



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Simulación en DWSIM de un sistema integrado de producción,
purificación y utilización de hidrógeno con aplicación a sistemas
AIP en submarinos*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Guillermo Maldonado Muñoz

DIRECTORES: Víctor Alfonsín Pérez

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Simulación en DWSIM de un sistema integrado de producción,
purificación y utilización de hidrógeno con aplicación a sistemas
AIP en submarinos*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla el diseño y simulación, mediante DWSIM, de un sistema de producción y purificación de hidrógeno. Para ello, se basa en el reformado de combustibles líquidos y su posterior separación mediante adsorción por cambio de presión (PSA), integrando las etapas de reformado de glicerina, reacción de desplazamiento agua-gas (Water Gas Shift) y purificación en doble PSA para evaluar el comportamiento global del proceso de forma integrada. Por otra parte, se analiza la viabilidad de la glicerina como materia prima alternativa frente a otros combustibles líquidos, así como distintas configuraciones de adsorbentes en el sistema PSA, evaluando su influencia sobre la pureza del hidrógeno, la recuperación y el consumo energético. Los resultados obtenidos muestran que es posible alcanzar hidrógeno de alta pureza, adecuado para su uso en pilas de combustible tipo PEM, cumpliendo con los requisitos necesarios para este tipo de aplicaciones energéticas. Adicionalmente, se realiza un estudio de sensibilidad con el objetivo de identificar las variables operativas más influyentes en el rendimiento del sistema. Como caso de aplicación, se evalúa el uso del sistema en un entorno embarcado, concretamente en sistemas de propulsión independiente del aire (AIP), analizando su viabilidad energética y su integración a nivel conceptual

PALABRAS CLAVE

Sistema AIP, Hidrógeno, PSA, Reformado, Pila de combustible PEM

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor, el Sr. Alfonsín Pérez, por su orientación, apoyo, dedicación y paciencia a lo largo del desarrollo de este trabajo.

Asimismo, quiero agradecer a mi familia, por su apoyo durante los últimos cinco años. Donde, en momentos de duda y desánimo, su esfuerzo y ánimo han sido esenciales para poder alcanzar este objetivo.

También me gustaría reconocer a mis compañeros de promoción, con quienes he compartido estos años de formación. Las experiencias, el trabajo conjunto y el compañerismo han sido una parte muy importante durante estos años que nunca olvidare.

Por último, quiero agradecer de manera especial a mi pareja, Cristina, por su cariño, paciencia y apoyo constante, haciendo sacar lo mejor de mí mismo.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y Objetivos.....	7
1.1 Motivación del trabajo	7
1.2 Objetivos	8
2 Estado del arte.....	9
2.1 Introducción	9
2.2 Marco Energético Global.....	9
2.2.1 Problemática energética y cambio climático	9
2.2.2 Crecimiento de las energías renovables	10
2.2.3 El almacenamiento energético y el papel del hidrógeno.....	11
2.2.4 Implicaciones en el ámbito naval y defensa.....	11
2.3 El hidrógeno como vector energético	12
2.3.1 Concepto de vector energético	12
2.3.2 Propiedades energéticas del hidrogeno	12
2.3.3 Ventajas del hidrógeno como sistema de almacenamiento energético	13
2.4 Tecnologías de producción de hidrógeno	13
2.4.1 Electrólisis del agua	13
2.4.2 Reformado de hidrocarburos.....	14
2.4.3 Reformado de alcoholes y combustibles líquidos.....	15
2.4.4 Relevancia para aplicaciones submarinas	15
2.5 Purificación de hidrógeno	16
2.5.1 Necesidad de alta pureza para pilas PEM	16
2.5.2 Tecnologías de purificación existentes	16
2.5.3 Principio de funcionamiento del PSA.....	17
2.6 Tecnologías (PEM)	18
2.6.1 Principio de funcionamiento	18
2.6.2 Ventajas de las pilas PEM.....	19
2.6.3 Requisitos de pureza del hidrogeno	20
2.6.4 Eficiencia energética	20
2.7 Requerimientos energéticos en submarinos	21
2.7.1 Limitaciones energéticas de los sistemas convencionales	21

2.7.2	Firma acústica y térmica	22
2.7.3	Requisitos energéticos específicos en entorno submarino	23
2.8	Sistemas AIP (Air Independent Propulsion)	24
2.8.1	Motores Stirling	24
2.8.2	Sistema MESMA	25
2.8.3	Sistemas AIP basados en pilas de combustible.....	25
2.8.4	Producción de hidrógeno a bordo	27
3	Desarrollo del TFG	29
3.1	Diseño de la planta	29
3.2	Justificación del uso del Software DWSIM	30
3.3	Selección materia prima.....	31
3.3.1	Reformado de glicerina	31
3.3.2	Reformado de bioetanol	31
3.3.3	Selección final.....	32
3.4	Modelado de las etapas del proceso	32
3.4.1	Simulación proceso de reformado.....	33
3.4.2	Simulación WGS (reacción de desplazamiento gas-agua)	33
3.4.3	Simulación PSA	35
3.4.4	Simulación pila PEM	40
3.5	Estudio de sensibilidad del proceso	42
3.5.1	Influencia de la temperatura del reformado	43
3.5.2	Influencia de la relación glicerina-vapor	44
3.5.3	Influencia de la presión PSA.....	45
3.5.4	Influencia de la temperatura del reactor WGS.....	46
3.5.5	Evaluación global del estudio de sensibilidad	47
4	Resultados / Validación / Caso Práctico	49
4.1	Introducción a los resultados.....	49
4.2	Resultados globales del sistema	49
4.2.1	Conclusión resultado global.....	50
4.3	Validación del requerimiento energético	50
4.4	Caso práctico.....	51
4.4.1	Requerimiento energético para sistema AIP	52
4.4.2	Consumo de glicerina.....	52
4.5	Integración conceptual del sistema en el módulo AIP	53
4.5.1	Sistema de Alimentación de Glicerina.....	53
4.6	Reformador para el sistema AIP del submarino alimentado por glicerina	55

4.6.1	Reactor Water Gas Shift (WGS).....	57
4.6.2	Sistema de purificación de hidrógeno mediante PSA.....	57
4.6.3	Selección y dimensionado de la pila de combustible PEM VLIV240.....	58
4.7	Evaluación de viabilidad.....	60
4.7.1	Puntos favorables	60
5	Conclusiones y líneas futuras.....	62
5.1	Conclusiones	62
5.2	Líneas futuras	63
6	Bibliografía	65
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales		68
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales		69
Anexo III: Contenido del tercer anexo		70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Software DWSIM[1]	7
Figura 2-1. La evolución de la temperatura global desde 1950 [3].....	10
Figura 2-2 Uso de energías renovables 2019-2025[5]	10
Figura 2-3 Portada del ETID 2020[9]	11
Figura 2-4 Electrolisis del agua[15]	13
Figura 2-5 Reformado de hidrocarburos[18].....	14
Figura 2-6 Producción de hidrógeno de diferentes tecnologías, 2030[18].....	15
Figura 2-7 Esquema PSA[23].....	18
Figura 2-8 Esquema pila de hidrógeno[24]	19
Figura 2-9 Comparación de eficiencia con motores de combustión[26].....	20
Figura 2-10 Submarino haciendo snorkel para recargar baterías[28]	21
Figura 2-11 Firma acústica producida por un submarino[30]	22
Figura 2-12 Características submarino S-81 Isaac Peral, de Navantia[31]	23
Figura 2-13 Esquema de funcionamiento AIP con motor Stirling [34]	24
Figura 2-14 Esquema AIP MESMA[36].....	25
Figura 2-15 Esquema de funcionamiento planta S80[38]	26
Figura 2-16 Configuración planta AIP[37]	27
Figura 3-1 Esquema modelo.....	29
Figura 3-2 Simulación estudio de comparación	31
Figura 3-3 Simulación del proceso de reformado	33
Figura 3-4 Simulación WGS	34
Figura 3-5 Establecimiento de la reacción de equilibrio en el reactor	34
Figura 3-6 Simulación PSA.....	35
Figura 3-7 Comparativa de consumo energético.....	39
Figura 3-8 Gráfica comparativa de pureza y recuperación	39
Figura 3-9 Pureza VS recuperación.....	40
Figura 3-10 Reacción electroquímica en reactor de conversión	41
Figura 3-11 Simulación pila PEM.....	41
Figura 3-12 Bloque de control.....	42
Figura 3-13 Esquema global de sistema.....	43
Figura 3-14 Variación temperatura del reformador.....	44
Figura 3-15 Variación glicerina-vapor	45
Figura 3-16 Válvula simulación DWSIM	45
Figura 3-17 variación presión PSA	46

Figura 3-18 Variación temperatura reactor WGS	47
Figura 4-1 VLIV240[45]	50
Figura 4-2 Producción de hidrógeno necesario calculado en DWSIM	51
Figura 4-3 Ubicación sección AIP	51
Figura 4-4 Integración sistema en submarino	53
Figura 4-5 Tanque de acero inoxidable para almacenamiento de glicerina	54
Figura 4-6 Reformado de horno tubular industrial.....	55
Figura 4-7 Reformador catalítico compacto[37]	56
Figura 4-8 Reactor catalítico de lecho fijo[37].....	57
Figura 4-9 Diseño y montaje de plantas PSA (Pressure Swing Adsorption)	58
Figura 4-10 pila PEM[37]	59
Figura 4-11 Propuesta distribución	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 valores caloríficos de los combustibles [12]	12
Tabla 2-2 Comparación tecnología	17
Tabla 2-3 Elaboración propia a partir de DOE (Fuel Cell Handbook).....	21
Tabla 2-4 Comparación de tecnologías AIP	26
Tabla 3-1 Tabla comparativa de materias primas para producción de hidrógeno.....	32
Tabla 3-2 Fracciones de paso PSA1 carbón-carbón.....	36
Tabla 3-3 Fracciones de paso PSA2 carbón-carbón.....	36
Tabla 3-4 Fracciones de paso PSA1 sílice sílice	36
Tabla 3-5 Fracciones de paso PSA2 sílice-sílice.....	37
Tabla 3-6 Fracciones de paso PSA1 zeolita-zeolita	37
Tabla 3-7 Fracciones de paso PSA2 zeolita-zeolita	37
Tabla 3-8 Comparaciones adsorbentes	38
Tabla 4-1 Resultado global.....	49
Tabla 4-2 PEM del sistema AIP	52
Tabla 4-3 Estudio para diferentes autonomías	54
Tabla 4-4 comparación tecnologías de reformado	56
Tabla 4-5 Comparación entre reactores WGS industriales y sistemas compactos.....	57
Tabla 4-6 El espacio ocupado por el sistema de purificación	58
Tabla 4-7 Especificaciones técnicas de la pila PEM VLIV240	59

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Motivación del trabajo

En el contexto actual de transición energética, el hidrógeno se posiciona como un vector energético clave debido a su versatilidad, su elevada densidad energética en base másica y la posibilidad de ser producido a partir de fuentes renovables. Estas características lo convierten en una alternativa relevante para la descarbonización de sistemas energéticos, especialmente en aplicaciones donde la electrificación directa resulta limitada o inviable, como en sistemas aislados o de alta exigencia operativa.

No obstante, uno de los principales retos asociados a su utilización es la producción eficiente y su purificación hasta niveles adecuados, ya que muchas aplicaciones energéticas, como las pilas de combustible de membrana de intercambio protónico (Proton Exchange Membrane, PEM), requieren hidrógeno con muy baja concentración de impurezas, particularmente monóxido de carbono, que puede provocar la degradación del catalizador. Esto implica la necesidad de integrar procesos de generación y separación capaces de garantizar elevadas purezas sin comprometer el rendimiento global del sistema.

En este contexto, los procesos de reformado de combustibles líquidos, como la glicerina o el etanol, combinados con etapas de purificación como la adsorción por cambio de presión (Pressure Swing Adsorption, PSA), constituyen una solución viable para la obtención de hidrógeno de alta pureza. Estos sistemas permiten la producción de hidrógeno bajo demanda a partir de combustibles líquidos fácilmente almacenables, facilitando su integración en aplicaciones embarcadas, incorporando además etapas intermedias como la reacción de desplazamiento agua-gas (Water Gas Shift, WGS), que incrementa la producción de hidrógeno y reduce la concentración de CO en la corriente.



DWSIM

Figura 1-1 Software DWSIM[1]

Sin embargo, el diseño e integración de estos procesos presenta una elevada complejidad, debido a la interacción entre etapas de reacción, separación y acondicionamiento, así como a la influencia de múltiples variables de operación. Por ello, resulta necesario el uso de herramientas de simulación de procesos, como DWSIM (Figura 1-1), que permiten analizar el comportamiento global del sistema, comparar configuraciones y evaluar su rendimiento de forma integrada.

En este trabajo se plantea el desarrollo y simulación de un sistema completo de producción y purificación de hidrógeno mediante DWSIM, incluyendo las etapas de reformado, reacción de desplazamiento agua-gas y purificación mediante PSA. El objetivo es obtener una corriente de hidrógeno de alta pureza y analizar el rendimiento global del proceso, identificando las variables más influyentes y evaluando diferentes configuraciones.

Como caso de aplicación, se analiza la posible utilización de este sistema en un entorno embarcado, concretamente en sistemas de propulsión independiente del aire (AIP) en submarinos convencionales, donde la generación de hidrógeno a bordo puede representar una alternativa al almacenamiento directo. En este contexto, el sistema desarrollado se emplea como base para estudiar su viabilidad energética y su integración conceptual.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es el diseño y simulación de un sistema de producción y purificación de hidrógeno mediante DWSIM, evaluando su rendimiento y su capacidad para generar hidrógeno de alta pureza.

Como aplicación, se analiza su posible uso en sistemas AIP para submarinos, con el fin de valorar su viabilidad a nivel conceptual.

Para alcanzar este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar el proceso de producción de hidrógeno a partir de combustibles líquidos (glicerina o etanol), seleccionando la alternativa más adecuada.
- Modelar las etapas del proceso en DWSIM: reformado, reacción Water Gas Shift y purificación mediante PSA.
- Evaluar diferentes configuraciones de adsorbentes en el sistema PSA, analizando pureza, recuperación y consumo energético.
- Verificar que el hidrógeno obtenido cumple los requisitos de pureza para su uso en pilas de combustible PEM.
- Analizar el comportamiento global del sistema mediante estudios de sensibilidad.
- Aplicar los resultados obtenidos a un caso práctico (sistema AIP), evaluando su viabilidad a nivel conceptual.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

En la búsqueda de nuevas tecnologías energéticas se ha incrementado el interés por el hidrógeno como vector energético, debido a su alto contenido energético y su potencial para producir energía con bajas emisiones. En este contexto, el estado del arte aborda en primer lugar el marco energético global y el papel del hidrógeno en esta transición energética. A continuación, se analizan las principales tecnologías y métodos de producción y purificación de hidrógeno, así como de las pilas de combustible de tipo PEM, utilizadas para la generación eficiente de electricidad. Finalmente, se analizan los requerimientos energéticos de las plataformas submarinas y el desarrollo de sistemas AIP basados en hidrógeno, que permiten aumentar la autonomía de los submarinos en inmersión mediante sistemas de generación eléctrica silenciosos y eficientes.

2.2 Marco Energético Global

En la actualidad, el sistema energético global se enfrenta a grandes retos derivados de la problemática energética y el cambio climático, lo que ha impulsado el crecimiento de las energías renovables como alternativa a los combustibles fósiles. No obstante, la irregularidad de estas fuentes hace necesario el desarrollo de soluciones de almacenamiento energético, donde el hidrógeno destaca como un vector energético capaz de almacenar y suministrar energía de forma eficiente. En este contexto, estas tecnologías adquieren especial relevancia también en el ámbito naval y de defensa, donde pueden contribuir al desarrollo de sistemas energéticos más eficientes y autónomos, como los sistemas AIP utilizados en submarinos.

2.2.1 Problemática energética y cambio climático

Desde finales del siglo XX, la comunidad científica ha alertado sobre los efectos derivados del uso intensivo de combustibles fósiles como base del sistema energético mundial. El aumento de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero ha provocado un incremento sostenido de la temperatura media global como se puede apreciar en la Figura 2-1, fenómeno ampliamente documentado en los informes de evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) [2,3].

El incremento de la temperatura global conlleva consecuencias directas como la elevación del nivel del mar, la alteración de ecosistemas y la pérdida de biodiversidad. Como respuesta a esta situación, la comunidad internacional ha impulsado acuerdos multilaterales orientados a la reducción de emisiones y a la transformación del modelo energético.

Algunos como la Agenda 2030, establece los objetivos relacionados con la transición hacia un mundo con energías renovables y la intención de acabar con el cambio climático [4]. Por otra parte, el Acuerdo de París fija compromisos de reducción de gases de efecto invernadero para limitar el aumento de la temperatura global.

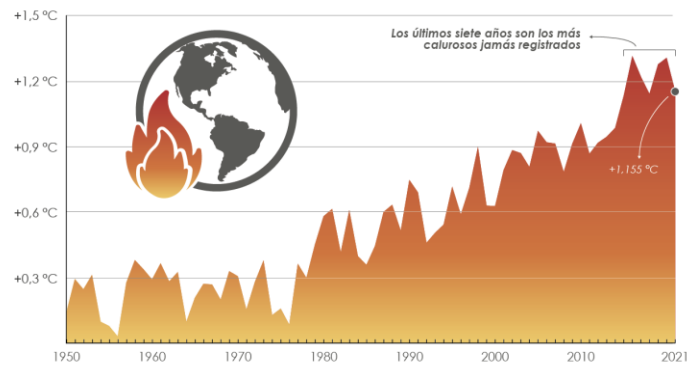


Figura 2-1. La evolución de la temperatura global desde 1950 [3]

Por ello, la transición energética se considera un elemento clave para conseguir un desarrollo sostenible a nivel global sin comprometer el medio ambiente.

2.2.2 Crecimiento de las energías renovables

Las energías renovables principalmente solar, eólica e hidráulica han experimentado un crecimiento sostenido en las últimas décadas, Figura 2-2. Según datos de la Agencia Internacional de la Energía (AIE), la participación de estas fuentes en la generación eléctrica mundial ha aumentado significativamente en los últimos quince años [5].

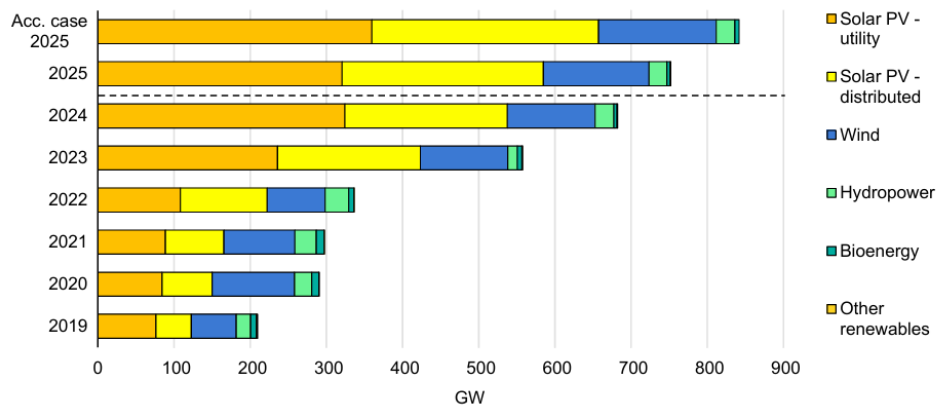


Figura 2-2 Uso de energías renovables 2019-2025[5]

No obstante, a pesar de este crecimiento, los combustibles fósiles continúan representando una proporción mayoritaria en comparación con otras fuentes de energía según datos de la Agencia Internacional de la Energía (IEA), pese al crecimiento sostenido de las energías renovables.

Esta situación pone de manifiesto que la transición energética aún se encuentra en fase de desarrollo y que es necesario implementar soluciones tecnológicas complementarias que permitan reducir la dependencia de los combustibles tradicionales

Uno de los principales retos asociados a las energías renovables es su carácter intermitente. Mayoritariamente las principales energías renovables como son, la generación solar y eólica dependen de condiciones ambientales variables, lo que obliga a desarrollar sistemas de almacenamiento energético eficientes.

2.2.3 El almacenamiento energético y el papel del hidrógeno

Debido a esta intermitencia, el almacenamiento de energía se ha convertido en un elemento clave en la transición energética. Las principales tecnologías actuales incluyen baterías, supercondensadores, almacenamiento por bombeo hidráulico, aire comprimido, volantes de inercia y almacenamiento en forma de hidrógeno [6].

Aunque las baterías de ion-litio son actualmente la tecnología de almacenamiento más extendida, especialmente en aplicaciones móviles y sistemas eléctricos autónomos, presentan ciertas limitaciones técnicas. Entre ellas destacan la degradación progresiva con el uso, la reducción de capacidad con el paso del tiempo y la autodescarga, que limita su almacenamiento a largo plazo. Estas características hacen que, para aplicaciones que requieren grandes cantidades de energía almacenada durante largos periodos, las baterías no siempre sean la solución óptima [6].

Frente a estas limitaciones, el hidrógeno aparece como una alternativa de gran interés. A diferencia de las baterías, el hidrógeno puede almacenarse durante largos periodos sin pérdidas significativas y presenta una elevada densidad energética por unidad de masa. Esto lo convierte en una gran alternativa energética atractiva para aplicaciones donde el almacenamiento prolongado y la alta capacidad energética son factores determinantes [7].

El hidrógeno es el elemento más ligero y abundante del universo y presenta una liberación energética por unidad de masa superior a la de muchos combustibles convencionales. La reacción de combustión del hidrógeno libera aproximadamente 120,8 kJ por gramo, valor significativamente superior al de otros elementos como el metano o el butano [8].

Sin embargo, el hidrógeno no se encuentra de forma libre en cantidades aprovechables, es por ello, que debe producirse mediante procesos industriales.

2.2.4 Implicaciones en el ámbito naval y defensa

Esta nueva transición energética no solo afecta al sector civil. En el ámbito de la defensa también se ve afectado por estas medidas, la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID 2020), Figura 2-3 identifica la sostenibilidad energética y el desarrollo de nuevas formas de propulsión como líneas prioritarias de investigación [9].

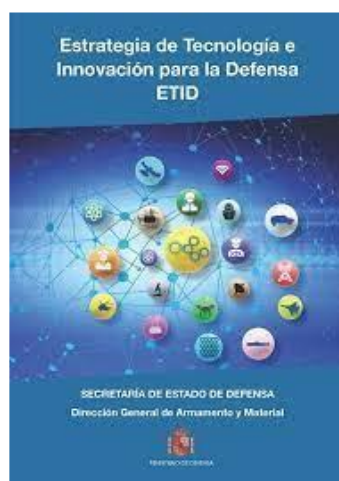


Figura 2-3 Portada del ETID 2020[9]

En el ámbito naval, la mejora de la eficiencia energética y el desarrollo de tecnologías de propulsión más sostenibles constituyen líneas estratégicas prioritarias en defensa. Asimismo, aunque la normativa IMO 2020, no aplica directamente a buques militares, la reducción de emisiones de óxidos de azufre representa una tendencia regulatoria global que impulsa la adopción de tecnologías más limpias para que nos permita alcanzar los objetivos de sostenibilidad [10].

