



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Estudio de los sistemas de propulsión AIP y sus líneas de desarrollo. Análisis y propuesta para aplicación en la Armada

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Fernando Gamboa García

DIRECTORES: Miguel Ángel Gómez Rodríguez
Arturo González Gil

CURSO ACADÉMICO: 2018-2019

Universida_{de}Vigo



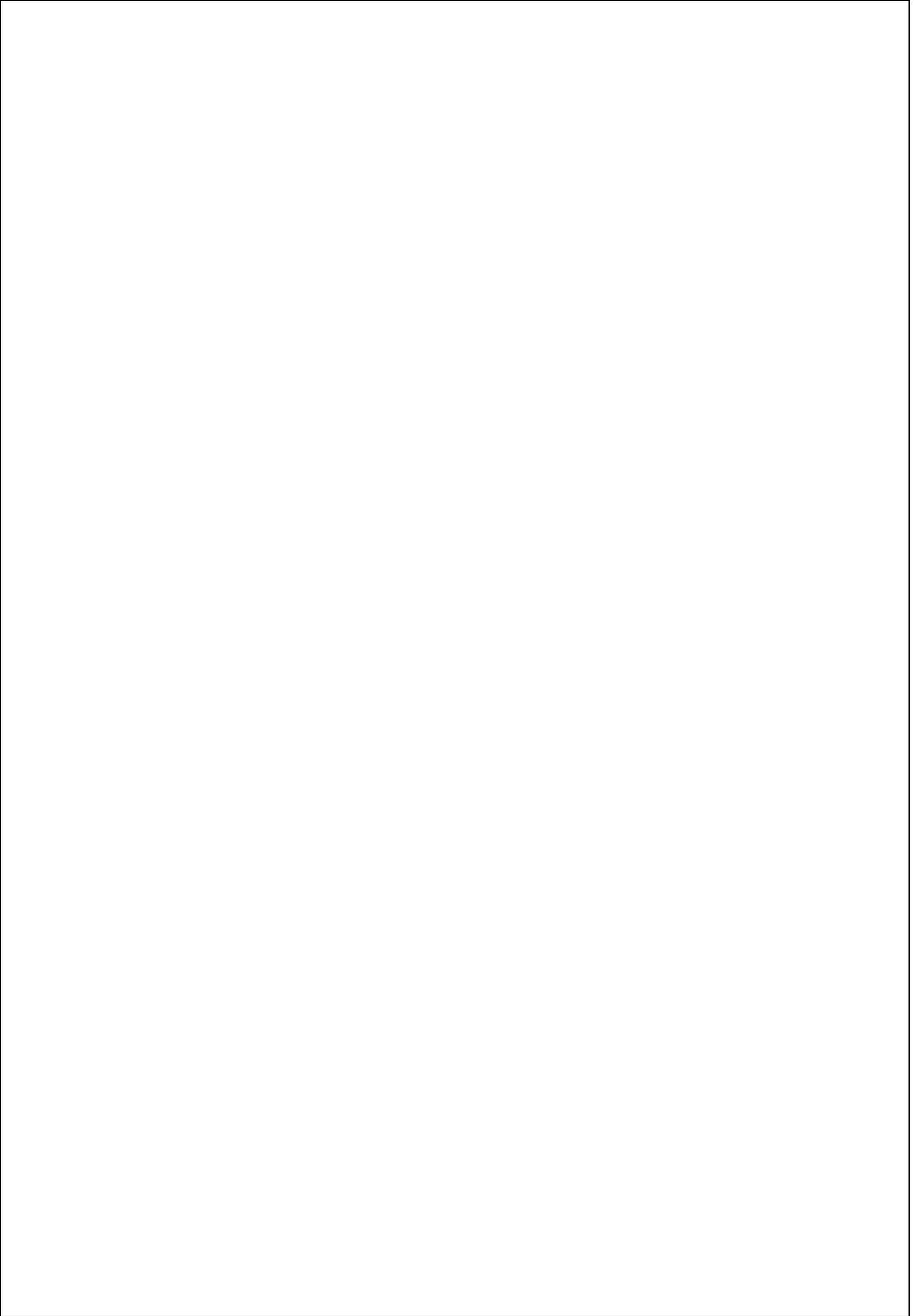
Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Estudio de los sistemas de propulsión AIP y sus líneas de desarrollo. Análisis y propuesta para aplicación en la Armada

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_deVigo



RESUMEN

Entendemos como un sistema de Propulsión con Independencia del Aire (AIP), como aquel que no requiere aire como es el caso de un motor de combustión interna o una turbina.

En la actualidad, la Armada Española está siendo partícipe de la implantación de este tipo de propulsión y prueba de ellos son los futuros S-80 cuya primera unidad entrará en servicio en el 2022. Este sistema AIP que se pretende implantar en la serie S-80 obtendrá la energía eléctrica mediante un dispositivo electroquímico conocido como celda de combustible o pila de combustible, al que se le suministrará la combinación de hidrógeno (H_2) producido por reformar el bioetanol abordo y oxígeno almacenado a bordo en un tanque dentro del submarino.

Por otra parte, en estos últimos años, estamos siendo testigos que la utilización de las pilas de combustible no solo se circunscribe al hábitat subacuático como es el caso de los submarinos, sino también en otro tipo de plataformas como son los buques de superficie o incluso en medios de transportes cotidianos como es el caso de los automóviles. En este trabajo se lleva a cabo un estudio riguroso del actual estado del arte en lo que se refiere a este tipo de propulsión AIP, su empleo actual y futuro, así como, las ventajas y desventajas que se derivarán de su utilización. Aunque no seamos aún totalmente conscientes de ello, este tipo de sistemas está ganando y ganará cada vez más terreno en el mundo de las energías, y prueba de ello son las recientes activaciones de protocolos de contaminación causada por combustibles fósiles. En resumidas cuentas, podemos decir que cuando se habla de los sistemas AIP estamos mirando al presente y apostando por el futuro.

Posteriormente, con la información obtenida del análisis de los diferentes sistemas AIP que se van a tratar en este trabajo, se realizará un diseño básico de una pila de combustible para propulsar lo que podría ser un vehículo sumergible no tripulado para la Armada Española.

Finalmente, para cerrar este Trabajo de Fin de Grado, se mostrarán las conclusiones obtenidas de este trabajo y se plantearán futuras líneas de desarrollo.

PALABRAS CLAVE

AIP, bioetanol, hidrógeno, S-80, oxígeno, pila de combustible, PEM, Armada Española, celda de combustible.

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores, que me han prestado ayuda de forma desinteresada durante la realización de este trabajo. Destacar la labor del profesor del Centro Universitario de la Defensa por intentar formar de la mejor manera posible a los futuros oficiales de la Armada.

A mis compañeros de mi brigada por ser los mejores compañeros de travesía que uno puede tener, y es por ello que les debo mi más sincera gratitud.

A la Escuela Naval, lugar en donde de he vivido experiencias inolvidables durante estos cinco años que me han hecho madurar como persona. Cada día que he pasado en este precioso e incomparable lugar, lo he intentado aprovechar y disfrutar al máximo ya que “la vida solo se vive una vez”.

Agradecer a uno de los pilares más importantes de mi vida, mi familia. Siempre están ahí, interesados por mi estado anímico y mi progreso académico. Sería imposible no sentirme agradecido al tener unos padres tan maravillosos como los que tengo; tener su apoyo incondicional me anima a seguir adelante sin importar la adversidad.

Por último quiero agradecer a dos piezas clave del puzle de mi vida; la mar y España. Cuando mis pensamientos están ansiosos, desamparados e inquietos, la mar ahoga todos estos males para darles un toque de cordura, tranquilidad y aliento para anteponerse a estos momentos. Por suerte, los marinos estamos destinados a pasar muchas horas en la mar, y es por ello que estoy eternamente agradecido a esta profesión. Finalmente, España por ser mí estímulo durante toda la carrera y espero poder agradecerle algún día todo lo que me ha dado.

CONTENIDO

Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	7
Abreviaturas	9
1 Introducción y objetivos	11
1.1 Introducción y motivación del trabajo	11
1.2 Método utilizado	11
1.2.1 Investigación y estudio de los sistemas “AIP” y el escenario en el que tendrán que operar.....	11
1.2.2 Evaluación de alternativas actuales.	12
1.3 Objetivos	13
2 Estado del arte	15
2.1 Introducción: Evolución del sumergible al submarino	15
2.2 Clasificación de los submarinos por su propulsión.....	17
2.2.1 Sistemas de propulsión convencionales.....	17
2.2.2 Sistemas no convencionales: submarinos nucleares	18
2.2.3 Comparativa sistemas convencionales y no convencionales	18
2.3 El sistema AIP.....	19
2.3.1 Concepto sistema AIP.....	19
2.3.2 Sistema de pilas de combustible (FC)	21
2.3.3 Sistema con motor Stirling	21
2.3.4 Sistema MESMA	22
2.4 Sistemas actuales de pilas de combustible	23
2.4.1 Principios básicos	23
2.4.2 Tipos de pilas de combustible.....	25
2.4.3 Rendimiento de la pila de combustible.....	27
2.5 Pilas de combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEM).....	28
2.5.1 Funcionamiento de las pilas PEM	28
2.5.2 Materiales de la célula de combustible PEM.....	29
2.5.3 Implantación de pilas PEM en submarinos AIP	30
2.5.4 Comparativa sistemas AIP	31
3 Biomasa, motor del AIP	35
3.1 La biomasa	35

3.2 Biomasa en el contexto mundial	37
3.3 Biocombustible, la biomasa como fuente energética.....	39
3.3.1 Proceso de obtención del bioetanol	39
3.3.2 Producción del bioetanol en España	40
3.3.3 Dilema AIP en el S-80, ¿Etanol o Metanol?.....	42
3.3.4 Obtención de energía a partir de bioetanol	44
3.3.5 ¿Es sostenible el bioetanol?	46
4 Análisis y características AIP del S-80	49
4.1 Evolución del programa y futuro del S-80.....	49
4.2 Funcionamiento sistema AIP del S-80.....	52
5 Perspectiva y visión de futuro de las pilas de combustible	55
5.1 Importancia del sistema AIP	55
5.2 Coche de H ₂	56
5.3 Plantas de producción de H ₂	59
5.4 Sistema AIP en el entorno marítimo	61
5.4.1 Propulsión de buques mediante pilas de combustible	61
5.5 Diseño de una pila de combustible PEM para submarino no tripulado	62
5.5.1 Introducción a los vehículos submarino no tripulados (UUV).....	62
5.5.2 Aspectos generales de los UUV	63
5.5.3 Dimensionado general	65
5.5.4 Dimensionado de la MEA	70
5.5.5 Dimensionado de las placas bipolares	71
5.5.6 Dimensionado de los sellos	74
5.5.7 Dimensionado de placas colectoras de corriente	75
5.5.8 Dimensionado de las tapas.....	75
5.5.9 Dimensionado de los sistemas de fijación	78
5.5.10 Modelo final de la pila de celdas de combustible del UUV	78
5.6 Estudio económico de una pila de 5kW	79
5.7 Sistemas auxiliares del diseño del UUV	80
6 Conclusiones y líneas futuras	85
6.1 Cumplimiento de objetivo.....	85
6.2 Conclusiones y líneas futuras.....	86
7 Bibliografía.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 U-boot de la II Guerra Mundial (izquierda) y el primer submarino de la historia, "Turtle"(derecha) [1].....	15
Figura 2-2 Submarino de Isaac Peral, reputado como el primer submarino torpedero [3].	16
Figura 2-3 Submarino AIP sueco clase Gotland. [5].....	17
Figura 2-4 Propulsión sistema convencional [5].	17
Figura 2-5 Sistema híbrido del submarino "AIP"	20
Figura 2-6 Sistema convencional anaeróbico, "AIP" [8].	21
Figura 2-7 Funcionamiento de motor Stirling [11].	22
Figura 2-8 Esquema del funcionamiento del sistema AIP MESMA [14].	23
Figura 2-9 Configuración básica de una pila de combustible de un submarino.....	24
Figura 2-10 Tipos de pila de combustible [19].	25
Figura 2-11 Transformación en una máquina térmica y una pila de combustible [22].....	27
Figura 2-12 Comparativa eficiencia pilas de combustible y otros sistemas[23].	28
Figura 2-13 Esquema del funcionamiento de una pila de combustible PEM [24].	29
Figura 2-14 Reacciones que tienen lugar en cada uno de los electrodos [25].....	29
Figura 2-15 Partes de una pila de combustible [26].	30
Figura 3-1 La biomasa según su procedencia [27].	35
Figura 3-2 Proceso de transformación termoquímica [28].	36
Figura 3-3 Proceso de transformación bioquímica [28].	37
Figura 3-4 Porcentaje de abastecimiento energético mundial.	38
Figura 3-5 Porcentaje de abastecimiento energético en España [29].	38
Figura 3-6 Las generación de los Biocombustibles.....	39
Figura 3-7 Producción de bioetanol en EEUU, Brasil y resto del mundo.....	41
Figura 3-8 Producción, capacidad de producción y capacidad de uso de bioetanol en España.	42
Figura 3-9 Etanol y metanol [32].	43
Figura 3-10 Obtención de energía mediante bioetanol.....	45
Figura 3-11 Precio del bioetanol y gasolina en EEUU [35].	47
Figura 4-1 Desarrollo del programa S-80.....	50
Figura 4-2 Vista por secciones del S-80.....	50
Figura 4-3 Funcionamiento sistema AIP del S-80.	52
Figura 4-4 Sistema AIP del S-80 [14].	53
Figura 4-5 Vista 3D instalación AIP en el S-80 [42].	54

Figura 5-1 Consumo en España de gasolina convencional y compuesta por bioetanol en la carretera.....	56
Figura 5-2 Contaminación del transporte global.	57
Figura 5-3 Vehículo con pila de combustible, conocido como “coche de hidrógeno”.	58
Figura 5-4 Construcción de estaciones de hidrógeno a largo plazo.	59
Figura 5-5 Aplicaciones de las plantas de H ₂	60
Figura 5-6 La unidad APU para el futuro de los buques.	61
Figura 5-7 Ferry de pasajeros inglés "Hydrogenesis".	62
Figura 5-8 Deep Sumergence Vehicle [44].	63
Figura 5-9 El ROV Pluto Plus preparado para una operación [44].	64
Figura 5-10 Configuración de sistema híbrido de pila de combustible para UUV.	65
Figura 5-11 Pérdidas de una pila de combustible según su voltaje y densidad de corriente [47]. ...	68
Figura 5-12 Configuración de una pila de combustible, compuesto por dos "stacks".	69
Figura 5-13 Elementos de una pila de células de combustible [26].	69
Figura 5-14 Diseño de un “stack” [48].	70
Figura 5-15 Arquitectura de una célula PEM [49].	71
Figura 5-16 Membrana de intercambio protónico [50].	71
Figura 5-17 Forma de una placa bipolar de doble canalización [51].	72
Figura 5-18 Vista en 3D de la placa bipolar del ánodo.	72
Figura 5-19 Vista en 3D de la placa bipolar del cátodo.	73
Figura 5-20 Vista en 3D de la placa bipolar de doble canalización.	73
Figura 5-21 Unión de celdas elementales mediante placas bipolares de doble canalización [49]. ...	74
Figura 5-22 Diseño del sello	74
Figura 5-23 Placa colectora de corriente eléctrica.	75
Figura 5-24 Diseño de la cara exterior de la tapa delantera.	75
Figura 5-25 Diseño de la cara interior de la tapa delantera.	76
Figura 5-26 Vista isométrica de la tapa delantera de la pila de células de combustible.	76
Figura 5-27 Diseño de la cara interior de la tapa trasera.	77
Figura 5-28 Diseño de la cara interior de la tapa trasera.	77
Figura 5-29 Vista isométrica de la tapa trasera de la pila de células de combustible.	78
Figura 5-30 Modelo 3D de una celda de la pila de combustible.	78
Figura 5-31 Pila de celdas de combustible de 5kW [52].	79
Figura 5-32 Tanque de metal hidruro MH7000 de 21kWh [56].	82
Figura 5-33 Tanque criogénico de oxígeno [57].	82
Figura 5-34 Sistema auxiliar de una pila de combustible [55].	83

Figura 5-35 Sistema de pila de combustible del UUV.....84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Características relevantes de alternativas propulsivas [16].	19
Tabla 2-2 Reacciones del proceso de tratamiento del combustible para la obtención de hidrógeno [17].	24
Tabla 2-3 Características de las pilas de combustible [21].	26
Tabla 2-4 Submarinos AIP en la actualidad [8].	32
Tabla 3-1 Procesos de obtención bioetanol.	40
Tabla 3-2 Plantas de producción de bioetanol en España [29].	41
Tabla 4-1 Características S-80. [40] [38]	52
Tabla 5-1 Pilas de combustible PEM y otros medios de transporte. [23]	57
Tabla 5-2 Características del vehículo submarino no tripulado Pluto Plus [46].	66
Tabla 5-3 Valores típicos de tensión y corriente para diversos tipos de pilas de combustible.	66
Tabla 5-4 Parámetro de la pila de combustible PEM a estudiar.	67
Tabla 5-5 Coste de fabricación de la pila de celdas de combustible de 5kW [53].	79
Tabla 5-6 Ventajas y desventajas de los distintos almacenamientos de hidrógeno.	81

ABREVIATURAS

TFG	<i>Trabajo Fin de Grado</i>
AIP	<i>Air- Independent Propulsion</i>
S-80	<i>Submarino clase “Isaac Peral”</i>
PEM	<i>Proton Exchange Membrane</i>
PEMFC	<i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i>
UUV	<i>Unmanned Underwater Vehicle</i>
ROV	<i>Remoted Operated Vehicle</i>
DCNS	<i>Direction des Constructions Navales</i>
TKMS	<i>ThyssenKrupp Marine Systems</i>
I+D	<i>Invenstigación y Desarrollo</i>
LOX	<i>Liquid Oxigen</i>
HRS	<i>Hydrogen Refilling Stations</i>
AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>
UGV	<i>Unmanned Ground Vehicle</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
MEA	<i>Membrane Electrode Assembly</i>
HAZOP	<i>Hazard and operability</i>
AFO	<i>Análisis Funcional de Operatividad</i>
AIE	<i>Agencia Internacional de la Energía</i>

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción y motivación del trabajo

Toda "historia" tiene su "prehistoria" y no es más que aquella que vivieron nuestros antepasados que, gracias a sus conocimientos, imaginación, ilusión, sacrificio, altruismo y que, en no pocas ocasiones, arriesgaron su propia fortuna y en otras muchas su propia vida. Los primeros sumergibles son un caso claro de esta "prehistoria" pero es en ésta, sin lugar a dudas, donde se ha asentado las bases del submarino que conocemos hoy en día.

En la actualidad, la apuesta valiente de la Armada Española para nuestra futura Arma Submarina es un submarino convencional que empleará la tecnología AIP, "Air-Independent Propulsion", y por la tanto, ganará en autonomía pero sobre todo y lo que es más importante, en discreción cualidad y requerimiento inequívoco para un submarino moderno. Gracias a este sistema innovador permitirá a nuestra Armada el poder ocupar un lugar destacado entre otras marinas de guerra del resto del mundo.

En el desarrollo de esta la tecnología AIP que se pretende implantar en los próximos submarinos S-80 trabaja un experimentado entramado de empresas de nuestra Industria Nacional, como pueden ser Técnicas Reunidas o Abengoa, estando estas lideradas por nuestros astilleros de Navantia y bajo un constante apoyo y supervisión de la Armada Española.

El desarrollo de este sistema AIP, además de situar a la Armada Española en la vanguardia de las demás marinas, permitirá a nuestra industria nacional convertirse en un referente tecnológico del empleo del hidrógeno como una fuente de energía para otros ámbitos de nuestra sociedad.

1.2 Método utilizado

En este punto se expone la estructura y metodología que se ha seguido para el desarrollo del presente Trabajo de Fin de Grado. En su estructura hay dos partes bien diferenciadas respecto al procedimiento seguido para desarrollar cada una de ellas.

1.2.1 Investigación y estudio de los sistemas "AIP" y el escenario en el que tendrán que operar.

Este Trabajo de Fin de Grado se divide en dos diferenciadas partes. Por un lado, un análisis del "AIP" español en profundidad, es decir, de dónde viene cada uno de los componentes que lo hacen característico respecto a otras tecnologías energéticas. Este punto hace referencia a los tres componentes esenciales que hacen a este sistema propulsivo único. Estos son: el bioetanol como combustible, la pila de combustible como dispositivo encargado de producir energía y la autonomía

respecto del oxígeno exterior. Por otro lado, se estudia las posibles aplicaciones que podría brotar a partir de este sistema además de los submarinos S-80, como es el caso de buques de superficie o transportes terrestres. Finalmente se propone un diseño de una pila de combustible basado en el sistema AIP en un UUV o vehículo sumergible no tripulado. En concreto, el ROV Pluto Plus de la Armada Española que forma parte en la misión de los cazaminas contra la lucha de minas.

En la primer parte del trabajo se explica la situación de los submarinos en la actualidad, para a continuación enfocar el trabajo en un tipo específico entre ellos, el submarino S-80. Una vez conocido el presente de los principios básicos del AIP, se procede a analizar las pilas de combustible y el origen y obtención de la biomasa. El guión de estos principios básicos ha sido estructurado de forma que se empieza de lo general a lo particular, es decir, del funcionamiento de una pila de combustible genérica a las particularidades de una pila de combustible intercambio protónico, del origen de la biomasa hasta el proceso de obtención del bioetanol y de las inicio del proyecto S-80 hasta su previsión de futuro.

En la segunda y última parte del trabajo, ya conocidas las peculiaridades de este incipiente y probablemente el arranque de un nueva tecnología, se desarrollado sus líneas de desarrollo en otros ámbitos civiles y militares. Finalmente se ha concluido el trabajo con una propuesta del uso de pilas de celdas de combustible como sistema propulsivo de los UUV y sus posibles ventajas, en concreto, del Pluto Plus. Para ello, se ha llevado a cabo un diseño básico de una pila de combustible compuesta por 84 celdas capaz de alimentar un motor eléctrico de 5kW y un estudio económico aproximado de la pila.

1.2.2 Evaluación de alternativas actuales.

En este apartado se plantea la selección del sistema AIP como mejor alternativa para su uso no solo en la Armada, sino en un marco energético global. La selección de esta alternativa se lleva a cabo a través de estudios a nivel nacional e internacional para conocer sus ventajas frente a la gran dependencia de los recursos actuales. El problema a tratar es complejo y conlleva tener una serie de criterios que es necesario exponer y “entender” antes de entrar en materia en el trabajo:

- El sistema AIP, no tiene que ser entendido como un sistema propulsivo que pertenece únicamente a los submarinos, sino como un **sistema energético** que puede ser implantado en cualquier escenario que esté ligado con la producción de energía.
- El sistema AIP mencionado en el trabajo, hace referencia al sistema energético que proviene del modelo propulsivo implantado por España en sus submarinos venideros, conocidos como S-80 o “clase Isaac Peral”, aunque también pueden ser entendidos como cualquier propulsión que no depende del aire para funcionar.
- El submarino S-80 es un producto **íntegramente español** que a día de hoy está en el horizonte, ya que su entrada en servicio está programada para 2022. No obstante, es considerado el submarino de propulsión diesel más silencioso del mundo y el primer submarino nacional con disponibilidad de atacar objetivos terrestres.
- El diseño de la pila de combustible se ha diseñado para un ROV Pluto Plus pero puede ser trasladado a cualquier vehículo no tripulado con independencia de su medio de operación. Es un modo de evidenciar la posibilidad de implantar este sistema AIP **a cualquier ámbito** de la Armada Española.

1.3 Objetivos

El objetivo de la investigación es profundizar en el estudio del estado del arte actual de los sistemas AIP, la postura de la Armada respecto a esta tecnología innovadora y sus beneficios, el futuro del sistema AIP basado en las células de combustible y la aplicación de los principios de la tecnología AIP en otras plataformas o sistemas existentes en la actualidad.

El **primer objetivo** de este trabajo es dar a conocer el concepto del sistema AIP, su estado de desarrollo actual y las capacidades que pueden aportar en el desarrollo de otros escenarios tecnológicos. El interés radica en, por un lado, mostrar el empeño e interés que tiene nuestra Armada en este tipo de propulsión, y por otro, el intentar descifrar cual podrá ser el camino para seguir y aquello que nos podrá deparar el futuro. Quizá, ¿por qué no?, estemos siendo testigos de un inicio de algo que posteriormente podrá acarrear un efecto dominó que comienza con la apertura de una tecnología puntera y moderna de los submarinos a nivel mundial, cruzando por la implementación de un sistema análogo en los UUV y buques de superficie en el entorno naval, hasta el esparcimiento del coche o centrales de hidrógeno en la vida civil.

