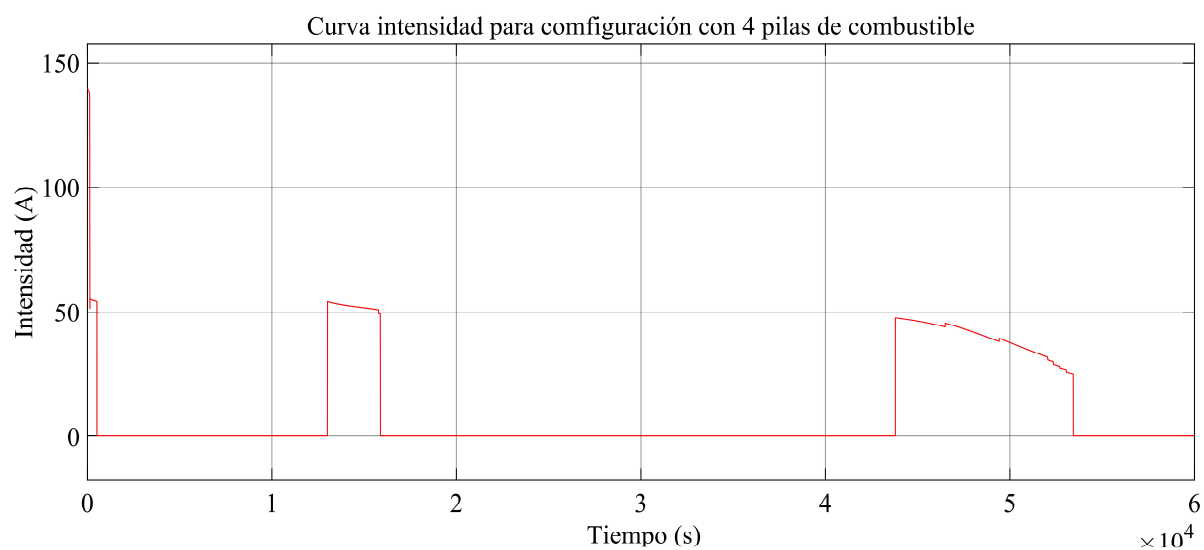


Figura A - 30: Curva intensidad simulación 3.

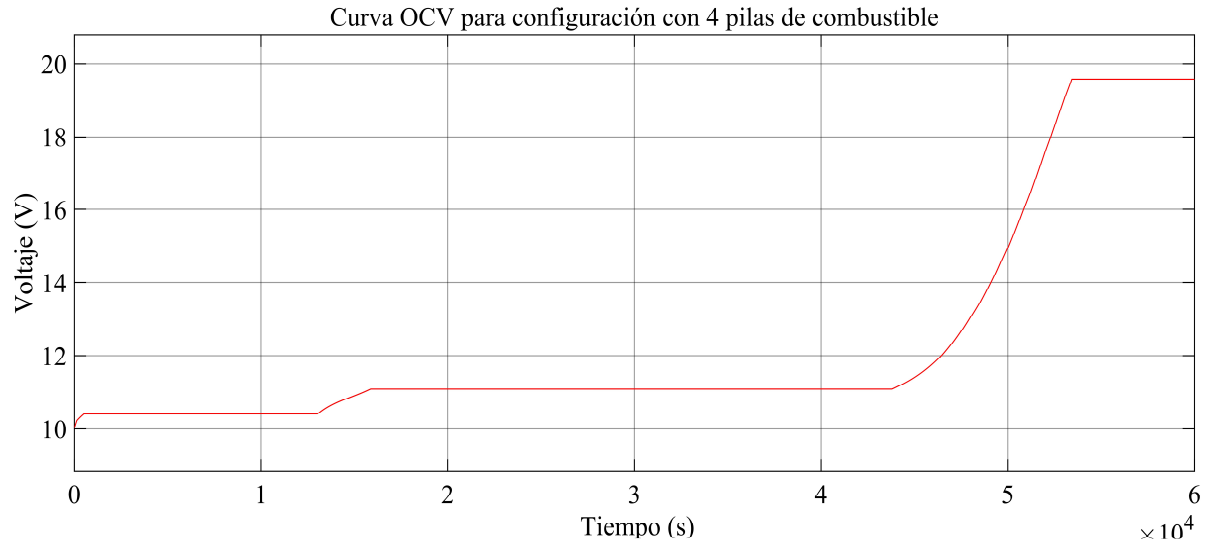


Figura A - 31: Curva OCV para simulación 3.