En este contexto, el hidrógeno, se posiciona como una alternativa energética estratégica, no solo para aplicaciones terrestres y marítimas comerciales, sino que también como un gran plan estratégico para plataformas navales.

2.3 El hidrógeno como vector energético

En este apartado se define el concepto de vector energético, ya que no es una fuente primaria de energía. Gracias a sus propiedades, como su elevado contenido energético por unidad de masa, puede utilizarse de forma eficiente en sistemas de generación eléctrica como las pilas de combustible. Además, el hidrógeno presenta importantes ventajas como sistema de almacenamiento energético, ya que permite almacenar energía procedente de distintas fuentes y utilizarla posteriormente cuando sea necesario.

2.3.1 Concepto de vector energético

Un vector energético es una sustancia o sistema capaz de almacenar, transportar y liberar energía que ha sido producida previamente a partir de una fuente primaria. Es decir, que, al no encontrarse disponible directamente en la naturaleza de forma utilizable, debe ser producido mediante un proceso previo.

En el caso del hidrógeno debe obtenerse a partir de otras fuentes, mediante procesos industriales como la electrólisis o el reformado de hidrocarburos [11].

2.3.2 Propiedades energéticas del hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más ligero y abundante del universo, compuesto por un único protón y un electrón. Desde el punto de vista energético, presenta una de las mayores densidades energéticas [11].

El poder calorífico inferior (PCI) del hidrógeno es de aproximadamente (120 MJ/kg) , valor significativamente superior al de otros combustibles convencionales como se puede apreciar en la Tabla 2-1 [12].

Combustible	PCS (MJ/kg)	PCS (BTU/lb)	PCS (kJ/mol)	PCI (MJ/kg)
Hidrógeno	141.8	61,000	286	121
Metano	55.5	23,900	889	50
Etano	51.9	22,400	1,560	47.8
Propano	50.35	21,700	2,220	46.35
Butano	49.5	20,900	2,877	45.75
Pentano	—	—	—	45.35
Gasolina	47.3	20,400	—	44.4
Parafina	46	19,900	—	41.5
Queroseno	46.2	—	—	43
Diésel	44.8	19,300	—	—
Carbón (antracita)	27	14,000	—	—
Carbón (lignito)	15	8,000	—	—
Madera	15	6,500	—	—
Turba (húmeda)	6	2,500	—	—
Turba (seca)	15	6,500	—	—

Tabla 2-1 Valores caloríficos de los combustibles [12]

2.3.3 Ventajas del hidrógeno como sistema de almacenamiento energético

El hidrógeno presenta varias ventajas frente a otras tecnologías de almacenamiento:

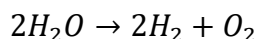
- Alta densidad energética gravimétrica: Esto es debido a que el hidrógeno contiene una gran cantidad de energía por unidad de masa [11]. Esto significa, que por cada kilogramo libera una elevada energía en comparación con otros combustibles como el metano o la gasolina como se puede apreciar en la Tabla 2-1.
- Almacenamiento a largo plazo sin autodescarga significativa: Como hemos mencionado anteriormente en el presente trabajo, mientras que las baterías electroquímicas, pierden progresivamente capacidad y pueden descargarse con el tiempo incluso sin uso, el hidrógeno almacenado en depósitos presurizados o en forma líquida no sufre autodescarga electroquímica. Esto permite conservar la energía durante largos periodos sin pérdidas significativas, lo que resulta ventajoso en sistemas que requieren almacenamiento prolongado [13,14].
- Versatilidad: El hidrógeno puede utilizarse de distintas maneras. Puede alimentar pilas de combustible para generar electricidad, puede emplearse en combustión directa en motores adaptados, y también es una materia prima fundamental en numerosos procesos industriales. Esta característica hace que resulte una fuente energética adaptable a múltiples sectores [11].

2.4 Tecnologías de producción de hidrógeno

El hidrógeno no es una fuente primaria de energía, sino un vector energético que debe producirse a partir de otras fuentes. Los métodos de producción condicionan tanto su impacto ambiental como su viabilidad técnica en cada aplicación.

2.4.1 Electrólisis del agua

La electrólisis consiste en la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno mediante el paso de corriente eléctrica:



Reacción 1 (Electrólisis del agua)

El proceso tiene lugar en una celda electroquímica compuesta por dos electrodos (ánodo y cátodo) separados por un electrolito o una membrana. En el cátodo se produce hidrógeno y en el ánodo oxígeno, como se observa en la Figura 2-4.

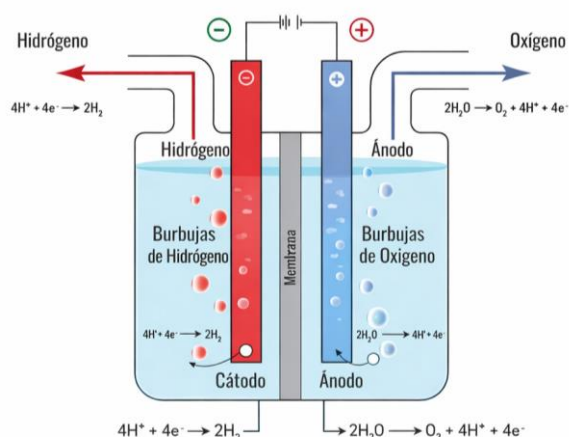


Figura 2-4 Electrólisis del agua[15]

Una gran ventaja de este proceso electroquímico es que no se generan emisiones de dióxido de carbono. Si la electricidad empleada procede de fuentes renovables, el hidrógeno producido puede considerarse de muy baja huella de carbono. Según la IEA (2019), la electrólisis será una tecnología clave en escenarios de descarbonización profunda [16].

No obstante, aunque la electrólisis constituye una tecnología fundamental en la transición energética global, su aplicación directa en sistemas embarcados para la Armada tanto en medios de superficie como submarinos presenta limitaciones técnicas y energéticas significativas.

Esto se debe a que en sistemas donde: la electricidad es un recurso limitado y el espacio y el peso están restringidos.

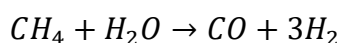
Resulta más adecuado emplear tecnologías de producción termoquímica como el reformado de combustibles líquidos, que permiten generar hidrógeno directamente a partir de un combustible almacenado.

Esta consideración justifica la elección del reformado como base del sistema modelado en el presente trabajo, como explicaremos más adelante.

2.4.2 Reformado de hidrocarburos

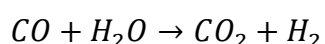
El reformado es el proceso industrial más extendido para la producción de hidrógeno ya que la IEA (2019) [14]. Identifica el reformado como la principal vía actual de producción mundial de hidrógeno. En el caso del reformado de hidrocarburos consiste en la reacción de un hidrocarburo con vapor de agua a alta temperatura para producir una mezcla rica en hidrógeno Figura 2-5.

La reacción más común es el reformado de metano con vapor (Steam Methane Reforming, SMR).



Reacción 2 (Reformado del metano)

Posteriormente, la reacción Water Gas Shift incrementa la producción de hidrógeno, para ello, el monóxido de carbono generado se convierte adicionalmente mediante la reacción:



Reacción 3 (WGS)

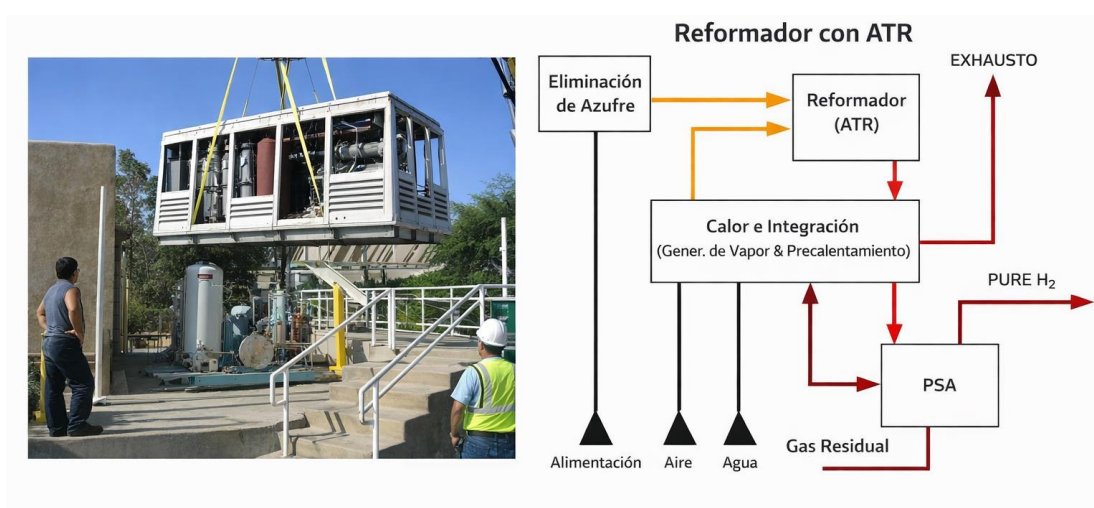


Figura 2-5 Reformado de hidrocarburos[18].

2.4.3 Reformado de alcoholes y combustibles líquidos

Actualmente, el coste por kilogramo de hidrógeno producido mediante reformado de gas natural es inferior al de la electrólisis en la mayoría de los escenarios como se puede apreciar en la Figura 2-6.

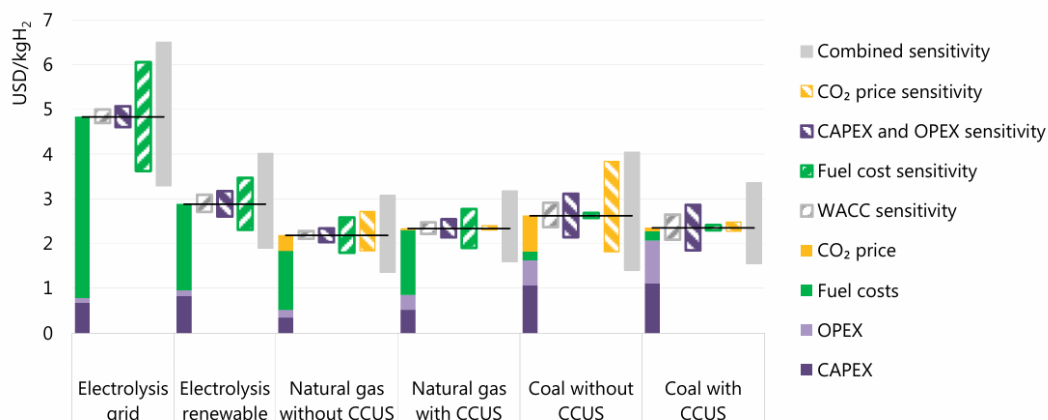
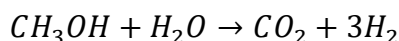


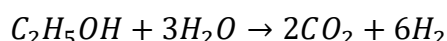
Figura 2-6 Producción de hidrógeno de diferentes tecnologías, 2030[18]

Entre los combustibles líquidos más estudiados para la producción de hidrógeno se encuentran el metanol, el bioetanol y la glicerina.

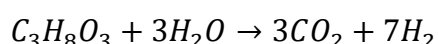
El reformado de alcoholes es un proceso termoquímico en el que un alcohol reacciona con vapor de agua a alta temperatura en presencia de un catalizador (el cual acelera una reacción química sin consumirse durante el proceso, es decir, sin transformarse en el producto final) para producir hidrógeno. A continuación, pueden observarse las reacciones principales para la descomposición de estos alcoholes.



Reacción 4 (Reformado de Metanol
(CH₃OH))



Reacción 5 Reformado de Etanol (C₂H₅OH)



Reacción 6 Reformado de Glicerina
(C₃H₈O₃)

Estos compuestos poseen algunas propiedades fisicoquímicas las cuales facilitan su almacenamiento, manipulación y transporte en comparación con el hidrógeno gaseoso.

Por ello, puede afirmarse que, en aplicaciones móviles o aisladas, el reformado de combustibles líquidos como metanol, bioetanol o glicerina constituye una alternativa viable frente al reformado de metano gaseoso o el almacenamiento directo de hidrógeno comprimido. Esto es debido a que los combustibles líquidos pueden almacenarse a presión atmosférica y temperatura ambiente en depósitos convencionales, a diferencia del hidrógeno, que requiere compresión de (200–700 bar) [11].

Por consiguiente, el reformado embarcado permite almacenar energía química en forma líquida y transformarla en hidrógeno bajo demanda. De esta manera, se reducen los grandes volúmenes de hidrógeno comprimido y se permite adaptar la producción a la demanda energética instantánea [19].

2.4.4 Relevancia para aplicaciones submarinas

Esta producción de hidrógeno con combustibles líquidos permite: Evitar almacenamiento masivo de H₂ comprimido, reducir riesgos asociados a depósitos de alta presión y producir hidrógeno bajo demanda.

Lo cual es crítico en plataformas donde: El espacio es limitado, la autonomía es crítica y la seguridad es prioritaria.

La producción in situ de hidrógeno mediante reformado permite integrar generación y consumo en un mismo sistema compacto. Esta aproximación será la base del sistema modelado en el presente trabajo, donde se integran los siguientes elementos:

- Reformador con vapor
- Reacción de desplazamiento del gas de agua (WGS, water gas shift)
- Reacción de intercambio de presión (PSA)
- Pila con membranas de intercambio protónico (PEM)

2.5 Purificación de hidrógeno

En este punto se tratará la purificación de hidrógeno, abordando la necesidad de tener una alta pureza para pilas de combustible PEM, las tecnologías de purificación existentes y el principio de funcionamiento del sistema PSA.

2.5.1 Necesidad de alta pureza para pilas PEM

Las pilas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM) tienen dos requisitos principales. El primero, es que requieren hidrógeno de muy alta pureza, generalmente superior al 99,9 %. Por otro lado, la otra condición es que requiere concentraciones de monóxido de carbono (CO) inferiores a 10 ppm. Esto se debe porque el CO es especialmente perjudicial ya que se adsorbe fuertemente sobre los sitios activos del catalizador de platino (Pt), reduciendo su actividad y provocando fenómenos de envenenamiento catalítico.

Asimismo, la norma ISO 14687 define los requisitos de pureza del hidrógeno para aplicaciones en pilas de combustible [20]. Es por ello, es preciso purificar el hidrógeno para cumplir con estos requisitos.

2.5.2 Tecnologías de purificación existentes

Tras el reformado y la reacción WGS, la corriente gaseosa presenta una composición mayoritaria de H_2 mayoritaria de H_2 junto con CO_2 , CO, CH_4 y vapor de agua. Para su uso en pilas de combustible PEM se emplean distintas tecnologías.

- **Membranas:** Las membranas actúan como sistemas de separación selectiva. Permiten que ciertas moléculas pasen a través de ellas más fácilmente que otras. En el caso de la purificación de hidrógeno, la membrana está diseñada para que el hidrógeno atraviese el material con mayor rapidez que los demás gases presentes en la mezcla, en este caso CO_2 , CO o CH_4 .
Esto ocurre porque las moléculas de hidrógeno son muy pequeñas y ligeras, lo que facilita su paso a través del material de la membrana. En este caso la purificación se realiza con membranas metálicas de paladio (Pd) ya que presentan una alta selectividad del hidrógeno, haciendo que se obtenga una pureza muy elevada.
Sin embargo, la IEA (2019) señala que las tecnologías de membranas a pesar de ser prometedoras, todavía presentan limitaciones económicas y de durabilidad para determinadas aplicaciones [14].
- **Absorción química:** Se basa en la captura selectiva de CO_2 con la presencia de soluciones químicas (por ejemplo, aminas) las cuales reaccionan con este, reteniendo selectivamente el CO_2 mientras el hidrógeno permanece en la corriente gaseosa. Es común en procesos industriales de captura de carbono, pero no elimina completamente el CO, lo que limita su aplicación directa en sistemas PEM.

- **Adsorción por cambio de presión (PSA):** En este caso se emplea un material sólido poroso (por ejemplo, zeolita o carbón activado) en lugar de líquido, el cual adhiere las partículas no deseadas haciendo que queden adsorbidas en la superficie del material, mientras que el hidrógeno que apenas tiene afinidad por el adsorbente pase a través del sistema.

En la Tabla 2-2, se comparan las principales tecnologías de purificación de hidrógeno. Como se observa, el sistema PSA permite alcanzar mayores niveles de pureza, lo que justifica su selección en aplicaciones con pilas de combustible PEM.

Tecnología	Cómo funciona	Ventaja principal	Limitación principal
Membranas	Filtro selectivo	Compactas	Coste alto (Pd)
PSA	Sólido atrapa impurezas	Muy alta pureza	Proceso cíclico
Absorción	Líquido reacciona con CO ₂	Buena eliminación CO ₂	Sistema voluminoso

Tabla 2-2 Comparación tecnología

2.5.3 Principio de funcionamiento del PSA

El PSA (Pressure Swing Adsorption) se basa en la adsorción selectiva de impurezas mediante cambios de presión sobre un material sólido poroso (adsorbente). Su funcionamiento se articula en dos etapas principales [21].

- **Fase de adsorción (alta presión):** ocurre cuando el gas procedente del reformado entra en el PSA por la columna a presión elevada y el material sólido del interior (zeolita o carbón activado) actúa como adsorbente haciendo que las moléculas no deseadas (CO₂, CO, CH₄) se queden retenidas en su superficie mientras que el hidrógeno, que tiene menor afinidad por el material, pasa a través de este y sale purificado.
- **Fase de despresurización (regeneración):** En la fase de despresurización (regeneración), se reduce la presión de la columna, provocando la liberación de las especies adsorbidas. Estas se evacúan como corriente residual, regenerando el adsorbente para su reutilización Figura 2-7 [22].

En sistemas industriales los PSA (Figura 2-7) emplean múltiples columnas (generalmente entre 4 y 6), que trabajan de forma independiente en distintos ciclos: Presurización, adsorción, despresurización y purga. Lo que permite tener un flujo continuo de hidrógeno purificado.

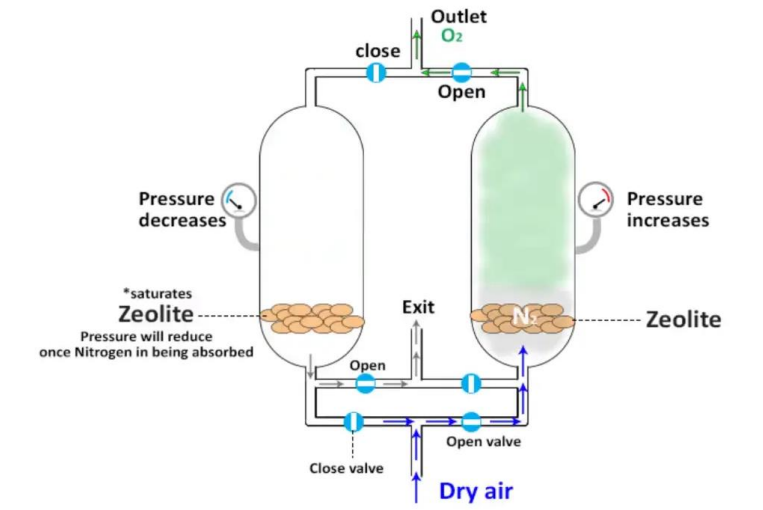


Figura 2-7 Esquema PSA[23]

2.6 Tecnologías (PEM)

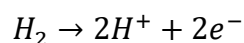
Aquí se presenta el concepto de pilas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM). Para ello, se comenzará describiendo su principio de funcionamiento, a continuación, se analizan sus principales ventajas, posteriormente, se abordan los requisitos de pureza del hidrógeno necesarios para su correcto funcionamiento y finalmente, se estudia su eficiencia energética.

2.6.1 Principio de funcionamiento

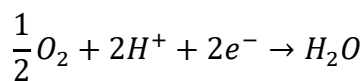
La pila de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM, Proton Exchange Membrane Fuel Cell) como se muestra en la Figura 2-8 es un dispositivo electroquímico que se encarga de convertir directamente la energía química del hidrógeno en energía eléctrica.

Esta batería PEM a diferencia de los motores térmicos no funciona mediante combustión, sino mediante reacciones electroquímicas separadas en dos electrodos.

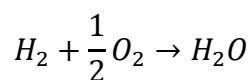
Sus reacciones fundamentales utilizadas son:



Reacción 7 Ánodo



Reacción 8 Cátodo



Reacción 9 Global

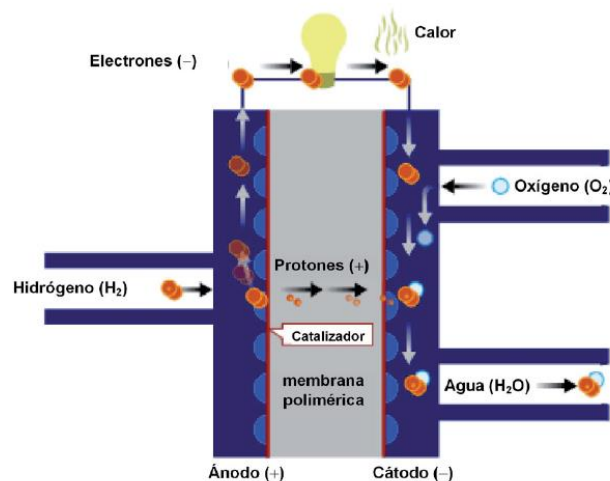


Figura 2-8 Esquema pila de hidrógeno[24]

Durante el proceso de funcionamiento de la pila de combustible el hidrógeno se disocia en protones y electrones. Los protones atraviesan una membrana polimérica (para intercambio protónico) situada en el interior de la pila mientras que los electrones no pueden atravesar esa membrana, por lo que circulan por un circuito externo, generando corriente eléctrica.

Finalmente, los protones y electrones se combinan con el oxígeno del aire, formando agua como único producto resultante [24].

2.6.2 Ventajas de las pilas PEM

Las pilas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM) tienen una serie de características que las hacen especialmente adecuadas para aplicaciones móviles embarcadas y navales.

En primer lugar, poseen una alta eficiencia eléctrica que se sitúa generalmente entre el 40 % y el 60 % en condiciones nominales de operación. Esto significa que una parte importante de la energía química térmica contenida en el hidrógeno se transforma directamente en electricidad útil, sin necesidad de procesos intermedios de combustión. En comparación con motores térmicos convencionales, esta conversión permite reducir pérdidas energéticas asociadas a ciclos termodinámicos.

Además, las pilas PEM normalmente trabajan a baja temperatura, entre 60 y 80 °C. Esto hace que se simplifique el diseño del sistema de refrigeración y se reduzca el número de estructuras y materiales, lo que facilita su integración en sistemas compactos y embarcados.

Esto por otra parte hace que a diferencia de otros tipos de pilas de combustible que requieren alcanzar temperaturas elevadas para comenzar a operar, las PEM pueden entrar en funcionamiento en tiempos relativamente cortos. Esto resulta especialmente importante en ambientes donde se requiere disponibilidad energética inmediata.

Por otra parte desde el punto de vista operativo, las pilas PEM presentan una baja firma acústica, debido a que no existe combustión ni partes móviles internas significativas en el proceso electroquímico. Esto las convierte en una opción especialmente atractiva para aplicaciones navales de superficie o submarinas, donde la discreción acústica es un factor estratégico.