El **segundo objetivo** consiste en valorar el empleo de la biomasa, bioetanol u otros biocombustibles como una fuente de energía renovable en un intento por reducir la dependencia actual de los combustibles fósiles. La decisión se basa en diversos criterios, siendo uno de ellos, el que España se encuentra en una posición favorable como uno de los países con un mayor potencial en la obtención de energía gracias al empleo de la biomasa y que sin duda se presenta como una “ilusionante” fuente de energía.

Con la ayuda de estos dos objetivos principales, este TFG pretende ofrecer un marco general técnico-operativo a nivel conceptual, que motive el estudio de los factores que sitúan al S-80 en la vanguardia de los submarinos y arraigarlo en otros ámbitos tecnológicos. Todo ello con vistas tanto a la determinación de líneas de investigación y desarrollo (I+D), como a la experimentación con este tipo de sistemas y la maximización de los recursos renovable que posee España. Un ejemplo de este tipo de sistemas que se proponen en este trabajo, es la posibilidad de emplear un sistema análogo al AIP para vehículos sumergibles no tripulados de la Armada Española.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción: Evolución del sumergible al submarino

El submarino como arma ofensiva utilizado en el ámbito naval fue visto por primera vez en la Revolución americana (1775-1783), conocida como la guerra de las trece colonias. La tortuga, el pequeño submarino tripulado por una única persona, cuya estructura era similar a la forma de una nuez fabricada de madera y un caparazón de cobre, fue proyectada para desempeñar una aproximación de ataque por debajo del agua con el propósito de no ser detectados. El submarino poseía una bomba manual parecida a un fuelle que se encargaba de renovar el aire en el interior de su caparazón (Figura 2-1).

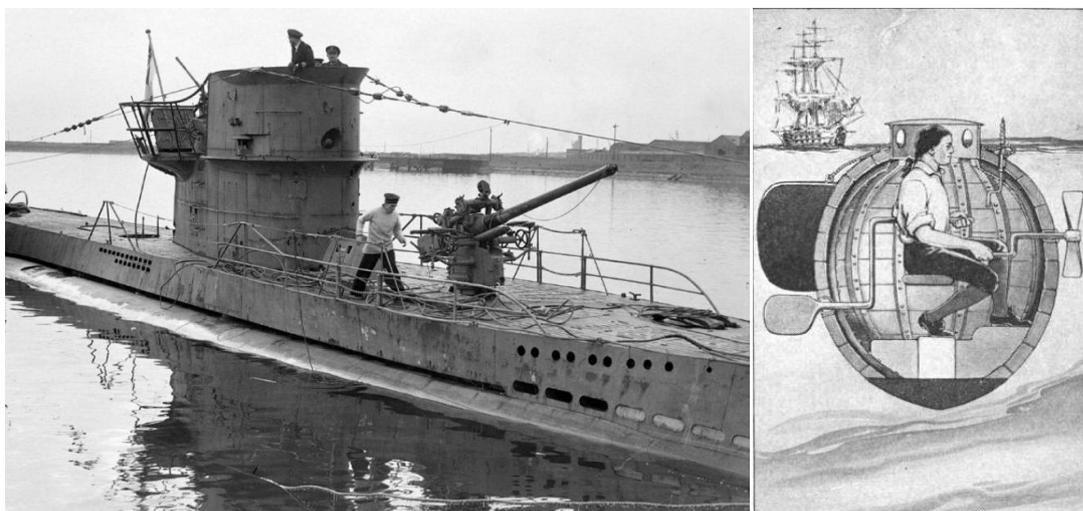


Figura 2-1 U-boot de la II Guerra Mundial (izquierda) y el primer submarino de la historia, "Turtle"(derecha) [1].

Dando un salto importante en el tiempo y ya en la Primera Guerra Mundial, los famosos U-Boot de la Marina Imperial del Kaiser Guillermo II se mostraron como un arma plenamente efectiva al llevar al Imperio Británico casi al colapso debido al férreo bloqueo llevado por su la Flota Submarina. Durante la Segunda Guerra Mundial paso algo similar, pero con la mejora de los métodos de detección de submarinos utilizados por parte de buques de superficie de los Aliados, el invento del sonar, que sentó las bases de la detección submarina, obligó al submarino a evolucionar y donde se mostraba indispensable permanecer el máximo tiempo sumergido para evitar su detección [1]. Es aquí

cuando se pone en práctica el sistema snorkel con el propósito de alimentar con aire los motores diesel y así poder navegar por debajo de la superficie con el “Schnorchel” evitando en gran medida la detección radar y visual. Dando un salto en el tiempo y los inventos proliferan naciendo nuevas tecnologías como es el caso de la propulsión AIP y nuclear. [2]

Sería incorrecto el no abordar el ámbito nacional y no hacer un rápido homenaje al primer submarino de propulsión eléctrica del mundo, submarino inventado gracias al tesón, esfuerzo e ilusión de un ingeniero y marino español, nos referimos al Teniente de Navío Isaac Peral. Su invento se puede considerar como el primer submarino con carácter militar a nivel mundial cuya botadura fue en 1888. Su tubo lanzatorpedos, con dos torpedos de recarga, nuevos sistemas integrados de aire que posibilitaban la permanencia abordo, un casco con forma de hueso, propulsor y controles lo hacían un arma única. Tal era el potencial y el arte de esta creación que algunos historiadores creen que, si este proyecto hubiera salido adelante, la historia sobre la pérdida de las últimas colonias españolas en el desastre del 1898 quizá habría acabado de otra manera. Su velocidad en inmersión era de 10 nudos y las baterías eran una modificación de un sistema zinc-dicromato potásico. En 1890, el submarino de Peral (Figura 2-2) lanzó el primer torpedo de la historia desde un submarino en inmersión, siendo un rotundo éxito. Sin embargo, la Junta Técnica encargada de la evaluación del submarino sacó a la luz una serie de fallos constructivos del buque, lo que impidió a Peral la continuación del prometedor proyecto echándole en cara la falta de conocimientos técnicos al no poseer la titulación de Ingeniero Naval. Lamentablemente así se escribe la historia, y en particular, la nuestra, la española, dejando pasar por alto páginas brillantes que se podrían haber escrito [3].

Hay que indicar que finalmente la Armada Española canceló el proyecto, siendo retomado por otros inventores de diferentes países, y que posteriormente a partir del siglo XX llegaría a ser una de las armas más mortíferas y eficaces que existe en estos momentos. [4]

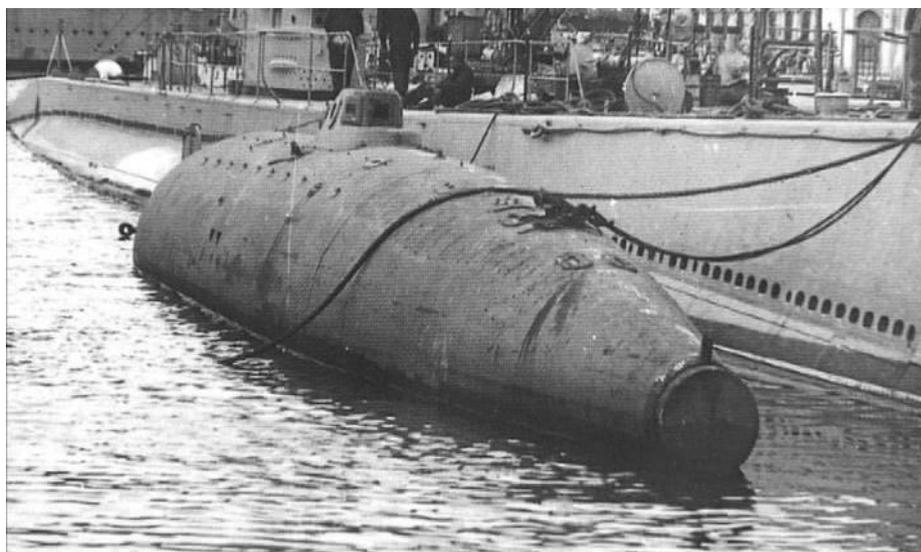


Figura 2-2 Submarino de Isaac Peral, reputado como el primer submarino torpedero del mundo [3].

Una vez hecha esta introducción, pasemos a la actualidad en donde existen diversos tipos de submarinos, ya no sumergibles, según su sistema de propulsión. Desde los veteranos submarinos convencionales tipo 212 o S-70 hasta los submarinos últimos nucleares de la clase Seawolf (USN) o clase Astute (Royal Navy).

2.2 Clasificación de los submarinos por su propulsión

2.2.1 Sistemas de propulsión convencionales

Clásicos:

- Diesel-eléctrico con baterías de plomo-ácido.
- Diesel eléctrico con baterías de litio.



Figura 2-3 Submarino AIP sueco clase Gotland. [5]

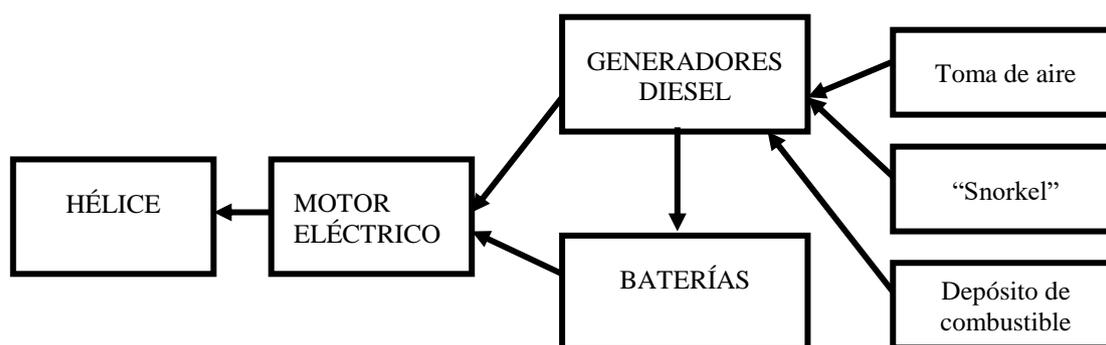


Figura 2-4 Propulsión sistema convencional [5].

Todos los submarinos convencionales actuales emplean propulsión eléctrica, donde el sistema se basa en el uso de baterías que entregan la potencia necesaria a un motor eléctrico, que está acoplado al eje directamente. Este grupo de baterías se recargan por grupos generadores diesel-eléctrico, durante las condiciones de snorkel o en navegación de superficie.

Las baterías tienen lógicamente una capacidad reducida de almacenamiento de energía, lo que limita el tiempo de operación del submarino sumergido y reduce factores como tasa de indiscreción, ruido, gases, calor térmico, factor sorpresa, entre otros. En la actualidad, la batería comúnmente usada empleada en los submarinos convencionales es la de plomo-ácido, aunque se está desarrollando otras clases de baterías secundarias, como es el caso de las baterías de litio de menor peso y mayor capacidad. Japón está siendo líder en este campo (Figura 2-4) [5].

Anaeróbicos:

- Híbrido con sistema de combustión interna anaeróbica (Figura 2-3).
- Híbrido con celdas de combustible.

2.2.2 Sistemas no convencionales: submarinos nucleares

Los submarinos nucleares, se distinguen por utilizar la fisión nuclear de partículas de uranio para finalmente generar energía eléctrica. Al contrario que los convencionales, no dependen del aire. En concreto, el U-235 produce una reacción en cadena que ocurre cuando un núcleo pesado de un átomo fisionable es bombardeado con neutrones convirtiéndole en inestable, y su posterior división en más de un núcleo pequeño, y estos núcleos pequeños a su vez en un mayor número, otros subproductos como neutrones libres, fotones o partículas alfa además de la gran energía desprendida en un proceso exotérmico [6].

Este calor a elevadas temperaturas se aprovechará para transformar el agua en estado líquido a vapor de agua y posteriormente transformarlo en energía eléctrica por medio del giro de un grupo de turbinas. Este giro de turbinas es el producto de la energía del flujo del vapor en energía mecánica por medio del intercambio de cantidad de movimiento por el fluido en estado gaseoso y el rodete compuesto por álabes.

2.2.3 Comparativa sistemas convencionales y no convencionales

En la Tabla 2-1 se muestran las características con mayor relevancia de los sistemas convencionales (incluyen los sistemas AIP) y los no convencionales, es decir, los nucleares. Se puede ver una clara diferencia en cuanto el tiempo de inmersión del submarino siendo la nuclear la más ventajosa, a continuación el sistema AIP y por última el sistema convencional compuesto por baterías de plomo/ ácido. Esto es proporcional al grado de indiscreción siendo más discreto el que mayor tiempo pueda permanecer en el medio subacuático [16]. Destacar las emisiones, ya sean térmicas o acústica, el sistema AIP tiene ventaja respecto a los demás. Esto se debe a que su sistema en el caso de las celdas de combustible (PEM) es un muy silencioso y poco caluroso al no existir combustión interna y carecen de partes móviles por lo que no se producen vibraciones. Estas ventajas, lo convierten en el submarino más sigiloso de todos los tiempos.

Características	Sistema convencional			Sistema no convencional
	Batería de plomo/ácido	Motor Stirling (AIP)	Celda de combustible (AIP)	Nuclear
Estado del arte	Tecnología en uso	Tecnología en uso	En desarrollo	Tecnología en uso
Tiempo sumergido	18-20 nudos: 1 a 1.5 horas 3-5 nudos: 50 a 100 horas	5 nudos: 14 días	4 nudos: 15 días	Ilimitado
Velocidad máxima sumergido(nudos)	20	Normal	Normal	Muy elevada
Grado de indiscreción	Normal	Poca	Poca	Nula
Profundidad máxima	Normal	Normal	Normal	Elevada
Emisión térmica	Poca	Poca	Nula	Mucha
Emisión de ruido	Sin ruido	Sin ruido	Sin ruido	Muy ruidoso
Coste	Elevado	Elevado	Elevado	Muy elevado

Tabla 2-1 Características relevantes de alternativas propulsivas [16].

2.3 El sistema AIP

2.3.1 Concepto sistema AIP

En 1867 el ingeniero, intelectual, político español Narciso Monturiol desarrolló una forma de propulsión anaeróbica con su famoso Ictíneo II, una mejora de su previo sumergible Ictíneo I, que optó por una máquina de vapor cuyo combustible era un compuesto de magnesio, zinc, cloruro potásico y peróxido que reaccionaba las condiciones ideales para la producción de vapor y oxígeno. Este oxígeno se recogía en tanques para ser utilizado posteriormente como medio de respiración de la dotación. Es por ello, por lo que el invento de Monturiol puede considerarse como el primer sumergible anaeróbico hasta la llegada del submarino alemán V-80 en 1940, que utilizó este mismo principio en las turbinas Walter que eran alimentadas por peróxido de hidrógeno [7].

La definición del sistema AIP puede ser extraída de sus propias siglas de locución inglesa, “Air-Independent Propulsión” que se entiende como propulsión independiente del aire. Este término excluye los submarinos de energía nuclear, es decir, una propulsión definida por el uso de reactores nucleares. El sistema AIP tiene como objetivo mejorar o reemplazar el sistema de propulsión diesel-eléctrica de submarino no nuclear. Como muestra la Figura 2-5, esta tecnología se asienta en el principio de utilizar un sistema de propulsión exento del aire exterior y así permanecer más tiempo debajo del agua. Este hito se ha ido desarrollando hasta la actualidad de múltiples formas, pero todas ellas al final anhelan el mismo objetivo, aumentar el tiempo de inmersión del submarino. En este tipo de propulsión no es necesario que el submarino esté en cota periscópica para poder izar el snorkel para la obtención de aire del exterior y por tanto su vulnerabilidad disminuye de una forma muy considerable [6].

Esta vulnerabilidad a la que está expuesta el submarino en ocasiones, define una relación tiempo exposición snorkel con el tiempo total de navegación que puede determinar la puesta en marcha o anulación de un proyecto. Esta división conocida como Coeficiente de Indiscreción (CI) equivale al tiempo relativo en el que un submarino se encuentra en una situación poco discreta, es decir, condición ruidosa respecto al tiempo total que el submarino ha navegado desde su salida de puerto hasta su entrada en puerto. Este grado de indiscreción es un factor importante en los submarinos convencionales y es la gran diferencia con el submarino nuclear.

Actualmente existen diferentes tipos de propulsión AIP, a pesar de que algunos que se encuentran en desarrollo. Esta propulsión se puede clasificar en tres tecnologías diferentes, pero con unos mismos elementos comunes con el propósito de alimentar el motor eléctrico. Este tipo de submarino mantiene los elementos del sistema convencional por baterías además del sistema particular AIP para la proporción de una mayor autonomía. Es decir, el submarino AIP es una mezcla entre un submarino convencional de baterías y un sistema de propulsión AIP (Figura 2-5).

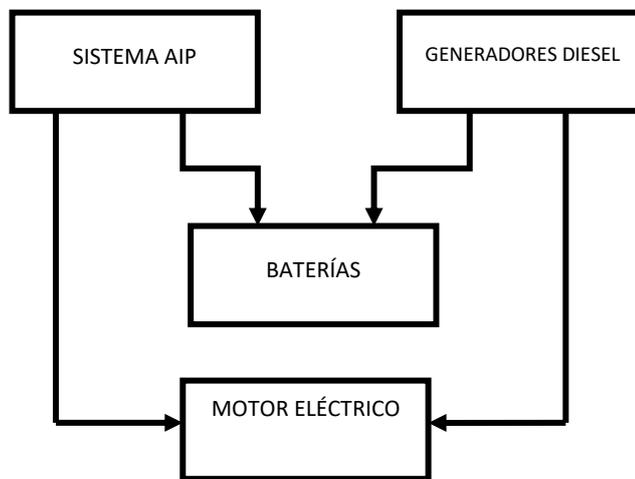


Figura 2-5 Sistema híbrido del submarino "AIP".

Una serie de países ha apostado por este tipo de propulsión anaeróbica asumiendo todas sus ventajas y desventajas que contiene esta tecnología. Todas las diferentes propulsiones AIP tienen un sistema de producción de energía característico. Es aquí donde se encuentran los sistemas AIP (Figura 2-6) basado en células de combustible, sistemas basados en motores Stirling, y sistema MESMA.

Su finalidad es la de obtener energía eléctrica en forma de corriente continua pudiendo ser un proceso factible o más costoso. El producto de esa transformación energética tiene que ser lo suficientemente elevado para suministrar al motor eléctrico que mueve las hélices y en ocasiones para alimentar las baterías (alimentadas por los diesel generadores) [8].

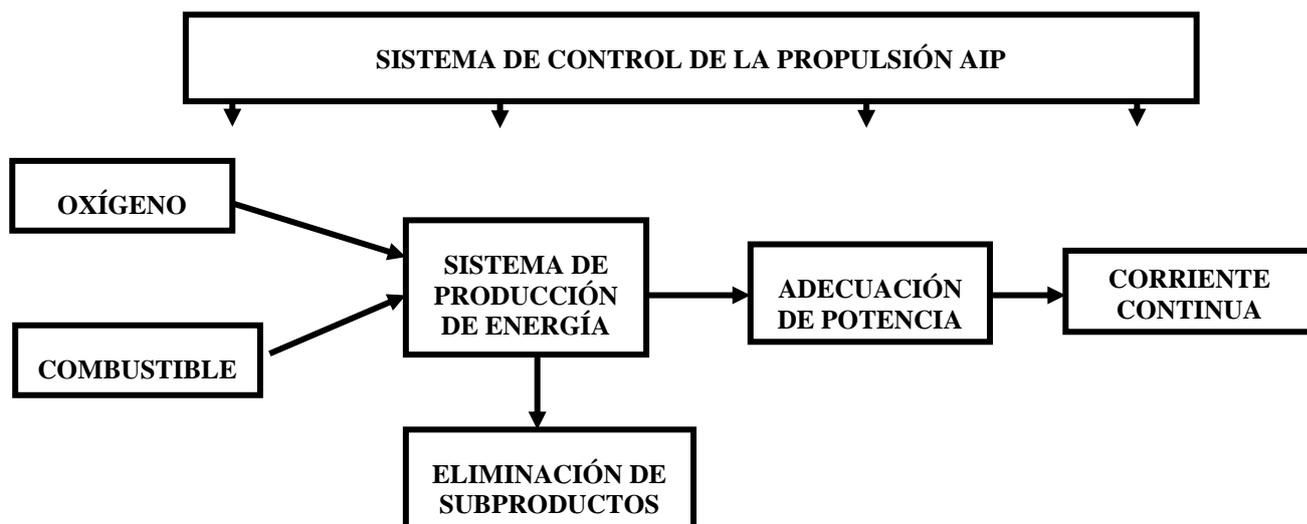


Figura 2-6 Sistema convencional anaeróbico, “AIP” [8].

2.3.2 Sistema de pilas de combustible (FC)

Sistema lo emplearán nuestros submarinos S-80 y será la columna vertebral de su AIP. Estas pilas de combustible utilizan una reacción electroquímica en la que el oxígeno y un combustible se combinan para formar agua y electricidad. A diferencia de los motores de combustión interna, el combustible no se quema sino que la energía se libera a través de una reacción catalítica.

La pila de combustible AIP se desarrolló en la década de 1980 para la Marina alemana. El sistema principal en uso hoy en día es el Siemens PEM (Proton Exchange Membrane) diseñado en Alemania, pero las otras empresas americanas también los suministran para submarinos AIP.

Las celdas de combustible tienen una alta eficiencia en referencia a la potencia y generalmente ofrecen la mayor resistencia de los sistemas AIP en la actualidad. Son muy silenciosos, y no contaminan considerando el sistema AIP con mayor potencial. Sin embargo, este sistema es complejo y a su vez costoso.

En la actualidad, los submarinos AIP con el sistema de pilas de combustible como principal fuente de energía se dividen en cuatro [9]:

- Desarrollo español (NAVANTIA).
- Desarrollo alemán (TKMS).
- Desarrollo francés (DCNS).
- Desarrollo ruso (RUBIN).

2.3.3 Sistema con motor Stirling

El sistema AIP basado en motores Stirling fue desarrollado por Suecia y actualmente pertenece a la compañía Saab Group. Este sistema se introdujo por primera vez en submarinos Clase Gotland de la Marina Sueca en los años 90 [10].

Este sistema se compone de un motor de combustión interna conocido como motor Stirling que opera por compresión y expansión cíclica de un fluido de trabajo ya sea aire u otro gas a diferentes temperaturas. Esto permite una conversión de energía térmica en trabajo mecánico.

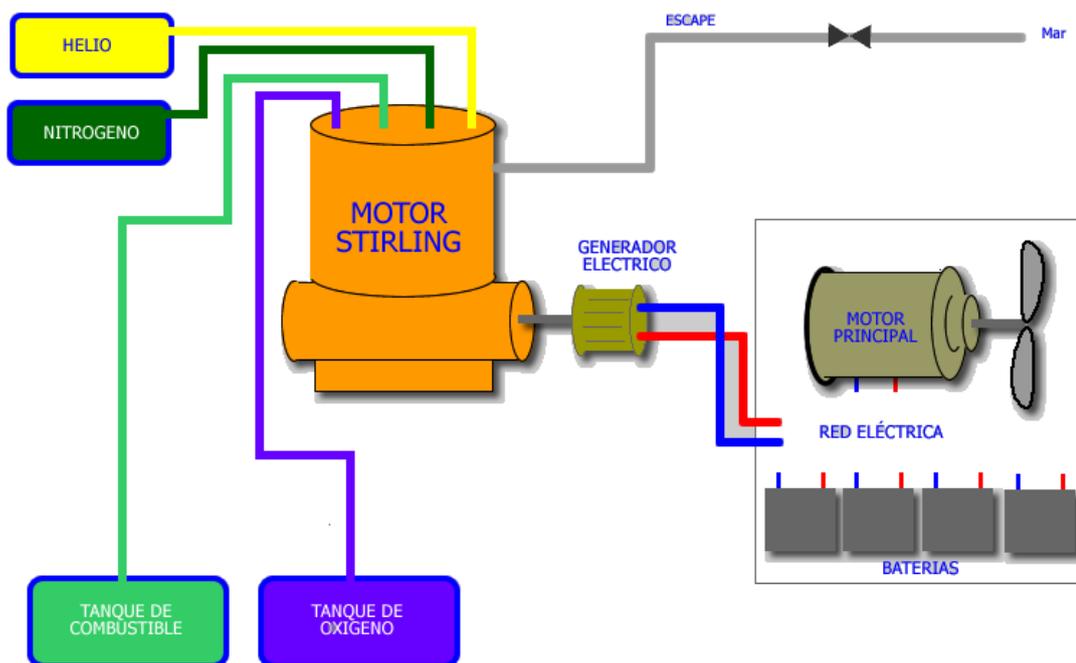


Figura 2-7 Funcionamiento de motor Stirling [11].