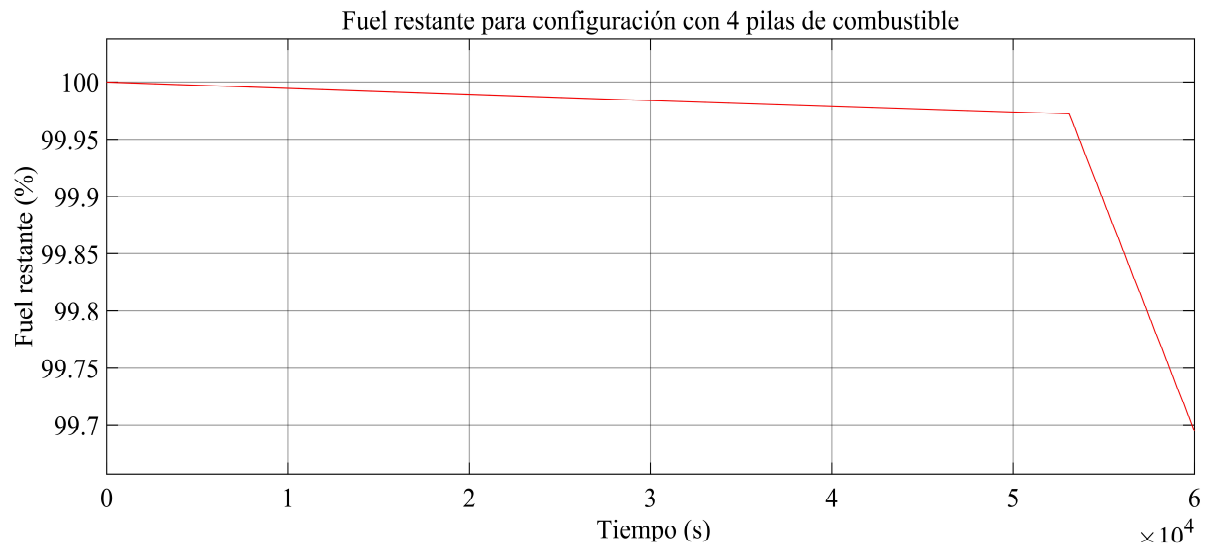


Figura A - 32: Curva combustible restante simulación 3.

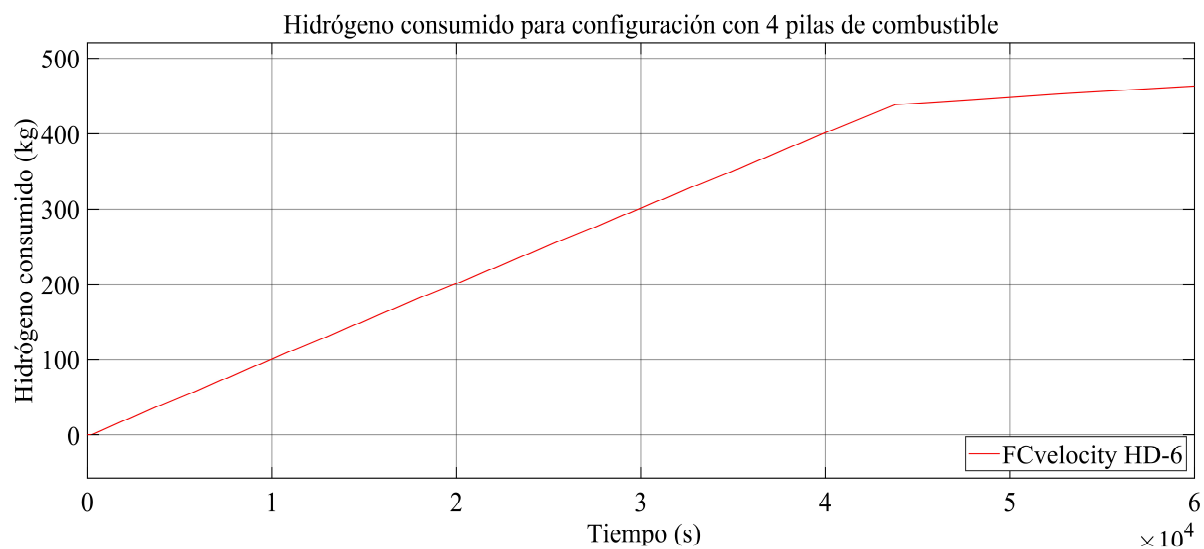


Figura A - 33: Consumo pila de combustible simulación 3.