En este contexto, la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2019) [14] identifica las pilas de combustible, y en particular las tecnologías PEM, como una opción clave para la movilidad avanzada y determinadas aplicaciones clave dentro de los escenarios de transición energética.

2.6.3 Requisitos de pureza del hidrógeno

El correcto funcionamiento de una pila de combustible PEM depende en gran medida del nivel de pureza del hidrógeno suministrado. Ya que la presencia de determinadas impurezas puede afectar significativamente al rendimiento electroquímico del sistema. Esto debido en gran parte por el monóxido de carbono (CO) ya que se trata de uno de los contaminantes más perjudiciales.

Todo esto surge por la alta afinidad que posee el CO por el catalizador de platino presente en el ánodo de la pila. Cuando está presente en la corriente de alimentación, incluso en concentraciones muy bajas, tiende a adsorberse sobre los sitios activos del catalizador, bloqueando las zonas donde debería producirse la reacción de oxidación del hidrógeno. Este fenómeno reduce la disponibilidad de dicha superficie catalítica haciendo que pierda efectividad y, en consecuencia, disminuye la velocidad de reacción y la eficiencia del sistema.

Además, la exposición prolongada a concentraciones elevadas de CO puede provocar una degradación progresiva del catalizador, afectando a la vida útil de la pila. Por esta razón, los sistemas PEM requieren hidrógeno de muy alta pureza, con niveles de CO típicamente limitados. Por ello normas como la ISO 14687[20], establece la concentración máxima admisible de CO en hidrógeno para aplicaciones en pilas de combustible del orden de ppm.

Esto hace imprescindible la incorporación de etapas avanzadas de purificación en los diseños industriales, como los sistemas PSA, en configuraciones basadas en reformado.

2.6.4 Eficiencia energética

La eficiencia de una pila alimentada por hidrógeno PEM se define como la relación entre la energía eléctrica generada y la energía térmica producida por hidrógeno suministrado, normalmente expresada en función del poder calorífico inferior (PCI) del hidrógeno (Figura 2-9). En otras palabras, indica qué porcentaje de la energía producida en el combustible se transforma en electricidad útil.

En condiciones nominales de operación, estas PEM suelen presentar eficiencias eléctricas típicas comprendidas entre el 45 % y el 55 % [25]. Esto significa que aproximadamente la mitad de la energía química del hidrógeno se convierte en electricidad, mientras que el resto se libera principalmente en forma de calor.

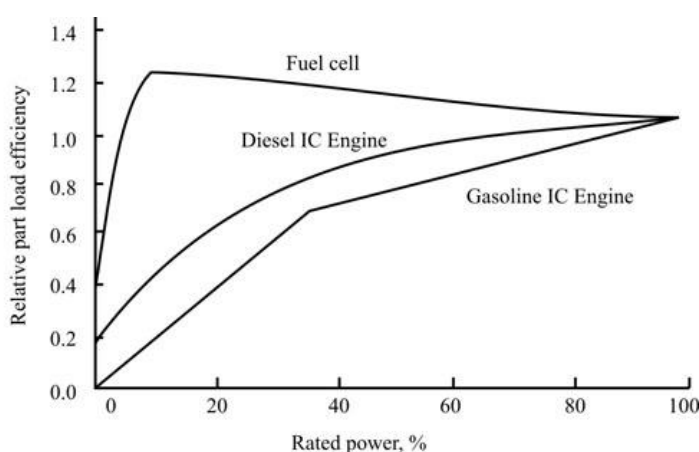


Figura 2-9 Comparación de eficiencia con motores de combustión[26]

No obstante, la eficiencia global del sistema no depende únicamente de la pila de combustible. En un sistema modelado integrado como el desarrollado en este trabajo, deben considerarse también las eficiencias en etapas previas a la pila PEM, como la producción de hidrógeno con el reformado del combustible y la reacción Water Gas Shift y su posterior purificación mediante PSA, así como las

pérdidas térmicas asociadas a intercambiadores de calor, compresores y sistemas auxiliares utilizados. Por tanto, la eficiencia total del sistema es el resultado del rendimiento combinado de todas estas etapas.

Por otra parte, la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2019)[14] también señala que las pilas de combustible permiten una conversión de energía más eficiente que muchos sistemas basados en combustión convencional, parte de esta afirmación se debe a que al poder evitar las limitaciones termodinámicas propias que requieren los ciclos térmicos tradicionales y su capacidad para convertir directamente la energía química en electricidad mediante un proceso electroquímico.

Esto deja a la pila de combustible como uno de los sistemas con mayor eficiencia energética como se puede apreciar en la Tabla 2-3 [27].

Tecnología	Eficiencia eléctrica
PEM Fuel Cell	45–55 %
Motor gasolina	20–25 %
Motor diésel	30–40 %
Turbina gas	30–40 %

Tabla 2-3 Elaboración propia a partir de DOE (Fuel Cell Handbook).

2.7 Requerimientos energéticos en submarinos

En este apartado se analizan los requerimientos energéticos en submarinos. En primer lugar, se estudian las limitaciones energéticas actuales de los sistemas convencionales, a continuación, se examina la importancia e influencia de la firma acústica y térmica en el diseño y operación de los sistemas energéticos y finalmente, se abordan los requisitos energéticos específicos del entorno submarino.

2.7.1 Limitaciones energéticas de los sistemas convencionales

En un mundo donde los requerimientos energéticos mayores hay unidades que están teniendo problemas para adaptarse. Un ejemplo son los submarinos convencionales diésel-eléctricos los cuales operan mediante un sistema híbrido compuesto por motores diésel y baterías. En superficie o a profundidad de snorkel (Figura 2-10), los motores diésel están en funcionamiento mientras que se recargan las baterías y alimentan los sistemas del buque. Sin embargo, durante la inmersión profunda, el submarino depende exclusivamente de la energía almacenada en baterías. Esta configuración implica que la autonomía sumergida está directamente condicionada por la capacidad de almacenamiento eléctrico disponible.



Figura 2-10 Submarino haciendo snorkel para recargar baterías[28]

Además, esta necesidad de ascender a profundidad de snorkel para recargar baterías incrementa la detectabilidad del buque, tanto por radar como por sensores infrarrojos y acústicos como señalan diferentes estudios sobre propulsión submarina [29].

Esto es un gran problema ya que, en entornos tácticos, la necesidad periódica de recarga representa un riesgo estratégico, ya que el uso del snorkel tiene consecuencias directas como el aumento de la firma radar, de la firma térmica y genera ruido mecánico asociado a motores diésel.

2.7.2 Firma acústica y térmica

En los submarinos, uno de los factores más importantes es la discreción y sigilo con la que actúan. Esta capacidad de permanecer sin ser detectado es clave para el éxito de sus cometidos, esto hace que la firma acústica y térmica de los sistemas de propulsión y generación de energía se deban mantener lo más bajos posible.

Tal y como se ha indicado, en los sistemas basados en combustión, como es el caso de los submarinos convencionales de propulsión con motores diésel, generan vibraciones mecánicas, ruido estructural y emite gases calientes los cuales pueden ser detectados por sensores acústicos o térmicos del enemigo (Figura 2-11). Estas emisiones aumentan la probabilidad de localización del submarino por parte de sistemas de vigilancia [28].

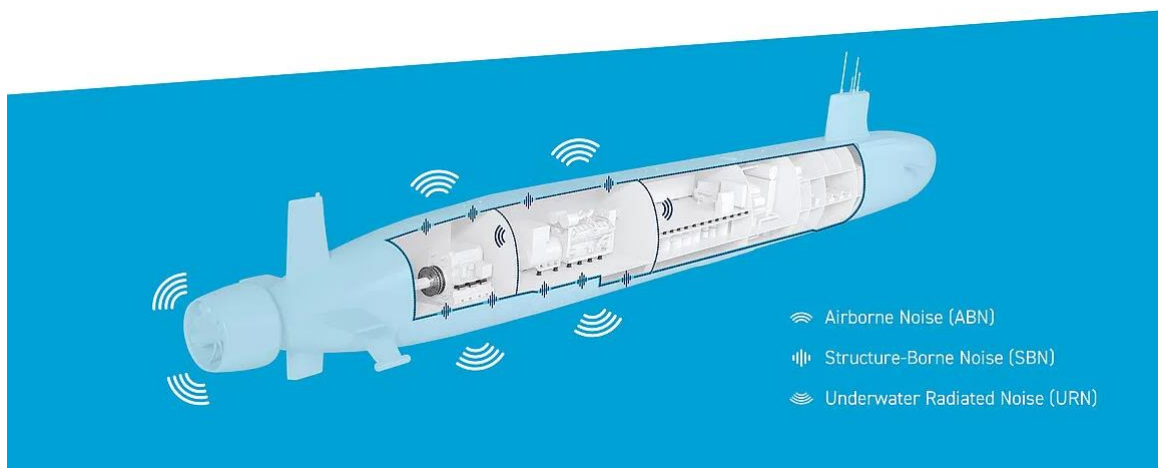


Figura 2-11 Firma acústica producida por un submarino[30]

En cambio, los sistemas electroquímicos como las pilas de combustible de hidrógeno PEM las como las que hemos hablado anteriormente las cuales presentan una serie de ventajas importantes en este aspecto. Al no basarse en procesos de combustión directa como los motores diésel, la generación de energía se produce mediante reacciones electroquímicas internas que no implican explosiones ni ciclos térmicos intensos. Esto reduce significativamente la generación de ruido y vibraciones lo que contribuye a una gran reducción de la firma acústica.

En cuanto a la firma térmica, en los sistemas de combustión convencionales, una parte importante de la energía necesita ser liberada en forma de calor, haciendo que se originen unos gases de escape a alta temperatura. Al contrario que en las pilas de combustible en las cuales la conversión de energía se realiza de forma más eficiente y a temperaturas relativamente bajas, lo que reduce en gran medida la cantidad de calor emitido al exterior.

Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2019) [14]. Las pilas de combustible consiguen una conversión electroquímica directa de la energía generada por el hidrógeno en electricidad, evitando muchas de las pérdidas térmicas asociadas a los sistemas de combustión tradicionales y contribuyendo a un funcionamiento más eficiente y discreto.

2.7.3 Requisitos energéticos específicos en entorno submarino

Como hemos podido observar, el sistema energético instalado en un submarino debe satisfacer una gran variedad de requisitos muy exigentes debido a las limitaciones de espacio y a las condiciones de operación en las que se encuentran este tipo de unidades cuando están en inmersión. La primera característica que debe poseer es la de tener una alta densidad energética, es decir, ser capaz de almacenar o generar mucha energía ocupando el menor volumen posible.

Por otra parte, es fundamental que tenga la capacidad de operar de forma silenciosa y con bajas vibraciones, para evitar la detección del submarino. Además, debe garantizar una alta fiabilidad y seguridad con el manejo de combustibles y gases durante largos periodos de funcionamiento, ya que las operaciones en inmersión las cuales comprenden un gran riesgo pueden prolongarse durante días. Otro aspecto a tener en cuenta es que el sistema sea de tamaño reducido y tenga la capacidad de integrarse de forma compacta en el espacio limitado disponible en el interior del submarino.

Finalmente, debido a la importancia de los citados anteriormente es preciso disponer de una gestión térmica y acústica adecuada, la cual permita controlar el calor generado durante el funcionamiento del sistema y reduzca las emisiones sonoras.



Figura 2-12 Características submarino S-81 Isaac Peral, de Navantia[31]

Estas características hacen que las pilas de hidrógeno PEM sean las adecuadas para satisfacer todos estos requisitos energéticos mediante su integración en sistemas de propulsión independiente del aire (AIP) en submarinos que han sido impulsados, estos últimos años debido a las limitaciones operativas, donde la reducción de ruido, vibraciones y emisiones térmicas constituye un requisito operativo fundamental como veremos a continuación.

Este sistema surge debido a que, en sistemas cerrados como un submarino, la generación eléctrica sin intercambio de aire exterior constituye una ventaja operativa significativa. Según la literatura técnica sobre AIP, la autonomía sumergida es uno de los principales factores de mejora en submarinos convencionales [32].

2.8 Sistemas AIP (Air Independent Propulsion)

Los sistemas de propulsión independiente del aire (Air Independent Propulsion, AIP) son aquellos que permiten a los submarinos convencionales, es decir, no nucleares, generar energía eléctrica en inmersión sin el requerimiento de utilizar oxígeno atmosférico.

Los submarinos convencionales son diésel-eléctricos tradicionales, lo que significa que la energía eléctrica es obtenida mediante motores diésel los cuales recargan las baterías cuando el submarino se encuentra en superficie o a profundidad de snorkel al requerir de oxígeno atmosférico para poder efectuar esta recarga. Esto hace que durante el tiempo que este el submarino en inmersión dependa únicamente de la capacidad de energía que pueda almacenar en las baterías, lo que limita el tiempo que puede permanecer sumergido.

Con la incorporación de estos sistemas AIP se permite extender significativamente la autonomía en inmersión, al reducir la necesidad de utilizar el snorkel para recargar las baterías y, por consiguiente, reducir la probabilidad de detección del submarino por sensores radar, acústicos o infrarrojos. Diversos estudios sobre modernización naval indican que los submarinos equipados con AIP pueden permanecer sumergidos durante periodos considerablemente más largos que los submarinos convencionales, alcanzando varias semanas de operación a baja velocidad (O'Rourke, 2018) [32].

En la actualidad ya existen diversas tecnologías AIP implementadas en submarinos convencionales, entre las que podemos destacar el uso de motores Stirling, los sistemas MESMA y los sistemas basados en pilas de combustible.

2.8.1 Motores Stirling

Los motores Stirling fueron una las primeras tecnologías AIP empleadas en submarinos. Su funcionamiento se basa en motores térmicos de combustión externa en los cuales el combustible líquido se quema empleando oxígeno el cual es almacenado abordo, para generar calor. Este calor hace que se produzca la expansión de un gas en el interior del motor como en todos los motores de combustión, lo que mueve un pistón y produce energía mecánica. Esta, es posteriormente convertida en electricidad mediante el empleo de un generador (Figura 2-13).

Esta tecnología fue implementada principalmente en submarinos suecos de la clase Gotland, lo que permitió mejorar la autonomía en inmersión respecto a los sistemas diésel-eléctricos convencionales. Sin embargo, estos sistemas con motores Stirling presentan ciertas limitaciones, ya que al tratarse de procesos de combustión y contener partes móviles generan ruido y vibraciones. Estos factores, como hemos explicado anteriormente pueden incrementar la firma acústica del submarino, lo que constituye una gran desventaja desde el punto de vista operativo [33].

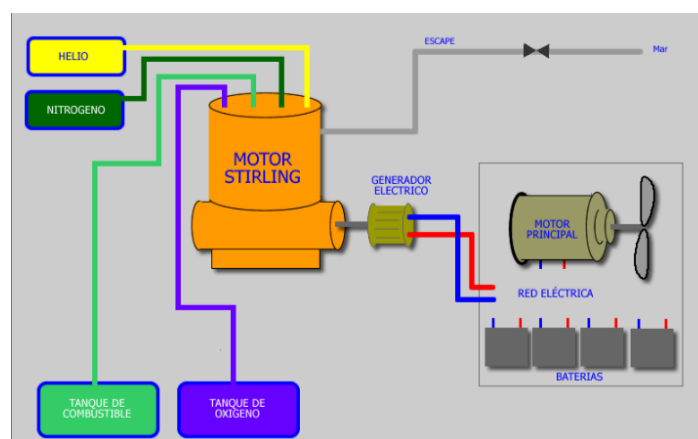


Figura 2-13 Esquema de funcionamiento AIP con motor Stirling [34]

2.8.2 Sistema MESMA

El sistema MESMA (Module d'Energie Sous-Marine Autonome) es otro tipo de tecnología AIP desarrollada por Naval Group que funciona por medio de un ciclo de vapor, similar al utilizado en algunas centrales térmicas. En este sistema funciona por medio de un combustible como puede ser el etanol el cual se quema empleando oxígeno almacenado a bordo del submarino al igual que con el motor Stirling. El calor generado por la combustión se emplea para producir vapor de agua a alta presión. Dicho vapor es el que se encarga de hacer girar una turbina conectada a un generador, que produce electricidad para alimentar los sistemas eléctricos del submarino y recargar sus baterías (Figura 2-14).

Una de las principales ventajas de este sistema es que permite generar energía, aunque el submarino se encuentre en inmersión sin la necesidad de utilizar aire atmosférico con el snorkel, lo que aumenta el tiempo que el submarino puede permanecer sumergido.

A pesar de esto, el sistema MESMA presenta algunas limitaciones. Al basarse en un ciclo térmico, su eficiencia es menor y posee un mayor nivel de ruido al igual que en el caso anterior. Otro impedimento, es el requerimiento del sistema de precisar de varios equipos adicionales, como turbinas, intercambiadores de calor, condensadores y sistemas de manejo de vapor, lo que incrementa el tamaño, el peso y la complejidad de la instalación. Esto hace que aumente su dificultad de integración en submarinos al tener un espacio tan reducido y aumentar los requisitos de mantenimiento del sistema [35].

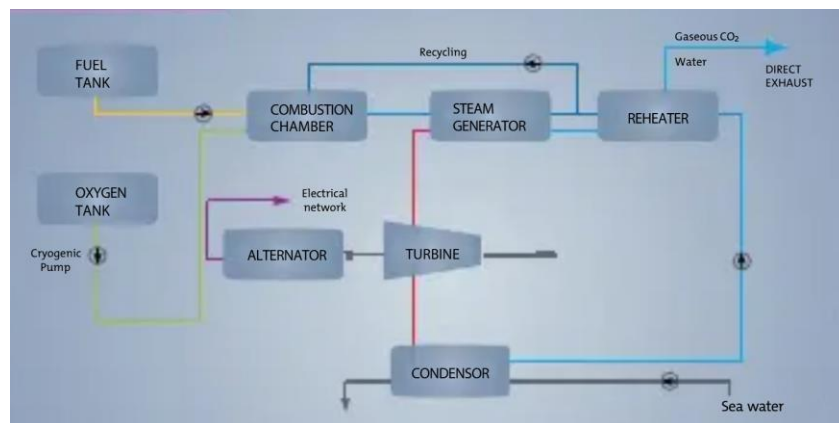


Figura 2-14 Esquema AIP MESMA[36]

2.8.3 Sistemas AIP basados en pilas de combustible

Las pilas de combustible se han convertido en una de las tecnologías AIP más avanzadas actualmente. En concreto, las pilas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM) Figura 2-15 las cuales hemos explicado previamente, ya que son capaces de convertir directamente la energía química del hidrógeno en electricidad por medio de reacciones electroquímicas.

Como hemos explicado en el apartado 2.6.2 al contrario que de los sistemas AIP basados en procesos de combustión o ciclos térmicos, estas pilas de combustible poseen una serie de ventajas importantes para aplicaciones submarinas. Las cuales son, la capacidad de tener una alta eficiencia energética, ya que la conversión electroquímica evita muchas de las pérdidas asociadas a los ciclos termodinámicos convencionales. Por otra parte, su funcionamiento es prácticamente silencioso, ya al no requerir de una combustión directa en el proceso de generación de electricidad. Además, este sistema presenta pocas partes móviles, lo que reduce tanto vibraciones mecánicas como requisitos de mantenimiento. Por último, las pilas de combustible operan a temperaturas relativamente bajas en comparación con otros sistemas de generación energética y, por tanto, una menor firma térmica.

Esta serie de ventajas hacen que los sistemas basados en pilas de combustible sean los más adecuados para aplicaciones submarinas, en situaciones donde la reducción de ruido, vibraciones y emisiones térmicas es clave para mantener la discreción operativa del buque. Como resultado, varios submarinos modernos ya han incorporado sistemas AIP basados en pilas de combustible como los submarinos alemanes Type-212 y Type-214 y otros están encaminados a integrarlos como es el caso de la serie S80 o los nuevos diseños de submarinos franceses [37], permitiendo aumentar significativamente su autonomía submarina y reducir la necesidad de utilizar el snorkel [37].

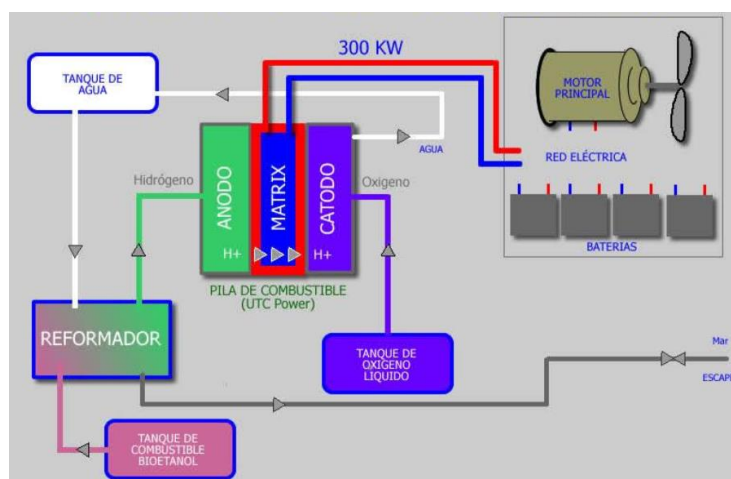


Figura 2-15 Esquema de funcionamiento planta S80[38]

En la Tabla 2-4 se comparan las principales tecnologías AIP. Como se observa, las pilas PEM presentan ventajas claras en eficiencia y discreción operativa, lo que justifica su creciente adopción en submarinos modernos.

Tecnología	Principio	Ventajas	Limitaciones
Stirling	Motor de combustión externa que genera energía mecánica y electricidad.	Tecnología probada y relativamente simple.	Ruido, vibraciones y menor eficiencia.
MESMA	Ciclo de vapor donde la combustión produce vapor que mueve una turbina.	Mayor autonomía que sistemas diésel-eléctricos.	Sistema voluminoso y menor eficiencia.
PEM (hidrógeno)	Conversión electroquímica de hidrógeno en electricidad.	Alta eficiencia, funcionamiento silencioso y baja firma térmica.	Requiere almacenamiento o producción de hidrógeno.

Tabla 2-4 Comparación de tecnologías AIP

Como se puede apreciar, los sistemas AIP basados en pilas de combustible presentan ventajas importantes frente a otras tecnologías que las convierten en la opción más adecuada para aplicaciones submarinas. Sin embargo, la implementación de este tipo de sistemas requiere disponer de hidrógeno de alta pureza, lo que plantea el desafío de su almacenamiento o producción a bordo. Por este motivo, en los últimos años se han estudiado diferentes estrategias para la producción de hidrógeno directamente en el submarino, aspecto que se aborda en el siguiente apartado.

2.8.4 Producción de hidrógeno a bordo

En los sistemas AIP basados en pilas de combustible, el hidrógeno es un factor esencial ya que actúa como vector energético el cual permite generar electricidad de forma eficiente y silenciosa mediante reacciones electroquímicas.

No obstante, uno de los principales desafíos que tienen estos sistemas es el almacenamiento de hidrógeno a bordo del submarino debido a su reducido espacio. Tanto el almacenamiento gaseoso, el cual requiere sistemas de almacenamiento a alta presión como en forma líquida que requiere estar muy bajas temperaturas, pueden complicar su integración en plataformas submarinas.