El principio de funcionamiento es calentar y enfriar, un fluido de trabajo ya sea aire u otro gas, el fluido de trabajo, mediante la aportación del calor generado en una cámara de combustión externa y así producir el movimiento alternativo de pistones que lo transmite a un cigüeñal ocasionando un movimiento giratorio. Este movimiento circular uniforme es empleado para alimentar a un generador y así convertirlo en energía eléctrica para el movimiento de hélices (Figura 2-7).

Las principales ventajas de este sistema son su fiabilidad y su favorecedora firma acústica en el entorno marino debidas a sus bajas vibraciones. Este sistema tiene un mayor rendimiento, así como su destacado sigilo. Como inconvenientes, tenemos su limitación para eliminar CO_2 , quedando reducido a 200m de profundidad, y su delicada condición de estanqueidad del gas de trabajo [12].

Actualmente existen en varios países submarinos con este sistema AIP:

- Singapur con dos submarinos clase “Archer” de procedencia sueca.
- Japón con diez submarinos clase “Sōryūs”, y cuatro en construcción.
- Suecia con sus 3 submarinos clase “Gotland” y 2 submarinos clase “Södermanland”.

2.3.4 Sistema MESMA

El Sistema AIP MESMA fue desarrollado por el astillero francés DCNS y puesto en servicio en los submarinos de la clase Agosta 908 para la marina de Pakistán, a principios del siglo XXI.

El sistema MESMA reside esencialmente en una turbina de vapor de alta presión donde el vapor es generado mediante la combustión de una mezcla gaseosa de etanol y oxígeno puro, proveniente de un tanque de oxígeno, en una cámara de combustión. Esta combustión a posteriori, da lugar a energía eléctrica y dióxido de carbono que es desechado por el submarino [13].

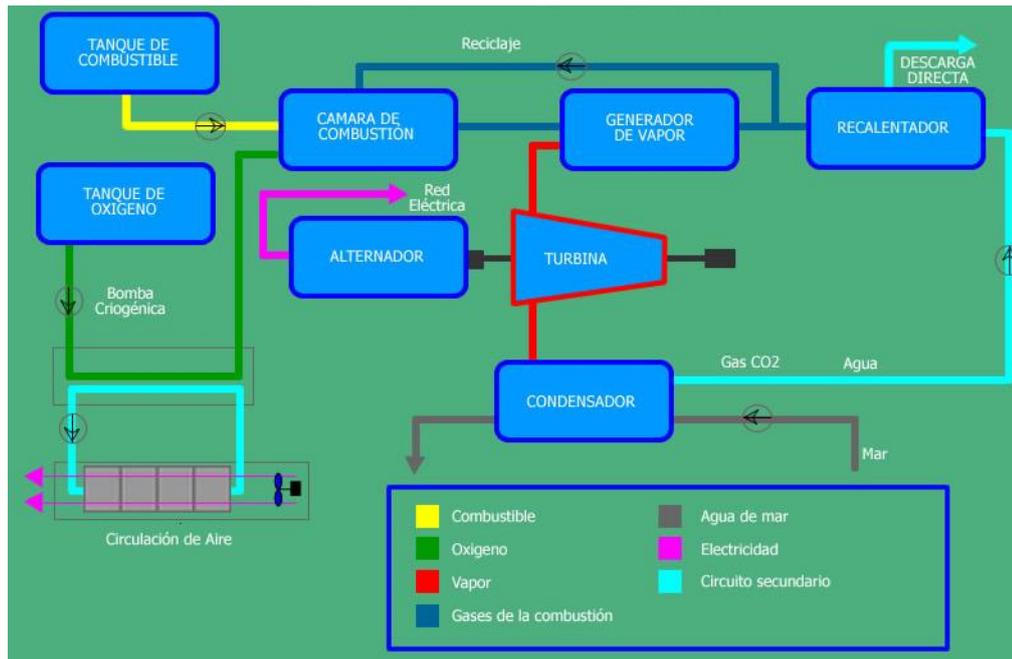


Figura 2-8 Esquema del funcionamiento del sistema AIP MESMA [14].

La energía térmica producida por la cámara de combustión es convertida en energía eléctrica mediante un ciclo de Rankine, que comprende una turbina, alternador y un condensador. Es importante que oxígeno criogénico y etanol se deben almacenar a una en unos tanques de oxígeno conocido como cilindro de oxígeno en unas condiciones determinadas para evitar la evaporación del oxígeno líquido (Figura 2-8). La principal ventaja de este sistema es su fiabilidad y sus principales desventajas son la baja densidad energética y la contribución a la firma acústica del submarino en propulsión AIP.

2.4 Sistemas actuales de pilas de combustible

2.4.1 Principios básicos

Los principios básicos de funcionamiento de las pilas de combustible comenzaron hace dos siglos, en 1838, por el científico Christian Friedrich Schönbein, aunque no se puso en práctica hasta 1967 por EE.UU. en vehículos espaciales y en submarinos.

En la actualidad, son varios países que apuestan sus sistemas AIP por el reformado de un combustible para la obtención de hidrógeno y así actuar como agente reductor junto al oxígeno para producir energía eléctrica. La industria militar ha sido uno de los principales emprendedores de las nuevas tecnologías y como es de esperar, el sistema compuesto por pilas de combustible ha atraído todos los focos en los últimos años. A parte de ofrecer una elevada eficiencia a nivel energético y una contaminación medioambiental insignificante, las celdas de combustible aportan ventajas estratégicas para el submarino en tema de ruido, evacuación de humos y emisión de calor.

Como es una conversión química a eléctrica podemos definir el rendimiento ideal de las pilas de combustible es el cociente entre la energía eléctrica, W , y la energía química ΔH [15].

$$\mu_{ideal} = \frac{\Delta W_{elec,ideal}}{\Delta H_{reac}} = \frac{\Delta G}{\Delta H_{reac}} \quad (Ec.1)$$

- Energía entrante: ΔH , calor procedente de la combustión del H_2 .
- Energía saliente: ΔG , energía de Gibbs en la combustión del H_2 .

Actualmente se encuentra en desarrollo tres 3 opciones que compiten por hacerse un hueco en el mercado submarinista y cuyas diferencias radican principalmente en el proceso de tratamiento del combustible, para la obtención de hidrógeno (Tabla 2-2) [16]:

	Reformado de vapor	$CH_4 + H_2O + calor \rightarrow CO_2 + 3H_2$	(Ec.2)
Metanol	Oxidación parcial del gas natural	$CH_4 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2 + calor$	(Ec.3)
Gasóleo		$C_{12}H_{26} + 6O_2 \rightarrow 12CO + 13H_2$	(Ec.4)
	Vapor de agua	$CH_3CH_2OH + 3H_2O \rightarrow 2CO_2 + 6H_2 + CO$	(Ec.5)
Etanol	Oxidación parcial	$CH_3CH_2OH + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2H_2$	(Ec.6)
	Autotérmico	$CH_3CH_2OH + H_2O + O_2 \rightarrow 2CO_2 + 4H_2$	(Ec.7)

Tabla 2-2 Reacciones del proceso de tratamiento del combustible para la obtención de hidrógeno [17].

Ninguno de estos desarrollos se encuentra instalado aún en una plataforma para su calificación operativa, ya que en estos momentos están en pleno desarrollo. Eso sí, estos sistemas deben de tener en cuenta una serie de condicionantes que deben ser soslayados para conseguir un sistema de propulsión óptimo:

- La dificultad para el reformado y la temperatura de reacción requerida aumentaría en función de la complejidad del hidrocarburo (metanol, etanol y gasóleo).
- La seguridad operativa puede provocar un fallo catastrófico que sería más delicado en el reformado del metanol ya que contiene partículas cancerígenas, tóxicas y es fácilmente inflamable.
- La eficiencia de la integración física y lo que se va a consumir para su operación en cuanto al espacio que ocupa en el submarino dependerá de la solución de diseño adoptada por los diferentes constructores.

Antes de enfocarnos en sistema característico del S-80, ahondemos en el funcionamiento de la célula de combustible y de los tipos que existen en la actualidad.

Las pilas de combustible operan como las baterías, con la diferencia que ésta no se agota ni tiene la necesidad de una recarga y su producción adicional de calor y agua además de electricidad. Todas estas resultantes solo son posibles si se produce una reacción electroquímica de la combinación de combustible que actúa como reductor y oxígeno que hace de figura de oxidante [18].

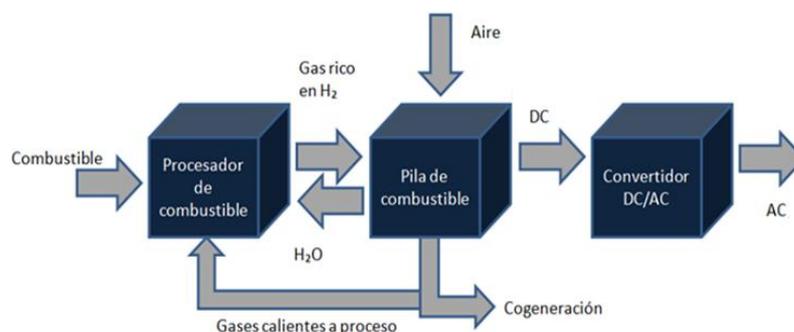


Figura 2-9 Configuración básica de una pila de combustible de un submarino.

- Su eficiencia puede llegar hasta un 60%, y está aún en pleno desarrollo para intentar maximizar la producción de energía.
- Esta energía producida por las pilas de combustible es limpia, es decir, no emiten CO₂ a la atmósfera ya que parten de elementos químicos.
- Se puede generar pilas reversibles que pueden almacenar la energía que sobra en hidrógeno, para luego aprovecharlo en otras pilas.
- No tienen partes móviles, lo que anula la emisión de ruido y hace sencillo su mantenimiento.
- El tamaño puede ser muy adaptable. Esto dependerá de las necesidades, desde una pila de pequeñas dimensiones para un dispositivo electrónico hasta una pila de grande para una central de hidrógeno.

Una de estas pilas de combustible, PEMC, característica en el empleo de automóviles alternativos, propulsión aeroespacial, en el submarino AIP S-80 e incluso en el uso de algunos dispositivos electrónicos, presentan numerosas ventajas es su alta eficiencia en comparación con otras pilas de combustible. Estas ventajas que hacen a éste tipo de pila tan característica son [20]:

- Conversión de energía utilizando dispositivos adecuados.
- La mayor densidad energética de entre todas las actuales pilas de combustible.
- El electrolito polimérico sólido ayuda a minimizar la corrosión.
- En contraste con otros tipos de celdas de combustible, la temperatura frecuente de operación es baja (por debajo de 80 ° C), permite ponerse en marcha con rapidez.
- La operación es más segura.
- Coste de los materiales es menor ya que usan catalizadores de platino.

En la Tabla 2-3, se muestra las características más reseñables de las pilas de combustible anteriormente mencionadas en la Figura 2-10:

Tipo de pilas	PEM	DMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Nombre	Pilas de Membrana de Intercambio Protónico	Pila de Metanol Directo	Pila alcalina	Pila de ácido fosfórico	Pila de carbonatos fundidos	Pilas de óxidos sólidos
Temperatura de Trabajo	50-120°C	50-100°C	90-100°C	150-200°C	600-700°C	700-1000°C
Electrolito	Membrana de polímeros	Membrana de polímeros	KOH disuelto en agua	Ácido fosfórico	Carbonatos fundidos	Óxidos sólidos
Combustible	H ₂	Metanol	H ₂	H ₂	H ₂ , CH ₄ , CO ₂	H ₂ , CH ₄ , CO ₂
Eficiencia	60%	40%	60-70%	40%	45-50%	60%
Usos	Transporte*, portátiles, centrales, residencial	Portátiles	Espaciales	Generación eléctrica, automoción	Generación eléctrica, cogeneración	Generación eléctrica, cogeneración

*Hace referencia a todo tipo de transporte; automóviles, autobuses, barcos, submarinos, satélite artificial.

Tabla 2-3 Características de las pilas de combustible [21].

2.4.3 Rendimiento de la pila de combustible

Como ya sabemos se trata de una reacción de oxidación del hidrógeno con oxígeno que equivale a una combustión isotérmica, con la diferencia de que en vez de energía térmica al principio se obtiene energía eléctrica directamente. Por lo tanto, es un proceso breve, como muestra el esquema siguiente en el cual se comparan los procesos que llevan a cabo un sistema convencional, es decir, una máquina térmica y una pila de combustible.

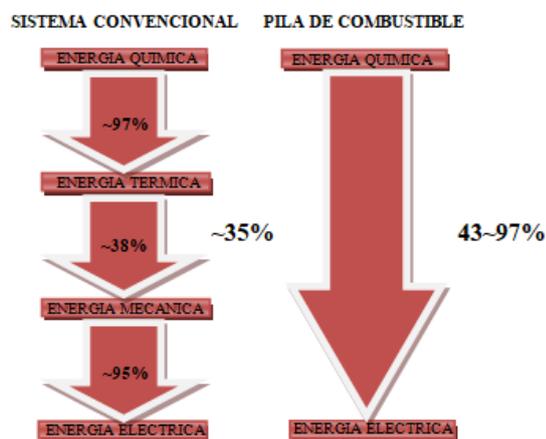


Figura 2-11 Transformación en una máquina térmica y una pila de combustible [22].

El rendimiento máximo teórico para una pila de combustible se encuentra en torno a 95% aunque las pilas puestas en práctica suelen alcanzar una eficiencia de aproximadamente 50% y todavía está en desarrollo con la finalidad de la mejor de este rendimiento. Sin embargo, las transformaciones en un sistema convencional como es el caso de un motor térmico, su rendimiento disminuye a la cifra de un 30% en condiciones normales (Figura 2-11 Transformación en una máquina térmica y una pila de combustible [22]). Estos motores característicos de motores diesel-marino tienen que pasar diferente transformación de energía hasta llegar a la deseada, partiendo de una combustión en una caldera (cámara de combustión) para conseguir energía térmica, mover un eje central con la ayuda de un alternador y así transformar energía mecánica en eléctrica. Sin embargo, en la pila de combustible se logra transformar la energía química en electricidad con una reacción química controlada con la ayuda de un catalizador.

El hecho de que las pilas de combustible realicen una conversión directa del combustible a energía hace que sean capaces de producir más energía con la misma cantidad de combustible. Este proceso alcanza valores en torno a 40-60%, aunque depende del sistema de pila de combustible y el aprovechamiento del calor emitido. La Figura 2-12 realiza una comparativa entre la eficiencia de las pilas de combustible y otros sistemas de capaces de generar energía eléctrica.

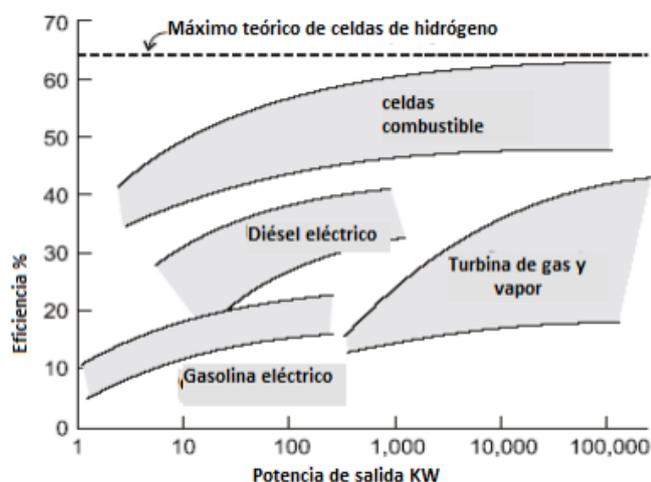


Figura 2-12 Comparativa eficiencia pilas de combustible y otros sistemas de energía eléctrica [23].

Esta eficiencia alcanzada por las pilas de combustible provoca un impacto no solo en la eficiencia de potencia de salida sino también en las emisiones de los contaminantes. El combustible al ser hidrógeno, la reacción electroquímica catalizada de la pila de combustible obtiene una serie de productos que no contaminan. Estos productos son agua, calor y electricidad, a diferencia de los sistemas de combustión fósil que son CO_2 , NO , SO_x y otras partículas perjudiciales para el medio ambiente. Este hecho reduce el deterioro ambiental ya que el hidrógeno es sólo vapor de agua que se desplaza hacia la atmosfera al ser más ligero que el aire. Además podemos observar en la Figura 2-12 que la relación potencia-eficiencia para todos los sistemas de energía eléctrica es mayor a medida que aumenta alguno de estos dos factores. Esto se puede plasmar como un mejor aprovechamiento de la energía cuanto mayor es la potencia de salida ya que las pérdidas en proporción son menores.

2.5 Pilas de combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEM)

2.5.1 Funcionamiento de las pilas PEM

Estas pilas características del S-80 tienen un funcionamiento similar a cualquier célula de combustible común, alimentan el ánodo con hidrógeno como combustible y en el cátodo oxígeno. La única gran diferencia de las pilas PEM es su particular electrolito y por lo tanto el proceso químico para la obtención de energía. Esta reacción electroquímica desglosada da lugar a electricidad como fuente aprovechable y combinación de agua y calor como resultado desechable. En este fenómeno, conocido como electrolisis, hasta la obtención del resultado esperado, se pueden diferenciar una serie de fases representadas en la Figura 2-13:

1. El combustible, en este tipo de pila hidrógeno, se introduce por unos canales mecanizados en la placa bipolar situados en el ánodo para posteriormente ser guiados a una capa de material carbonoso donde tendrá lugar la oxidación del hidrógeno.
2. El hidrógeno alcanza el ánodo y el oxígeno se introduce en el cátodo.
3. En el ánodo, un catalizador provoca que la molécula de hidrógeno (H_2) se divida en protones (iones positivos del H_2) y electrones.

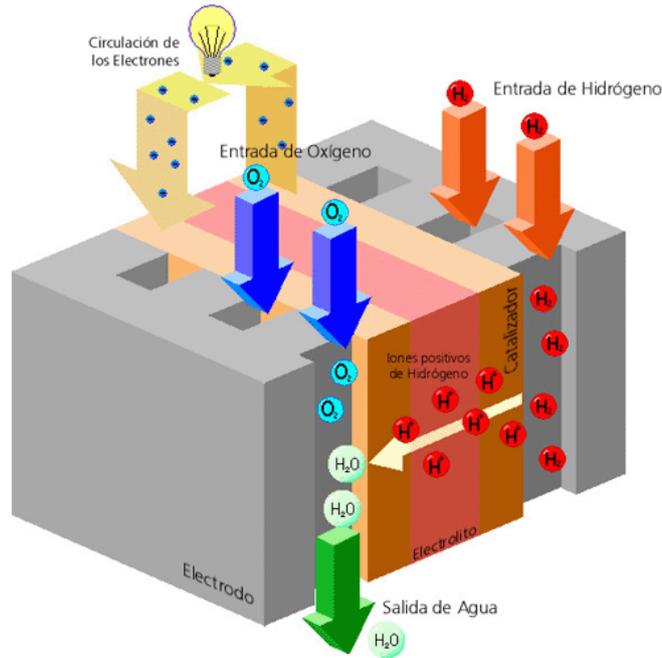


Figura 2-13 Esquema del funcionamiento de una pila de combustible PEM [24].

4. La membrana central o electrolito permite solo que los protones puedan pasar a través suya, hasta llegar a él cátodo. Simultáneamente, los electrones que no tienen otro camino para alcanzar el cátodo se dirigen por un circuito exterior que está cargado con una diferencia de potencial y es en este momento cuando se produce una corriente eléctrica.
5. Por otro lado, los protones provenientes del hidrógeno que alcanzan el cátodo pasando por el electrolito, se juntan con los electrones que llegan para producir agua.
6. El agua producida de la mezcla de los electrones y protones es expulsada de la celda (Figura 2-14).

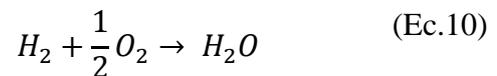
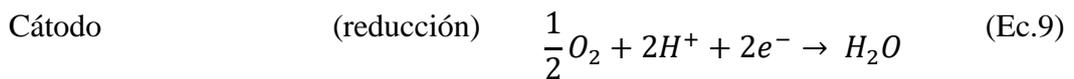


Figura 2-14 Reacciones que tienen lugar en cada uno de los electrodos [25].

2.5.2 Materiales de la célula de combustible PEM

Una pila de combustible tipo PEM está compuesta por numerosos elementos y cada uno ellos cumplen una función en particular (Figura 2-15). Tienen que estar diseñados de forma que ayude el desarrollo del proceso del sistema, es decir, de las reacciones químicas ocurrentes en el sistema. La pila, aparte de los equipos auxiliares que favorecen la reacción (suministro de calor, tensión necesaria del sistema, compuestos químicos o seguimiento de la reacción), está compuesta por electrodos, electrolito, capas difusoras y placas bipolares [26].

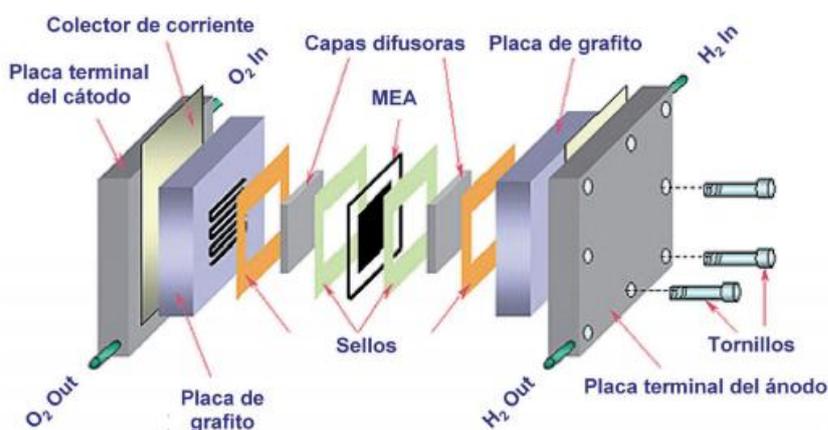


Figura 2-15 Partes de una pila de combustible [26].

2.5.3 Implantación de pilas PEM en submarinos AIP

El sistema que integrará los S-80 serán pilas tipo PEM (Proton Exchange Membrane), cuyo electrolito es un polímero orgánico sólido en forma de membrana. Este tipo de pilas presentan ventajas de mayor conveniencia acorde a su empleo, en los submarinos, donde el volumen y el peso son factores determinantes en este tipo de plataformas como se ha podido observar en la remodelación del proyecto del submarino S-80.

Integran una parte primordial del corazón del submarino como es la propulsión, encargada del movimiento del buque. Algunas de las ventajas de este tipo de pilas son las siguientes:

- La potencia suministrada se ajusta fácilmente a la demanda.
- Tamaño y peso reducidos.
- Sustenta un elevado tiempo de vida, aproximadamente 2 años y medio.
- Temperatura reducida de funcionamiento.
- Menor corrosión y pérdidas por calor reducidas.
- Firma acústica despreciable y firma térmica inapreciable (60- 80°C).

Estas ventajas entre otras han sido un factor clave para la elección de las pilas de combustible tipo PEM como fuente de suministro de energía eléctrica y, es por ello, por lo que diferentes países han optado por el desarrollo de nuevos submarinos basado en este tipo de pilas de combustible, pero cada uno de ellos con una técnica de reformado particular. Estos países que han optado a elegir las pilas PEM como fuente de energía de sus submarinos son; España, Alemania, Francia e incluso Rusia.

2.5.3.1 Desarrollo español (Navantia)

El impulso de Propulsión AIP fue impulsado en España en 2002 con la propuesta del S-80 por Navantia. Se basa en el reformado de bioetanol para la obtención de H₂ tomando como punto de partida la pila de combustible PEM de potencia 300kW, que utiliza hidrógeno como combustible y oxígeno líquido almacenado en tanques que armonizan las condiciones ideales para su uso.

Este diseño español del AIP fue desarrollado por la empresa Hynergreen Technologies S.A. donde la pila de combustible PEM fue fabricada por la empresa estadounidense UTC Power dedicada a la creación de células de combustible. En este sistema, se puede distinguir el rendimiento teórico de las pilas de combustible tras el suministro de hidrógeno puro es 95%, aunque éste porcentaje en la práctica disminuye debido a las pérdidas.