Resultados simulación de hidruros metálicos

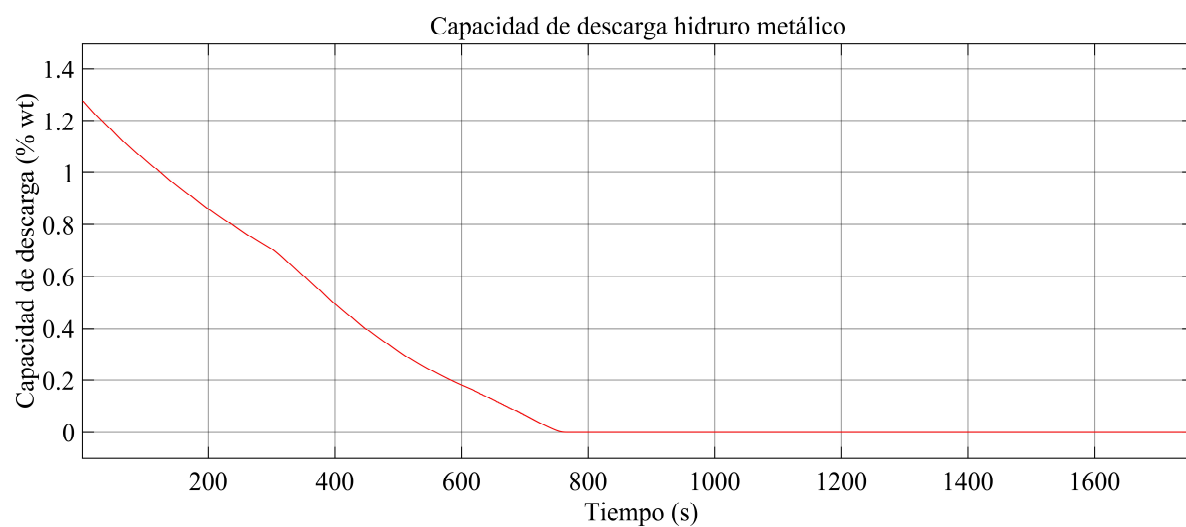


Figura A - 34: Capacidad de descarga.

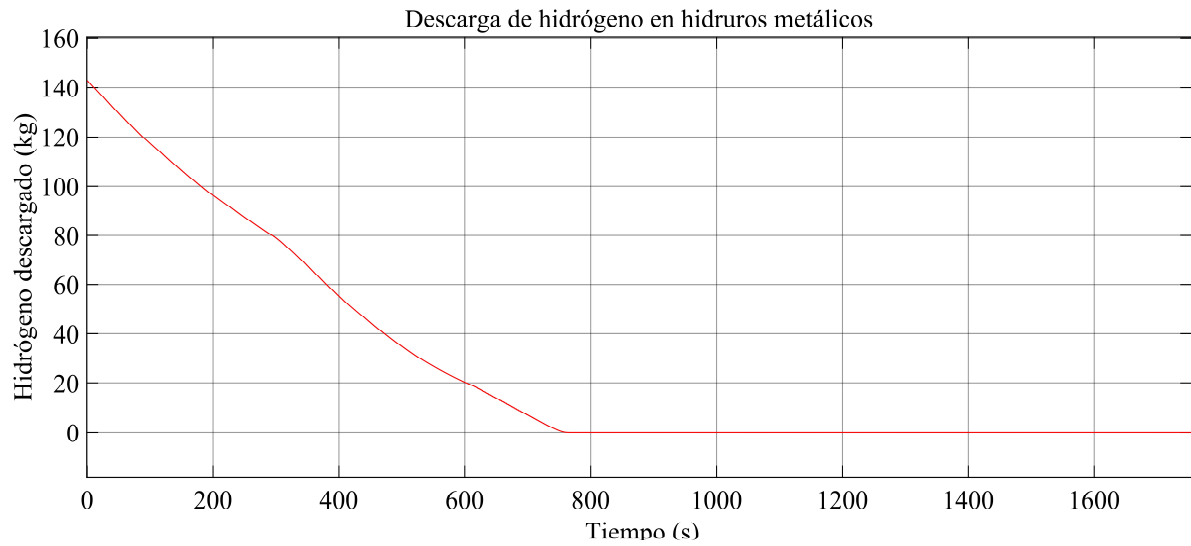


Figura A - 35: Descarga de hidrógeno.