Debido a estas limitaciones, una de las alternativas consiste en producirlo directamente a bordo a partir de combustibles líquidos. Este enfoque permite almacenar la energía en forma de combustibles con mayor densidad energética volumétrica y generar el hidrógeno únicamente cuando es necesario para alimentar la pila de combustible [37].

Por ello se aplican los procesos de obtención los cuales ya hemos explicado: el reformado con vapor, en el que un combustible reacciona con vapor de agua a altas temperaturas en presencia de un catalizador para producir una mezcla de gases rica en hidrógeno. Posteriormente, esta mezcla puede someterse a procesos adicionales como la reacción Water Gas Shift (WGS) para aumentar la producción y reducir la concentración de monóxido de carbono.

Finalmente, el gas producido es purificado antes de su utilización en una pila de combustible, ya que impurezas como el monóxido de carbono pueden afectar negativamente al funcionamiento del catalizador. Para ello, se emplean tecnologías de purificación como los sistemas PSA (Pressure Swing Adsorption), que permiten obtener hidrógeno de alta pureza.

De esta forma, se consigue integrar en un mismo sistema las distintas etapas y fases necesarias para la producción y utilización del hidrógeno, como se muestra en la Figura 2-16.

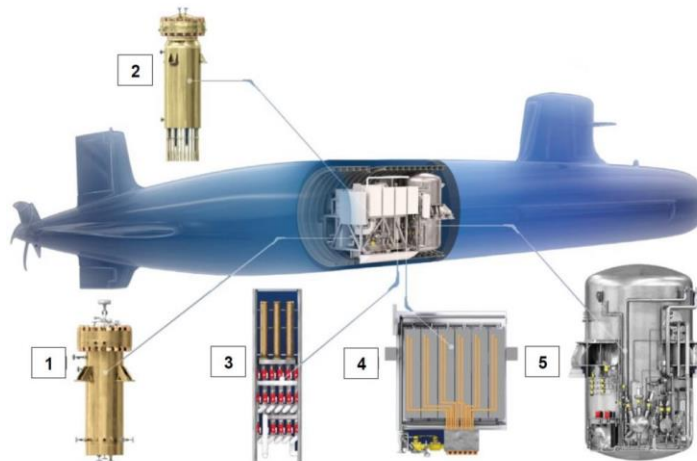


Figura 2-16 Configuración planta AIP[37]

Este enfoque permite producir hidrógeno de alta pureza a partir de un combustible líquido almacenado a bordo y convertirlo posteriormente en electricidad mediante una pila de combustible, constituyendo una solución potencialmente viable para sistemas AIP compactos y eficientes.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Diseño de la planta

En el presente trabajo se plantea el diseño de un sistema integrado capaz de transformar un combustible líquido en hidrógeno de alta pureza, adecuado para su utilización en pilas de combustible de tipo PEM. Para ello, se adopta una configuración de proceso basada en etapas ampliamente empleadas en la industria de producción de hidrógeno, adaptadas a un enfoque de modelado conceptual en DWSIM.

El esquema de proceso propuesto, representado en la Figura 3-1, permite la generación de hidrógeno in situ, evitando la necesidad de almacenamiento directo del mismo. Esta decisión responde a las limitaciones asociadas al almacenamiento de hidrógeno, especialmente en aplicaciones embarcadas, donde los requisitos de alta presión o criogenia suponen un incremento significativo en complejidad, volumen y riesgos operativos.

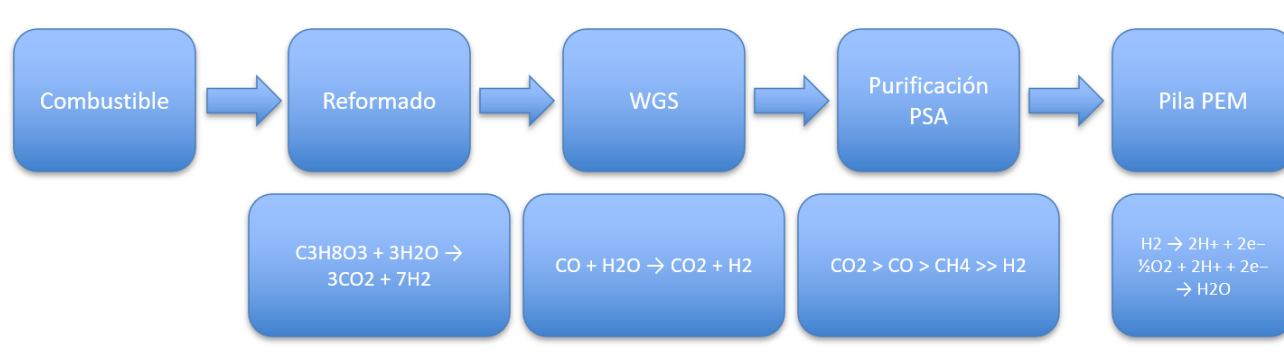


Figura 3-1 Esquema modelo

La arquitectura del sistema se basa en la integración de tres etapas principales: reformado con vapor, reacción Water Gas Shift (WGS) y purificación mediante adsorción por cambio de presión (PSA).

En primer lugar, se selecciona el reformado con vapor como etapa de producción de hidrógeno, al tratarse de una tecnología ampliamente desarrollada y adecuada para la conversión de combustibles líquidos en una corriente gaseosa rica en H_2 . No obstante, el gas de salida del reformador presenta una composición compleja, incluyendo monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y vapor de agua, lo que hace necesaria la incorporación de etapas posteriores de acondicionamiento.

Con el objetivo de incrementar la producción de hidrógeno y reducir la concentración de monóxido de carbono, se incorpora una etapa de reacción Water Gas Shift (WGS). Esta etapa permite convertir el CO presente en la corriente en CO₂, generando adicionalmente hidrógeno y mejorando así el rendimiento global del proceso.

Posteriormente, la corriente gaseosa se somete a un proceso de purificación mediante adsorción por cambio de presión (PSA), seleccionado frente a otras tecnologías como membranas o absorción química debido a su capacidad para alcanzar elevados niveles de pureza de hidrógeno. En este sistema, los adsorbentes retienen selectivamente las impurezas (CO₂, CO, CH₄), mientras que el hidrógeno atraviesa el lecho adsorbente con mínima retención, obteniéndose una corriente final con alta pureza. Este requisito resulta fundamental para el correcto funcionamiento de las pilas de combustible PEM, que son altamente sensibles a contaminantes, especialmente al monóxido de carbono.

Como resultado, la integración de las etapas de reformado, reacción WGS y purificación PSA permite definir una configuración de proceso capaz de transformar un combustible líquido, fácilmente almacenable, en hidrógeno de alta pureza, apto para su conversión en energía eléctrica mediante una pila de combustible.

Esta arquitectura constituye la base del modelo desarrollado en DWSIM, donde las distintas etapas serán representadas mediante operaciones unitarias y modelos termodinámicos simplificados, permitiendo evaluar el comportamiento global del sistema y su viabilidad en aplicaciones tipo AIP.

3.2 Justificación del uso del Software DWSIM

El modelado del sistema se ha realizado mediante DWSIM, un simulador de procesos basado en balances de materia y energía y en modelos termodinámicos.

Su utilización en este trabajo se justifica no solo por sus capacidades generales, sino por su adecuación al tipo de problema planteado, caracterizado por la integración de múltiples etapas fisicoquímicas en régimen estacionario.

En particular, el sistema desarrollado combina procesos en los que intervienen reacciones químicas en fase gaseosa (reformado y reacción WGS), separación de componentes (PSA) e integración energética del sistema.

DWSIM permite representar este tipo de sistemas mediante operaciones unitarias interconectadas, lo que resulta especialmente adecuado para analizar el comportamiento global del proceso y la interacción entre sus distintas etapas.

En el presente trabajo, el software se ha empleado para modelar el reactor de reformado de glicerina, el reactor de equilibrio para la reacción WGS, el sistema de purificación mediante una aproximación del PSA, la pila de combustible PEM, intercambiadores de temperatura y presión y su integración del sistema completo.

Este enfoque permite evaluar variables clave como la producción de hidrógeno, la composición de las corrientes y el rendimiento global del sistema, aspectos fundamentales en el análisis de viabilidad de sistemas AIP.

No obstante, el modelo presenta ciertas limitaciones. En particular, el PSA se representa mediante una aproximación simplificada en régimen estacionario, sin considerar la dinámica real del ciclo de adsorción. Por ello, el modelo debe interpretarse como una herramienta de análisis conceptual, adecuada para el estudio del sistema a nivel global, pero no como un diseño detallado a escala industrial.

3.3 Selección materia prima

Con el objetivo de seleccionar la materia prima más adecuada para la producción de hidrógeno en el sistema modelado en DWSIM, se ha realizado una comparación técnica entre glicerina y bioetanol, dos compuestos orgánicos que pueden ser reformados con vapor para generar hidrógeno. Para ello se ha realizado un estudio simulando la producción de hidrógeno con ambos, en la Figura 3-2.

El análisis se ha basado en criterios relevantes para su aplicación en sistemas AIP:

- Producción teórica de hidrógeno por unidad de combustible
- Complejidad del reformador
- Tendencia a la formación de coque
- Estabilidad operativa en funcionamiento continuo
- Facilidad de almacenamiento a bordo

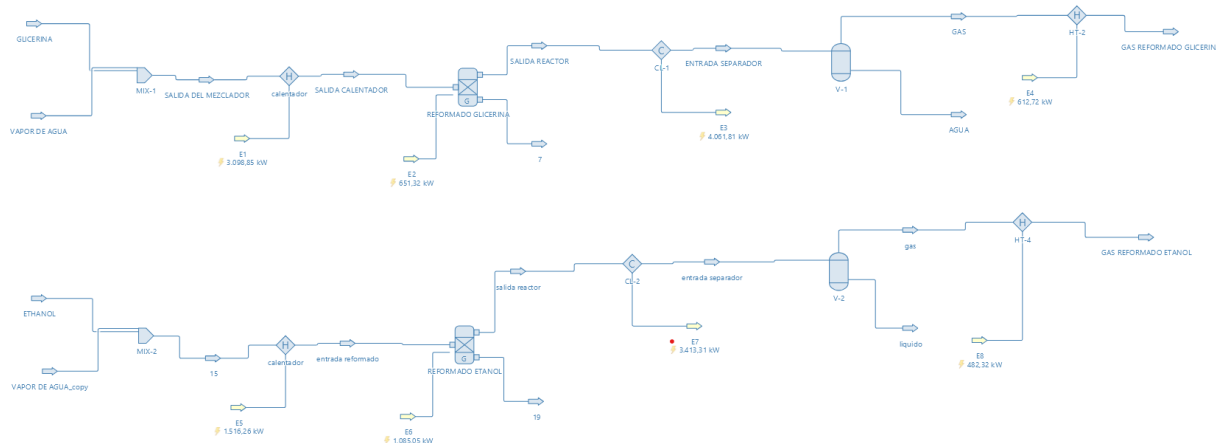


Figura 3-2 Simulación estudio de comparación

3.3.1 Reformado de glicerina

La glicerina presenta un alto contenido en hidrógeno en su estructura molecular, lo que hace que sea un candidato para la producción de hidrógeno mediante el reformado.

La reacción global de reformado puede expresarse como:



Se obtiene como resultado se obtiene 1 mol de glicerina que produce 7 moles de hidrógeno y que 1 kg de glicerina produce aproximadamente 0,15 kg de H_2

En la simulación se puede observar como la glicerina presenta un elevado rendimiento, lo que la sitúa como una opción atractiva desde el punto de vista de producción de hidrógeno. Sin embargo, debido a sus propiedades posee una elevada viscosidad, mayor tendencia a la formación de coque y mayor complejidad en la vaporización y control térmico.

3.3.2 Reformado de bioetanol

El bioetanol es uno de los combustibles más estudiados y empleados para la producción de hidrógeno mediante reformado con vapor.

La reacción global es



Para este caso, se obtiene que 1 mol de etanol produce 6 moles de hidrógeno y que 1 kg de etanol produce aproximadamente 0,13 kg de H_2 .

Aunque presenta algunas ventajas sobre la glicerina como baja viscosidad y elevada volatilidad como, se presenta en la Tabla 3-1, las cuales facilitan su vaporización, y menor tendencia a la formación de coque. Tras realizar la simulación se obtiene que la producción teórica de hidrógeno es inferior a la de la glicerina.

Parámetro	Glicerina	Bioetanol
Fórmula química	$C_3H_8O_3$	C_2H_5OH
Reacción global de reformado	$C_3H_8O_3 + 3H_2O \rightarrow 3CO_2 + 7H_2$	$C_2H_5OH + 3H_2O \rightarrow 2CO_2 + 6H_2$
Producción teórica de H_2	7 mol H_2 / mol combustible	6 mol H_2 / mol combustible
Producción específica de H_2	0,15 kg H_2 / kg combustible	0,13 kg H_2 / kg combustible
Complejidad del reformador	Alta (mayor control térmico y vaporización)	Media
Tendencia a formación de coque	Alta	Baja
Viscosidad del combustible	Alta	Baja
Capacidad de almacenamiento	Alta	Alta

Tabla 3-1 Tabla comparativa de materias primas para producción de hidrógeno

3.3.3 Selección final

Aunque el bioetanol presenta mejores características operativas desde el punto de vista industrial, en el presente trabajo la selección de la materia prima se realiza bajo un enfoque de modelado conceptual, y no de optimización de un proceso real.

En este contexto, se selecciona la glicerina como materia prima debido a su mayor potencial teórico de producción de hidrógeno, lo que permite obtener una corriente de gas reformado con mayor contenido en H_2 . Este aspecto resulta especialmente relevante en un estudio como el presente, donde el objetivo principal es evaluar la capacidad del sistema para generar hidrógeno de alta pureza.

Además, una mayor fracción de hidrógeno en la corriente de alimentación al sistema de purificación favorece el rendimiento del proceso PSA, facilitando el análisis de su comportamiento y la obtención de hidrógeno con la pureza requerida para su uso en pilas de combustible tipo PEM.

Por tanto, la glicerina se adopta como caso de estudio, priorizando su potencial de producción frente a sus limitaciones operativas, las cuales no se abordan en detalle al tratarse de un modelo conceptual desarrollado en DWSIM.

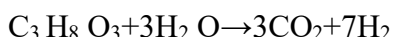
3.4 Modelado de las etapas del proceso

El sistema se modela mediante la integración de las etapas de reformado, reacción Water-Gas Shift (WGS), purificación por PSA y conversión en pila PEM. Cada operación se representa en DWSIM mediante modelos basados en equilibrio termodinámico, permitiendo evaluar la producción de hidrógeno, su grado de purificación y el rendimiento global del sistema.

3.4.1 Simulación proceso de reformado

El objetivo de este bloque consiste en la producción de un gas rico en hidrógeno (para su posterior purificación) a partir del reformado con vapor de glicerina. La corriente generada está compuesta principalmente por H_2 , CO_2 , CO y H_2O , con presencia de pequeñas cantidades de CH_4 , siendo representativa de un gas reformado típico en procesos industriales de producción de hidrógeno.

El proceso de reformado es establecido mediante la siguiente reacción de equilibrio:



Reacción 12 (Reformado global de glicerina)

Como se observa en la Figura 3-3, el reformador se ha modelado en DWSIM mediante un reactor de Gibbs, en el cual la composición de salida se determina a partir de la minimización de la energía libre de Gibbs del sistema. Este enfoque permite estimar la composición en equilibrio sin necesidad de definir mecanismos cinéticos detallados, lo que resulta adecuado para estudios de carácter conceptual.

Por otra parte, este reactor permite que el reformado del vapor opere cerca del equilibrio termodinámico a altas temperaturas. Se ha demostrado experimentalmente la viabilidad del reformado de glicerina con vapor a temperaturas entre 600–800 °C [39-40].

Asimismo, emplear un reactor basado en la minimización de la energía libre de Gibbs para estimar la composición del gas de reformado viene respaldada por trabajos comparativos entre termodinámica de equilibrio y resultados experimentales [41]. Esto permite analizar la influencia de variables operativas como la temperatura y la relación vapor/carbono sin introducir incertidumbres asociadas a modelos cinéticos detallados.

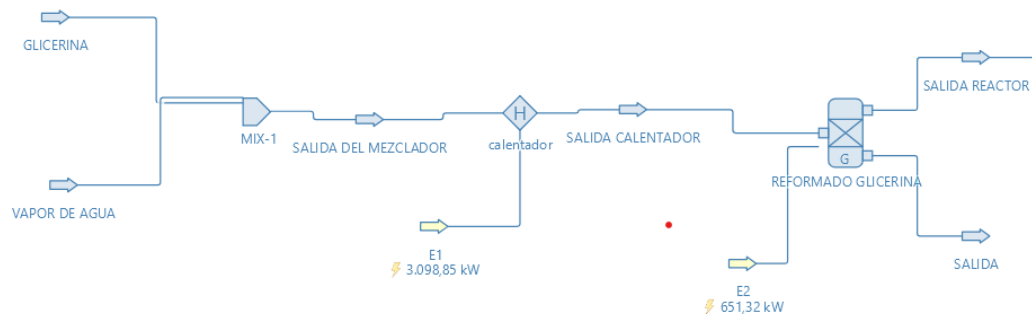


Figura 3-3 Simulación del proceso de reformado

La corriente de alimentación al reactor está compuesta por una mezcla de glicerina y vapor de agua, seleccionándose la glicerina como materia prima por su elevado contenido en hidrógeno.

Como condición de operación base, se establece una temperatura de aproximadamente 750 °C, valor que permite favorecer la producción de hidrógeno, limitar la formación de metano y obtener una composición adecuada para las etapas posteriores del proceso.

3.4.2 Simulación WGS (reacción de desplazamiento gas-agua)

Tras la etapa de reformado, la corriente gaseosa contiene una fracción significativa de monóxido de carbono (CO), cuya presencia resulta perjudicial para las etapas posteriores del proceso. Para su conversión, se incorpora una etapa de Water-Gas Shift (WGS), Figura 3-4, en la cual el CO reacciona con vapor de agua para producir dióxido de carbono e hidrógeno adicional.

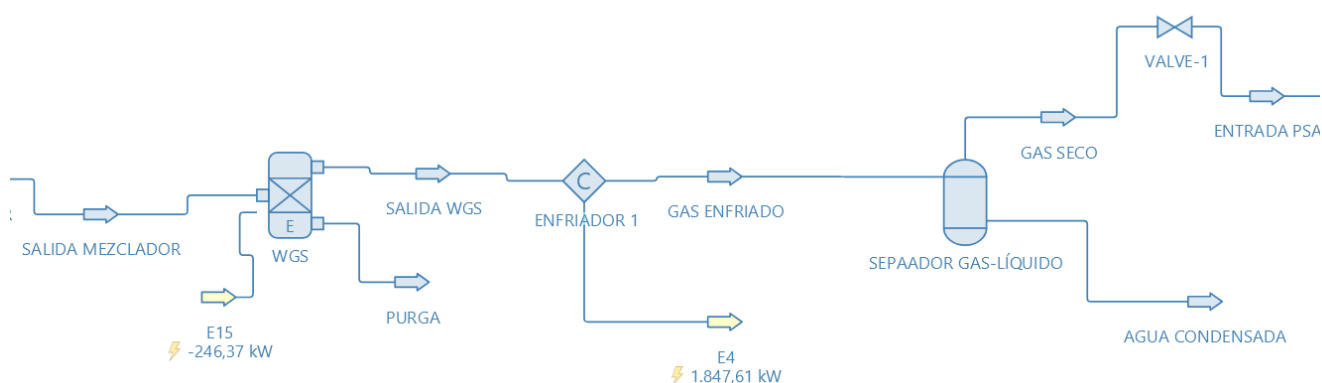
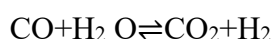


Figura 3-4 Simulación WGS

Como se muestra en la Figura 3-5, esta etapa se modela en DWSIM mediante un reactor de equilibrio, operando en un rango de temperaturas comprendido entre 250–350 °C, condiciones en las que la reacción se ve favorecida. Posteriormente, la corriente se enfría para permitir la eliminación del agua mediante un separador.

Esto se consigue aplicando la reacción de equilibrio al reactor de equilibrio, establecido en la Figura 3-5.



Reacción de desplazamiento agua-gas (WGS)

Nombre	Peso molar	ΔH_f (kJ/kg)	Incluir	A.C.	Stoich. Coeficientes.
Oxygen	31,9988	0	☐	☐	0
Water	18,0153	-13422,7	☒	☐	-1
Carbon dioxide	44,0095	-8941,48	☒	☐	1
Carbon monoxide	28,0101	-3946,08	☒	☒	-1
Methane	16,0425	-4645,17	☐	☐	0

Estequiometría OK Equilibrar Heat of Reaction (kJ/kmol_BC) (25°C) -41166

Ecuación $\text{H}_2\text{O} + \text{CO} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{CO}_2$

Equilibrium Reaction Parameters

Base Fugacity Fase Vapor Tmin (K) 0 Tmax (K) 2000

Unidades Aproximación de temperatura (K) 0

Constante de equilibrio (Keq)

☒ Calcular a partir de la energía de reacción de Gibbs ΔG_R (kJ/kmol_BC) (25°C) -28630

☐ T-Function: $\ln K_{eq} [f(T)] =$ T en K

☐ Valor constante 0

Use "." as the decimal separator on math expressions. Cancel OK

Figura 3-5 Establecimiento de la reacción de equilibrio en el reactor

La incorporación de esta etapa presenta dos efectos principales sobre el sistema:

- Incremento del rendimiento de hidrógeno, al generarse un mol adicional de H_2 por cada mol de CO convertido.
- Reducción de la concentración de CO, componente crítico por su efecto negativo sobre catalizadores y su impacto en la pureza del hidrógeno.

La disminución del contenido de CO antes de la etapa de purificación permite mejorar el rendimiento del sistema PSA, reduciendo la carga de impurezas y facilitando la obtención de hidrógeno de alta pureza.

3.4.3 Simulación PSA

En esta etapa se modela el sistema de purificación mediante adsorción por cambio de presión (PSA), con el objetivo de obtener hidrógeno de alta pureza a partir del gas reformado. El enfoque adoptado permite analizar el comportamiento global del proceso y su influencia en la calidad final del hidrógeno.

3.4.3.1 FUNDAMENTOS DEL MODELADO

El objetivo de esta etapa es obtener una corriente de hidrógeno de alta pureza a partir del gas reformado tras la reacción WGS y la eliminación de agua Figura 3-4. La corriente de entrada al sistema PSA está compuesta principalmente por H_2 , junto con CO_2 , CO y CH_4 .

El proceso PSA se basa en la adsorción selectiva de impurezas a alta presión, donde los adsorbentes (zeolitas, carbón activo, sílice) retienen preferentemente CO_2 , CO y CH_4 , mientras que el hidrógeno atraviesa el lecho con mínima retención.

En DWSIM, el PSA se ha modelado mediante bloques de separación de componentes Figura 3-6, definiendo fracciones de paso para cada uno. Este enfoque permite reproducir el comportamiento global del proceso sin modelar la dinámica del ciclo (presurización, despresurización y purga), siendo adecuado para estudios conceptuales.