Además, tiene un bajo impacto ambiental debido a la ausencia de una combustión a diferencia de los motores convencionales diesel-eléctricos, sin embargo si produce una despreciable cantidad de dióxido de carbono causado en la etapa de conformado del bioetanol.

2.5.3.2 Desarrollo alemán (TKMS)

La compañía alemana TKMS ha impulsado el desarrollo de tecnologías AIP con metanol materia prima de reformado sosteniendo como raíz el sistema de pilas de combustible PEM de potencia 240kW. Este sistema AIP consiste en un procesador de metanol a una elevada presión para obtener hidrógeno y un sistema para diluir los gases, la mayoría dióxido de carbono. Esto se consigue a través de un sistema que conecta los productos desechables con el agua del mar facilitando la disolución y aumentando el grado de discreción mediante la mejoría de la firma acústica, térmica o visual.

2.5.3.3 Desarrollo francés (DNCS)

Otra empresa puntera en el ámbito de tecnología AIP para submarinos es la compañía de defensa naval francesa considerado uno de los principales astilleros de Europa. Este sistema de propulsión AIP como sus pilas de ion-litio como sus pilas de ion de litio, se nutre en el reformado de gasóleo.

Este Sistema AIP se trata de un concepto similar al reformado por el astillero alemán TKMS, saltando del metanol al gasóleo como producto de reformado y oxígeno al aire en el cátodo de la pila de combustible PEM.

El aire se obtiene a través de una mezcla controlada entre oxígeno y nitrógeno. Esta mezcla que da lugar a aire se utiliza para aumentar la vida útil del sistema ya que estarían menos expuestos a la oxidación.

2.5.3.4 Desarrollo ruso (RUBIN)

Según fuentes públicas Rusia estaría programando el desarrollo del sistema AIP para una serie modernizada de la cuarta generación submarinos de características similares a las del proyecto S-80, cuyo sistema AIP se basa en las pilas de combustible PEM y una fase previa de reformado de bioetanol.

2.5.4 Comparativa sistemas AIP

Se puede observar en la Tabla 2-4 los países actuales que han apostado por diferentes sistemas AIP para ser el pilar de sus submarinos, y seguramente para su Armada. Se aprecia que la mayor parte de los submarinos AIP en la actualidad o desarrollo son de tecnología basada en las pilas de combustible. En este lugar se encuentra España que arriesga para intentar estar al nivel tecnológico de los demás países y en un futuro próximo no solo en un marco de submarinos sino también en todo el ámbito naval e incluso en el mundo civil.

Sistema AIP	Origen	Tecnología AIP	Clase	Buque y País	Total	
Stirling/ Krockums	Suecia	Motor alternativo de combustión externa (Stirling)	A -19	3 Gotland(Suecia)	3	11
			A-17-M	2 Sodermanland (Suecia)	4	
			A-17-M	2 -- -- (Singapur)		
			Asashio	1 Asashio (Japón)	1	
			Soryu	3 Soryu (Japón)	3	
MESMA DCNS	Francia	Turbina de vapor	Agosta 90 B	1 Hamza (Paquistán)	1	1
Navantia	España	Reformador de bioetanol y pilas de combustible	S-80	4 S-80 (España)	4	4
HDW/Siemens	Alemania	Hidruros metálicos y pilas de combustible	212 A	4 U-31 (Alemania) 4 Salvatore Todaro (Italia)	8	27
			212 A Batcht 2	2 U-35 (Alemania)	2	
			214	4 Papanokolis (Grecia) 3 Son Wong-II (Corea del Sur) 3 -- -- (Turquía) 3 -- -- (Paquistán)	13	
			Dolphin AIP	2 -- -- (Israel)	2	
			209/1400	2 Tridente (Portugal)	2	
Rubin Design	Rusia	Depósito de hidrógeno y pilas de combustible	Lada	3 Sankt Peterburg (Rusia)	3	3

Tabla 2-4 Submarinos AIP en la actualidad [8].

Los beneficios del sistema de propulsión de celda de combustible se reforzaron cuando un submarino de la clase U212A (U-35) estableció un nuevo récord para submarinos no nucleares al pasar dieciocho días en tránsito sumergido sin snorkel. Esto fue el inicio de partido para el interés de las armadas más prestigiosas del mundo. Es por ello, que numerosas armadas han seguido el ejemplo de los alemanes. La Armada italiana encargó dos U212 en 2005 (Salvatore Todaro) y 2007 (Scire). Las últimas dos fueron ordenadas para construcción en 2008 pero siguen a la espera de su botadura. La Armada israelí firmó un contrato con ThyssenKrupp para comprar dos submarinos adicionales de la empresa de construcción HDW. Hasta la fecha, esto se ha integrado en la clase de submarinos U214 de HDW, una variante más grande del U212 con una mayor profundidad de buceo. En los clientes se

incluyen; Corea del Sur (tres), Grecia (cuatro), Turquía (seis) y Portugal (dos, bajo la clase de U209 y una ligera variación de U214). En potencias mundiales como la Armada rusa, los submarinos de la clase Lada, diseñados por Rubin Design cuentan con un sistema AIP. El submarino Sankt-Petersburg, se puso en servicio en 2010 después de más de una década de desarrollo y dos más de esta misma clase están en construcción. En el ámbito nacional Navantia está construyendo actualmente cuatro submarinos S-80 clase “Isaac Peral” para la Armada Española que incluirá una propulsión de celda de combustible suministrada con bioetanol y desarrollada por UTC Aerospace. Estos reformadores de bioetanol para la generación de hidrógeno emanan de Abengoa y Técnicas que ya han mostrado la viabilidad de sus prototipos.

3 BIOMASA, MOTOR DEL AIP

3.1 /La biomasa

La biomasa es probablemente la fuente más antigua de energía, sin tener en cuenta la del sol. Desde el comienzo de la vida en el planeta Tierra, la gente ha quemado madera para calentar sus alimentos y su hogar. La biomasa es una fuente de energía renovable porque sus suministros no están limitados ya que siempre podremos plantar árboles o cultivos.

El término "biomasa" hace referencia a la materia orgánica que almacena energía mediante el proceso de la fotosíntesis. Esta energía es empleada hoy en día en numerosos escenarios, suponiendo un 4% de la potencia empleada de la energía a nivel mundial.

La energía radiante del Sol es sustancial en el proceso de la fotosíntesis, ya que las plantas transforman esta energía solar en energía química en forma de glucosa. La luz solar proporciona a las plantas la energía que necesitan para convertir el agua y dióxido de carbono en glucosa y oxígeno. Esta energía química, conocida como bioenergía, es aprovechada para la transformación de la materia orgánica producida por plantas y animales en combustible.



Figura 3-1 La biomasa según su procedencia [27].

Sin embargo la energía de biomasa o bioenergía se puede obtener a través de un aprovechamiento de materia industrial formado en algún proceso mecánico o biológico, aunque generalmente se obtiene a través de los residuos de los seres vivos plasmados en la Figura 3-1. La obtención de bioenergía se puede dividir; en tipos de biomasa según su origen y en los procesos de transformación de la biomasa en energía [27].

Existen distintos tipos de biomasa según su origen: Biomasa natural, biomasa residual (biomasa seca o húmeda), excedentes agrícolas y cultivos energéticos.

En los procesos de transformación de la biomasa se dividen en dos grupos diferentes. Existen los procesos termoquímicos y los procesos bioquímicos.

- Los procesos termoquímicos (en seco) son la combustión y pirolisis (Figura 3-2).
- Los procesos bioquímicos (húmedo) son la digestión anaeróbica y la fermentación (Figura 3-3).

Combustión

En este método se utiliza calor para la transformación de la biomasa, y es por ello, que tienen que estar en un estado de poca humedad, es decir, seco. La combustión directa, es considerada ser de los medios más habituales para la obtención de energía [28].

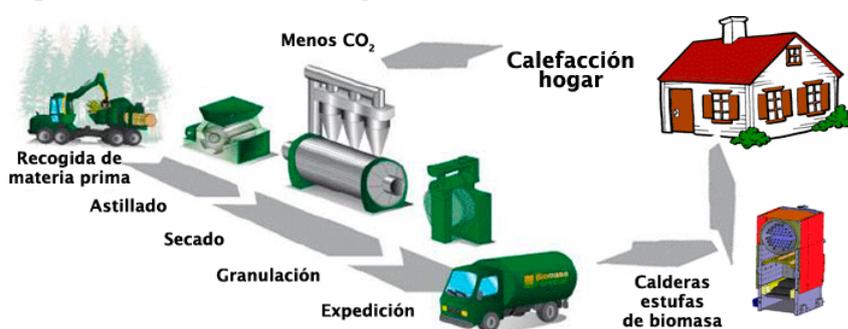


Figura 3-2 Proceso de transformación termoquímica [28].

La combustión se entiende por la oxidación completa de la materia, alcanzando unas temperaturas elevadas para mantener la reacción. Esta reacción genera calor para producir vapor de agua que será aprovechada para la obtención de energía a través del movimiento de una turbina. Otros componentes como dióxido de carbono y ceniza son fruto de esta reacción.

El problema principal de obtener energía con este método es su baja eficiencia energética ya que a través de este proceso no se aprovecha toda la energía procedente de la de la materia orgánica de la biomasa.

Pirolisis

El material se pulveriza, luego se alimenta a un recipiente del reactor y se calienta sin la presencia del aire, es decir, de forma anaeróbica. Tras la descomposición de la materia orgánica al igual que la combustión se hace pasar por una turbina con la diferencia de que en este caso existe una mayor eficiencia del calor [28].

Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso natural conocido también como fermentación donde ocurre la degradación de la biomasa de forma espontánea por medio de microorganismos. Esta descomposición está formada por productos gaseosos o “biogás” como metano, dióxido de carbono, hidrógeno, nitrógeno entre otros. El biogás contiene un alto porcentaje en metano entre el 50 al 70 % suponiendo una eficiencia energética a la hora de la combustión en motores, calderas o la obtención de otros combustibles al mezclarlo. Es un proceso ideal para el beneficio del efecto invernadero.



Figura 3-3 Proceso de transformación bioquímica [28].

Fermentación

La fermentación implica la transformación de glucosa de una planta en un alcohol o en un ácido. Es un proceso anaeróbico por levaduras, para convertir azúcar en glucosa y a su vez, etanol y dióxido de carbono.

El etanol se destila para obtener una elevada concentración de alcohol y así usar un combustible con mayor pureza. En ocasiones, la materia orgánica resultante tras el proceso de fermentación puede utilizarse de alimento o en otros procesos como la gasificación [28].

3.2 Biomasa en el contexto mundial

La Agencia Internacional de la Energía (AIE) calcula que aproximadamente el 10% de la energía primaria mundial procede de recursos asociados a energías renovables a partir de materia orgánica. Estos productos componen lo que conocemos como “biomasa” que abarca un amplio grupo de materia de procedencia variada y características diferentes como es el caso de los cultivos energéticos, residuos de industrias, residuos humanos o animal e incluso residuos forestales. Mayoritariamente, éste porcentaje pertenece a los países pobres que están todavía en desarrollo donde resulta ser la materia prima más utilizada para la producción de energía motivada por su sencillez. En África, Asia y Latinoamérica forman una tercera parte del consumo energético y para más de 2.000 millones de personas es un recurso esencial para su hogar.

La biomasa supone una indudable importancia para el desarrollo de los países pobres, pero para ello hay que establecer unas normas y requisitos que aseguren que se está haciendo de forma reglada. Éste progreso creará una menor dependencia de energía no renovables, reducirá en gran medida la contaminación y proporcionará protección forestal. Actualmente, el 78% del suministro energético proviene de los combustibles fósiles, el 12% de la energía nuclear y otro 9% de las energías renovables (Figura 3-4).

Suministro energético

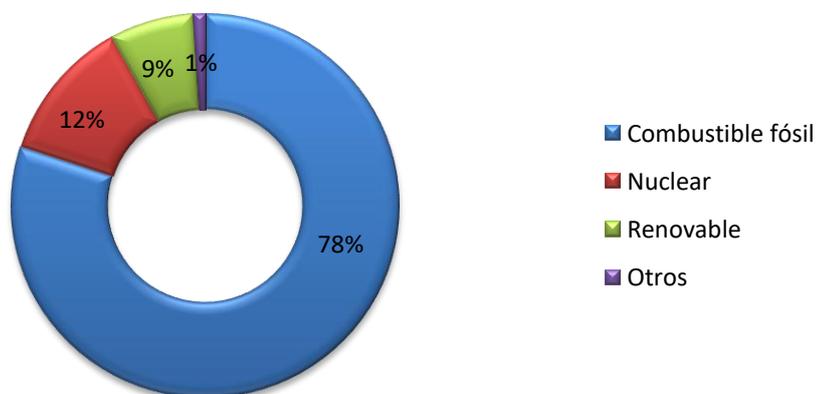


Figura 3-4 Porcentaje de abastecimiento energético mundial.

El uso de esta biomasa en vez de combustibles fósiles, suponen una serie de ventajas que lo hacen ser una de las futuras fuentes energéticas:

- Disminución de emisiones de partículas, azufre o contaminantes como CO, HC, NO_x entre otros.
- No contribuye al efecto invernadero debido a su ciclo neutro de CO₂.
- Aprovecha todo tipo de residuos forestales y agrícolas.
- Impulsa el desarrollo económico en el mundo rural.
- Mantenimiento de los bosques limpios, ayudando a la reducción del riesgo de incendios.
- Está inscrito dentro de las energías renovables, es decir, es una fuente inagotable.
- Reduce la fuerte dependencia actual de los combustibles fósiles.

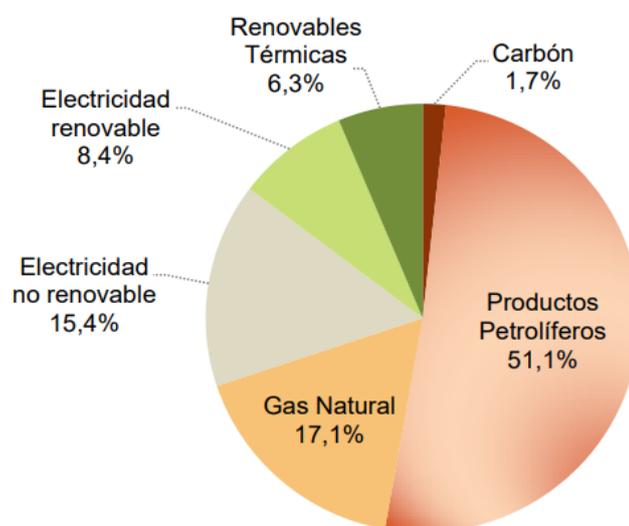


Figura 3-5 Porcentaje de abastecimiento energético en España [29].

Comparando las Figura 3-4 y Figura 3-5 se extrae que España actualmente está por encima de la media mundial en cuanto al abastecimiento de energías renovables se refiere.

3.3 Biocombustible, la biomasa como fuente energética

Los biocombustibles son fuentes de energía generadas a partir de biomasa, procedente de la materia animal o vegetal. A pesar que los biocombustibles existen desde el inicio de la historia, el carbón y petróleo ocupan las todas las portadas desde la Revolución Industrial, a mediados del siglo XVIII, con la máquina de vapor de James Watt hasta la actualidad. Esto se debe por su abundancia, fácil extracción, precio reducido y su elevado valor energético. El carbón y el petróleo provienen de la biomasa, a diferencia de que su producción tardó millones de años. Tras siglos de explotación, estos combustibles fósiles han creado una dependencia en todos los ámbitos del ser humano. No obstante, debido a su cada vez más limitado recurso y el incumplimiento del compromiso medioambiental, los biocombustibles están haciendo un resurgimiento en terreno de la energía.



Figura 3-6 Las generación de los Biocombustibles.

A diferencia que los combustibles fósiles, los biocombustibles son un recurso renovable ya que son ininterrumpidamente suministrados. Existen cuatro tipos de biocombustibles: biocombustibles de 1^a, 2^a, 3^a y 4^a generación. Se distinguen por la forma en cómo se genera biomasa; alimentación humana (1^a) o ganado, residuos o algunas algas (2^a), pastos, árboles, algas y plantas de crecimiento rápido (3^a) y obtenidos a partir de bacterias aunque todavía está en desarrollo (4^a) (Figura 3-6).

3.3.1 Proceso de obtención del bioetanol

El etanol, conocido como alcohol etílico, es una sustancia química compuesta de carbono, hidrógeno y oxígeno, como se puede observar en su fórmula semidesarrollada $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{OH}$. Es un compuesto químico líquido e inflamable y es uno de los principales componentes de las bebidas alcohólicas, licores destilados, vino y cerveza.

Puede ser obtenido a través de la hidratación del etileno o, si es bioetanol mediante el tratamiento de materias vegetales ricas en almidón azúcar o celulosa. El bioetanol se puede utilizar en el sector industrial, como fuente de energía eléctrica y calorífica o como combustible para los transportes. Es una búsqueda de energías renovables que nos ayuda a disminuir la dependencia actual de los combustibles fósiles, en concreto de la demanda de petróleo percibida en la actualidad.

Es un tipo de alcohol de carácter inflamable que se obtiene con un proceso de fermentación de materiales orgánicos particulares, principalmente la materia vegetal. Para esta producción del bioetanol se utilizan distintos tipos de productos de origen vegetal.

En primer lugar, los que tienen un alto contenido en sacarosa, destacando la caña de azúcar, remolacha y alcoholes vínicos (la uva). Un segundo grupo corresponde a los productos agrícolas con alto contenido de almidón, es decir, cereales como trigo, cebada o maíz y la patata (tubérculos). Finalmente la utilización de materias con un elevado porcentaje de celulosa y la biomasa formada por residuos agrícolas. Sin embargo, la metodología y el coste total de la obtención del bioetanol dependen del grupo correspondiente de la materia prima a utilizar.

Materias primas		Preparación de la materia prima		Obtención de azúcares			Fermentación y destilación		
Sacarosa	Caña azúcar, uvas	Limpieza y acondicionamiento de la materia prima	Triturado y filtrado	-----			Fermentación	Destilación	BIOETANOL
Almidón	Cereales, Tubérculos		Molienda o trituración	Hidrolisis	Cocción	Sacarificación			
Celulosa	Madera (Biomasa)		Trituración	1ªHidrólisis ácida	Separación de líquidos/sólidos	2ª Hidrólisis ácida			

Tabla 3-1 Procesos de obtención bioetanol.

La Tabla 3-1 representa los procesos de obtención de bioetanol según su preparación de las materias primas: fermentación y destilación de sus azúcares e incluso se podría añadir el proceso de secado. Todas estos procesos previamente mencionados comparten materias primas que contengan azúcares y las materias más comunes son la caña de azúcar y el maíz.

Esta fuente de energía renovable, como todo recurso energético, tiene su lado positivo y su lado negativo. En cuanto las ventajas más características que conciernen a este combustible en cuanto al proceso de obtención de bioetanol se refieren:

- Reduce dependencia de los combustibles fósiles.
- Es una fuente limpia, promulgada por su escasez de gases invernaderos, hasta un 80% que los combustibles fósiles.
- Sin duda, una de sus mayores ventajas sea la fácil producción y almacenamiento de éste combustible.
- Su elaboración no es complicada, por lo que cualquier país puede desarrollarlo.
- Es un anticongelante para los motores, mejorando el arranque del motor en frío y previniendo el congelamiento del motor.
- Existen numerosas formas de su obtención.

3.3.2 Producción del bioetanol en España

El interés en el uso de bioetanol ha aumentado desde la década de 1980 y ha sido considerado como un combustible alternativo en muchos países. La producción global de éste recurso aumentó a 49,15 miles de millones de litros en 2007, a 85 miles de millones en 2013 hasta 105 miles millones en la actualidad (Figura 3-7). Ahora mismo, Estados Unidos es el mayor productor de bioetanol en el mundo, seguido por una potencia mundial en este sector como es Brasil. Ambos países producen el 90% de bioetanol mundial disminuyendo la dependencia de los recursos energéticos derivados de los combustibles fósiles.

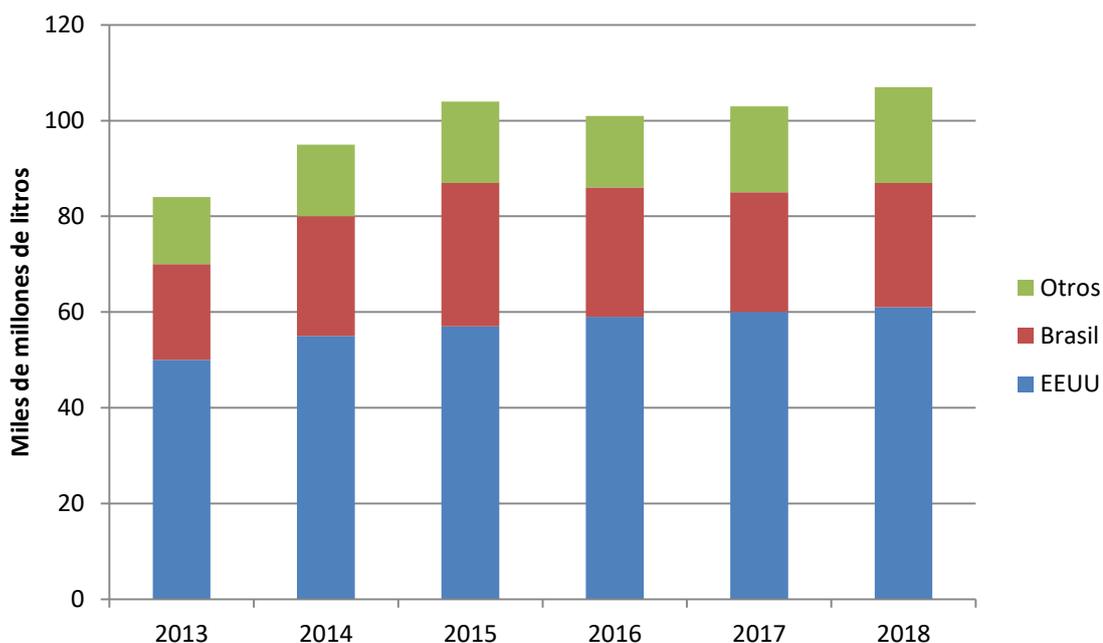


Figura 3-7 Producción de bioetanol en EEUU, Brasil y resto del mundo.

Durante un tiempo, la UE ha promovido el uso de biocombustibles teniendo en cuenta sus beneficios potenciales, como la reducción de la dependencia de las importaciones de energía de fuera, los precios más económicos de los combustibles fósiles, la reducción del GEI, y la fuente adicional de ingresos para el sector primario.

Los biocombustibles no están a la altura de competir con los combustibles fósiles en la actualidad, pero es posible que en el futuro se le dé una vuelta a la tuerca causada por la preocupación actual sobre la contaminación ambiental y los biocombustibles puedan llegar a ser competitivos.

Planta	Emplazamiento	Materias primas y capacidad de procesado	Productos y capacidad de producción	Puesta en marcha
Ecocarburantes Españoles	Cartagena (Murcia)	Grano: 300.000 toneladas métricas	Bioetanol: 100 MI. DDG: 110.000 tons	2000
Bioetanol Galicia	Texeiro (La Coruña)	Grano: 340.000 toneladas métricas	Bioetanol: 140 MI. DDG: 130.000 tons	2002
Biocarburantes Castilla y León	Babilafuente (Salamanca)	Grano: 585.000 toneladas métricas	Bioetanol: 205 MI. DDG: 120.000 tons.	2006
Bioetanol de la Mancha	Alcazar de San Juan (Ciudad Real)	Alcohol de vino. Residuos vitivinícolas	Bioetanol: 45 MI	2006

Tabla 3-2 Plantas de producción de bioetanol en España [30].

En la Tabla 3-2 se encuentran las empresas de producción de bioetanol en España según sus materias primas y capacidad de procesado. Estos datos hacen una idea de la gran capacidad de

procesado que puede tener una empresa dedicado a la producción de bioetanol y la apuesta de España por este tipo de biocombustible como alternativa del futuro.

El bioetanol en España está limitada a planta de alcohol de vino y transformación de residuos por las empresas Acciona y Abengoa. La planta de residuos, “Waste to Biofuels” fue inicialmente ideada para tratar paja de cebada y trigo pero en 2013 cambió sus tecnología.