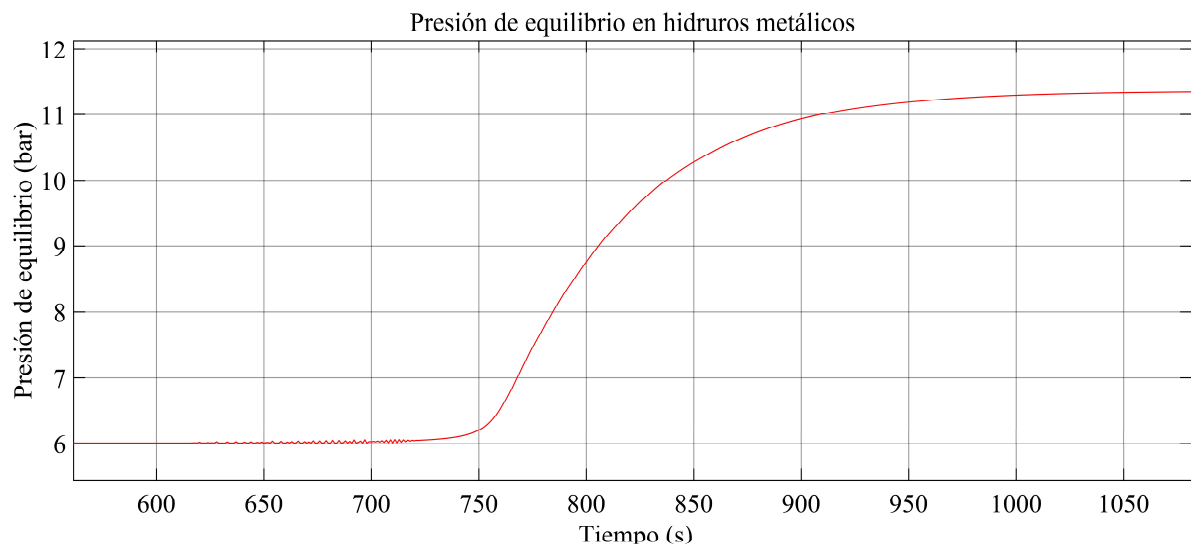


Figura A - 36: Presión de equilibrio.

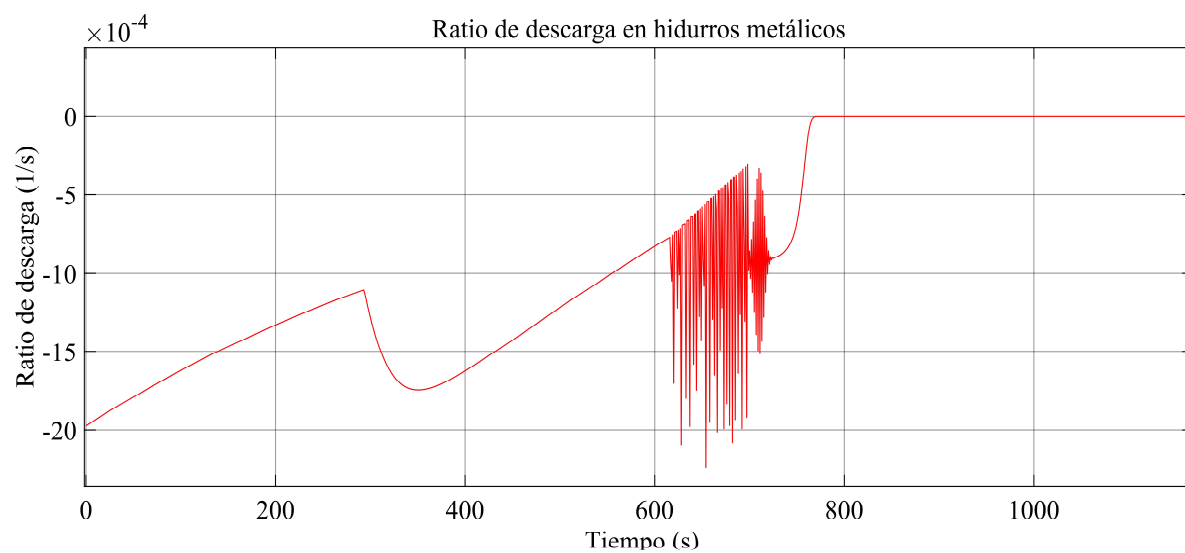


Figura A - 37: Ratio de reacción.