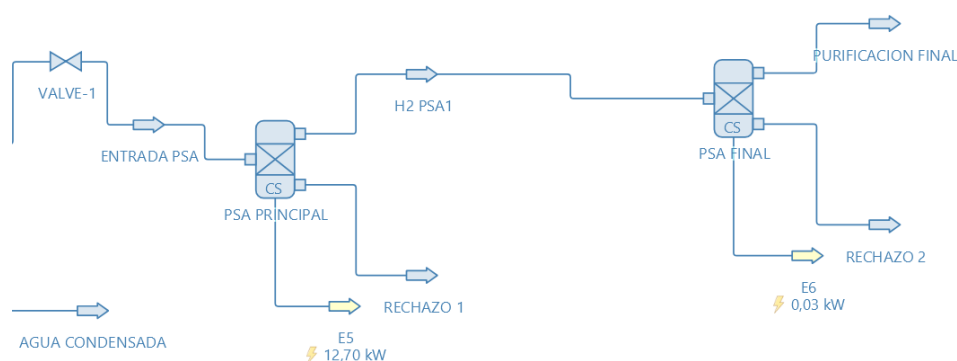


Figura 3-6 Simulación PSA

Este tipo de modelado es empleado en diferentes estudios de simulación de PSA donde es habitual el uso de este tipo de herramientas, ya que se permite representar de forma experimental el orden de absorciones $CO_2 > CO > CH_4 \gg H_2$ [42].

Como se puede observar en la Figura 3-6 se están empleando dos PSA en serie, esto es debido a que en procesos industriales de producción de hidrógeno a partir de reformado, la purificación empleando en la simulación solo una unidad PSA puede no ser suficiente si se pretende alcanzar simultáneamente: Alta pureza ($>99.9\%$ molar de H_2), alta recuperación de hidrógeno y bajo contenido de CO [43].

Por ello, se emplea una configuración de doble PSA en serie, habitual en procesos industriales cuando se requieren altos niveles de pureza, en el que tenemos:

- PSA 1 (principal): dedicado a la eliminación mayoritaria de CO_2 , CO y CH_4
- PSA 2 (pulido): para la eliminación de trazas residuales y aumento de pureza

3.4.3.2 CONFIGURACIONES ENSAYADAS

Para el análisis del sistema de purificación se han adoptado diferentes configuraciones de doble PSA en serie, evaluando el efecto del tipo de adsorbente en el rendimiento del proceso.

Las simulaciones se han realizado empleando tres materiales adsorbentes representativos como son el carbón activo, la Zeolita 13X y el Sílice gel.

A partir de estos materiales, se han definido cuatro configuraciones: Carbón activo + Carbón activo, Sílice + Sílice, Zeolita + Zeolita y Carbón activo + Zeolita.

El modelado se ha llevado a cabo mediante el uso de fracciones de paso, definidas como la fracción de cada componente que atraviesa el adsorbente sin ser retenido. Este enfoque permite representar el comportamiento global del sistema en régimen estacionario.

Las fracciones de paso empleadas, no corresponden a valores experimentales directos, sino a parámetros efectivos los cuales son ajustados para reproducir en un modelo estacionario rangos de pureza y recuperación observados experimentalmente en sistemas PSA industriales[44]. Se han seleccionado valores conservadores con el objetivo de priorizar el realismo del modelo frente a una optimización extrema de la pureza del hidrógeno.

A continuación, se recogen las fracciones de paso empleadas para cada configuración:

- Carbón activo + Carbón activo:

Orden de adsorción experimental $\text{CO}_2 > \text{CH}_4 > \text{CO} \gg \text{H}_2$

Componente	Fracciones de paso
H_2	0,94
CO_2	0,05
CO	0,12
CH_4	0,10

Tabla 3-2 Fracciones de paso PSA1 carbón-carbón

Componente	Fracciones de paso
H_2	0,96
CO_2	0,02
CO	0,05
CH_4	0,04

Tabla 3-3 Fracciones de paso PSA2 carbón-carbón

- Sílice + Sílice

Orden experimental: $\text{CO}_2 > \text{CO} = \text{CH}_4 \gg \text{H}_2$

Componente	Fracciones de paso
H_2	0,93
CO_2	0,15
CO	0,30
CH_4	0,25

Tabla 3-4 Fracciones de paso PSA1 sílice sílice

Componente	Fracciones de paso
H ₂	0,95
CO ₂	0,08
CO	0,20
CH ₄	0,18

Tabla 3-5 Fracciones de paso PSA2 sílice-sílice

- Zeolita + Zeolita

Componente	Fracciones de paso
H ₂	0,93
CO ₂	0,02
CO	0,05
CH ₄	0,07

Tabla 3-6 Fracciones de paso PSA1 zeolita-zeolita

Componente	Fracciones de paso
H ₂	0,95
CO ₂	0,005
CO	0,015
CH ₄	0,02

Tabla 3-7 Fracciones de paso PSA2 zeolita-zeolita

- Carbón activo + Zeolita

Se ha propuesto incluir esta configuración híbrida, en la que el PSA1 actúa mediante el carbón activo y en el PSA2 se emplea la zeolita para efectuar una purificación final.

3.4.3.3 CRITERIOS DE COMPARACIÓN

Las configuraciones de adsorbentes del sistema PSA se han evaluado en base a tres parámetros principales: Pureza del hidrógeno (% molar), recuperación de hidrógeno (%) y consumo energético específico (kWh/kg H₂)

La recuperación de hidrógeno se define como la relación entre el flujo molar de hidrógeno en la corriente de producto y el flujo molar de hidrógeno a la entrada del sistema:

$$\text{Recuperación} = \frac{\dot{n}_{H_2, \text{out}}}{\dot{n}_{H_2, \text{in}}}$$

Este parámetro permite cuantificar la fracción de hidrógeno recuperada tras el proceso de purificación.

Por su parte, el consumo energético específico se calcula como:

$$P_{\text{total}} = P_{\text{PSA1}} + P_{\text{PSA2}} \qquad \text{Consumo específico} = \frac{P_{\text{total}}}{\dot{m}_{H_2, \text{out}}}$$

Donde la potencia total corresponde a la suma de las etapas del sistema PSA.

Cabe destacar que, debido al carácter estacionario del modelo empleado en DWSIM, el consumo energético asociado al PSA no incluye el trabajo real del ciclo (presurización, despresurización y regeneración). En consecuencia, las diferencias entre configuraciones se deben principalmente a variaciones en el caudal de hidrógeno recuperado, mientras que el consumo global está dominado por otros equipos del proceso.

Por tanto, como podemos ver en la Tabla 3-8 el tipo de adsorbente apenas modifica la potencia total del sistema en este modelo simplificado. Las diferencias energéticas observadas se deben principalmente a variaciones en el caudal de hidrógeno recuperado.

Configuración	Pureza H ₂ (%)	Recuperación H ₂ (%)	Consumo específico (kWh/kg H ₂)
Carbón + Carbón	99,85	90,2	0,0556
Zeolita + Zeolita	99,97	88,4	0,0551
Carbón + Zeolita	99,93	91,2	0,0540
Sílice + Sílice	98,27	88,3	0,0596

Tabla 3-8 Comparaciones adsorbentes

3.4.3.4 RESULTADOS PSA

Los resultados obtenidos para las distintas configuraciones de adsorbentes se recogen en la Tabla 3-8, donde se comparan la pureza del hidrógeno, la recuperación y el consumo energético específico.

- Análisis del consumo energético:

El consumo energético específico, representado en la Figura 3-7, presenta diferencias reducidas entre configuraciones.

La configuración carbón activo + zeolita muestra el menor consumo, seguida de zeolita + zeolita y carbón activo + carbón activo, con valores muy próximos. Por el contrario, la configuración sílice + sílice presenta el mayor consumo energético, indicando un menor rendimiento global.

No obstante, estas diferencias deben interpretarse con cautela, ya que el modelo es estacionario y no incorpora la dinámica real del ciclo PSA. En consecuencia, el consumo está principalmente influenciado por el caudal de hidrógeno recuperado, más que por el tipo de adsorbente.

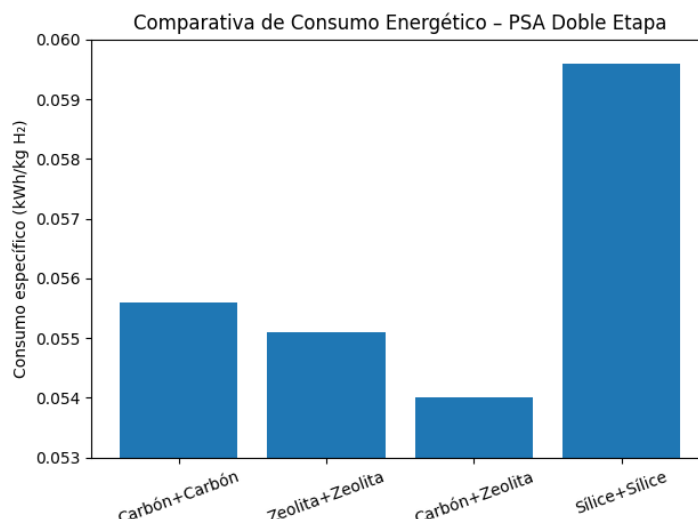


Figura 3-7 Comparativa de consumo energético

- Análisis de pureza y recuperación:

Los resultados de pureza y recuperación, mostrados en la Figura 3-8 evidencian un compromiso entre ambos parámetros en función del adsorbente utilizado.

La configuración zeolita + zeolita alcanza la mayor pureza de hidrógeno (99,97%), debido a la elevada selectividad de la zeolita frente a CO₂ y CO. Sin embargo, esta mayor selectividad implica una menor recuperación (88,4%), asociada a pérdidas de hidrógeno durante el proceso.

La configuración carbón activo + zeolita presenta el mejor equilibrio entre pureza (99,93%) y recuperación (91,2%), combinando una eliminación inicial de impurezas con una etapa final de alta selectividad.

Por su parte, la configuración carbón activo + carbón activo muestra un comportamiento intermedio, con elevada recuperación (>90%) pero menor pureza (99,85%).

Finalmente, la configuración sílice + sílice presenta el peor desempeño global, con menor pureza (98,27%) y recuperación (88,3%), debido a su baja selectividad frente a los gases presentes en la mezcla.

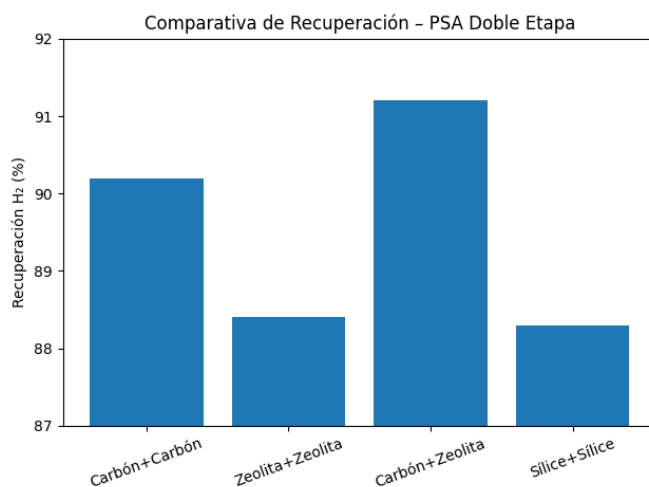
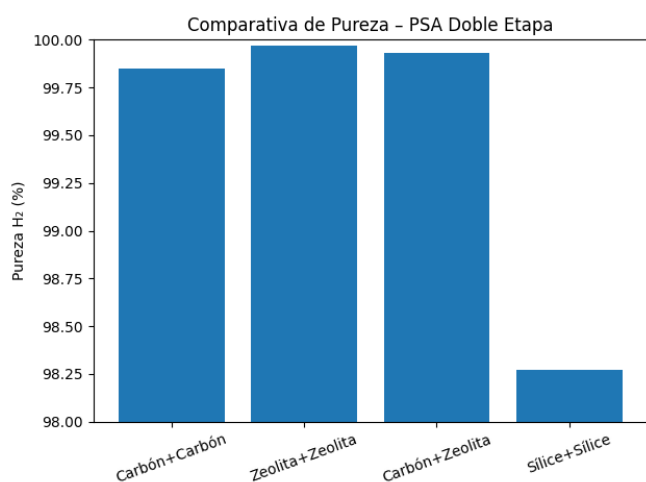


Figura 3-8 Gráficas comparativas de pureza y recuperación

- Evaluación global:

A partir del análisis conjunto Figura 3-9, se observa que:

A partir del análisis conjunto de pureza, recuperación y consumo energético, se observa que la configuración zeolita + zeolita alcanza la mayor pureza de hidrógeno (99,97%), mientras que carbón activo + zeolita ofrece el mejor equilibrio entre pureza y recuperación.

La configuración carbón activo + carbón activo presenta un comportamiento intermedio, con buena recuperación, pero menor pureza, mientras que sílice + sílice muestra el peor rendimiento global debido a su baja selectividad.

En consecuencia, desde un punto de vista de optimización global, carbón activo + zeolita puede considerarse la alternativa más equilibrada.

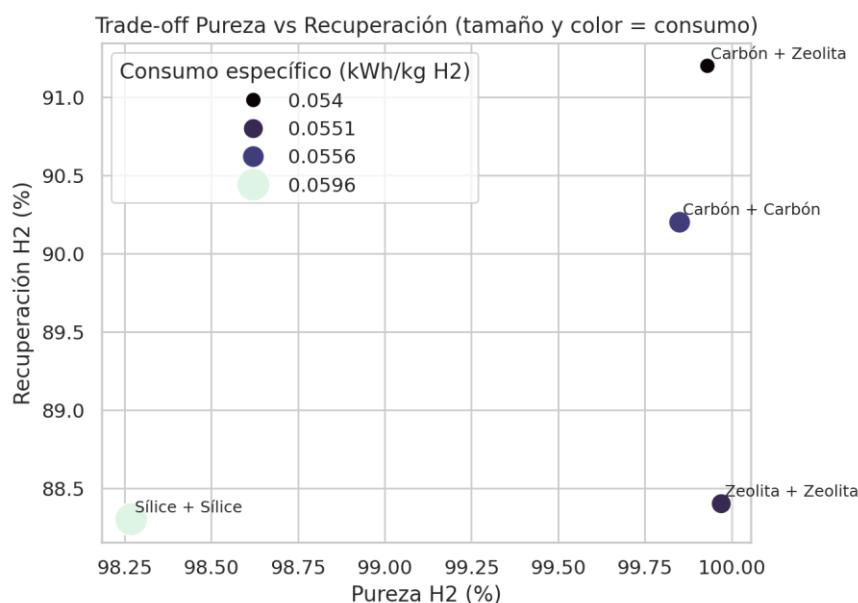


Figura 3-9 Pureza VS recuperación

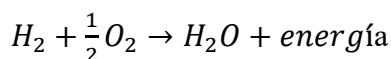
- SELECCIÓN FINAL

Debido, a los resultados obtenidos, se puede concluir que, desde un punto de vista de optimización global del proceso con fin industrial, la configuración carbón activado + zeolita se consideraría considerarse la alternativa más adecuada para el sistema. No obstante, en el presente proyecto el objetivo principal es maximizar la pureza del hidrógeno, como para aplicaciones que requieren alimentar pilas de combustible PEM, por ello la configuración zeolita + zeolita que es la que nos ofrece una mayor pureza de hidrógeno, resulta la opción más adecuada.

3.4.4 Simulación pila PEM

- Fundamento de funcionamiento

El funcionamiento de una pila de combustible tipo PEM se basa en la reacción electroquímica entre hidrógeno y oxígeno, en la que se genera electricidad, agua y calor. La reacción global puede expresarse como:



Reacción12 (electroquímica)

Components/Stoichiometry

Nombre	Peso molar	ΔH_f (kJ/kg)	Incluir	A.C	Stoich. Coeficientes.
Hydrogen	2,01588	0	☒	☒	-1
Oxygen	31,9988	0	☒	☐	-0,5
Water	18,0153	-13422,7	☒	☐	1
Nitrogen	28,0134	0	☐	☐	0
Air	28,96	0	☐	☐	0

Estequiometría OK Equilibrar Heat of Reaction (kJ/kmol_BC) (25 °C) -241814

Ecuación $H_2 + 0,5O_2 \rightarrow H_2O$

Conversion Reaction Parameters

Base Comp Hydrogen Fase Vapor

Conversión [%, f(T)] = 97 T en K

Use '.' as the decimal separator on the conversion expression.

Cancel OK

Figura 3-10 Reacción electroquímica en reactor de conversión

- Modelado en DWSIM

En DWSIM, la pila se representa mediante un reactor de conversión, en el cual se define la reacción estequiométrica entre hidrógeno y oxígeno Figura 3-10. Este enfoque permite integrar la generación de energía dentro de los balances de materia y energía del sistema.

La conversión de hidrógeno en el reactor se ajusta para representar el comportamiento global de la pila, permitiendo estimar el consumo de hidrógeno en función de la potencia generada.

Como se muestra en la Figura 3-11, esta aproximación permite modelar la pila de forma simplificada dentro del esquema global del proceso.

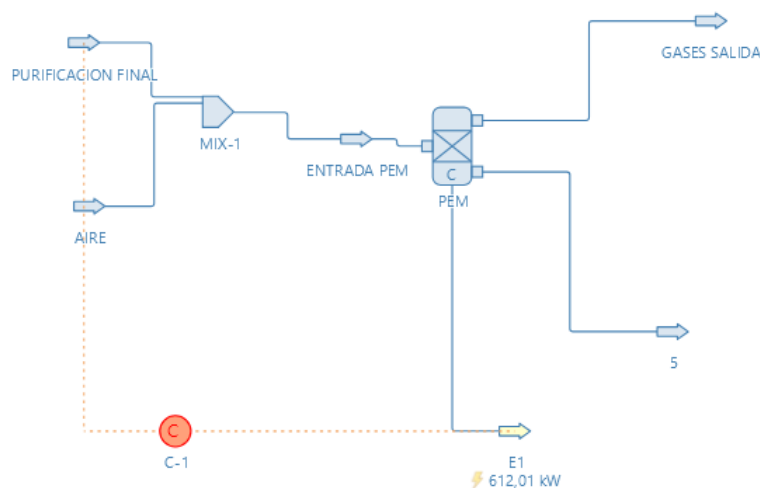


Figura 3-11 Simulación pila PEM

- Implementación y control

Por otra parte, para garantizar que en la simulación se cumplan los requerimientos energéticos, se ha empleado un bloque controlador conectado al reactor.

Como se muestra en la Figura 3-12, se incorpora un bloque de control que regula el caudal de hidrógeno alimentado al reactor, de forma que la potencia generada se ajuste a la requerida por el sistema.

Este planteamiento permite simular una gestión energética adaptativa, en la que el consumo de hidrógeno se modula en función de la carga eléctrica. Con ello se consigue que el sistema modifique automáticamente la variable de proceso hasta llegar a cumplir y mantener el objetivo energético definido, al mismo tiempo que se consigue reproducir en DWSIM una gestión energética la cual regula el consumo de hidrógeno de la pila en función de la demanda eléctrica.

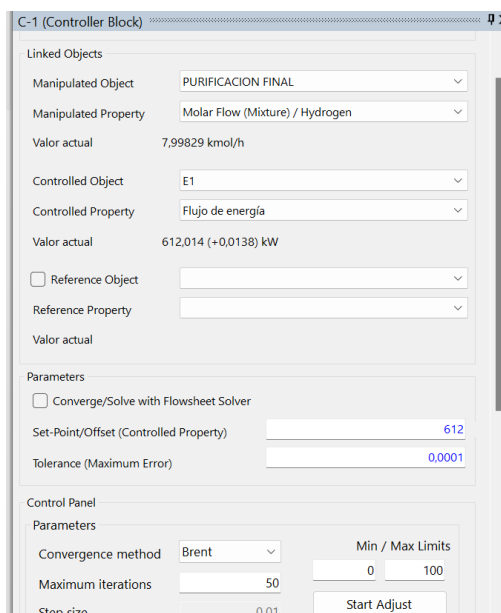


Figura 3-12 Bloque de control

3.5 Estudio de sensibilidad del proceso

Se ha realizado un estudio de sensibilidad con el modelo desarrollado en DWSIM con el objetivo de analizar la influencia de las principales variables operativas sobre el rendimiento del sistema de producción y purificación de hidrógeno.

Como variables de respuesta se han considerado: la producción de hidrógeno, pureza del hidrógeno, concentración de CO y el consumo energético específico

El análisis se ha llevado a cabo utilizando la configuración de doble PSA con adsorbente zeolita–zeolita, seleccionada previamente por su elevada capacidad de purificación. En este modelo, la recuperación de hidrógeno se mantiene constante (88,4%), al depender de las fracciones de paso definidas.

Las variables operativas analizadas han sido:

Temperatura del reformador

Relación glicerina–vapor

Presión del sistema PSA

Temperatura del reactor WGS

Para cada variable se han evaluado distintos niveles de operación, manteniendo el resto de las condiciones constantes, con el fin de identificar su influencia sobre el comportamiento global del sistema.

La configuración del modelo global empleado se muestra en la Figura 3-13

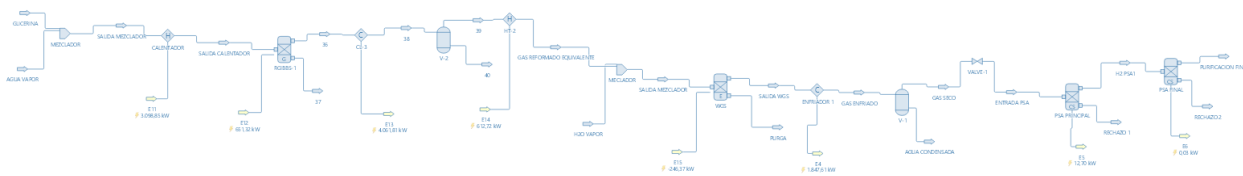


Figura 3-13 Esquema global de sistema

3.5.1 Influencia de la temperatura del reformado

La temperatura del reformador es uno de los parámetros más influyentes en el proceso de reformado de glicerina, ya que afecta directamente al equilibrio de las reacciones y, por tanto, a la producción de hidrógeno.

Los resultados obtenidos Figura 3-14, para un rango de temperaturas entre 700 °C y 800 °C (siendo 750 °C la condición base del modelo), muestran que el aumento de la temperatura produce un incremento en la producción de hidrógeno. Como consecuencia, se observa una mejora del rendimiento global del sistema.

En particular, el consumo energético específico disminuye de forma significativa, pasando de aproximadamente 52,7 kWh/kg H₂ a 39,7 kWh/kg H₂, lo que indica que el aumento de producción compensa el mayor requerimiento térmico del reformador.

Este comportamiento se explica porque el reformado de glicerina está dominado por reacciones endotérmicas, que se ven favorecidas a altas temperaturas, incrementando la conversión del combustible y la generación de hidrógeno.

Sin embargo, el aumento de la temperatura también provoca un incremento en la concentración de monóxido de carbono antes de la etapa de purificación, pasando de 1,74% a 3,06% en el rango analizado. Este efecto se debe a que las condiciones térmicas elevadas favorecen la formación de CO en las reacciones de reformado, aumentando la carga de impurezas que debe tratar el sistema PSA.