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018e
Producción (1.000 m3)	470	464	381	442	455	494	328	280	346
Capacidad de producción(1.000 m3)	588	588	588	588	588	494	494	494	494
Capacidad de Uso	80	79	65	75	77	100	66	57	71

Figura 3-8 Producción, capacidad de producción y capacidad de uso de bioetanol en España.

En la Figura 3-8 muestra la evolución de la producción y capacidad en los últimos años según la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC). Como consecuencia de un futuro incierto de Abengoa de vender sus unidades de negocio en 2016, se ve una clara decadencia de la producción de bioetanol. Según unas estadísticas [31] de la CNMC, actualmente una gran parte del bioetanol es exportado a la UE y EEUU.

3.3.3 Dilema AIP en el S-80, ¿Etanol o Metanol?

En el ámbito de la Defensa, este sistema innovador basado en el reformado de bioetanol proveniente de la biomasa, viabiliza un sistema de propulsión independiente del exterior infalible ya que el hidrógeno se obtiene a bordo sin tener que estar almacenado a bordo del submarino. El H₂ es un elemento inestable y muy inflamable, por lo que hay que evitar su almacenamiento a bordo siendo necesaria la adquisición de un remedio idóneo a la situación. Es necesario el suministro ininterrumpido de H₂ en la pila de combustible a la hora de generar electricidad, y que mejor forma de utilizar un tipo de energía puntera y en pleno auge como es el caso de los biocombustibles.

Los biocombustibles son una alternativa sostenible para prevenir la dependencia de los combustibles fósiles que sufrimos en la actualidad. El nuevo submarino S-80 debe estar a la vanguardia de los sistemas AIP, y el uso de biocombustible como recurso energético es una apuesta concorde a las expectativas. Los biocombustibles son un mercado emergente y una apuesta segura dentro de las energías renovables. Brasil y el interés de España por esta innovadora energía es un claro ejemplo de ello, pero también hay muchas naciones que están apostando por ello. Sin embargo la faceta nueva del sistema AIP en el S-80, no es el bioetanol como combustible sino el hidrógeno obtenido a partir de él. La obtención de hidrógeno a partir de biocombustible se conoce como producción de hidrógeno por medio de biomasa y se puede atender en las actuales centrales de biomasa.

En un principio se plantearon diversos criterios, conjugando el rendimiento y la seguridad que éste combustible otorga al submarino son:

- Seguridad en el almacenamiento.
- Energía y densidad en la producción del hidrógeno.
- Volumen necesario para llevar en práctica estos sistemas.
- Disponibilidad.

Los combustibles que un principio se tuvieron en consideración por su proximidad a los requisitos

previamente mencionados son: diesel, metanol, etanol y gasolina.

El diesel y gasolina, obtenidos a través de combustibles fósiles, suponen un inconveniente a largo plazo para cualquier escenario. Por otro lado, el uso de biocombustibles (etanol, metanol) como fuente propulsora sustituye la dependencia actual de los combustibles fósiles y abre paso a las fuentes de energía renovables. Estas fuentes de energía limpia, ilimitada y en pleno auge se adaptan concordes al proyecto S-80 por su dependencia del oxígeno exterior, su facilidad de transporte, manejo y almacenamiento en los depósitos del submarino y su elevada capacidad de producir energía.

El metanol y el etanol son dos alcoholes (Figura 3-9) de características físicas muy similares, que a temperatura y presión ambiente se mantienen en estado líquido, a lo que respecta de sus características de inflamabilidad. Las temperaturas de ignición del metanol y etanol están asentadas en un rango de 464°C y 422°C [32] respectivamente, siendo ligeramente mayor la del metanol.

Ambos biocombustibles son aceptados como combustibles altamente peligrosos si no se toman medidas de mitigación de riesgos oportunas, ya sean preventivos como correctivos. Estas sustancias pueden considerarse químicamente estables aunque son capaces de reaccionar de forma violenta si entran en contacto con agentes oxidantes, frecuentemente el oxígeno. El etanol habitualmente reacciona con los oxidantes fuertes mientras el metanol reacciona con todos los oxidantes.

En lo que concierne al talante frente a materiales de construcción naval el uso de aceros inoxidable austeníticos frente al de aceros al carbono es más adecuado para el metanol si se quiere evitar la corrosión, en el tiempo que el comportamiento del etanol es insignificante. En el caso del S-80 los tanques estructurales son de acero al carbón, por lo que será necesario recurrir a medidas adicionales.

En consecuencia, con el metanol hay que tomar medidas de diseño y construcción adicionales, con su coste asociado, que no son necesarias con el etanol.



Figura 3-9 Etanol y metanol [33].

En cuanto a la contaminación del medio ambiente se refiere, el metanol es más contaminante que el etanol, aunque es una sustancia química cuyas propiedades no se consideran dañinas para el medio ambiente. Esto se debe a la rápida degradación en el éter. Eso sí, se deben evitar los derrames accidentales de metanol en el océano, aunque se considere que presentan menor riesgo para el medio ambiente que las de otros materiales como petróleo crudo, combustible para calderas, gasolina o diesel. El derrame de metanol en la mar es diluido con rapidez hasta concentraciones no tóxicas para la biocenosis marina [32].

Con relación a la toxicidad, el etanol carece de toxicidad, rechazado su consideración como agente tóxico. A diferencia que éste, el metanol presenta unas características muy distintas, categorizándose como agente tóxico capaz de causar efectos graves (dolor de cabeza, alteración del sistema nervioso, infección, visión borrosa o polineuritis) e incluso la muerte, llegando a ser necesario la asistencia médica.

A partir de las 1000 ppm de metanol empezarán los trastornos graves, y a partir de las 30000 ppm el riesgo de muerte será muy elevado ante una sola hora de exposición. En consecuencia, teniendo en cuenta que el límite de exposición del etanol es de 1000 ppm en comparación con las 200 ppm del metanol, que siempre será mayor la cantidad derramada de metanol por su mayor presión de trabajo y que los residuos de la combustión incompleta del metanol son altamente tóxicos, por lo tanto, las reacciones en caso de emergencia tendrán que ser más radicales, urgentes y exigentes con el reformado de metanol.

Hay que hacer referencia a su uso en un submarino que es un espacio cerrado sin posibilidad de evacuación con un sistema AIP ubicado a popa de las cámaras de máquinas, que exige unas medidas oportunas de aislamiento y acondicionamiento con el entorno. En éste aspecto el etanol tiene ventaja sobre metanol ya que es un campo más investigado en el mundo.

Es por ello, unos requisitos de seguridad necesarios para garantizar en cada caso (metanol y etanol) su empleo a bordo en función de la situación operativa y un apoyo logístico seguro durante todo el ciclo de vida del submarino.

Entre las posibles medidas para mitigar los riesgos, tanto preventivas como correctivas, en función de la situación operativa del submarino, cabría destacar; los medios de detección, sistema de reacción inmediata, sistema de ventilación de compartimentos afectados, estanqueidad especializada, protección de depósito para prevenir posible derrame ante cualquier situación (colisión, explosión o varada), medios de protección del personal y una formación específica ante cualquier situación de emergencia que involucre metanol de por medio [34].

Centrándonos en los medios de protección personal necesarios únicamente en caso del empleo de metanol en el sistema AIP, implica el uso de ropa aislante, gafas de protección, guantes de goma y protección respiratoria con su filtro adecuado para evitar la toxicidad por inhalación, por ingestión o el contacto con la piel. Además, son necesarios algunos instrumentos para la eliminación del metanol derramado.

De acuerdo con la Especificación Técnica de las empresas AIP han presentado informes HAZOP [35](en castellano AFO), una metodología cuyo derrotero es detectar posibles situaciones de inseguridad debida a los procesos productivos, para analizar los posibles sucesos iniciadores y las medidas a tomar ante un posible derrame, prestando una mayor atención en el metanol.

Por último, el uso del metanol o el etanol a bordo de submarinos puede ser permisible según de las características físicas y químicas de ambas sustancias. Eso sí, es primordial establecer requisitos de seguridad, en el caso del metanol más exigentes, que garantizan su uso eficiente sin distinción alguna en las situaciones operativas o logísticas durante todo el ciclo de vida del submarino.

No obstante, analizando la corrosividad, la toxicidad, las medidas de protección a tomar, es otras palabras la seguridad del submarino en su totalidad o el futuro potencial de España en cuanto a producción de bioetanol se refiere son los principales motivos de una decisión por parte del Ministerio de Defensa del empleo del etanol y no la exigente imposición del metanol.

3.3.4 Obtención de energía a partir de bioetanol

El objetivo principal de este asunto es la obtención de energía a través de las pilas de combustible, siendo el bioetanol el factor de ignición. Como se ha mencionado a priori, el bioetanol es una fuente de energía renovable, obtenido por la fermentación de azúcares, cereales o biomasa, y no tiene impurezas perjudiciales para el reformador y las células, como el azufre. Para la obtención de energía debemos tener en cuenta dos fases: la primera de obtención del hidrógeno por aportación de bioetanol y agua/oxígeno sobre un catalizador; y segunda, con el hidrógeno obtenido y oxígeno aportado, se obtendría la energía necesaria para las baterías. Como subproductos se obtienen CO₂ de la reacción del reformado y agua de la pila de combustible. El procedimiento en sí para la obtención de hidrógeno se

explicará en detalle más adelante.

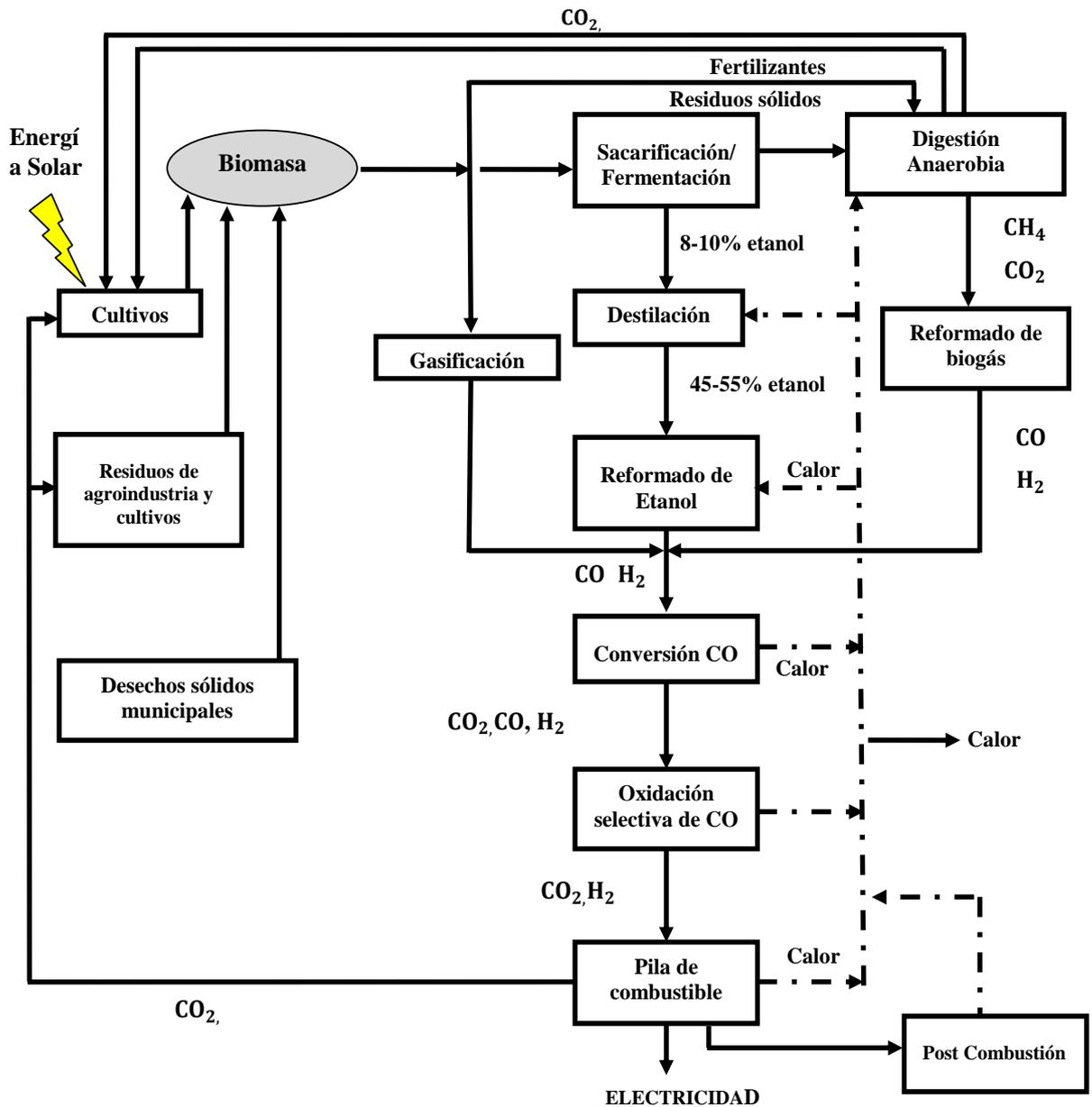


Figura 3-10 Obtención de energía mediante bioetanol.

En la Figura 3-10 se explica el proceso de obtención de energía desde su estado original como biomasa, pasando por los diferentes procesos para generar bioetanol hasta la manipulación del H₂ para adquirir una elevada pureza y ser fruto de obtención de energía a través de una pila de combustible.

En los submarinos S-80, el hidrógeno del Sistema AIP se obtiene del reformado de etanol. Este reformado consiste en combinar bioetanol (CH₃CH₂OH) con vapor de agua, en condiciones adecuadas para la reacción, y con un catalizador que craquea las moléculas en hidrógeno y dióxido de carbono además de otros subproductos de menos importancia.

El Sistema Procesador de Bioetanol, equipo que dedicado al cumplimiento de este reformado (SPB), produce un flujo de hidrógeno mediante el proceso del reformado de bioetanol con vapor de agua y así posteriormente poder abastecer la pila de combustible del submarino. Esta pila suministrará energía a los equipos del buque pero su función principal es la de proporcionar corriente al motor

eléctrico que se encarga del movimiento de la hélice. La energía que genera las pilas puede ser almacenada en las baterías de la plataforma para su posterior uso.

Dicha reacción de reformado se puede representar de la siguiente manera:



La existencia de múltiples reactores catalíticos permite que la corriente antes de llegar a la pila de combustible alcance la pureza necesaria requerida por el proceso. Se conoce como etapa de purificación y se encargan principalmente de eliminar la abundancia de monóxido de carbono que no acepta la pila de combustible.

Otro tema a tratar fue el descartar totalmente bioetanol que contuviese desnaturalizante, es decir, impurezas del bioetanol. Navantia redactó un informe sobre la posibilidad del uso de desnaturalizantes en el etanol para el sistema AIP. Este informe sacó a la luz la conclusión de que tras el paso del bioetanol en SPB se obtiene una mezcla gaseosa rica de hidrógeno y dióxido de carbono que será disuelto en el agua sin dificultad alguna.

Podemos destacar el buen rendimiento, el rendimiento teórico de las pilas de combustible tras la obtención del hidrógeno es del 95% aunque en la práctica disminuye al 70%. Además tiene un bajo impacto ambiental, ya que no existe proceso de combustión y no se forman nitrógeno ni azufre, aunque si se forma dióxido de carbono en una proporción mucho menor que en una combustión. Su firma acústica y térmica es reducida y su tecnología se encuentra en continua evolución, con prometedoras perspectivas. Como inconvenientes podemos señalar que el almacenamiento y distribución de hidrógeno supone un riesgo para la seguridad del personal y del propio submarino, sobre todo las zonas en las que pasa el hidrógeno puro.

3.3.5 ¿Es sostenible el bioetanol?

Los múltiples impactos de la bioenergía despiertan una cierta preocupación. La mejor forma de afrontar a este problema es revisar cuidadosamente la evidencia de la preocupación de biomasa y su uso energético y presentarla desde una perspectiva energética, agrícola, medioambiental y económica.

Para saber si un recurso energético, se debe examinar una serie de condiciones acorde a tres factores básicos como son; La disponibilidad y costo del recurso a estudiar con el fin de hacer frente a la demanda, el equilibrio en el acceso de este recurso para el uso humano, y por último el impacto ambiental provocado por el recurso ya sea por los medios empleados para su obtención o en el momento de su utilización.

La primera preocupación a considerar con mayor detalle es la creciente demanda de estos biocombustible en los precios de los elementos, que se podrían ver perjudicados sobre las personas de escaso poder adquisitivo y los países menos desarrollados que dependen del mercado internacional. Esta situación o dilema, se conoce como “alimentos para combustibles” puesto que los principales cultivos irían destinados a la producción de biocombustible como fuente de energía. Los efectos de este dilema son difíciles de determinar ya que existen numerosos factores que entran en juego. La producción de maíz destinado a la producción de bioetanol y otros biocombustibles alcanzó un 7% a nivel mundial en 2006, la caña de azúcar un 17% o el aceite de palma a un 3%. Es por ello, que el número de materias primas para estos biocombustibles ha crecido sustancialmente desde finales del siglo XX. Evidentemente, esto ha contribuido al alza de los precios del mercado nacional de algunos países como es el caso de EEUU con el maíz y también a nivel internacional. A pesar de estas incertidumbres, el ser humano siempre ha tomado acciones al respecto y es por ello que se estima en el futuro una reducción de precios de los alimentos para 2050 en adelante. Se espera que las mejores en el rendimiento sean mayores y un incremento en la producción de cultivos energéticos. La preocupación por la destrucción de los bosques tropicales ha supuesto una preocupación aunque la producción agrícola de biomasa es sólo una parte de toda la biomasa destinada a la producción de bioetanol u otros

biocombustibles. Pero aun así hay que evitar esta deforestación innecesaria y es por ello que el desafío de este escenario sea facilitar una demanda de suelo adicional para los cultivos bioenergéticos.

Es un recurso de carácter renovable que en la actualidad se nos presenta de manera abundante pero, no debe ser esto un motivo de uso único para la producción de energía. Existen diferentes maneras que pueden complementarse con esta materia prima como es el caso de los residuos orgánicos, un biocombustible de segunda generación que se presenta como un recurso potencial. No solo porque genera biocombustible como fuente de energía, sino que se disminuye el impacto de basura en el medio ambiente y disminuye la dependencia de los combustibles fósiles. Es decir, es una alternativa beneficiosa en todos los aspectos por lo que se podría denominar como un recurso sostenible.

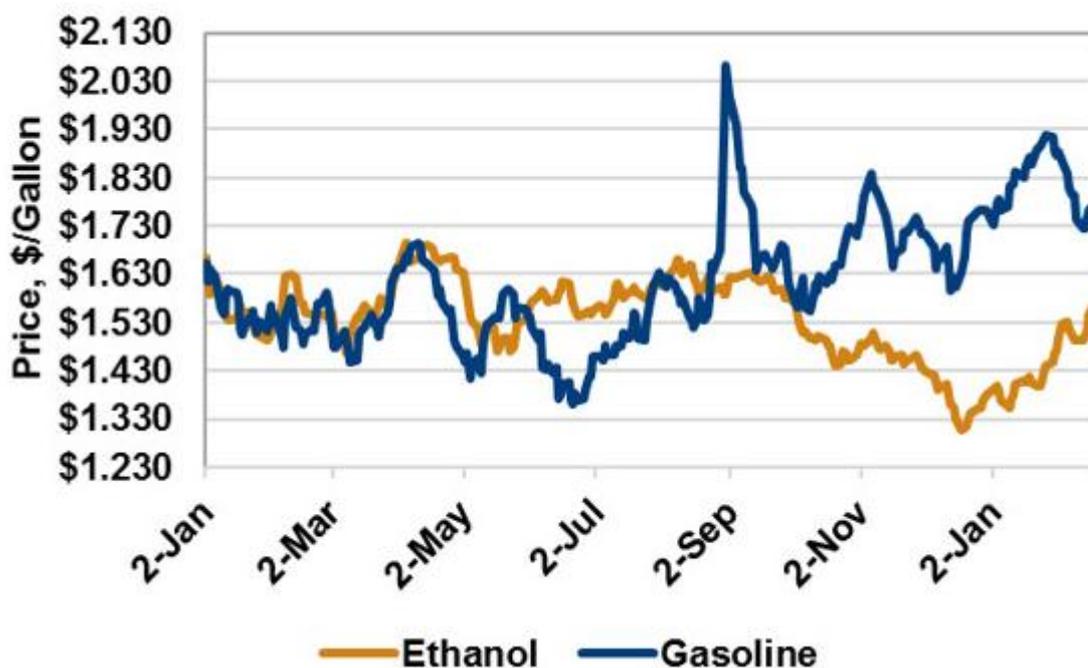


Figura 3-11 Precio del bioetanol y gasolina en EEUU [36].

En la Figura 3-11 se puede observar una comparativa de precios actualmente en EEUU entre la gasolina y bioetanol como fuente energética. A pesar de que el etanol obtenido a través de la biomasa sea más económico en estos momentos, no quiere decir que sea más rentable. Principalmente por su eficiencia energética aunque se podría resumir en un escenario muy importante en la actualidad, que es el del transporte. Es cierto que el etanol en solitario o mezclado con gasolina tiene menor poder energético que la gasolina, de forma que para recorrer la misma distancia, se necesita una mayor cantidad de bioetanol. En el caso de los biocombustibles para el transporte, se ha de tener en cuenta la energía necesaria para convertir la biomasa en combustible. Para cada tipo de biomasa utilizado para la producción de bioetanol se tiene que tener en cuenta el balance energético neto.

En cuanto al impacto medioambiental se refiere, el bioetanol es un recurso amigable para el efecto invernadero. No obstante, aunque se diga que el bioetanol o los biocombustibles sean un combustible verde, su impacto ambiental general controversias en diferentes sectores sociales. El bioetanol para ser producido implica consumo de energía, no quiere decir que estés libre de emisiones sino que son más reducidas. Es necesario estudiar la cantidad necesaria para su generación en comparación de la energía que genera durante su uso. Si esta diferencia es una cantidad rentable entonces se puede considerar como un combustible beneficioso para el medio ambiente. Eso sí, no hay que olvidar el impacto forestal de este biocombustible y el efecto que tiene sobre el precio de alimentos. En líneas generales

podemos decir que el bioetanol presenta una serie de ventajas que lo convierten en un recurso energético atractivo, y por lo tanto sostenible:

- Menor impacto ambiental que los combustibles fósiles.
- Es un producto renovable, por lo que no existen preocupación de su futuro agotamiento.
- Se quema de manera limpia, menos CO₂ y menos hollín.
- Se compone de una tecnología sencilla, por lo que es accesible a todos los países del mundo.
- Se puede utilizar en todo el sector automovilístico.
- Mejor el arranque del motor cuando está en frío ya que sirve como anticongelante.
- Existen numerosas formas de su obtención, en especial por residuos orgánicos.
- Está a día de hoy en desarrollo, por lo que se esperan grandes expectativas en el futuro.

En definitiva, el bioetanol origina a una fuerte polémica: para algunos se perfila como un recurso energético potencialmente sostenible a nivel medioambientales y económico a largo plazo en rechazo a los combustibles fósiles, mientras que otros manifiestan ser el responsable de las grandes deforestaciones y el aumento del precio de algunos alimentos, al suplantar terrenos agrícolas y selvas para su posterior producción, cuestionando su rentabilidad energética.

4 ANÁLISIS Y CARACTERÍSTICAS AIP DEL S-80

4.1 Evolución del programa y futuro del S-80

Tras la construcción de las dos series anteriores de submarinos asociados con la empresa francesa DNCS, los submarinos S-60 (Delfín) y S-70 (Galerna), la Armada Española consideró que era oportuna una modernización del Arma Submarina de más de un siglo de reputación y éxito para España. Para ello, la capacidad de ser autosuficientes es un requisito fundamental y es por ello que se recurre a la colaboración (como se ha llevado a cabo durante muchos años) de Navantia.

Colaboración que en el caso del S-80 es totalmente diferente respecto a anteriores ocasiones, como fue el caso de los submarinos de la clase 60 y 70, en donde se partió de un diseño extranjero, concretamente de la DCNS (ahora NAVAL GROUP). Para el S-80 tanto el diseño como la construcción es llevado a término por nuestros astilleros en colaboración con la Armada. Es, por tanto, sin duda, un reto sin precedentes en el ámbito de la construcción naval militar. No hay más que pensar que solo ocho naciones en el mundo son capaces de diseñar un submarino y entre estas, España.

Una vez que estos submarinos S-80 entren en servicio en flota submarina española, será sin duda la más moderna hasta la fecha que ha tenido nuestra Armada, situándonos a la vanguardia del resto de países en la primera mitad del siglo XXI.