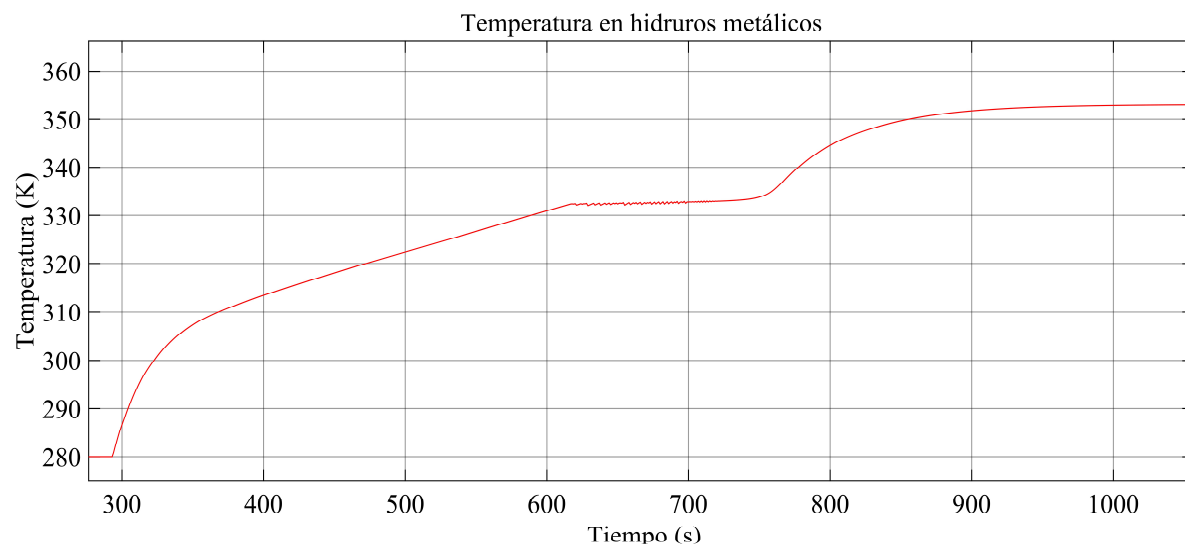


Figura A - 38: Temperatura.

ANEXO VII: CÓDIGO MATLAB

```
[System]
Name='Fuzzy_prototype_v004'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=4
NumOutputs=3
NumRules=81
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='mom'

[Input1]
Name='SOC'
Range=[0 100]
NumMFs=3
MF1='SOC_bajo':trapmf,[-30 -10 10 27]
MF2='SOC_medio':trimf,[20 56.8672839506173 80]
MF3='SOC_alto':trapmf,[70 90 110 170]

[Input2]
Name='H2_MH'
Range=[0 572]
NumMFs=3
MF1='h2_bajo':trapmf,[-214.3 -23.83 24.27 160]
MF2='h2_medio':trapmf,[111.6 216.8 391.6 511.6]
MF3='h2_alto':trapmf,[400 540.8 600 680]

[Input3]
Name='Potencia_electrica'
Range=[0 2200]
NumMFs=3
MF1='req_bajo':trimf,[-916.7 0 600]
MF2='req_medio':trimf,[400 1220.52469135802 1800]
MF3='req_alto':trapmf,[1600 2000 2500 3000]

[Input4]
Name='fuel'
Range=[0 100]
NumMFs=3
MF1='fuel_bajo':trimf,[-41.67 0 30]
MF2='fuel_medio':trimf,[10 50 90]
MF3='fuel_alto':trimf,[70 100 141.7]

[Output1]
Name='potencia_fuel_cell'
Range=[0 600]
NumMFs=3
MF1='potencia_baja':trapmf,[-225.1 -25 72.73 136.4]
MF2='potencia_media':trapmf,[96.73 214.4 361.8 505.5]
MF3='potencia_alta':trapmf,[454.5 527.3 680.5 769.5]

[Output2]
Name='potencia_bateria'
Range=[0 2200]
NumMFs=3
MF1='bateria_baja':trapmf,[-823.4 -91.77 222.5 738.6]
```

MF2='bateria_media':trimf,[489 1132.25308641975 1620]
 MF3='bateria_alta':trapmf,[1484.46913580247 2174.46913580247 2518.46913580247 3250.46913580247]

[Output3]

Name='potencia_diesel_generador'

Range=[0 1700]

NumMFs=3

MF1='potencia_diesel_baja':trapmf,[-638 -70.8 138 431.558641975309]

MF2='potencia_diesel_media':trimf,[303.009259259259 832 1440]