Desde el punto de vista del rendimiento del reformado, la temperatura de 800 °C permite maximizar la producción de hidrógeno. No obstante, este aumento conlleva una mayor formación de CO antes de la etapa PSA, incrementando la carga de purificación.

Aunque en el modelo este incremento no afecta de forma significativa a la pureza final del hidrógeno, debido a la alta eficiencia del PSA, la selección de la temperatura de operación debe considerar también aspectos como el consumo energético y las exigencias térmicas del sistema.

En este sentido, y dado que el objetivo del estudio es maximizar la pureza del hidrógeno desde un punto de vista conceptual, la elección de las condiciones de operación debe entenderse como un compromiso entre la producción de hidrógeno y la capacidad del sistema de purificación para garantizar dicha pureza.

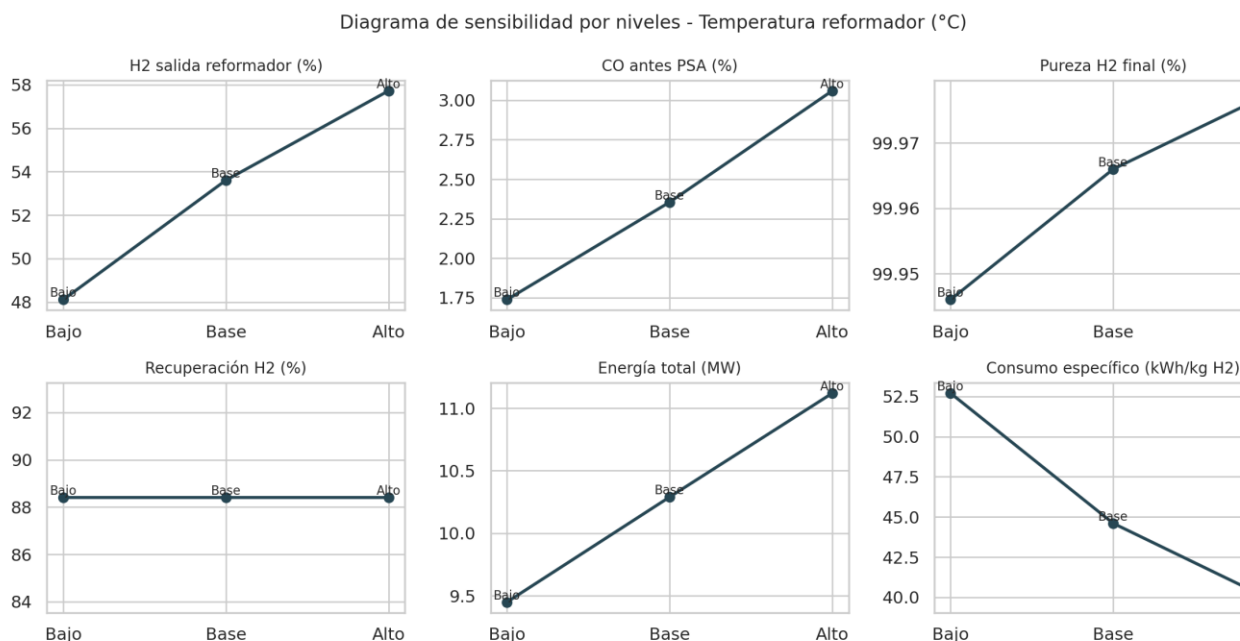


Figura 3-14 Variación temperatura del reformador

3.5.2 Influencia de la relación glicerina-vapor

La relación glicerina–vapor es un parámetro relevante en el proceso, ya que el vapor de agua interviene tanto en las reacciones de reformado como en la reacción de desplazamiento gas-agua (WGS).

Para su análisis se han considerado tres niveles de operación: 3,87; 4,97 y 6,45, correspondientes a condiciones baja, base y alta, respectivamente.

Los resultados obtenidos Figura 3-15 muestran que el incremento de la relación vapor/glicerina produce un aumento en la fracción de hidrógeno a la salida del reformador, pasando de 50,46% a 56,85%. Este comportamiento se debe a que una mayor cantidad de vapor favorece las reacciones de reformado, incrementando la producción de hidrógeno.

Este efecto se traduce en una ligera mejora de la pureza final del hidrógeno. No obstante, dicha mejora es limitada, ya que el sistema PSA mantiene una elevada eficiencia de separación en todo el rango analizado.

Por otro lado, se observa un incremento moderado en la concentración de CO antes de la etapa de purificación, pasando de 2,22% a 2,50%, lo que implica una ligera mayor carga para el PSA, aunque sin impacto significativo en la pureza final dentro del modelo.

El efecto más relevante se observa en el consumo energético. Al aumentar la relación glicerina–vapor, la energía total del sistema crece de forma significativa, pasando de 9,28 MW a 11,61 MW, lo que se traduce en un aumento del consumo energético específico, especialmente a partir del valor base (4,97).

Este comportamiento indica que el vapor adicional, aunque favorece la producción de hidrógeno, penaliza la eficiencia energética del sistema.

El aumento de la relación glicerina–vapor mejora la producción de hidrógeno, pero con un impacto limitado en la pureza final y un incremento significativo del consumo energético. Por ello, valores intermedios (condición base) representan la opción más equilibrada entre rendimiento y eficiencia del sistema.

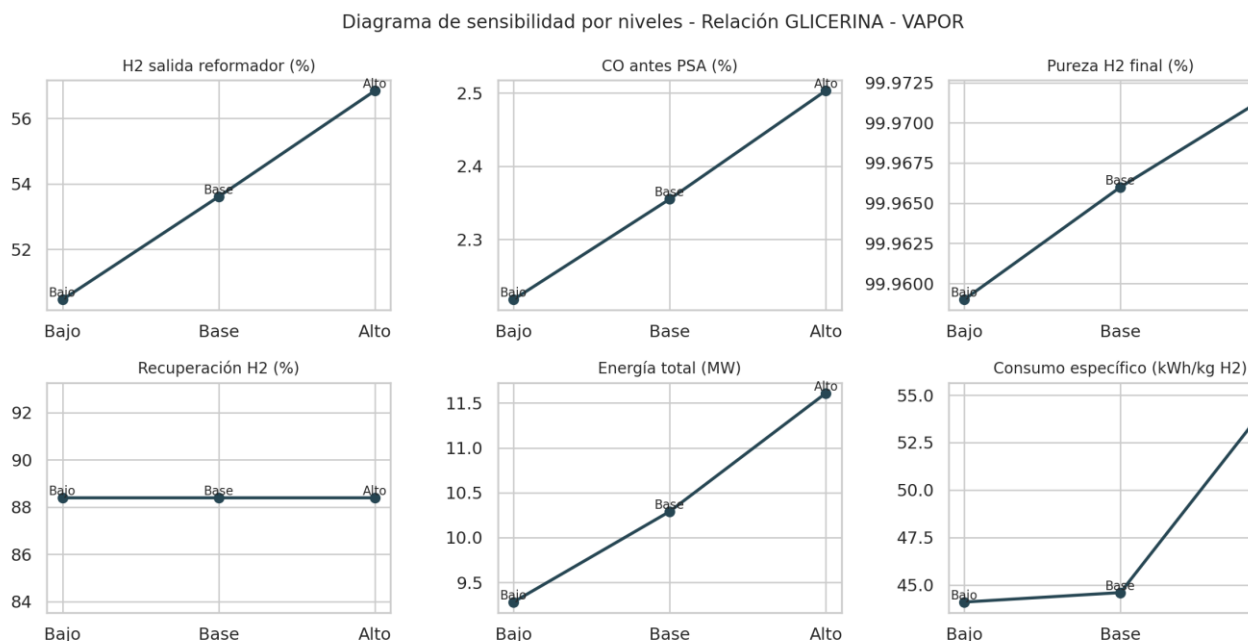


Figura 3-15 Variación glicerina-vapor

3.5.3 Influencia de la presión PSA

Con el objetivo de analizar la influencia de la presión de operación en el sistema de purificación, se ha realizado un estudio de sensibilidad considerando tres niveles de presión en el PSA: 5 bar, 10 bar y 15 bar, correspondientes a los niveles bajo, base y alto, respectivamente.

Para implementar esta variación en la simulación, se ha empleado una válvula a la entrada del sistema PSA (Figura 3-16), que permite ajustar la presión de operación manteniendo constantes el resto de las variables del proceso.

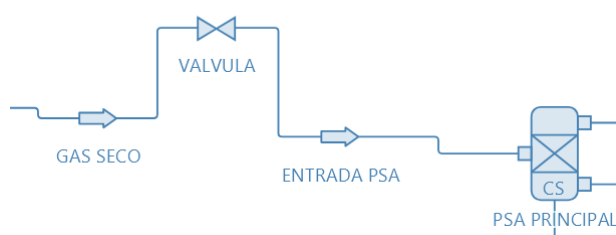


Figura 3-16 Válvula simulación DWSIM

Cabe destacar que las variables de composición a la salida del reformador, como la fracción de hidrógeno o la concentración de CO, no se ven afectadas por este parámetro, al tratarse de etapas previas al sistema de purificación.

Los resultados obtenidos Figura 3-17 muestran que, dentro del rango de presiones analizado, no se observan variaciones significativas en los principales parámetros del proceso, como la pureza del hidrógeno, la recuperación o el consumo energético específico, que permanecen prácticamente constantes.

Este comportamiento se explica por la forma en que el sistema PSA ha sido modelado en DWSIM. En el presente trabajo, el proceso de adsorción se representa mediante un separador de componentes basado en fracciones de paso constantes en régimen estacionario. Como consecuencia, la eficiencia de

separación no depende explícitamente de la presión de operación, a diferencia de lo que ocurre en sistemas PSA reales, donde la presión es un parámetro clave en el equilibrio de adsorción y en el funcionamiento cíclico del proceso.

Por tanto, la ausencia de influencia de la presión observada en los resultados no debe interpretarse como un comportamiento físico real del sistema, sino como una limitación inherente al modelo simplificado adoptado.

En consecuencia, se puede concluir que, dentro del marco del modelo desarrollado y en el rango de presiones considerado, la presión del PSA no presenta una influencia apreciable en el rendimiento del proceso. No obstante, en un sistema real, este parámetro tendría un impacto significativo sobre la eficiencia de separación y el consumo energético del proceso.

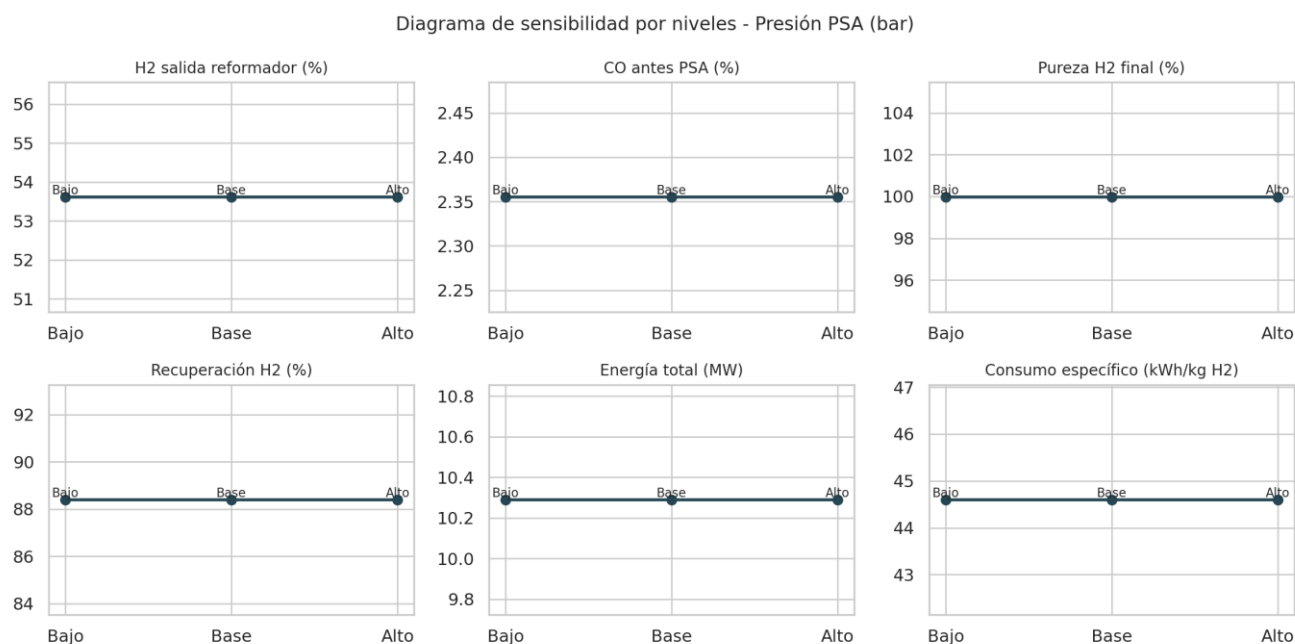


Figura 3-17 Variación presión PSA

3.5.4 Influencia de la temperatura del reactor WGS

Se ha analizado la influencia de la temperatura del reactor de desplazamiento gas-agua (WGS) sobre el comportamiento global del sistema, considerando tres niveles de operación: 250 °C, 350 °C y 450 °C, correspondientes a condiciones baja, base y alta Figura 3-18.

La fracción de hidrógeno a la salida del reformador no se ve afectada por esta variable, al tratarse de una etapa previa al reactor WGS.

Sin embargo, la temperatura del WGS influye de forma significativa en la concentración de monóxido de carbono antes de la etapa de purificación. Como se muestra en la, Figura 3-18 al aumentar la temperatura, la concentración de CO se incrementa notablemente, pasando de 0,614 % a 5,37 % en el rango analizado.

Este comportamiento se debe al carácter exotérmico de la reacción WGS, en la que temperaturas más bajas favorecen el desplazamiento del equilibrio hacia la formación de productos (CO_2 y H_2), reduciendo la concentración de CO.

En consecuencia, el aumento de temperatura provoca una mayor carga de impurezas en la corriente de entrada al PSA. Esto se traduce en una ligera disminución de la pureza final del hidrógeno, aunque los valores se mantienen próximos al 99,96% debido a la elevada eficiencia del sistema de purificación.

Adicionalmente, se observa un incremento del consumo energético del sistema al aumentar la temperatura del reactor, pasando la potencia total de 9,73 MW a 10,88 MW, y el consumo específico de 40,9 a 45,8 kWh/kg H₂.

La disminución de la temperatura del reactor WGS favorece la conversión de CO y reduce el consumo energético del sistema. Por ello, temperaturas bajas (250 ºC) resultan más favorables dentro del modelo, al minimizar la carga sobre el PSA y mejorar el rendimiento global del proceso.

Diagrama de sensibilidad por niveles - Temperatura WGS (°C)

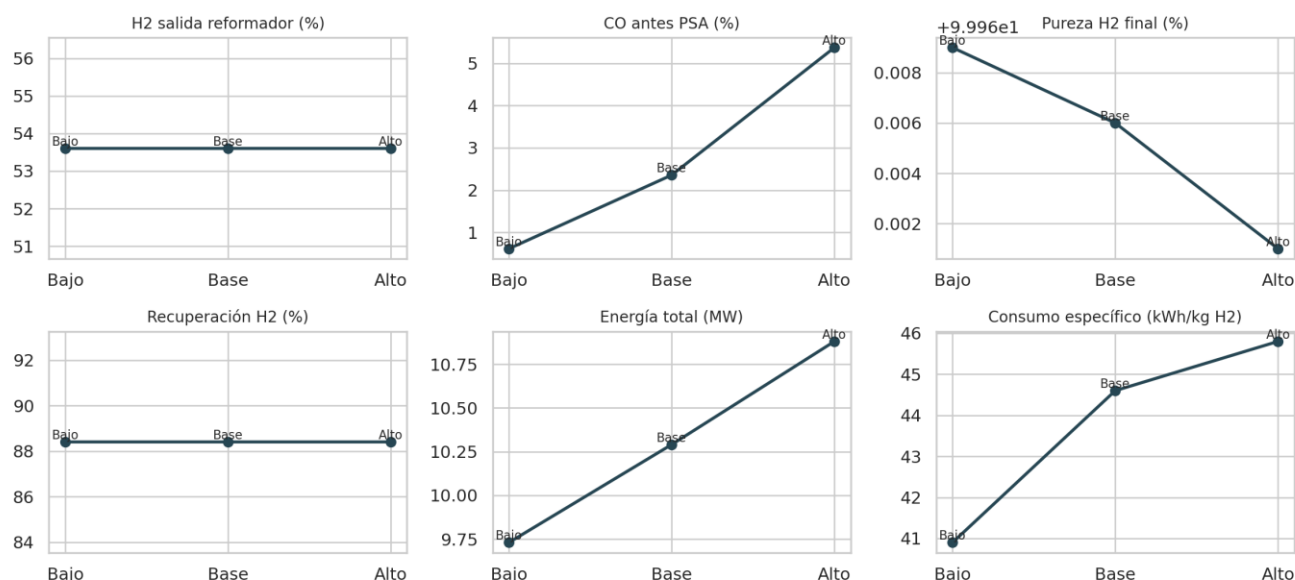


Figura 3-18 Variación temperatura reactor WGS

3.5.5 Evaluación global del estudio de sensibilidad

El análisis realizado permite identificar las variables con mayor impacto en el rendimiento del proceso.

La temperatura del reformador y la relación glicerina/vapor son las variables más influyentes, al afectar directamente a la producción de hidrógeno y al consumo energético. La temperatura del reactor WGS presenta una influencia moderada, principalmente sobre la concentración de CO previa al PSA, mientras que la presión del PSA no muestra efecto significativo dentro del modelo adoptado.

Los resultados evidencian la existencia de compromisos entre las variables operativas, por lo que no es posible definir una condición óptima única. En este contexto, se consideran adecuados los siguientes rangos de operación:

Reformado: temperaturas elevadas (750 a 800 ºC)

Relación glicerina/vapor: valor intermedio

WGS: temperaturas bajas (250 ºC)

El estudio permite definir condiciones de operación coherentes con el objetivo del sistema, orientado a la obtención de hidrógeno de alta pureza dentro del marco del modelo desarrollado.

4 RESULTADOS / VALIDACIÓN / CASO PRÁCTICO

4.1 Introducción a los resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del modelo desarrollado en DWSIM, con el objetivo de evaluar el rendimiento del sistema de producción y purificación de hidrógeno.

En primer lugar, se analizan los resultados globales del sistema, incluyendo la pureza del hidrógeno obtenido, el caudal de producción y la composición de la corriente final, con el fin de comprobar su adecuación para alimentar una pila de combustible PEM.

A continuación, se valida la capacidad del sistema para cubrir una demanda energética determinada, comparando el caudal de hidrógeno obtenido en la simulación con el requerido para la generación de energía eléctrica.

Finalmente, a partir de estos resultados, se plantea la aplicación del sistema en un caso práctico, evaluando su viabilidad en un submarino equipado con un sistema de propulsión independiente del aire (AIP).

4.2 Resultados globales del sistema

El modelo desarrollado permite obtener una corriente de hidrógeno de alta pureza a partir de la secuencia de procesos compuesta por reformado de glicerina, reacción de desplazamiento gas-agua (WGS) y purificación mediante PSA.

Los resultados de la simulación Tabla 4-1, muestran que el sistema es capaz de generar una corriente final con las siguientes características:

Pureza de hidrógeno	99,978 %
Caudal de hidrógeno producido	16,17 kg/h
Composición de impurezas (fracción molar)	CO ₂ : 5,18 $\times 10^{-5}$ CO: 4,15 $\times 10^{-5}$ CH ₄ : 1,26 $\times 10^{-4}$

Tabla 4-1 Resultado global

La elevada pureza obtenida se debe al sistema de doble PSA en serie, que permite eliminar de forma efectiva las impurezas presentes en la corriente reformada, principalmente CO₂, CO y CH₄. En particular, la reducción del CO hasta niveles del orden de 10⁻⁵ resulta fundamental, dado su efecto perjudicial sobre los catalizadores de las pilas de combustible PEM.

Por otro lado, el caudal de hidrógeno producido se mantiene dentro del rango requerido para aplicaciones energéticas de potencia media, lo que indica una adecuada integración entre las etapas de producción y purificación del sistema.

En conjunto, estos resultados muestran que el sistema es capaz de generar una corriente de hidrógeno apta para alimentar una pila de combustible tipo PEM sin necesidad de etapas adicionales de purificación.

4.2.1 Conclusión resultado global

El sistema modelado permite obtener hidrógeno con una pureza superior al 99,9% y con niveles de CO compatibles con aplicaciones PEM, cumpliendo los requisitos básicos para su uso en sistemas AIP en el marco de un análisis conceptual.

4.3 Validación del requerimiento energético

Para evaluar la viabilidad del sistema propuesto, se compara el caudal de hidrógeno obtenido en la simulación con el requerido para alimentar una pila de combustible PEM.

Para satisfacer esta demanda se considera el uso de una pila de combustible PEM, concretamente el modelo VLIV240 Figura 4-1, capaz de operar en el rango de potencia requerido.



Figura 4-1 VLIV240[45]

Teniendo en cuenta que la pila empleada tiene un requerimiento energético de 300 kW continuos, se calcula el necesario durante todo un día

$$300 \text{ kW} \times 24 \text{ h} = 7\,200 \text{ kWh/día} \quad (1)$$

Teniendo en cuenta que la pila PEM tiene eficiencia del 55 %, es decir, que de toda la energía térmica producida el 55 % es transformada en energía eléctrica. Por tanto, la energía química requerida es:

$$\frac{7\,200}{0.55} = 13\,090 \text{ kWh/día} \quad (2)$$

Una vez conocido esto, podemos calcular el flujo másico de hidrógeno necesario, conociendo, que el poder calorífico inferior del H₂ es 33,3 kWh/kg

$$\frac{13\,090}{33.3} = 393 \text{ kg H}_2\text{/día} \quad (3)$$

Lo que corresponde a un consumo continuo de aproximadamente de 16 a 17 kg/h de H_2

Este valor coincide con el caudal de hidrógeno obtenido en la simulación, Figura 4-2, lo que valida la coherencia entre el modelo desarrollado y los requerimientos energéticos del sistema.

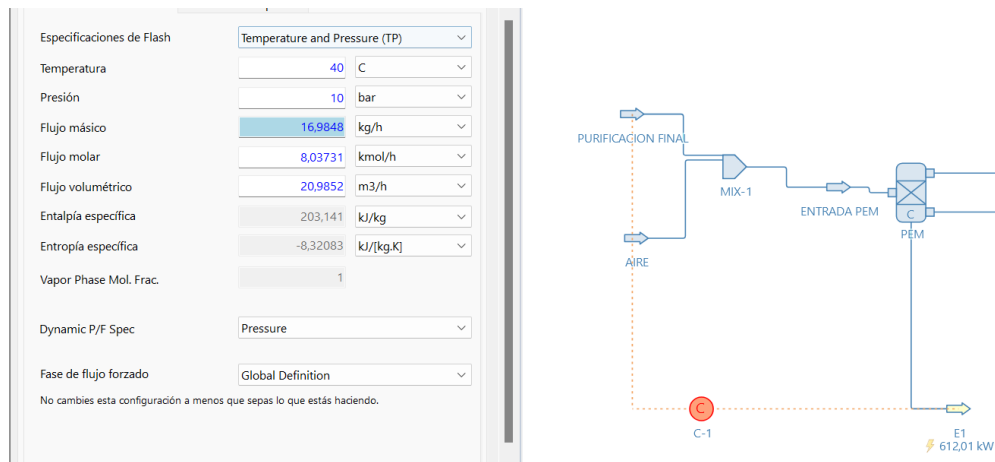


Figura 4-2 Producción de hidrógeno necesario calculado en DWSIM

En consecuencia, se puede afirmar que el sistema es capaz de suministrar el caudal de hidrógeno necesario para alimentar una pila PEM en condiciones representativas de operación AIP, validando su viabilidad desde el punto de vista energético en el marco del modelo desarrollado.