El proyecto S-80 tiene tres épocas diferenciadas (Figura 4-1). Entre 1982 y 1991 se realizaron una serie de estudios para la determinación del buque necesario. Entre 1997 y 2003, el periodo crítico del proyecto [37], se llevaron estudios dirigidos a definir el programa. En éste periodo se divide en una fase conceptual, una definición de proyecto (I+D), estudios adicionales y una revisión de proyecto. Finalmente, la tercera generación de 2004 hasta 2016 comprende el diseño funcional la construcción de los cuatro primeros buques de la serie S-80, en donde hay que mencionar que en el año 2012 debido a un desbalance en el desplazamiento que fue corregido añadiendo 16 anillos al submarino que incrementaron su eslora de 67 metros a los 80 metros del actual diseño [9].

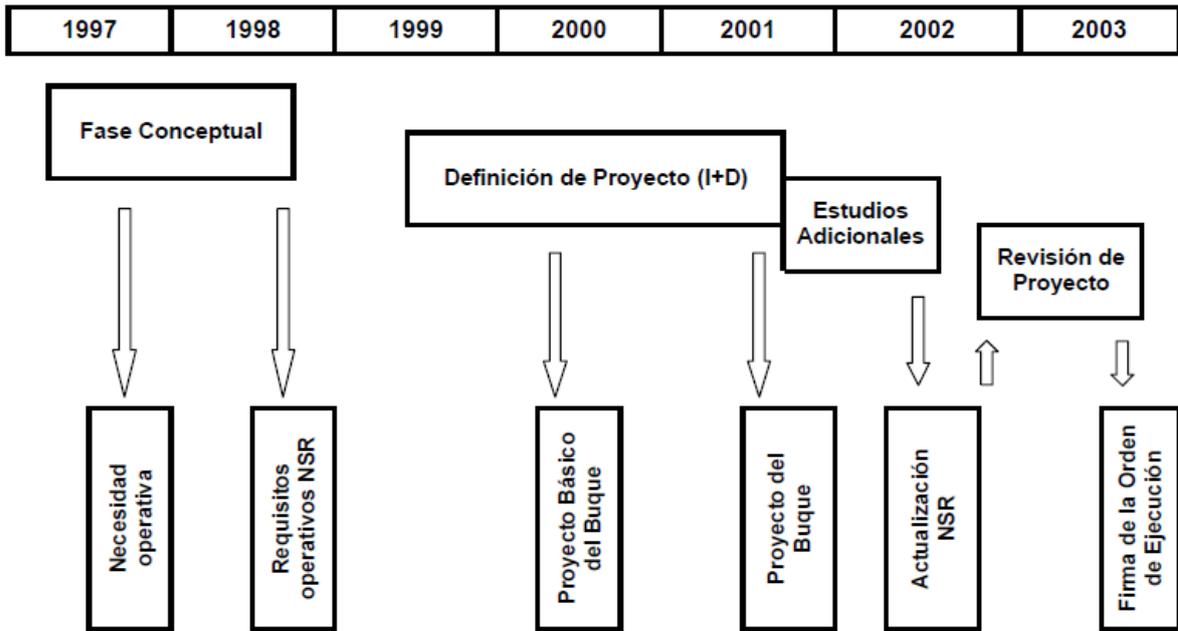


Figura 4-1 Desarrollo del programa S-80.

Hoy, el programa de construcción de los submarinos S-80 continúa avanzando a buen ritmo dentro de su Fase de Producción, fase que se inició en noviembre de 2017 una vez concluida la anterior Fase de Diseño. Cabe citar que, dentro de este ritmo de trabajo, en el mes septiembre del pasado año 2018 se procedió a la unión de las secciones 1 y 2 de las cinco que tiene el submarino- estando prevista la unión con la sección 3 en abril de este año 2019.

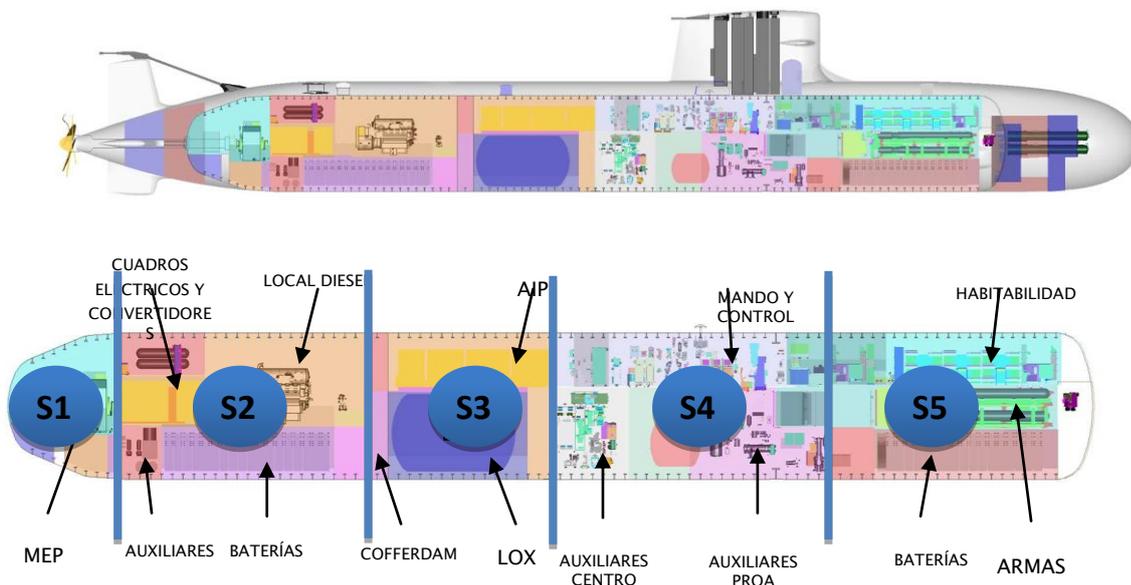


Figura 4-2 Vista por secciones del S-80.

En la Figura 4-2 representa una división de las cinco secciones o módulos que componen el submarino S-80 y en el cual nos centraremos en una de ellas en concreto, la sección tres o sección AIP [37].

Otro buen indicador del actual ritmo de trabajo es que en el mes de noviembre también del año pasado se realizó la instalación del eje en el S-81 “Isaac Peral” y se embarcó el Módulo de los Motores Diesel Alternadores, que a diferencia de los submarinos clase “Galerna”, está formado por tres

unidades en lugar de dos. Dicho todo lo anterior y se mantiene el actual ratio de construcción, las fechas de Entrega a la Armada de los submarinos S-80 serán [38]:

- S-81 “Isaac Peral” en septiembre de 2022
- S-82 “Narciso Monturiol” en junio de 2024
- S-83 “Cosme García” en abril 2026
- S-84 “Mateo García de los Reyes” en agosto de 2027

Abordado ya la situación actual del programa S-80, pasemos a ver cuál es el comienzo y el estado actual del programa I+D relativo al AIP.

Todo comienza cuando en el año 2003, se decidió delegar el desarrollo de la tecnología AIP en la empresa multinacional española Abengoa. Esta empresa nacional, que es especialista en los sectores de la energía y el medioambiente desarrolló un prototipo para comprobar la viabilidad del sistema para su posterior desarrollo completo e instalación a bordo. Después del éxito del prototipo Abengoa comienza con la construcción de un sistema a escala 1:1 que permita al submarino durante que 15 días y sumergido una velocidad de 4 nudos sin necesidad de realizar snorkel, cuya potencia fuese 300Kw [39].

En un principio, Abengoa marcha a un ritmo adecuado en su desarrollo, pero se encuentra con problemas a la hora de navalizar la pila de combustible según el contrato de la Armada. Es por lo anterior, por lo que se decide ampliar el repertorio de empresas que participen en este programa I+D del AIP, siendo los nuevos candidatos Técnicas Reunidas y Sener. Con esto se persigue que con tres empresas “compitiendo” los riesgos tecnológicos de no consecución sean menores. De estas tres empresas compitiendo, Sener ya no está en el proyecto debido a que se descartó en otros motivos por emplear como reformado metanol y no etanol, en donde el metanol es altamente tóxico.

Así pues, a día de hoy, son pues dos las empresas que compiten para lograr el AIP, Abengoa y Técnicas Reunidas. La forma de abordar la consecución del AIP por parte de estas dos empresas es completamente diferente, veamos como son.

Por un lado, Abengoa está trabajando directamente en escala 1:1 para que una vez logrado que el sistema funcione en lazo abierto, se procederá a hacerlo en lazo cerrado y posteriormente su instalación a bordo. Lazo abierto significa que ha testeado cada elemento de la planta AIP, uno por uno, dando a cada elemento la alimentación que requiere, pero sin probar toda la planta como un conjunto interconectado que es lo que se conoce como lazo cerrado.

Por otro lado, Técnicas Reunidas emplea una metodología diferente que consiste en diseñar y construir el AIP en escala 1:12 para posteriormente escalar a 1:1 y proceder a su instalación a bordo. Pero ¿Cuál es la situación es el estado de avance el diseño del AIP en cada una de estas empresas?

Técnicas Reunidas (TR) ha logrado en lazo cerrado que el sistema funcione es escala 1:12 dando una potencia de 25kW y durante más de 300 horas (similar al tiempo que se emplearía el sistema en una patrulla). Ahora a día de hoy, su diseño AIP se encuentra ya en el proceso de ir a escala 1:1 [40].

Abengoa ha obtenido 300kW durante 50 horas en escala 1:1 pero en lazo abierto y está buscando el que el sistema esté en lazo cerrado. Cabe ahora preguntarnos, ¿Qué empresas de estas dos será adjudicataria del proyecto?, en donde para su respuesta habrá que esperar a diciembre de este año 2019 en donde se optará por una de ellas.

Finalmente, indicar que como se ha indicado anteriormente, las características iniciales del submarino S-80 se han visto modificadas a lo largo del proyecto, provocados por problemas en el diseño inicial. Al solventarse estos problemas, las características del actualizado submarino son las descritas en la Tabla 4-1:

Eslora	81 m
Manga	7,3 m
Desplazamiento	2960 tons (inmersión)
Autonomía	50 días (15 días con AIP)
Dotación	32+8 (SOPS)
Motor eléctricos principal	3500kW
Diesel Generadores	1200kW x 3
Sistema AIP	Células PEM de 300kW y reformador bioetanol
Baterías	2 cajones de baterías (180 elementos)

Tabla 4-1 Características S-80. [41] [39]

4.2 Funcionamiento sistema AIP del S-80

Como se ha indicado el futuro submarino S-80 tendrá un sistema de propulsión basado en la combinación del sistema tradicional de Grupos Diesel Generadores que producirán energía eléctrica que irá a las baterías y un sistema anaeróbico, o lo que es lo mismo, un sistema de propulsión independiente del aire con hidrógeno, proveniente del reformado de bioetanol, como combustible. El sistema AIP, considerado “la joya del submarino” se compone de una serie de elementos que lo hacen ser únicos en su especie [42].

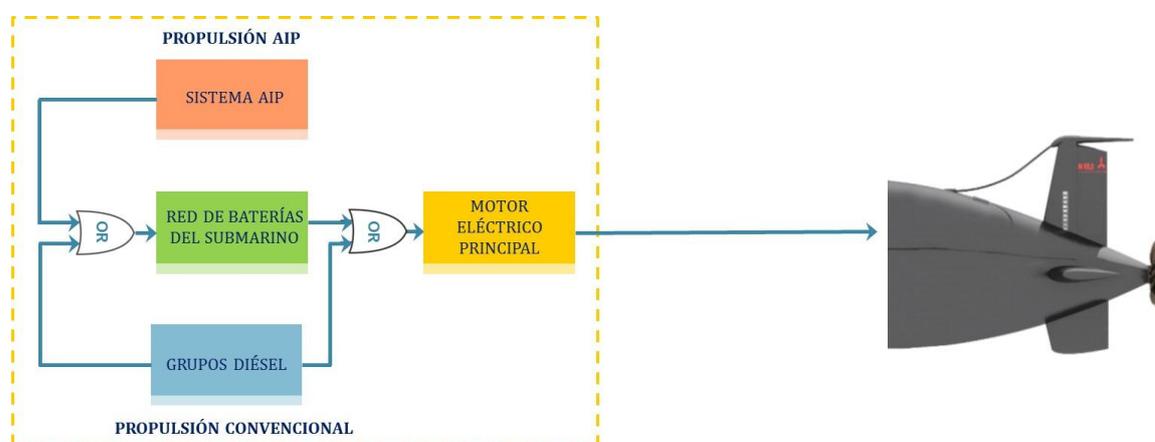


Figura 4-3 Funcionamiento sistema AIP del S-80.

Esta sección AIP se compone de un recipiente LOX, tanques de bioetanol, un reformador, un sistema de expulsión para los gases, dos grupos de pilas PEMFC además de algunos equipos auxiliares que hacen posible su uso y todo ello a lo largo de 8m de eslora [40].

El primer paso en el AIP, y quizá el más complejo, es el obtener hidrógeno del bioetanol, es decir “crackear” la biomasa en hidrógeno apto para alimentar la pila de combustible. Para ello cuenta con una cámara de combustión, donde se proporciona el calor necesario para el desarrollo de la reacción endotérmica inicial, y dos módulos: el reformador, que es donde tiene lugar la transformación del bioetanol en hidrógeno y el sistema de purificación de gases residuales. En este reformador (reformador de vapor) se basa en el principio de que el contenido en hidrógeno del combustible

(bioetanol) se descompone ante la presencia del vapor en los catalizadores del reformador para producir la mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono. Por otra parte, el hidrógeno presente en el vapor de agua será desprendido durante la reacción, con lo que también contribuirá a la producción total de hidrógeno. Este primer paso explicado es un proceso endotérmico, con lo que una gran parte de la energía puede ser recuperada e introducida de nuevo en el proceso, mejorando la eficacia térmica del reformador [40].

Un segundo paso será la eliminación del monóxido de carbono, ya que de lo contrario envenenaría a los diversos catalizadores del sistema AIP y a las membranas poliméricas de las células de combustibles. Esta eliminación se logra mediante un sistema conocido como purificación mediante la reacción de “Desplazamiento con Vapor de Agua” (Water Gas Shift). Este sistema se trata ahora de una reacción exotérmica para que haya una disminución de la etapa a alta temperatura (350°C) a la de baja temperatura (200°C). De esta manera se consigue por (1) disminución de la temperatura (2) disminución de la concentración de monóxido de carbono (3) aumento de la cantidad de hidrógeno.

El tercer paso es la producción de la energía eléctrica en la célula de combustible. Aunque ya ha sido explicado en detalle en el anterior capítulo, tan solo recordar que las células de combustible son dispositivos electroquímicos de conversión directa de la energía química de un combustible en energía eléctrica y calor, en decir, un proceso inverso a la electrólisis del agua. Es proceso en el que su combustible es hidrógeno y el oxidante oxígeno, obteniéndose como únicos productos de la reacción: agua, energía eléctrica y calor.

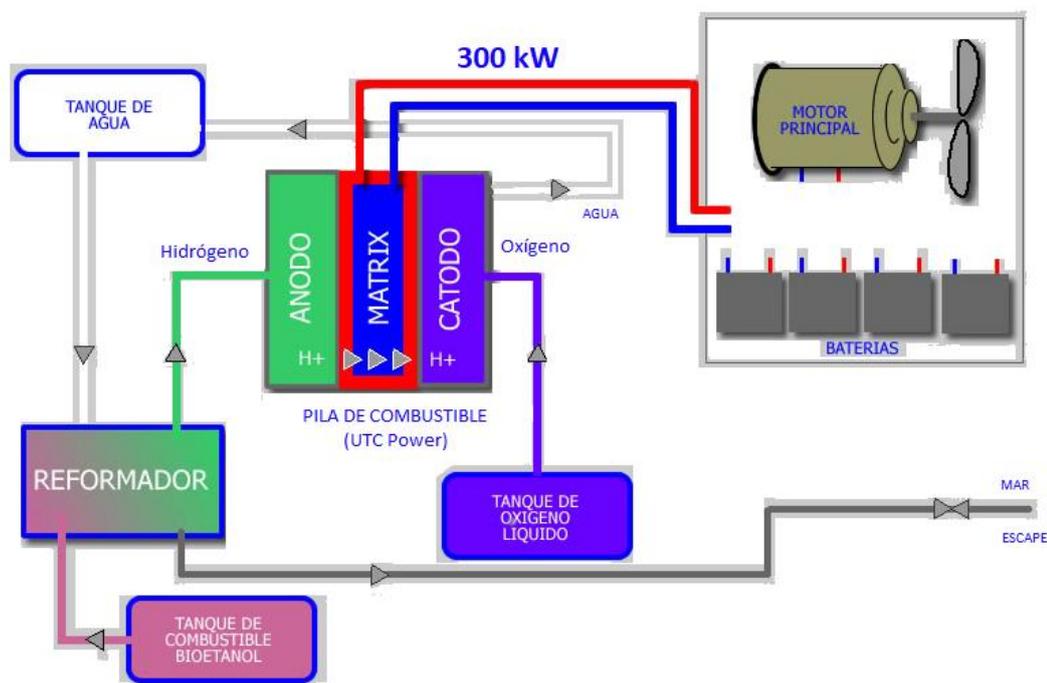


Figura 4-4 Sistema AIP del S-80 [14].

En la Figura 4-4 representa una visión general de los principales componentes del sistema AIP en los cuales se obtiene el H_2 y O_2 y su recorrido para combinarse en la pila de combustible y formar electricidad. Esta potencia eléctrica en forma de corriente continua alimenta al sistema de propulsión eléctrico de 3.500kW o se utiliza para recargar los dos locales de baterías de litio compuestos de 180 elementos cada uno. Estas pilas de combustibles desarrolladas por la empresa estadounidense UTC generan 300kW de energía eléctrica de forma continua y desechan H_2O que junto a los subproductos de CO_2 son expulsados del submarino [14].

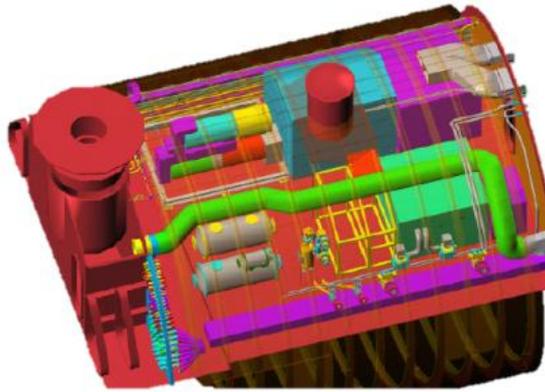


Figura 4-5 Vista 3D instalación AIP en el S-80 [43].

Finalmente, en la Figura 4-5 se aprecia una vista 3D de las instalaciones AIP situadas en la sección del submarino S-80.

5 PERSPECTIVA Y VISIÓN DE FUTURO DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE

5.1 Importancia del sistema AIP

El sistema AIP integrado en los S-80 no es solamente un proyecto del sistema propulsivo de los futuros submarinos “clase Peral” para la Armada Española. Va más allá que una mera construcción naval llevada a cabo por empresas españolas del sector naval. Este sistema, es el principio de una tecnología a nivel nacional y que en un futuro puede llegar a ser mundial. Es la combinación de un sistema capaz de operar sin la necesidad de oxígeno, uso de bioetanol combustible y pila de combustible como fuente de energía para alimentar a las baterías o directamente el motor eléctrico para el funcionamiento del sistema en cuestión. Este sistema puede variar, pero la esencia es siempre la misma y las ventajas que traen consigo lo convierten en una tecnología idónea para la ocasión. Si se explora fuera del mundo de los submarinos para centrarse en los automóviles, que utilizamos prácticamente todos los días, se puede analizar una analogía del sistema AIP en este sector en particular. El funcionamiento del llamado “coche de hidrógeno”, al igual que el sistema AIP, utiliza una pila de combustible como generador de energía. Para llegar a esta energía, se tiene que [44]:

1. El hidrógeno almacenado en unos tanques proviene de las estaciones de hidrógeno o hidrogeneras usualmente localizados en las orillas de las carreteras. Estas hidrogeneras obtienen el hidrógeno de diferentes maneras, pero es aquí donde el sistema AIP propone obtener el hidrógeno mediante el los procesos de obtención de energía a través del bioetanol mencionado en el apartado 3.3.4.
2. Se inyecta aire a las celdas de combustible que constituyen la pila para que se dé lugar la reacción química. En analogía al sistema AIP, este oxígeno podría almacenarse en un tanque de oxígeno para obtener una reacción más eficiente debido a la pureza del compuesto y no el uso del aire que tiene un 20,94% de O_2 en su totalidad. Sin embargo, esta opción no es la más idónea ya que el aire es una fuente inagotable.
3. En semejanza al sistema AIP, la reacción del oxígeno y el hidrógeno almacenado da lugar a electricidad y agua que posteriormente será desechada en este caso por el sistema de escape.
4. Esta electricidad producida por la célula de combustible alimentará a las baterías, la cual al mismo tiempo se encarga abastecer al motor eléctrico.
5. Como se puede ver, el coche de hidrógeno se compone de un reparto similar por no decir

igual que el sistema AIP; el bioetanol como posible propulsor, el hidrógeno como combustible que alimenta a la pila de combustible, la célula de combustible como creador de la energía eléctrica y finalmente las baterías y motor eléctrico que actúa como el aparato muscular del sistema.

6. Son sistemas iguales con la única excepción de la necesidad de adaptación al medio como se puede ver en el uso del oxígeno.

Además de la posibilidad de utilizar biocombustible como fuente de energía para obtener este hidrógeno, muchos vehículos utilizan biocombustibles a base de bioetanol y metanol como carburante en los coches de combustión (**bioetanol y biodiesel**). Sin embargo, lo más habitual es que se emplee con gasolina en diferentes cantidades. Estas cantidades pueden ser; porcentaje bajo de 5 a 10% (E5 y E10), porcentaje alto hasta 85% de bioetanol y 15% de gasolina (E85) o concentraciones puras del 100% bioetanol (E100) para motores especiales.

El bioetanol goza de un índice de octano superior al de la gasolina, repercutiendo en una mayor potencia en el motor pero un consumo mayor. Desde el punto de vista medioambiental, el bioetanol siempre es una ayuda a la hora de la reducción de gases contaminantes.

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018e
Gasolina (1.000 m3)	7.610	7.104	6.599	6.249	6.196	6.240	6.382	6.445	6.224
Bioetanol (1.000 m3)	468	445	396	337	371	375	253	265	315

Figura 5-1 Consumo en España de gasolina convencional y compuesta por bioetanol en la carretera.

En la Figura 5-1, se muestra una comparación entre el uso de la gasolina convencional (combustible fósil en su totalidad) y el carburante que contiene bioetanol. La diferencia entre ambos es tan grande que el consumo de bioetanol corresponde al 5% de la gasolina convencional.

5.2 Coche de H₂

Las principales causas de la contaminación del aire están relacionadas con la quema de combustibles fósiles. La combustión de estas materias primas se produce fundamentalmente en los procesos de sectores industriales y transporte por carretera. Estas combustiones emiten dióxido de carbono, hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y ozono. Es complejo saber el porcentaje total de la contaminación global provocado por el transporte pero si se sabe que de los más importantes en este campo. Según los datos de los ecologistas, el 80% de la contaminación en España es fruto del tráfico.

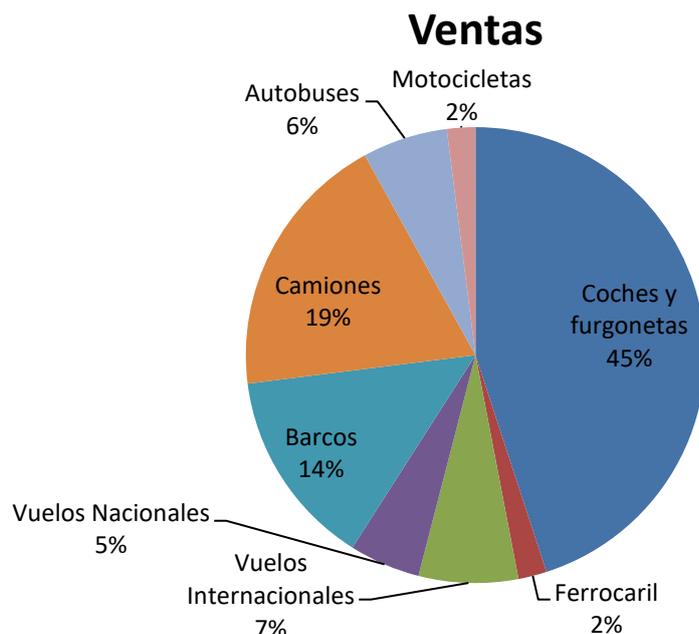


Figura 5-2 Contaminación del transporte global.