MF3='potencia_diesel_alta':trapmf,[1326.15740740741 1500 1730 2300]

[Rules]

3 3 3 3, 3 2 0 (1): 1
 3 2 3 3, 3 2 0 (1): 1
 3 1 3 3, 2 3 0 (1): 1
 3 3 2 3, 3 1 0 (1): 1
 3 2 2 3, 3 2 0 (1): 1
 3 1 2 3, 2 3 0 (1): 1
 3 3 1 3, 3 2 0 (1): 1
 3 2 1 3, 2 2 0 (1): 1
 3 1 1 3, 1 3 0 (1): 1
 2 3 3 3, 3 2 0 (1): 1
 2 2 3 3, 2 2 0 (1): 1
 2 1 3 3, 1 2 1 (1): 1
 2 3 2 3, 3 1 0 (1): 1
 2 2 2 3, 3 1 0 (1): 1
 2 1 2 3, 2 2 0 (1): 1
 2 3 1 3, 3 2 0 (1): 1
 2 2 1 3, 2 2 0 (1): 1
 2 1 1 3, 1 2 0 (1): 1
 1 3 3 3, 3 1 1 (1): 1
 1 2 3 3, 2 1 2 (1): 1
 1 1 3 3, 1 1 3 (1): 1
 1 3 2 3, 3 1 0 (1): 1
 1 2 2 3, 3 1 1 (1): 1
 1 1 2 3, 2 1 2 (1): 1
 1 3 1 3, 3 1 1 (1): 1
 1 2 1 3, 2 1 1 (1): 1
 1 1 1 3, 1 1 2 (1): 1
 3 3 3 2, 3 3 0 (1): 1
 3 2 3 2, 2 3 0 (1): 1
 3 1 3 2, 1 3 0 (1): 1
 3 3 2 2, 3 3 0 (1): 1
 3 2 2 2, 2 3 0 (1): 1
 3 1 2 2, 1 3 0 (1): 1
 3 3 1 2, 3 3 0 (1): 1
 3 2 1 2, 2 3 0 (1): 1
 3 1 1 2, 1 3 0 (1): 1
 2 3 3 2, 3 2 0 (1): 1
 2 2 3 2, 2 2 1 (1): 1
 2 1 3 2, 1 2 1 (1): 1
 2 3 2 2, 3 2 0 (1): 1
 2 2 2 2, 2 2 2 (1): 1
 2 1 2 2, 1 2 1 (1): 1
 2 3 1 2, 3 2 0 (1): 1
 2 2 1 2, 2 2 0 (1): 1
 2 1 1 2, 1 2 1 (1): 1
 1 3 3 2, 3 1 1 (1): 1
 1 2 3 2, 2 1 2 (1): 1
 1 1 3 2, 1 1 3 (1): 1
 1 3 2 2, 3 1 0 (1): 1
 1 2 2 2, 2 1 1 (1): 1

1 1 2 2, 1 1 2 (1): 1
1 3 1 2, 3 1 1 (1): 1
1 2 1 2, 2 1 1 (1): 1
1 1 1 2, 1 1 2 (1): 1
3 3 3 1, 3 3 0 (1): 1
3 2 3 1, 2 3 0 (1): 1
3 1 3 1, 1 3 0 (1): 1
3 3 2 1, 3 3 0 (1): 1
3 2 2 1, 2 3 0 (1): 1
3 1 2 1, 1 3 0 (1): 1
3 3 1 1, 3 3 0 (1): 1
3 2 1 1, 2 3 0 (1): 1
3 1 1 1, 1 3 0 (1): 1
2 3 3 1, 3 2 1 (1): 1
2 2 3 1, 2 2 1 (1): 1
2 1 3 1, 1 2 2 (1): 1
2 3 2 1, 3 2 0 (1): 1
2 2 2 1, 2 2 0 (1): 1
2 1 2 1, 1 2 1 (1): 1
2 3 1 1, 3 2 0 (1): 1
2 2 1 1, 2 2 0 (1): 1
2 1 1 1, 1 2 0 (1): 1
1 3 3 1, 3 1 2 (1): 1
1 2 3 1, 2 1 2 (1): 1
1 1 3 1, 1 1 2 (1): 1
1 3 2 1, 3 1 1 (1): 1
1 2 2 1, 2 1 1 (1): 1
1 1 2 1, 1 1 2 (1): 1
1 3 1 1, 3 1 0 (1): 1
1 2 1 1, 2 1 0 (1): 1
1 1 1 1, 1 1 1 (1): 1