4.4 Caso práctico

Una vez validada la capacidad del sistema para producir hidrógeno en las condiciones requeridas, se plantea su aplicación a un submarino convencional equipado con un sistema de propulsión independiente del aire (AIP) Figura 4-3.

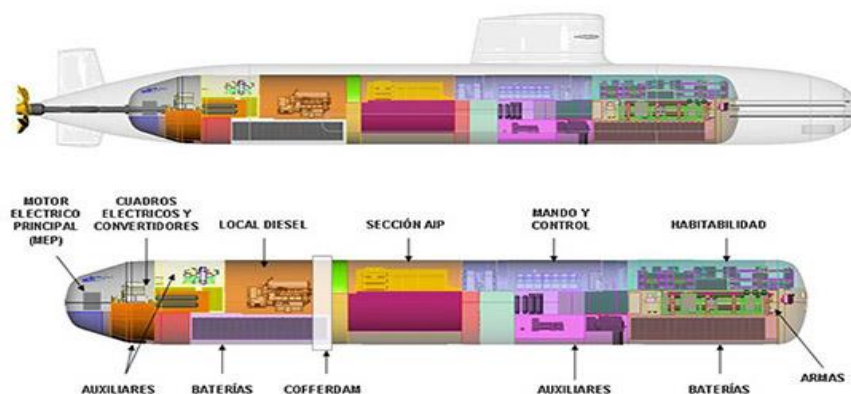


Figura 4-3 Ubicación sección AIP

El objetivo de este apartado es evaluar la viabilidad del sistema a partir de los resultados obtenidos en la simulación, analizando su capacidad para cubrir la demanda energética del submarino en régimen

de operación AIP. Para ello, se estudian parámetros clave como el consumo de hidrógeno, el consumo de glicerina, la autonomía alcanzable y el volumen de almacenamiento requerido.

Este análisis permite trasladar los resultados del modelo a un escenario de aplicación realista, con el fin de comprobar si el sistema propuesto presenta coherencia desde el punto de vista energético y de dimensionamiento dentro de un entorno naval.

4.4.1 *Requerimiento energético para sistema AIP*

Durante sus diferentes labores y misiones para contribuir con la vigilancia y seguridad marítima, el submarino opera de manera silenciosa, normalmente a velocidades comprendidas entre 3 y 5 nudos, con el objetivo de minimizar su firma acústica y maximizar su autonomía en inmersión. En este régimen de funcionamiento, la energía producida por el sistema debe cubrir tanto el sistema de propulsión como los sistemas auxiliares del submarino, incluyendo sensores, sistemas de control, navegación y servicios internos.

En este régimen de navegación silenciosa, los submarinos convencionales con sistemas AIP presentan una demanda eléctrica típica en el rango de 250–350 kW. En este trabajo se adopta un valor de diseño de 300 kW, coherente con sistemas AIP actuales [45].

A partir de este requerimiento, con la pila PEM empleada, se obtuvo un consumo de hidrógeno de 16–17 kg/h de H₂, calculado anteriormente

Este valor coincide con el caudal obtenido en la simulación, lo que permite utilizarlo como base para el dimensionamiento del sistema.

Parámetro	Valor
Velocidad patrulla	3–5 nudos
Potencia requerida	300 kW
Eficiencia pila PEM	55 %
Consumo H ₂	16–17 kg/h

Tabla 4-2 PEM del sistema AIP

4.4.2 *Consumo de glicerina*

A partir del consumo de hidrógeno requerido (16–17 kg/h), se procede a estimar el consumo de glicerina necesario para alimentar el sistema.

Según los resultados de la simulación, la producción teórica de hidrógeno mediante reformado de glicerina es de 0,15 kg H₂ / kg glicerina. De este modo, se puede establecer la relación: 1 kg glicerina son 0,15 kg H₂.

No obstante, considerando la recuperación del sistema de purificación PSA (≈85 %), la producción efectiva de hidrógeno disponible se reduce a:

$$0,15 \times 0,85 = 0,1275 \quad (4)$$

De esta manera se obtiene que la producción utilizable de hidrógeno disponible para la pila es aproximadamente 0,127 kg H₂ por kilogramo de glicerina.

Debido a esto, teniendo en cuenta que en la simulación hay trazas de hidrógeno las cuales son retenidas por los adsorbentes de los PSA en serie, la nueva relación establecida es:

$$1 \text{ kg glicerina} \rightarrow 0,127 \text{ kgH}_2$$

A partir de esta relación, el consumo de glicerina necesario para satisfacer la demanda energética es:

$$\dot{m}_{\text{glicerina}} = \frac{16,5}{0,1275} \quad (5)$$

$$\dot{m}_{\text{glicerina}} = 129 \text{ kg/h}$$

Por tanto, el consumo de combustible del sistema es aproximadamente:

$$130 \times 24 = \frac{3120 \text{ kg}}{\text{día}} \quad (6)$$

$$3,1 \text{ toneladas/día}$$

Estos valores constituyen la base para el dimensionamiento del sistema de almacenamiento y el análisis de la autonomía del sistema AIP.

4.5 Integración conceptual del sistema en el módulo AIP

El sistema propuesto se integra en el módulo AIP del submarino, concebido como un conjunto de subsistemas interconectados que permiten la producción, purificación y utilización del hidrógeno de forma continua.

La arquitectura global sigue la secuencia del proceso modelado Figura 4-4:

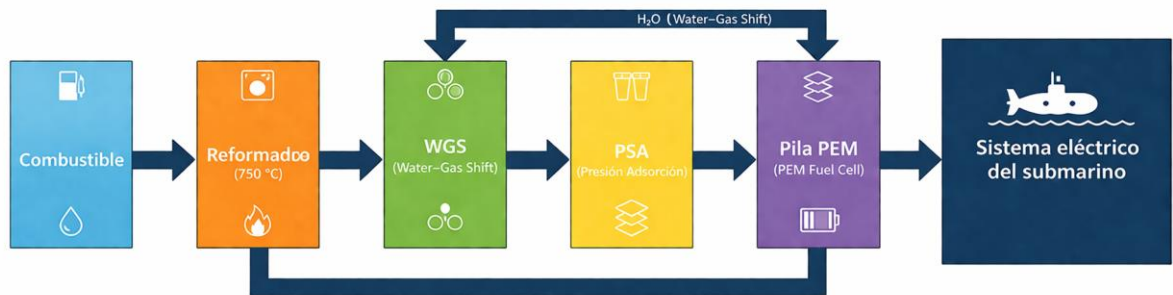


Figura 4-4 Integración sistema en submarino

Este enfoque permite mantener coherencia entre el modelo de simulación y su posible implementación conceptual en un entorno naval.

4.5.1 Sistema de Alimentación de Glicerina

El sistema de alimentación de glicerina tiene como función garantizar el almacenamiento, bombeo y dosificación controlada del combustible hacia el reformador, asegurando un suministro continuo y estable.

Este subsistema constituye el primer elemento del proceso de producción de hidrógeno, por lo que su correcto funcionamiento resulta clave para mantener la estabilidad del reformado y del sistema energético global.

Para el almacenamiento del combustible se consideran tanques presurizados de acero inoxidable dispuestos de forma horizontal Figura 4-5, adecuados para su integración en el módulo AIP.



Figura 4-5 Tanque de acero inoxidable para almacenamiento de glicerina

Las líneas de alimentación se diseñan con longitudes reducidas, con el objetivo de minimizar pérdidas de carga y mejorar la eficiencia del transporte hacia el reformador.

Dado que la glicerina presenta una elevada viscosidad a temperatura ambiente, se incorpora un sistema de precalentamiento que eleva su temperatura hasta valores comprendidos entre 60 °C y 80 °C, reduciendo su viscosidad y facilitando su bombeo. Este acondicionamiento permite garantizar un flujo estable y evitar problemas operativos en la etapa de reformado.

- Dimensionado preliminar y autonomía

A partir de los resultados obtenidos en la simulación, el consumo de glicerina necesario para alimentar el sistema se sitúa en torno a 130 kg/h, equivalente a aproximadamente 3,1 t/día.

Considerando una densidad de la glicerina de 1,26 kg/L, esto corresponde a un volumen de almacenamiento del orden de:

$$V = \frac{3120}{1,26} = 2476 \text{ L} \quad (7)$$

$$V = 2,5 \text{ m}^3/\text{día}$$

Para una autonomía del AIP pensado para operar durante 10 días, el volumen de almacenamiento requerido es aproximadamente 25 m³ de glicerina, lo cual es compatible con la integración dentro del módulo AIP del submarino.

$$V_{\text{tanque}} = 2,5 \times 10 = 25 \text{ m}^3 \quad (8)$$

En base a estos valores, pueden estimarse distintos escenarios de autonomía, Tabla 4-3.

Autonomía	Volumen glicerina	Viabilidad
5 días	12.5 m ³	Muy viable
10 días	25 m ³	Óptimo
15 días	37.5 m ³	Límite operativo
20 días	50 m ³	Difícil integración

Tabla 4-3 Estudio para diferentes autonomías

Estos resultados indican que autonomías del orden de 10–15 días podrían resultar compatibles, a nivel conceptual, con sistemas AIP actuales, situándose dentro de rangos habituales de operación en inmersión prolongada.

No obstante, estos valores deben interpretarse como una estimación preliminar, ya que la viabilidad real de integración dependerá de factores adicionales como la distribución de espacios en el módulo AIP, las limitaciones estructurales del submarino y la integración con el resto de los sistemas.

Asimismo, aspectos como la gestión térmica y la disposición de los equipos pueden condicionar el volumen realmente disponible, por lo que la autonomía alcanzable podría variar en un diseño detallado.

Por tanto, los resultados obtenidos permiten establecer una primera aproximación coherente al dimensionado del sistema, válida a nivel conceptual.

4.6 Reformador para el sistema AIP del submarino alimentado por glicerina

Para la producción de hidrógeno se plantea la integración de un reformador catalítico compacto presurizado, adaptado al uso de glicerina como materia prima.

Como referencia, los sistemas AIP actuales emplean reformadores compactos alimentados con bioetanol. En este trabajo se propone la sustitución por glicerina, manteniendo una configuración tecnológica similar a nivel conceptual.

Se han considerado dos alternativas:

El reformador industrial por horno tubular radiante Figura 4-6, el cual se trata de la tecnología tradicional empleada en plantas petroquímicas para la producción de hidrógeno mediante reformado de hidrocarburos.

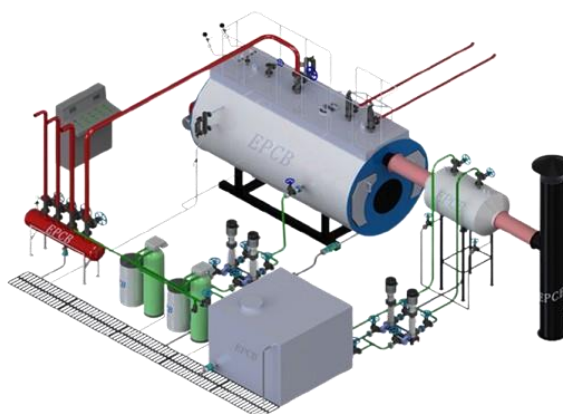


Figura 4-6 Reformado de horno tubular industrial

A pesar de que este tipo de reformador presenta altas eficiencias de conversión, su integración en un submarino no es posible debido a diferentes motivos. Para empezar, las dimensiones incompatibles con el espacio de la sección AIP además de presentar unas potencias térmicas excesivas en una unidad embarcada. Por otra parte, este sistema necesita de sistemas de combustión y un elevado mantenimiento del sistema.

Como alternativa se ha planteado el uso de un reformador catalítico compacto presurizado, una tecnología que ya es utilizada en sistemas AIP modernos Figura 4-7 y en aplicaciones de producción distribuida de hidrógeno.

Este posee varias ventajas las cuales facilitan su integración dentro del sistema AIP del submarino. En primer lugar, al tener un diseño compacto y modular se puede adaptar al espacio del módulo AIP [46].

Además, el sistema al trabajar con un control térmico cerrado evita la necesidad de utilizar sistemas de combustión abiertos, como el caso del reformador industrial. Esto permite mejorar la seguridad y simplificar la integración dentro de un entorno cerrado como el interior de un submarino. Lo que se

consigue con este sistema cerrado es que no requiera de chimeneas ni sistemas de evacuación de gases de combustión.

Por otra parte, con esta configuración se consigue una menor firma térmica, algo especialmente relevante en aplicaciones submarinas donde la discreción es clave.

Estas características hacen que el reformador catalítico compacto sea la opción adoptada para el sistema AIP propuesto en el presente proyecto.

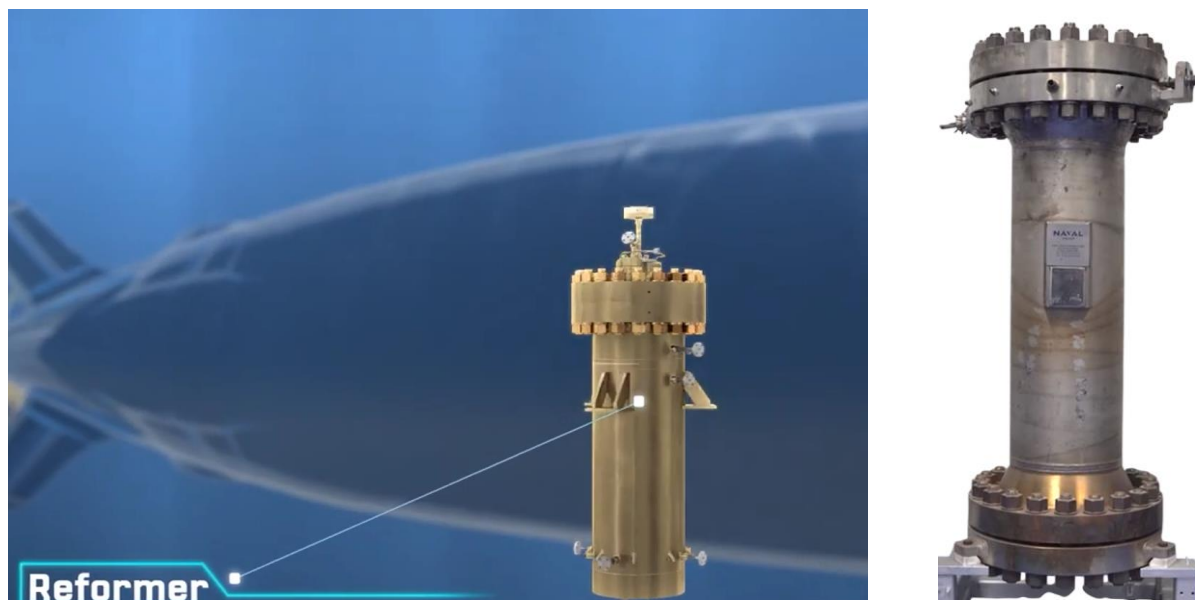


Figura 4-7 Reformador catalítico compacto[37]

Estas características hacen que esta tecnología sea coherente con los requisitos de integración en un sistema AIP.

Desde el punto de vista operativo, el reformador se plantea para una producción de hidrógeno del orden de 16–17 kg/h, en coherencia con la demanda energética del sistema.

Asimismo, la operación a temperaturas del orden de 750 °C, inferiores a las de reformado industrial, permite reducir las exigencias térmicas del sistema, facilitando su integración y contribuyendo a limitar la firma térmica.

Parámetro	Horno tubular industrial	Reformador compacto
Integración en submarino	No viable	Viable
Longitud típica	>15 m	3–4 m
Potencia térmica	>50 MW	1 MW
Sistema de combustión	Abierto	Cerrado
Seguridad naval	Baja	Alta
Firma térmica	Elevada	Reducida
Compatibilidad con glicerina	Excesiva capacidad	Adecuado

Tabla 4-4 comparación tecnologías de reformado

4.6.1 Reactor Water Gas Shift (WGS)

En aplicaciones industriales de gran escala, como en refinerías, la reacción de desplazamiento agua-gas se lleva a cabo en reactores de gran tamaño (generalmente de tipo radial), diseñados para operar con elevados caudales y potencias térmicas.

Sin embargo, este tipo de configuraciones no resulta adecuado para su integración en sistemas AIP, debido a sus dimensiones, complejidad estructural y requerimientos operativos.

Como alternativa, en sistemas compactos se emplean reactores catalíticos de lecho fijo presurizados Figura 4-8 que permiten llevar a cabo la reacción de forma eficiente en equipos de tamaño reducido [47].

En el presente trabajo se considera la integración de un reactor de este tipo, caracterizado por una geometría simple, robustez mecánica y ausencia de partes móviles lo que facilita su integración y mantenimiento en este tipo de sistemas.

Estas características lo hacen adecuado para su implementación conceptual en el módulo AIP.

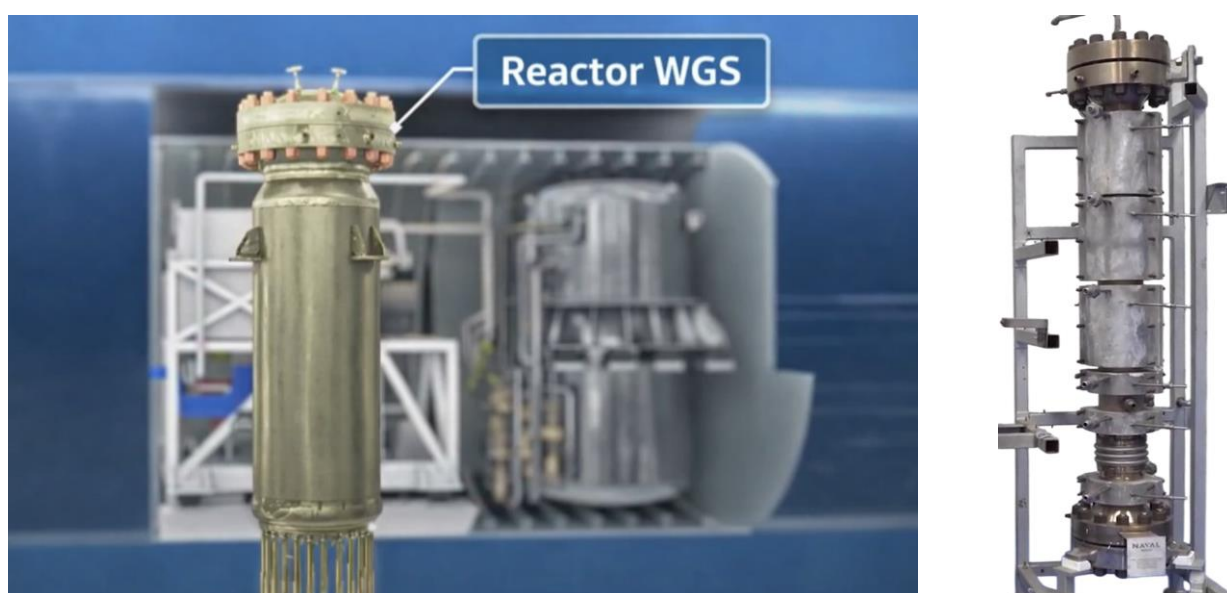


Figura 4-8 Reactor catalítico de lecho fijo[37]

En el modelo desarrollado en DWSIM, la reacción WGS se representa mediante una aproximación de equilibrio termodinámico, lo que permite estimar la conversión de monóxido de carbono y la producción adicional de hidrógeno sin necesidad de modelado cinético detallado.

Característica	Reactor industrial de refinería	Reactor WGS para sistema AIP
Tipo de reactor	Reactor radial de gran tamaño	Reactor catalítico compacto
Altura típica	5 – 15 m	1 – 2 m
Diámetro	Muy grande	Reducido
Escala de potencia	>100 MW	~1 MW
Evacuación de gases	Chimeneas industriales	Sistema cerrado

Tabla 4-5 Comparación entre reactores WGS industriales y sistemas compactos

4.6.2 Sistema de purificación de hidrógeno mediante PSA

La etapa final del sistema consiste en la purificación del gas procedente del reactor de desplazamiento agua-gas (WGS), con el objetivo de obtener una corriente de hidrógeno de alta pureza

adecuada para alimentar la pila de combustible PEM. Para ello, se emplea un sistema de adsorción por cambio de presión (Pressure Swing Adsorption, PSA) Figura 4-9.

A nivel conceptual, se considera una configuración basada en múltiples columnas adsorbentes operando en ciclo, siendo habitual en aplicaciones industriales el uso de al menos cuatro columnas para garantizar funcionamiento continuo. Estas operan en diferentes etapas del ciclo:

Adsorción, donde el hidrógeno atraviesa el lecho adsorbente mientras las impurezas quedan retenidas.

Despresurización, donde la columna reduce su presión para liberar los compuestos adsorbidos.

Purga, etapa en la que se elimina el gas residual acumulado en el lecho adsorbente.

Represurización, en la que la columna vuelve a alcanzar la presión de operación para iniciar un nuevo ciclo.



Figura 4-9 Diseño y montaje de plantas PSA (Pressure Swing Adsorption)

Para poder integrarlo dentro de los 15 metros de longitud aproximados con los cuales cuenta la sección AIP, las unidades PSA se sitúan entre el reactor WGS y la pila de combustible PEM. Para dimensionarlo nos mantendremos fieles al modelo propuesto en DWSIM utilizando dos PSA en serie.

Sistema	Longitud aproximada
PSA principal	1,5 m
PSA final	1,2 m

Tabla 4-6 El espacio ocupado por el sistema de purificación

En términos de dimensionado conceptual, ambas unidades presentan longitudes del orden de 1,2–1,5 m, lo que sugiere que su integración dentro del módulo AIP es razonable desde el punto de vista espacial, si bien debe considerarse como una estimación preliminar.

En conjunto, la configuración propuesta permite alcanzar niveles de pureza compatibles con los requerimientos de una pila PEM, manteniendo un diseño compacto y modular adecuado para su aplicación en sistemas AIP.

4.6.3 Selección y dimensionado de la pila de combustible PEM VLIV240

La generación de energía en el sistema AIP propuesto se realiza mediante una pila de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM), Figura 4-10, modelo VLIV240 [48].

La selección de esta tecnología se basa en su idoneidad para aplicaciones submarinas, debido a su alta eficiencia eléctrica, funcionamiento silencioso y elevada densidad de potencia, características clave en sistemas AIP. En submarinos convencionales, la demanda energética en régimen de operación silenciosa se sitúa típicamente en el rango de 200–300 kW, por lo que una pila con potencia nominal de 240 kW resulta adecuada como base de diseño.