La Figura 5-2 describe el porcentaje de contaminación global de los diferentes transportes en la actualidad. Se puede destacar los transportes de carretera y naval, al ser los que mayor porcentaje tienen, en cuanto contaminación se refiere. Los transportes de carretera lideran con un total de 64% de la contaminación mundial, seguidos de los barcos que suman un 14%. Entre ambos, forman el 78% de la contaminación del transporte mundial, por lo que se urge unas medidas necesarias para solventarlo.

Si queremos detener el deterioro de la atmósfera causado por un mal uso de los hidrocarburos, es necesario un cambio drástico en nuestra mentalidad y pero sobre todo en el foco del problema, la contaminación. Una alternativa, que ha intentado hacer un hueco a lo largo de los últimos años, es el hidrógeno. Se dice que actualmente hay en torno a 800 millones de vehículos que consumen una media de 10 litros cada uno, suponiendo un consumo de ocho mil millones de litros diarios de gasolina. Este resultado en términos de contaminación es una cifra insostenible para la atmósfera durante varios de miles años. Esta inmensa contaminación está compuesta por gases nocivos como el dióxido y monóxido de carbón, y otros óxidos nitrosos.

Medio	Potencia (Kw)	Recorrido, sin repostar (km)	Rendimiento energético (%)
Pilas de combustible PEM	100-200	500	40-60
Motor de gasolina	100-100	600	25-30
Motor Diesel	10-200	800	30-35
Vehículo híbrido/ Motor eléctrico	10-100	500	40-50

Tabla 5-1 Pilas de combustible PEM y otros medios de transporte. [23]

El hidrógeno es el elemento químico más ligero y más abundante de todos, al constituir aproximadamente el 75% de la materia viva de universo. Los motores de hidrógeno se componen principalmente por dos partes; la primera se conforma por células de combustible o pilas de combustible que producen electricidad a través de la reacción química del hidrógeno almacenado y oxígeno perteneciente al aire o un tanque y la segunda está conformada por un motor eléctrico encargado de proporcionar movimiento del coche (Figura 5-3). Es en la primera parte del coche donde se presenta una mayor complejidad ya que son la parte con menos experiencia del sistema. Su funcionamiento mencionado en el punto 2.5 sirve para alimentar al motor eléctrico aunque por el camino algunos subproductos como el agua tienen que ser desechado por el tubo de escape. Estas pilas de combustible normalmente son capaces de obtener 2kW por Kg de combustible gracias a la conexión en serie de más de 200 células simples de 1V.

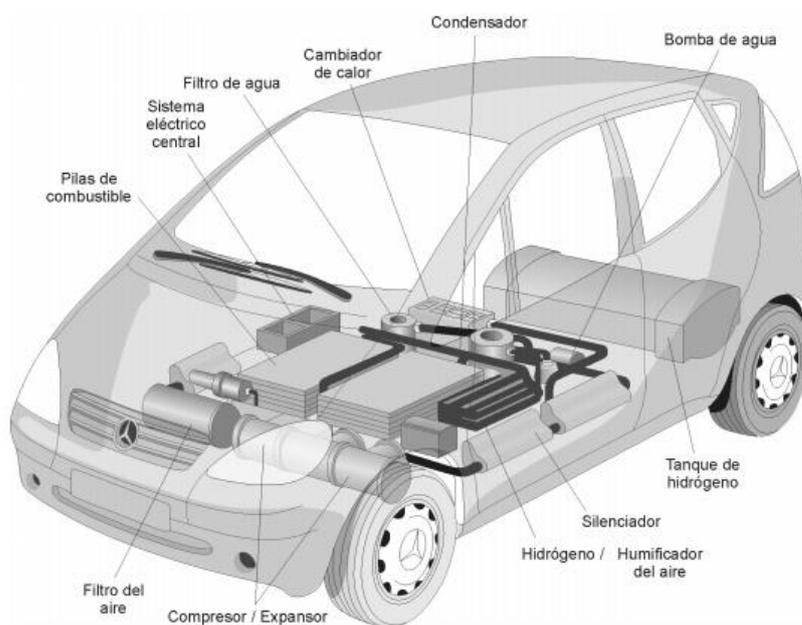


Figura 5-3 Vehículo con pila de combustible, conocido como “coche de hidrógeno”.

Sin embargo, el logro de mayor relevancia del motor de hidrógeno es la mejora del medioambiente, aunque también presentan ciertas desventajas que a día de hoy, lo convierten en un coche poco eficiente. Para recorrer una misma distancia en coches de combustible fósiles y de hidrógeno, este último necesita un mayor consumo para obtener la misma energía. Esto se debe fundamentalmente a una necesidad de un desarrollo aún por terminar que se conseguirá únicamente a través de la experiencia. Son coches costosos de elaborar por sus materiales raros y preciosos que necesita la pila de combustible durante su fabricación. Además, cabe destacar la seguridad que tanta importancia tiene a la hora de conducir, y que los coches de hidrógeno no cumplen con plena fiabilidad. Los tanques de hidrógeno están expuestos a cualquier tipo de fuga y por lo tanto, a un gas altamente inflamable.

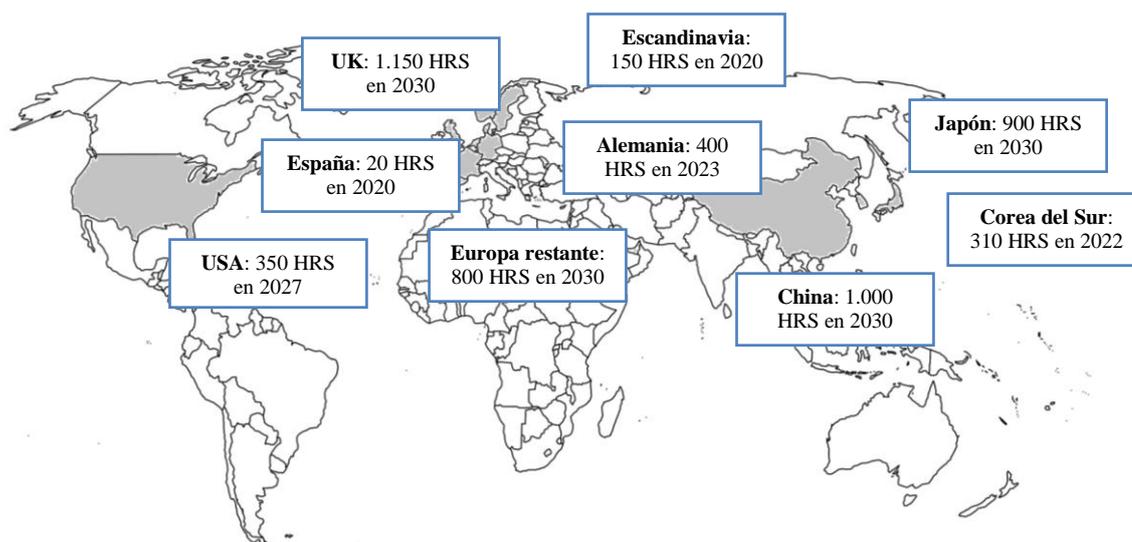


Figura 5-4 Construcción de estaciones de hidrógeno a largo plazo.

Es por esto que esta tecnología no está globalizada en estos momentos, sin embargo, está en pleno desarrollo y parece que está en camino de ser uno de los mercados del futuro. Europa, Japón, Corea del Sur, China y Estado Unidos tienen planes ambiciosos para establecer miles de automóviles de hidrógeno en los próximos años. Es tan grande la inversión, que estos países han anunciado la construcción de más de 5.000 hidrogeneras para los próximos 10 años. Estas estaciones de hidrógeno venderían sobre 12.000 toneladas de hidrógeno por día, aunque supone una inversión de gran calibre. En la Figura 5-4 se aprecia la inversión de algunos países por esta tecnología, destacando algunos de ellos como China, UK o Japón que siempre han encabezado la economía mundial. Fuera de estos países líderes en este sector, pero no menos ambicioso, está España con un total de 20 estaciones de servicio de hidrógeno para antes del 2020, motivando la llegada de vehículos que utilicen esta tecnología y poder entrar de lleno en este sector futurista.

5.3 Plantas de producción de H₂

Actualmente existe un gran interés por producir energía proveniente de recursos renovables. Esto se debe a sus ventajas frente a las energías no renovables, pero encima de esto, a su proyección de futuro. El hidrógeno es un medio ideal para llegar a la energía debido a que se puede producir de diversas maneras; como el agua, biomasa o gas natural. Es por esto que es considerado una de las energías más atractivas del futuro. En la actualidad existen diferentes plantas de H₂ según sus procesos industriales.

El H₂ puede obtenerse mediante la biomasa celulósica, utilizando procesos termoquímicos como licuefacción, pirolisis, combustión o gasificación. Pero esto no acaba aquí, existen procesos térmicos y fotoquímicos que disocian el agua a través de la luz solar o el reformado de etanol y azúcares.

Este último incluye el bioetanol como alternativa, que al igual que todas, intentará subsanar la alarmante situación medioambiental que padecemos hoy en día. Como se ha mencionado previamente, el etanol se puede producir de dos formas; por medio de la modificación química de etileno o por el procesamiento de la materia biológica. Esta última forma, se basa en la fermentación de azúcares como principal fuente de obtención aunque también existen otros procesos. La fermentación de carbohidratos de los cultivos del maíz, la remolacha y caña son comúnmente utilizados para abastecer las plantas de H₂.

Este bioetanol, se transforma en hidrógeno a través de un proceso de reformado de vapor de agua o aplicando presión en fase líquida. Los catalizadores concretos del proceso ayudan a liberar H₂ del compuesto químico. Al considerarse reacciones neutras, no dan lugar a emisiones de CO₂ pero al no ser reacciones selectivas, también se ven favorecidas algunos subproductos tóxicos como monóxido de carbono, metano o acetaldehído.

En otros procesos industriales, el H₂ se produce mediante el reformado de fuel, carbón o gas natural pero su componente más empleado es el CH₄. Este último proceso se conoce como reformado de metano con vapor y es considerado la técnica más económica. El gas natural, a temperaturas de más de 1000°K y presión de 25bar, reacciona con el vapor de agua con la ayuda de un catalizador de níquel. La electrólisis del agua (separación de los elementos del agua a través de una corriente eléctrica) puede verse en algunas industrias, a pesar de su elevado coste y reducida vida útil.

Actualmente, casi el 96% de todo el hidrógeno se obtiene a partir de combustibles fósiles, siendo el reformado con vapor de agua de gas natural el más usado (49%), seguido del reformado con vapor de agua (29%) y la gasificación del carbón (18%). Todos ellos son procesos bien desarrollados, pero asociados a una huella carbónica. En el otro lado de la tabla, la electrólisis del agua suma un 4%.

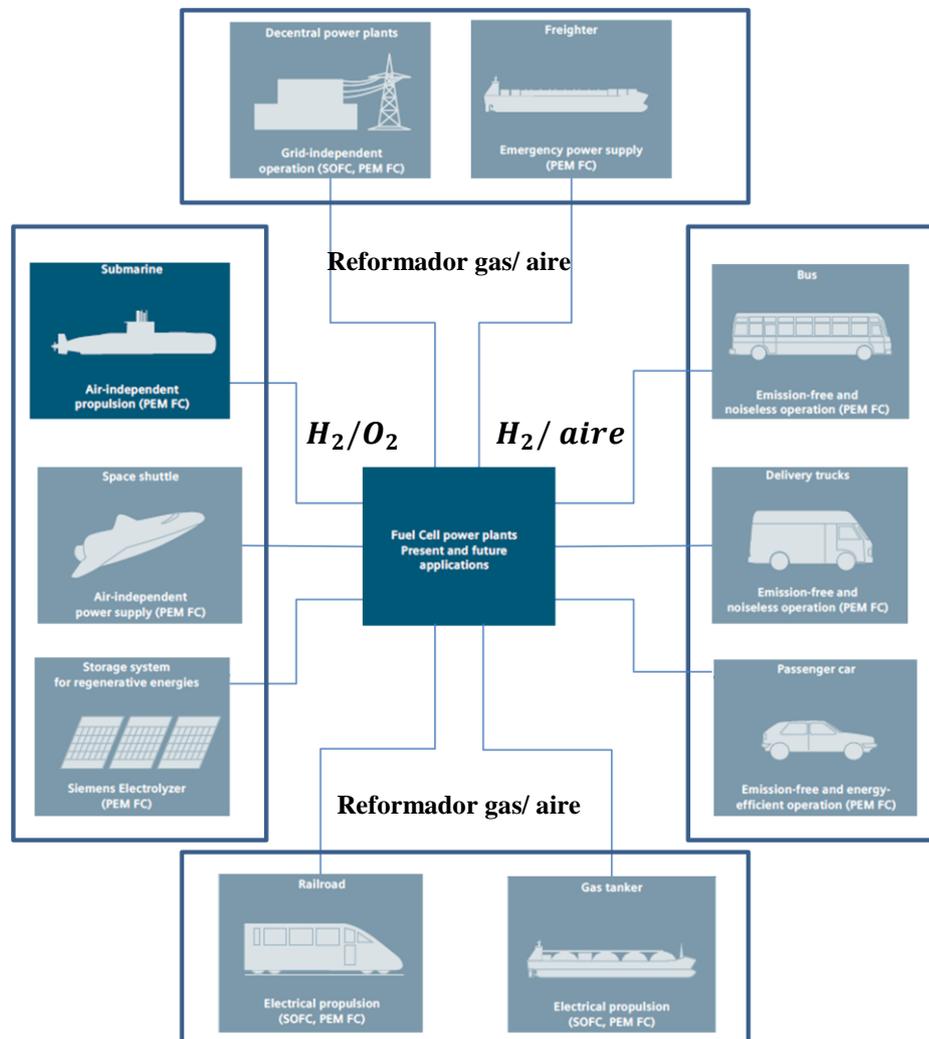


Figura 5-5 Aplicaciones de las plantas de H₂.

Las plantas de H_2 a día de hoy tienen un gran número de clientes con diferentes tipos de proyectos. Existen muchas aplicaciones anaeróbicas (submarino, naves espaciales o sistemas de almacenamiento de energía) y anaeróbicas (automóviles, ferrocarril, buques de superficie o plantas de energía eléctrica) han apostado en el H_2 como alternativa a los combustibles fósiles (Figura 5-5).

5.4 Sistema AIP en el entorno marítimo

5.4.1 Propulsión de buques mediante pilas de combustible

La mar es el medio predilecto de los comerciantes para el transporte de sus mercancías desde de la aparición de los primeros barcos de vela. Hasta la fecha, el número de barcos ha aumentado de forma masiva, no solo para el uso comercial sino además para su uso militar, de transporte de pasajeros, ocio o para el estudio del entorno marino.

En la actualidad, nos encontramos ante una incertidumbre de cuantía de los combustibles fósiles además de impacto medioambiental, y es por ello, que los buques de futuro tienen que adaptarse a esta circunstancia. Este futuro es el hidrógeno, que se caracteriza por ser un combustible ilimitado, limpio y barato, convirtiéndole en la medicina perfecta para la enfermedad en la que estamos sumidos. Los generadores que consumen este hidrógeno son las ya mencionadas pilas de combustible que aparte de ser muy silenciosas en el mar, desechan como “contaminante” más agua.

Es una industria que está en desarrollo para poder adaptar este sistema a las demandas de potencia eléctrica de un barco y precio accesible para la gente. Este sistema implantado en buques se asemeja al sistema AIP, con una pila de combustible como núcleo que alimentarían al motor eléctrico o a las baterías. De esta forma, las baterías y pilas de combustible se complementan en los momentos de mayor demanda energética en situación marineras como dar “avante toda” conocido como ir a máxima velocidad. Aunque lo adecuado es utilizar hidrógeno a partir de un tanque de gas a presión, también cabe la posibilidad de obtener este hidrógeno con diesel, metanol, etanol e incluso de la desmineralización del agua del mar para posteriormente separar el oxígeno y conseguir hidrógeno mediante el proceso de la electrólisis. Mientras se investiga en este campo, entrarán en vigor las estaciones de hidrógeno o hidrogenas que proporciona un gas suficiente para alimentar al buque con los kW necesarios. Algunas empresas ya están diseñando una dispositivo conocido como APU que será capaz de generar gas puro o rico en hidrógeno a partir del combustible diesel, metanol y etanol (Figura 5-6).

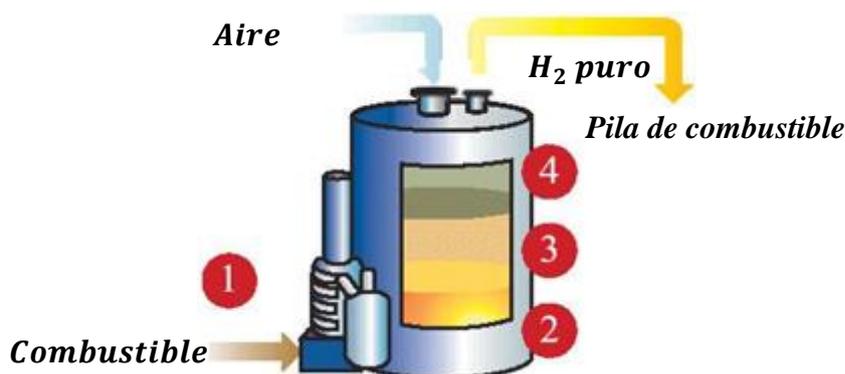


Figura 5-6 La unidad APU para el futuro de los buques.

Pero el gran reto en el sector marítimo aún por cumplir, es conseguir una pila de combustible capaz de suministrar a barcos con grandes demandas. Se sabe que uniendo varias monoceldas de diferentes tamaños, por tanto, de distintas potencias, se puede suplir estas demandas. Pero eso sí, el precio desconocido no es viable y es por ello que todavía sigue en desarrollo. Lo que sí se sabe por ciencia cierta, son los aspectos innovadores que le permitirán competir con los demás sistemas

propulsivos; un escaso impacto medioambiental, flexibilidad de operación, rendimiento elevado y una estructura sencilla. Destacar la “flexibilidad de operación”, que para un buque es un aspecto importante a tener en cuenta debido a las grandes potencias que maneja y al escenario en el que se encuentra. En un buque, en cambiar de potencia del motor es necesario un tiempo de reacción que evitar no forzarlo y así poder conseguir un mantenimiento más eficaz. Con el sistema de pilas de combustible es posible un cambio de potencia instantáneo que, a día de hoy, es el motivo de la mayoría de colisiones en la mar.

Este sistema de pila de combustible no es compatible actualmente con barcos de gran eslora, máquinas que necesitan una potencia entre 10000kW a 73500kW. Es por eso que los barcos que albergarán en un principio esta vanguardista tecnología serán buque de aproximadamente 500kW como máximo. Países como Estados Unidos, Holanda, Noruega, Suecia o UE ya han invertido en este sector para mantenerse actualizados en lo que se piensa que va a ser el futuro marítimo. Los noruegos han financiado un proyecto de un ferry con un motor eléctrico alimentado por celdas de combustible PEM de 200kW junto con baterías de ion litio de 100kW.

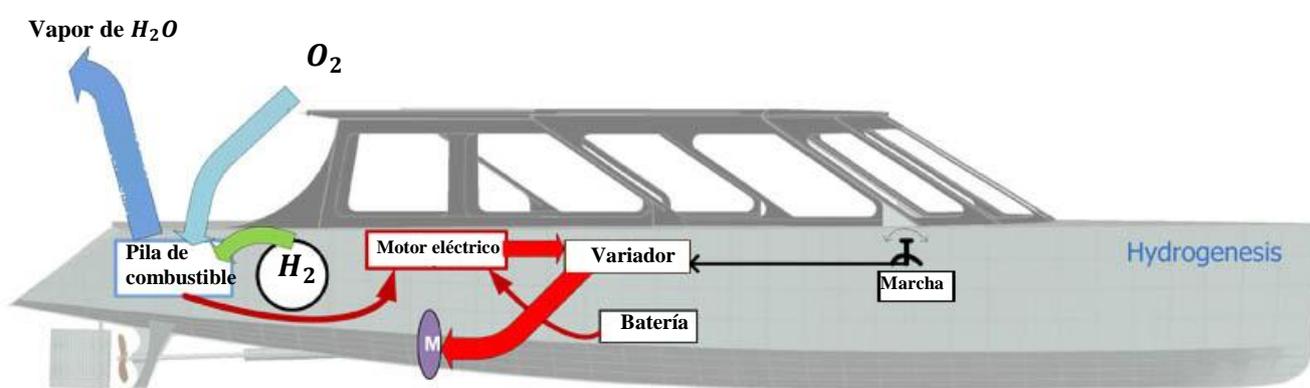


Figura 5-7 Ferry de pasajeros inglés "Hydrogenesis".

El ferry Hydrogenesis (Figura 5-7) se alimenta de cuatro pilas de combustible de 12kW de potencia y tiene un depósito de hidrógeno a 350 bar de presión de cuatro días de autonomía. Su cometido es transportar pasajeros durante seis horas al día desde Temple Quay y SS Great Britain.

5.5 Diseño de una pila de combustible PEM para submarino no tripulado

5.5.1 Introducción a los vehículos submarino no tripulados (UUV)

El UUV, “Unmanned underwater vehicle” (Figura 5-11), son vehículos capaces de operar en un medio subacuático. Los primeros vehículos submarinos no tripulados se crearon para realizar trabajos en el fondo del mar, donde las condiciones no son idóneas para cualquier buceador. Posteriormente, se les dio otros usos, como la búsqueda de naufragios o el estudio del fondo marino. Estos tipos de vehículos se dividen en dos categorías; los vehículos remotamente operados (ROVs) que son controlados por un operador humano y los vehículos autónomos sumergibles (AUVs) que al contrario que los anteriores, no son controlados por un operador.

En este tipo de vehículos, existen limitaciones a la hora de operar debajo del agua, medio desconocido y vulnerable para todos:

- La integración de sistemas tecnológicos limitados por su escaso tamaño.
- La posibilidad de almacenamiento de energía.

- Al ser la mar es un medio prácticamente turbio, las ondas electromagnéticas, sistemas ópticos o empleo de ondas acústicas como medios de transmisión de información se ven perjudicados a la hora de adentrarse en la superficie del agua.
- Vida útil de las baterías.
- Autonomía limitada por las baterías.



Figura 5-8 Deep Sumergence Vehicle [45].

5.5.2 Aspectos generales de los UUV

Los vehículos sumergibles no tripulados están asumiendo un papel importante en las numerosas misiones que tiene hoy los militares. Estos submarinos no tripulados son capaces de realizar misiones de forma sigilosa y acceder a zonas donde nadie puede acceder. Esto les permite cumplir la misión sin riesgo de bajas humanas ya que como se ha mencionado, se caracteriza por ser un dispositivo no tripulado y según el tipo puede entrar en juego o no, el factor humano. Esto depende la misión, alcance de plataforma o sensores y armas. Entre estas misiones destacan la lucha de minas (MCM), reconocimiento y vigilancia de una zona en la mar, inteligencia (ISR) o incluso misiones civiles como es el caso de búsqueda de naufrago o detección de medio ambiente.

Los AUV utilizado para misiones de ámbito militar destacan, los SeaOtter MKII o Pluto Plus para minas submarinas, el SeaWolf o Bluefin-9 para búsqueda de objetos y los SOG Seaglider o Bluefin-21 para guerra antisubmarina.

En algunos los buques de la Armada Española existe la presencia de algunos vehículos sumergidos no tripulados. Estos barcos que cuentan con la fortuna de tener dos de estos UUV, son los cazaminas de la clase Segura cuya cometido principal es la lucha contra las minas marinas. Estos vehículos son de tipo ROV y tienen la denominación de Pluto Plus (Figura 5-9). Este vehículo sumergido funciona con una batería, tienen una autonomía de 2 a 4 horas dependiendo de la velocidad y su velocidad máxima que alcanza es de 6 nudos. Presenta unas ciertas características que lo hacen único en su clase [46]:

- Máxima distancia operativa entre su clase.
- Rotación en todos sus tres ejes, iluminación y videocámara que le convierten en un excelente vehículo en cuanto maniobrabilidad y posicionamiento se refiere.
- Identificación de objetivos bajo malas condiciones de visibilidad.
- Es ligero y resistente.
- Se puede utilizar para casi todo tipo de misiones pero están más capacitados para minas de fondo.