Además, la pila VLIV240 presenta capacidad de operación en régimen variable, pudiendo alcanzar potencias cercanas a 400 kW, lo que permite cierto margen operativo frente a variaciones de demanda.

Desde el punto de vista del dimensionado, el consumo de hidrógeno asociado a la pila se sitúa en torno a 16–17 kg/h, valor coherente con el obtenido en el modelo de simulación. Esta correspondencia garantiza la consistencia entre la producción de hidrógeno del sistema (reformado + WGS + PSA) y su consumo en la pila, evitando desajustes energéticos.

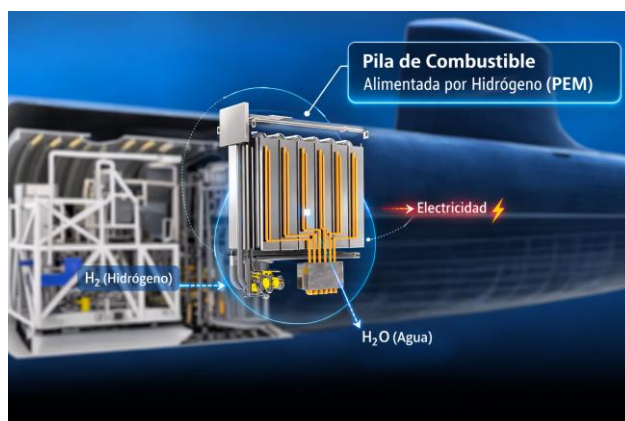


Figura 4-10 Pila PEM[37]

Adicionalmente, las características físicas de la pila, con dimensiones compactas ($1,35 \times 0,89 \times 0,80$ m) y un peso aproximado de 430 kg, favorecen su posible integración en el módulo AIP. No obstante, esta integración debe considerarse a nivel conceptual, ya que su viabilidad real dependerá de aspectos adicionales como la gestión térmica, la disipación de calor (hasta 300 kW) y la integración con el resto de los subsistemas.

Parámetro	Valor
Potencia nominal	240 kW
Potencia máxima	400 kW
Eficiencia nominal	$49 \pm 0.5 \%$
Consumo máximo H_2	≤ 16.5 kg/h
Presión entrada H_2	1.3 ± 0.2 MPag (13 bar)
Disipación térmica	≤ 300 kW
Dimensiones	$1350 \times 890 \times 800$ mm
Peso	430 kg

Tabla 4-7 Especificaciones técnicas de la pila PEM VLIV240

En conjunto, la selección de la pila VLIV240 permite garantizar la coherencia entre demanda energética, producción de hidrógeno y viabilidad de integración dentro del sistema AIP propuesto.

4.7 Evaluación de viabilidad

A partir de los resultados obtenidos y del análisis del sistema propuesto, se realiza una evaluación de su viabilidad a nivel conceptual.

4.7.1 Puntos favorables

El sistema es capaz de producir hidrógeno con un caudal de 16–17 kg/h y una pureza adecuada para alimentar una pila PEM.

Existe coherencia entre la producción de hidrógeno y la demanda energética (300 kW).

La configuración de doble PSA permite alcanzar niveles de pureza compatibles con aplicaciones AIP.

Los equipos seleccionados (reformador compacto, reactor WGS y pila PEM) presentan características adecuadas para entornos embarcados (compacidad, operación en sistemas cerrados y baja firma térmica).

La disposición conceptual propuesta, Figura 4-11, permite una integración funcional y modular del sistema.

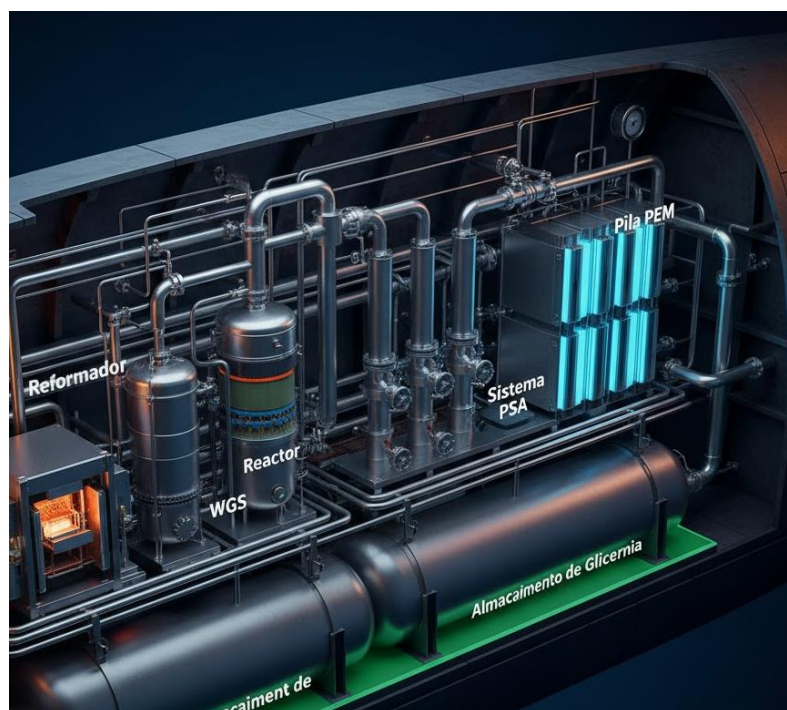


Figura 4-11 Propuesta distribución

4.7.2 Limitaciones del modelo y del diseño

El sistema PSA se ha modelado mediante una aproximación estacionaria, sin representar la dinámica real del ciclo.

No se ha realizado un análisis detallado de la gestión térmica, especialmente en la pila PEM.

La integración geométrica del sistema no ha sido validada a nivel de diseño constructivo.

No se han considerado condiciones transitorias de operación (arranque, parada o variaciones de carga).

El dimensionado del almacenamiento de glicerina se basa en estimaciones, sin un análisis estructural completo del submarino.

4.7.3 Grado de viabilidad

En base a lo anterior, el sistema puede considerarse viable a nivel conceptual, ya que cumple los requisitos de producción de hidrógeno, pureza y suministro energético necesarios para un sistema AIP.

No obstante, su implementación real requeriría un desarrollo más detallado, incluyendo diseño térmico, integración estructural y validación experimental.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado el diseño y simulación, mediante DWSIM, de un sistema de producción y purificación de hidrógeno basado en el reformado de glicerina, la reacción de desplazamiento agua-gas (Water Gas Shift) y la purificación mediante PSA. El modelo permite evaluar de forma integrada el comportamiento del proceso y su capacidad para generar hidrógeno de alta pureza.

En cuanto a la selección de la materia prima, se ha realizado una comparación entre glicerina y bioetanol. Los resultados obtenidos indican que, aunque el bioetanol presenta ventajas operativas, la glicerina ofrece una mayor producción teórica de hidrógeno, lo que la convierte en una alternativa adecuada dentro del enfoque conceptual del trabajo.

Posteriormente, en el proceso de purificación modelado mediante un PSA se ha realizado un estudio mediante la simulación donde se ha permitido analizar el comportamiento del sistema con diferentes adsorbentes. En este estudio, se ha concluido de la configuración óptima es la (Zeolita + Zeolita), la cual muestra una pureza de hidrógeno de 0,99978, con concentraciones residuales muy reducidas de CO_2 ($5,18 \cdot 10^{-5}$), CO ($4,15 \cdot 10^{-5}$) y CH_4 ($1,26 \cdot 10^{-4}$). Estos valores confirman la alta eficacia del proceso de separación.

Como consecuencia de lo anterior, se ha verificado que el hidrógeno obtenido cumple los requisitos de pureza exigidos por las pilas de combustible PEM, las cuales son la alta pureza del hidrógeno y la baja concentración de monóxido de carbono, el cual es uno de los contaminantes más críticos para el funcionamiento del catalizador.

Por otra parte, el análisis de sensibilidad ha permitido identificar las variables de operación más influyentes en el rendimiento del sistema, destacando la temperatura de reformado, la relación vapor-combustible y la temperatura del reactor WGS, mientras que la presión del PSA no muestra influencia significativa dentro del modelo empleado.

Finalmente, desde el punto de vista de la integración en un submarino, el sistema diseñado presenta una viabilidad técnica adecuada para su implantación en la sección AIP de un submarino. Si bien en esta integración se han tenido en cuenta una serie de factores críticos como son el volumen y tamaño ocupado por los equipos, la complejidad de los sistemas y la demanda de necesaria para poder alimentar a un submarino que opera de manera silenciosa. Por ello, la producción de hidrógeno a bordo a partir de combustibles líquidos se configura como una solución viable para mejorar la autonomía en inmersión.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten concluir que es técnicamente viable la implementación de un sistema AIP basado en la producción y purificación de hidrógeno mediante

reformado de glicerina, siendo una alternativa competitiva frente a otras tecnologías, al ofrecer mejoras en eficiencia energética, reducción de emisiones y aumento de la autonomía operativa.

5.2 Líneas futuras

Durante el desarrollo del presente trabajo, se han planteado diferentes líneas de investigación y mejoras para profundizar en el sistema del sistema AIP propuesto.

- Modelado dinámico del sistema PSA, que permita reproducir de forma más precisa los ciclos reales de adsorción, despresurización y regeneración del adsorbente.
- Diseño detallado del sistema de almacenamiento de glicerina, incluyendo aspectos estructurales, de seguridad y de integración naval, con el fin de validar completamente su implantación en un submarino real.
- Desarrollar un diseño estructural detallado del módulo AIP, incluyendo la distribución de masas dentro de la sección, los planos, seguridad operativa y compatibilidad con el casco resistente del submarino.
- Estudio de la formación y mitigación de CO en el reformador, uno de los principales problemas en el reformado de compuestos orgánicos.

.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «FOSSEE». Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://fossee.in/index.php>
- [2] «IPCC_AR6_WGI_Full_Report».
- [3] «Informes de Evaluación del IPCC», Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Accedido: 2 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/recursos/mini-portales-tematicos/cclimatico/informe_ipcc.html
- [4] «Conoce la Agenda | Ministerio de Derechos Sociales, Consumo y Agenda 2030». Accedido: 2 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.dsca.gob.es/es/agenda-2030/conoce-la-agenda>
- [5] I. International Energy Agency (2025), *Renewables 2025*. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/76ad6eac-2aa6-4c55-9a55-b8dc0dba9f9e/Renewables2025.pdf>
- [6] H. L. Ferreira, R. Garde, G. Fulli, W. Kling, y J. P. Lopes, «Characterisation of electrical energy storage technologies», *Energy*, vol. 53, pp. 288-298, may 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.02.037.
- [7] Kothari, R., & Singhal, S., «Hydrogen fuel cell: A sustainable energy technology», *Journal of Energy Storage*, 25, 100-107, 2019, doi: 10.1016/j.
- [8] «Poder Calorífico». Accedido: 2 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://ingemecanica.com/utilidades/poder-calorifico.html#tabla1>
- [9] «Estrategia de tecnología e innovación para la Defensa ETID - 2020», Castellano. Accedido: 2 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://publicaciones.defensa.gob.es/estrategia-de-tecnologia-e-innovacion-para-la-defensa-etid-2020-libros-papel.html>
- [10] «IMO 2020 – cutting sulphur oxide emissions». Accedido: 2 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/sulphur-2020.aspx>
- [11] «Home | Hydrogen Program». Accedido: 2 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.hydrogen.energy.gov/>
- [12] «Heating Values of Fuels in Biomass Data | PDF | Fuels | Chemical Energy Sources», Scribd. Accedido: 2 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.scribd.com/document/374744316/Lower-and-Higher-Heating-Values-of-Gas-Liquid-and-Solid-Fuels>
- [13] P. J. Hall y E. J. Bain, «Energy-storage technologies and electricity generation», *Energy Policy*, vol. 36, n.º 12, pp. 4352-4355, dic. 2008, doi: 10.1016/j.enpol.2008.09.037.
- [14] «The Future of Hydrogen – Analysis», IEA. Accedido: 2 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

- [15] «electrólisis del agua formando hidrógeno y oxígeno ilustración vectorial», Vecteezy. Accedido: 2 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://es.vecteezy.com/arte-vectorial/18891985-electrolisis-del-agua-formando-hidrogeno-y-oxigeno-ilustracion-vectorial>
- [16] J. Brey, «LA ELECTROLISIS COMO UNA HERRAMIENTA CLAVE DE LA DESCARBONIZACIÓN DEL SIGLO XXI».
- [17] «The Future of Hydrogen».
- [18] jovianne-armando, «El futuro de la energía: Hidrógeno y Pilas de Combustible», SlideServe. Accedido: 2 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.slideserve.com/jovianne-armando/el-futuro-de-la-energ-a-hidr-geno-y-pilas-de-combustible>
- [19] Phan et al., «Hydrogen production from biogas: Process optimization using ASPEN Plus», 2022.
- [20] E. Standards, «BS ISO 14687:2025 Hydrogen fuel quality. Product specification», <https://www.en-standard.eu>. Accedido: 3 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.en-standard.eu/bs-iso-14687-2025-hydrogen-fuel-quality-product-specification/>
- [21] «Ruthven Adsorption | PDF | Science & Mathematics», Scribd. Accedido: 3 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.scribd.com/document/47815654/Ruthven-Adsorption>
- [22] S. SIRCAR y T. Golden, «Purification of Hydrogen by Pressure Swing Adsorption», *Sep. Sci. Technol.*, vol. 35(5), pp. 667-687, ene. 2000, doi: 10.1081/SS-100100183.
- [23] «Understanding PSA Oxygen Generator Working Principle Basics - Jalon», <https://www.jalonzeolite.com/es/>. Accedido: 3 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.jalonzeolite.com/es/psa-oxygen-generator-working-principle/>
- [24] F. Barreras y A. Lozano, «Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM».
- [25] «Fuel Cell Basics», Energy.gov. Accedido: 4 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-basics>
- [26] «Objectives_template». Accedido: 4 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://archive.nptel.ac.in/content/storage2/courses/112104033/lecture35/35_6.htm
- [27] «Fuel Cell Handbook (Seventh Edition)».
- [28] «Nuevo concepto en submarinos: Ni Diesel ni AIP... Solo a baterías...», www.elSnorkel.com. Accedido: 4 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.elsnorkel.com/2019/01/nuevo-concepto-submarinos-ni-diesel-aip-baterias.html>
- [29] J. Jang, «A Study on the Submarine Air Independent Propulsion System: Focused on Submarines Currently in Operation», *J. Korea Inst. Mil. Sci. Technol.*, vol. 24, n.º 4, pp. 418-425, 2021, doi: 10.9766/kimst.2021.24.4.418.
- [30] «Firma acústica | Grupo VULKAN». Accedido: 4 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.vulkan.com/es/divisiones/marina/armada/enfoque-holistico-para-soluciones-navales-tecnologia-naval/firma-acustica>
- [31] «El submarino “S-81” sitúa a España en la élite de la ingeniería naval», elEconomista.es. Accedido: 4 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.eleconomista.es/tecnologia/noticias/12221250/04/23/el-submarino-s81-situa-a-espana-en-la-elite-de-la-ingenieria-naval.html>
- [32] R. O'Rourke, «China Naval Modernization: Implications for U.S. Navy Capabilities-- Background and Issues for Congress».
- [33] J. I. Group, *Jane's Underwater Warfare Systems*. Jane's Information Group, 2005.
- [34] A. Preston y Anthony Preston, *Submarine Warfare*. 1998, p. p. & nbsp;100.
- [35] P. Kerros, C. Inizan, y D. Grousset, «MESMA: AIP system for submarines», en *Proceedings of OCEANS'94*, sep. 1994, p. III/457-III/466 vol.3. doi: 10.1109/OCEANS.1994.364242.
- [36] «MESMA | PDF | Submarines | Energy Technology», Scribd. Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.scribd.com/document/199819727/MESMA>
- [37] Naval Group's, «Naval Group's Propulsion Systems: AIP for Submarines». Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: [https://www.bing.com/videos/riverview/relatedvideo?q=Naval+Group.+\(2018\).+MESMA+Air+In](https://www.bing.com/videos/riverview/relatedvideo?q=Naval+Group.+(2018).+MESMA+Air+In)

dependent+Propulsion+System.&mid=81BAA6BD0446475CD5C581BAA6BD0446475CD5C5&FORM=VIRE

- [38] «Como funciona el sistema independiente del aire (AIP) en los submarinos?», www.elSnorkel.com. Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.elsnorkel.com/2021/01/como-funciona-el-sistema-independiente-del-aire-aip-submarinos.html>
- [39] A. Iriondo *et al.*, «Effect of ZrO₂ addition on Ni/Al₂O₃ catalyst to produce H₂ from glycerol», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 37, n.º 8, pp. 7084-7093, abr. 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.11.075.
- [40] S. Adhikari, S. D. Fernando, y A. Haryanto, «Hydrogen production from glycerin by steam reforming over nickel catalysts», *Renew. Energy*, vol. 33, n.º 5, pp. 1097-1100, may 2008, doi: 10.1016/j.renene.2007.09.005.
- [41] H. Chen *et al.*, «A comparative study on hydrogen production from steam-glycerol reforming: thermodynamics and experimental», *Renew. Energy*, vol. 36, n.º 2, pp. 779-788, feb. 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.07.026.
- [42] T. Kim y J. K. Scott, «Dynamic modeling and simulation of pressure swing adsorption processes using toPSAil», *Comput. Chem. Eng.*, vol. 176, p. 108309, ago. 2023, doi: 10.1016/j.compchemeng.2023.108309.
- [43] F. V. S. Lopes, C. A. Grande, y A. E. Rodrigues, «Activated carbon for hydrogen purification by pressure swing adsorption: Multicomponent breakthrough curves and PSA performance», *Chem. Eng. Sci.*, vol. 66, n.º 3, pp. 303-317, feb. 2011, doi: 10.1016/j.ces.2010.10.034.
- [44] C. R. S. Franco, «PRESSURE SWING ADSORPTION FOR THE PURIFICATION OF HYDROGEN».
- [45] TOC, «Spain unveiled the S-80 sub with air-independent propulsion». Accedido: 10 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://bulgarianmilitary.com/2021/12/04/spain-unveiled-the-s-80-sub-with-air-independent-propulsion-aip/>
- [46] Defensa.com, «Lo que el sistema AIP permitirá a los submarinos S-80 - Noticias Defensa Programa submarino S-80», Defensa.com. Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.defensa.com/programa-submarino-s-80/sistema-aip-permitira-submarinos-s-80>
- [47] D. F. Barbosa Lima, F. Ademar, M. Kaminski, y P. Matar, «Modeling and Simulation of Water Gas Shift Reactor: An Industrial Case», en *Petrochemicals*, V. Patel, Ed., InTech, 2012. doi: 10.5772/37181.
- [48] «VLIV240-Liquid-Cooled-Fuel-Cell-System-v2G», Google Docs. Accedido: 10 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://docs.google.com/document/d/1h1x2-X1QOyfFktCIh1kYtVjslY23pM7ir7DaxlIVcm8/edit?usp=drive_web&ouid=116586443761464816368&usp=embed_facebook

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

Desde el punto de vista ambiental, el uso del hidrógeno como vector energético permite reducir de forma significativa las emisiones contaminantes asociadas a la propulsión naval. A diferencia de los sistemas convencionales basados en combustibles fósiles, las pilas de combustible PEM, alimentadas por hidrógeno, generan electricidad con emisiones prácticamente nulas de CO₂ y partículas, lo que contribuye a disminuir el impacto ambiental del sistema.

Además, el empleo de materias primas renovables como la glicerina, subproducto de la industria del biodiésel, favorece el aprovechamiento de corrientes residuales y mejora la sostenibilidad global del proceso.

En el ámbito económico, estos sistemas pueden presentar ventajas a medio y largo plazo, al reducir la dependencia de combustibles fósiles y la exposición a la volatilidad de sus precios. Asimismo, la mayor eficiencia energética de las pilas de combustible contribuye a disminuir el consumo específico de combustible.

Por otro lado, el desarrollo de este tipo de tecnologías impulsa la innovación en sectores clave como la ingeniería química, la industria naval y las tecnologías del hidrógeno, generando oportunidades de desarrollo industrial y transferencia tecnológica hacia otros ámbitos, como el transporte o la generación de energía.

Sin embargo, estos beneficios deben equilibrarse con una inversión inicial elevada. El diseño, integración y validación de equipos como el reformador, el sistema PSA o la pila de combustible requieren un alto nivel tecnológico y costes asociados tanto en desarrollo como en implementación. A esto se suman los costes de mantenimiento y operación de sistemas más complejos que los tradicionales. No obstante, a medida que estas tecnologías maduren y se generalicen, es previsible que los costes disminuyan, haciendo que su aplicación sea cada vez más viable desde el punto de vista económico.

Desde el punto de vista social y estratégico, la mejora de la autonomía en inmersión y la reducción de la firma acústica y térmica aumentan la capacidad operativa y la seguridad de los submarinos. Esto tiene implicaciones directas en el ámbito de la defensa, permitiendo misiones más prolongadas y discretas. Además, el desarrollo de tecnologías basadas en hidrógeno no solo tiene aplicación militar, sino que también puede trasladarse a otros sectores civiles, como el transporte o la generación de energía limpia, contribuyendo al avance hacia un modelo energético más sostenible.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El desarrollo de tecnologías AIP basadas en hidrógeno en el ámbito submarino plantea una serie de reflexiones éticas y sociales que deben ser consideradas más allá de su viabilidad técnica y económica.

En primer lugar, este tipo de sistemas se enmarca en el ámbito de la defensa, lo que implica una doble vertiente ética. Por un lado, el desarrollo tecnológico contribuye a mejorar la seguridad y capacidad operativa de los submarinos, reforzando la protección y defensa de un país. Sin embargo, también puede interpretarse como una contribución indirecta al desarrollo de capacidades militares más avanzadas, lo que plantea debates sobre el uso final de la tecnología y su impacto en el equilibrio geopolítico.

Por otro lado, el uso de hidrógeno como vector energético introduce una dimensión ética positiva relacionada con la sostenibilidad. La reducción de emisiones y el uso de materias primas renovables, como la glicerina, alinean este tipo de desarrollos con los objetivos globales de transición energética y lucha contra el cambio climático. En este sentido, el conocimiento generado en este trabajo puede tener aplicaciones más allá del ámbito militar, contribuyendo al desarrollo de tecnologías limpias en sectores civiles.

Asimismo, el diseño y operación de estos sistemas en entornos críticos exige un elevado nivel de responsabilidad técnica. La seguridad de la tripulación depende directamente de la fiabilidad del sistema, lo que implica la aplicación de criterios rigurosos de diseño, control y mantenimiento.

Finalmente, el desarrollo de estas tecnologías impulsa la formación en áreas como la ingeniería química, energética y naval, contribuyendo a la generación de conocimiento y a la capacitación de profesionales especializados.

ANEXO III: SIMULACIONES EN DWSIM

CARPETA SIMULACIONES DWSIM:

https://drive.google.com/drive/folders/18_2bQ8_RNtMnHlvA97XR1QH0efL3hlc5?usp=drive_link