Figura 5-9 El ROV Pluto Plus preparado para una operación [45].

Estos vehículos no tripulados suelen tener baterías de plomo ácido o ión litio, por lo que presentan ciertas limitaciones en cuanto autonomía y la posibilidad de implementar sistemas de elevado consumo energético. Es por ello que una buena manera de solventar este problema es la aplicación análoga del sistema AIP en este tipo de vehículos convirtiéndolo en un sistema híbrido de almacenamiento de energía eléctrica. Se combinarían dos tipos de almacenamiento de energía eléctrica, ya sean las baterías o un sistema AIP en menor escala encarnado en una pila de combustible. El uso de ambos sistemas ha sido fruto de proyectos de vehículos no tripulados que operan en distintos escenarios; subacuáticos (UUV), terrestre (UGV) o incluso aéreo (UAV).

Este cambio de sistema supondría un aumento de capacidades timoneado por la simplicidad de este tipo de sistema. Algunas ventajas que aporta este sistema innovador son:

- Mayor eficiencia en el uso de la energía almacenada.
- Emisión escasa o incluso nula, siendo el agua único subproducto “contaminante”.
- Al igual que el sistema AIP de los submarinos S-80, mejora de la firma acústica, térmica y medioambiental.
- Redundancia de suministros de energía; sistema AIP (en caso UUV) o pilas de combustible y baterías.
- Potencia de salida escalable normalmente entre 4kW y 21kW.
- Sistemas de alta durabilidad.
- Características rápidas y respuestas dinámicas.
- Aumento de densidad de energía y potencia respecto a las configuraciones basadas únicamente en baterías.
- Diseñado para soportar condiciones de operación resistentes.

Uno de los proyectos de demostración en este escenario se ha llevado a cabo en Japón, donde se instaló en un vehículo submarino no tripulado un sistema de pilas de combustible. Este vehículo sumergible alcanzó datos de 317km en 56 horas hasta 800m de profundidad y 3 nudos de velocidad media. Este proyecto disponía de dos “stacks” de pila de combustible con una potencia de 4kW y almacenaba hidrógeno en tanques de hidruros metálicos y oxígeno líquido en un tanque criogénico. Otro proyecto en Estados Unidos, financió un vehículo con pilas de combustible de 15kW que operó durante más de 500 horas a una velocidad de 5 nudos.

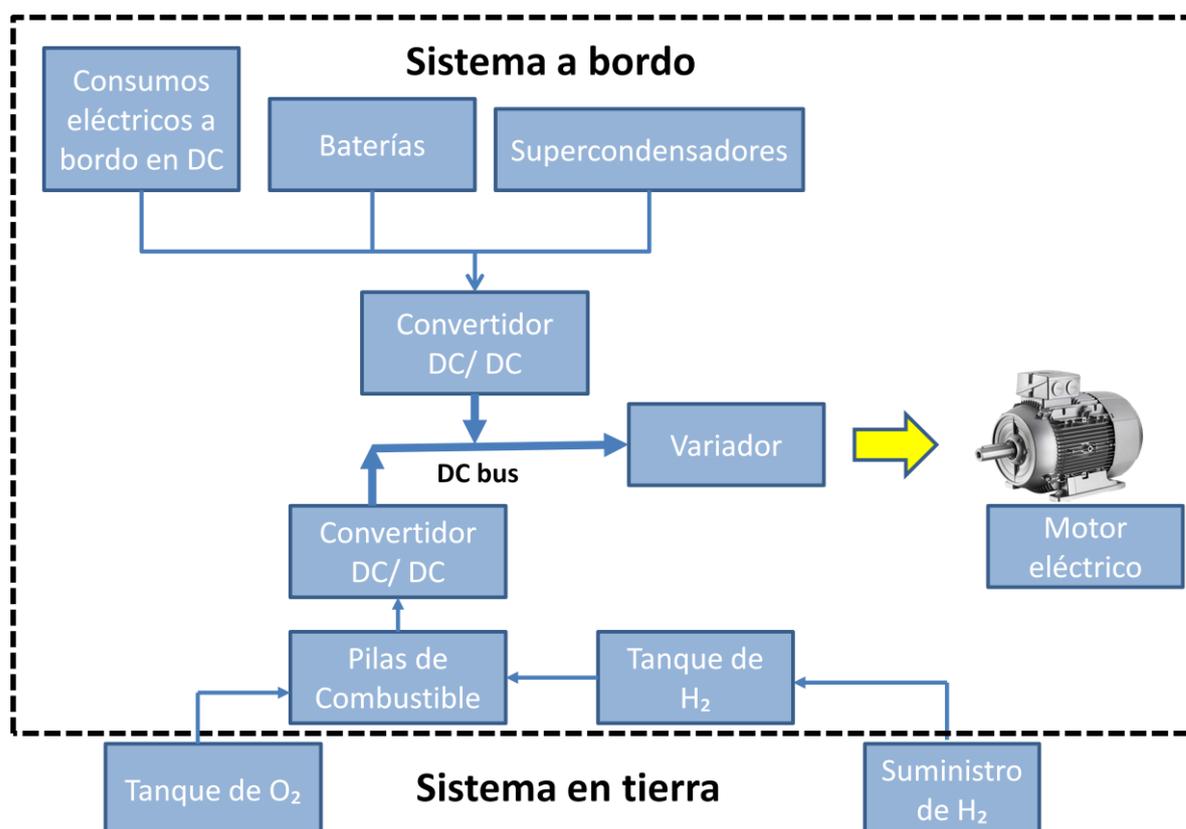


Figura 5-10 Configuración de sistema híbrido de pila de combustible para UUV.

La Figura 5-10 muestra el esquema de una configuración de un sistema híbrido de un UUV compuesto por baterías y pila de combustible. La energía de las baterías y pilas de combustible pasan a través de un convertidor para regular la corriente continua de una tensión a otra y así alimentar al motor eléctrico de forma controlada con la ayuda en variador.

5.5.3 Dimensionado general

En este apartado se detallan el diseño de una pila de combustible PEM como parte esencial del sistema AIP para un vehículo no tripulado. Como en estos momentos la Armada Española tiene dos tipos de vehículos submarinos no tripulados tipo ROV para la guerra de minas; el “Minesneeper” y el “Pluto Plus”, he decidido diseñar un sistema similar al AIP adaptado a un UUV cuyas características son similares a la de un Pluto plus. Esto no exime la posible implementación de este sistema AIP o pila de combustible para otros vehículos submarinos no sumergible e incluso a **otros vehículos no tripulados** si el tamaño lo permite.

Antes de empezar, es necesario conocer las características del vehículo en cuestión para partir de uno valores específicos que nos ayudarán a dimensionar la célula de combustible (Tabla 5-2).

Características	Especificaciones
Dimensiones	Eslora: 2,25 m Diámetro: 58 cm
Potencia:	5kW
Voltaje:	50V
Desplazamiento	315 kg
Velocidad	5 kn
Sensores	3 sonar / 1 videocámara
Autonomía	2 horas a 3 kn
Profundidad de operación	900 ft
Sistema propulsivo	2 motores horizontales 2 motores verticales 1 motor transversales
Aplicaciones:	Medidas contra minas Inteligencia Vigilancia y búsqueda

Tabla 5-2 Características del vehículo submarino no tripulado Pluto Plus [47].

Para diseñar la pila de combustible es necesario saber los requisitos de potencia. Para obtener una potencia elevada es necesario colocar un número de celdas en serie o en paralelo. A la unión de estas celdas se le conoce como “stack” o traducido como “apilamiento”. La potencia total del sistema, según la ley de ohm, es el producto del voltaje total de la pila y la corriente presente en el sistema.

$$W_{FC} = V_{st} * I \quad (\text{Ec.11})$$

Como se ha con anterioridad, el objetivo es diseñar una pila de combustible PEM para un vehículo submarino no tripulado con una potencia de 5kW y 50V. Esta potencia necesaria para propulsar el UUV, es una **potencia total aproximada** de la suma de los equipos electrónicos y potencia necesaria para mover el motor eléctrico de un “Pluto Plus”. Teniendo en consideración la ecuación previa, se obtiene una intensidad de corriente de 100A.

Tipo de pila	Tensión media a plena carga (V)	Densidad de corriente (mA/cm ²)
PEMFC	0.6 A 0.7	300 A 1000
DMFC	0.35 a 0.4	200 a 600
AFC	0.7 a 0.8	300 a 800
MCFC	0.6 a 0.7	200 a 600
SOFC	0.7 a 0.8	300 a 1200

Tabla 5-3 Valores típicos de tensión y corriente para diversos tipos de pilas de combustible.

Conociendo el voltaje y la potencia para un correcto funcionamiento del sistema, se puede calcular una densidad de corriente es 850 mA/cm^2 según la Tabla 5-3.

El número de celdas de la pila de combustible se define habitualmente por el máximo voltaje necesario y deseado de operación del equipo en cuestión. En este caso, el ROV Pluto Plus se compone de un voltaje máximo de 50 V y una potencia 5kW. Anteponiéndose en las peores condiciones una pila nos puede aportar como mínimo un voltaje de 0,6V, por lo tanto:

$$V_{st} = \sum_{i=1}^{N_{cell}} V_i = V_{cell} * N_{cell} \quad (\text{Ec.12})$$

De la ecuación anterior, resolvemos el número de celdas necesarias para obtener el voltaje requerido por el sistema resultando un número de 84 celdas. Conociendo que la densidad de corriente es la relación entre la corriente nominal y el área de la sección cuadrada de la pila, el área activa de la pila es 120 cm^2 . Recopilando los datos necesarios para diseñar la pila de combustible, obtenemos la Tabla 5-4:

Parámetros	Valor	Unidades
Potencia nominal	5000	[W]
Voltaje máxima nominal	50	[V]
Corriente nominal	100	[A]
Número de celdas	84	[--]
Área activa	120	[cm^2]

Tabla 5-4 Parámetro de la pila de combustible PEM a estudiar.

Al diseñar la pila de combustible es necesaria una serie de **hipótesis** a tener en cuenta:

- La **potencia necesaria** del UUV es de 5kW, teniendo en cuenta la suma de los equipos electrónicos y potencia necesaria para mover el motor eléctrico.
- Las pérdidas asociadas a la polarización se tienen en cuenta en la potencia necesaria.
- Se busca un alto rendimiento eléctrico aunque hay que poner un margen, es por ello que ponemos una tensión de trabajo de unos 0,6 V por celda.
- La densidad de potencia para el punto máxima de potencia es aproximadamente 850 mA/cm^2 para suplir los parámetros actuales.
- Combustible y oxidante se tienen que distribuir de forma uniforme por cada celda.
- La temperatura de la reacción tiene que ser la misma para toda la pila de combustible.
- Si se diseña una pila de combustible de un electrólito de polímero, la membrana no se puede secar o inundar con agua.
- Las pérdidas de resistencias tienen que ser las mínimas posibles.
- Los componentes de la pila de combustible tiene que estar bien sellada para evitar es escape de componentes participantes en la reacción.

Además de estas consideraciones, en el diseño de una pila de combustible es de gran importancia tener en cuenta las pérdidas y si es posible reducirlas al máximo con el fin de conseguir una mayor eficiencia. Para el diseño de UUV en cuestión se ha tenido en consideración una potencia necesaria que contrarreste esas pérdidas. Estas vienen dadas por las pérdidas de activación, óhmicas, corrientes, de concentración másica y otras más como las pérdidas por fricción, de tensión, ambientales o incluso humanas.

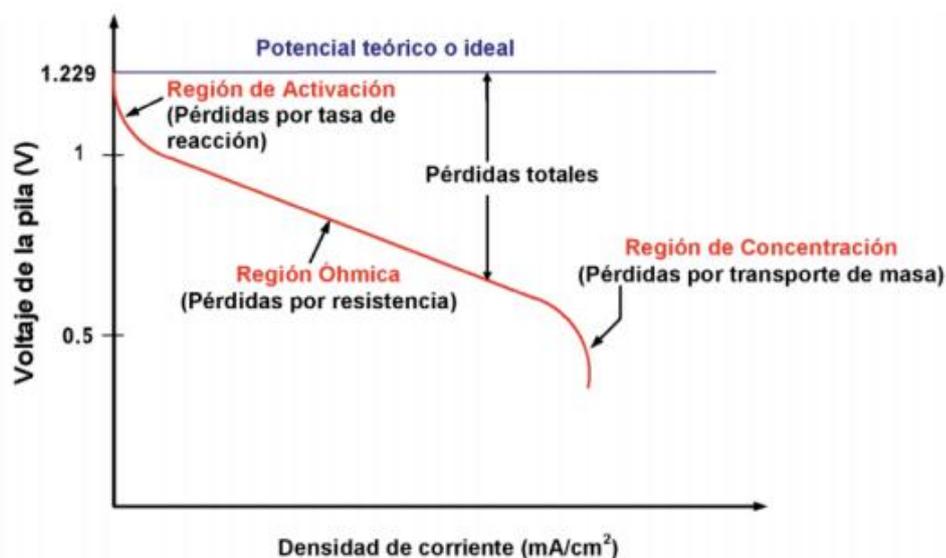


Figura 5-11 Pérdidas de una pila de combustible según su voltaje y densidad de corriente [48].

La Figura 5-11 es un ejemplo de una curva de polarización que se utiliza para una orientación inicial sobre el diseño de las celdas de pila de combustible teniendo en cuenta las pérdidas por polarización. En el eje de abscisas se muestra la densidad corriente en unidades de amperios y superficie cuadrada y en el eje de ordenadas se encuentran los valores de voltaje de la pila. La gran mayoría de las pilas de combustible usan un voltaje comprendido entre 0,6 a 0,8 V por celda e incluso podría ser mayor si el diseño, materiales, condiciones de operación y equipos electrónicos son óptimos.

Las pérdidas por activación tienen relación con cinética química de disociación de los reactantes producidos en los electrodos. Aquí entra en juego el catalizador que tiene como misión la producción de la disociación [48].

$$V_{act} = \frac{R \cdot T}{\alpha \cdot F} * \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (\text{Ec.13})$$

Las pérdidas de Óhmica hacen referencia a las pérdidas por la resistencia del interior de la pila, e incluye la de los electrodos y electrolito. Con otras palabras, es la oposición de la membrana al paso de protones, electrodos y colectores de corriente de paso electrónico. Como ya se ha mencionado en la Figura 5-11, viene dado por la ley de ohm.

Las pérdidas de concentración se deben a la caída de brusca de concentración de reactantes en los electrodos. A elevado valores de corriente, los reactantes se consumen rápido en comparación a la alimentación de la celda.

$$V_{conc} = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} * \ln \left(\frac{C_B}{C_S} \right) \quad (\text{Ec.14})$$

Como se ha apreciado anteriormente la tensión que se obtiene de una celda o unidad básica de un pila de combustible es reducida (entorno a 0,6V), siendo insuficiente para cualquier aparato electrónico y es por ello que estas celdas se deben apilar formando un paquete, o “stack”, para lograr una mayor tensión y alimentar al efecto útil en cuestión.

La Figura 5-12 es una pila de combustible compuesto por dos “stack” en serie de forma que el voltaje resultante el producto de ambos voltaje de cada una de las celdas.

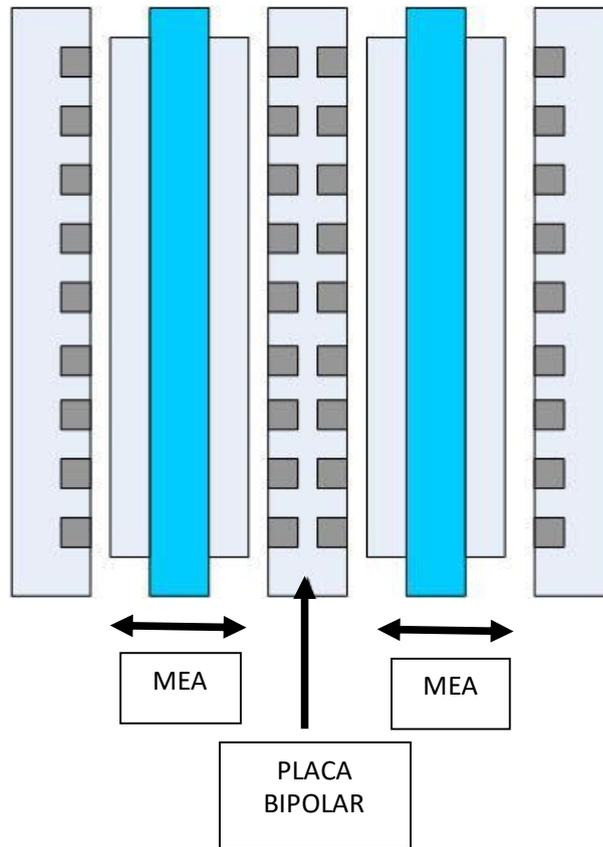


Figura 5-12 Configuración de una pila de combustible, compuesto por dos "stacks".

Una única monocelda, es decir, el electrolito conocido como “membrana”, un ánodo y un cátodo que utiliza hidrógeno de combustible para combinarse con oxígeno no es suficiente para alimentar a un dispositivo de más de 0,6V. Como máximo podría obtenerse un voltaje de 1,2V dependiendo de la calidad de la reacción. En términos de electrónica una monocelda no sería capaz de alimentar un led que necesitan mínimo una tensión de 1,2V. Es por esto que nace el concepto de “stack” o apilamiento que consiste en la unión en serie o paralelo de varias celdas (Figura 5-13).

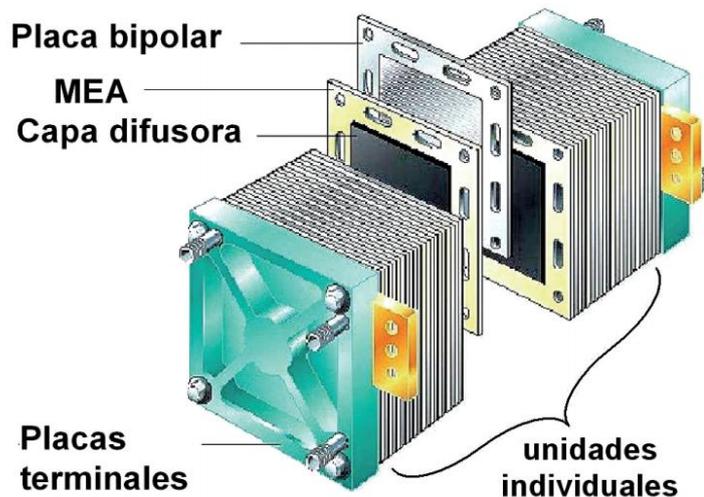


Figura 5-13 Elementos de una pila de células de combustible [26].

Antes de pasar al siguiente apartado, es necesaria una visión general de los elementos necesarios para fabricar una pila de celdas de combustible (Figura 5-14):

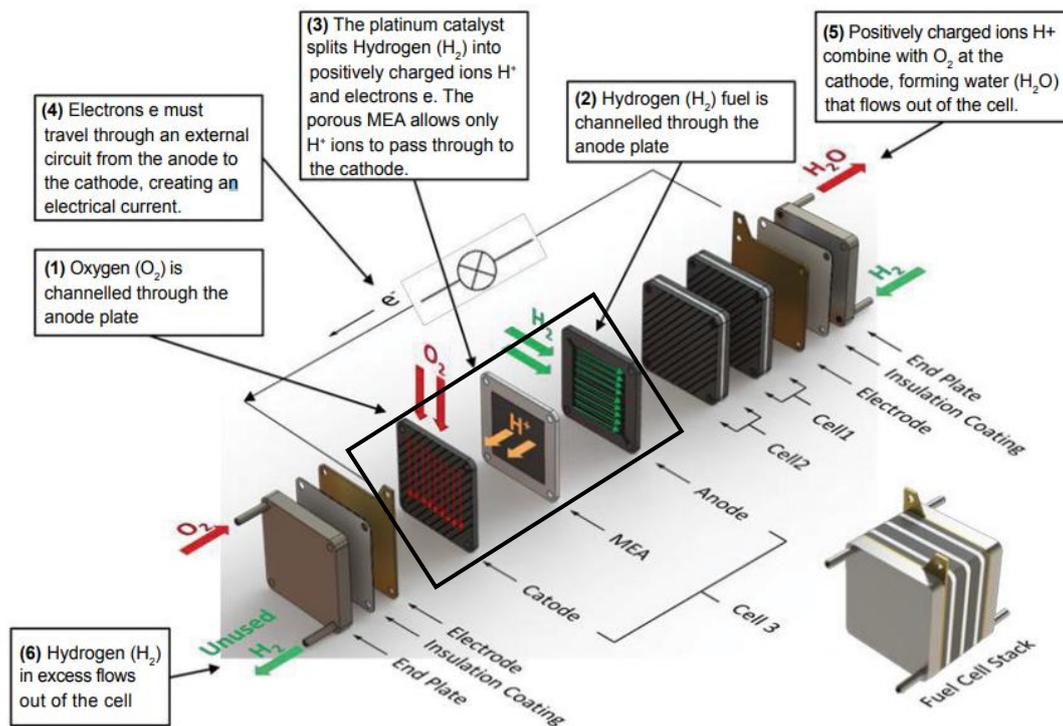


Figura 5-14 Diseño de un “stack” [49].

La imagen anterior representa todos los elementos de una celda de una pila de combustible. En el caso de la pila de combustible que se quiere diseñar, se necesitarían 84 celdas similares a la “Cell 3” de la imagen. Además de las colectores de corriente iniciales, se pueden poner dos colectores entre cada membrana para recoger la corriente generada por ésta. Si no se colocan los colectores de corriente, las placadas difusoras actúan de conductor de corriente. En nuestro caso no vamos a utilizar colectores de corrientes a excepción del inicial y final [49].

5.5.4 Dimensionado de la MEA

Es el conjunto de tres capas formado por la membrana de intercambio de protones, los electrodos y los catalizadores. Esta membrana es la culpable de que los protones aíslen a los electrones y producir corriente eléctrica. El nombre MEA (Figura 5-15) viene de “Membrane Electrode Assembly” que se considera la celda elemental de la pilas de combustible de membrana polimérica. Los componentes de las MEAs se diseñan y fabrican por separado y luego se juntan a través del compactado a altas presiones y temperaturas [50].

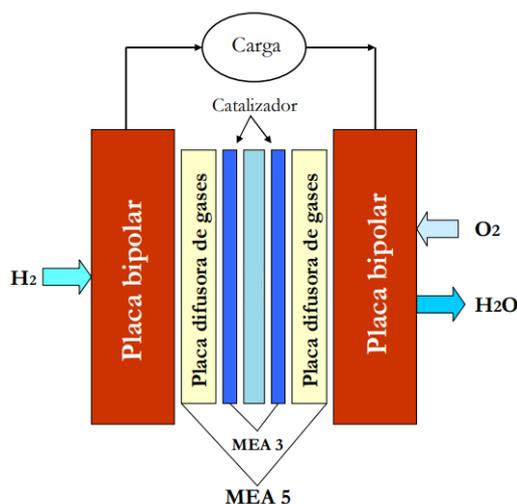


Figura 5-15 Arquitectura de una célula PEM [51].

En rasgos generales, una MEA está compuesto por dos electrodos (ánodo y cátodo), catalizadores y una membrana de intercambio de protones (Figura 5-15). La dimensión membrana de intercambio protónico viene dada por el área activa, que en este caso es 120 cm^2 [52].

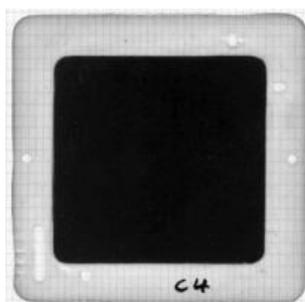


Figura 5-16 Membrana de intercambio protónico [52].

5.5.4.1 Dimensionado de los electrodos

Estos electrodos conocidos como ánodo (positivo) y cátodo (negativo), son capas delgadas catalíticas situadas ente la membrana o electrolito y las capas bipolares. Están formados por un material poroso en el cual se distribuye las partículas de catalizador. Este catalizador permite la reacción a una mayor velocidad y está hecho de pequeños trozos de platino. En nuestra pila necesitaremos un número de 128 electrodos en total para suministrar el UUV con 5kW [53].

5.5.5 Dimensionado de las placas bipolares

Las celdas de un “stack” se agrupan en serie con el fin de obtener un voltaje mayor y poder obtener la potencia deseada. Para separar estas celdas y colocarlos en serie se utilizan unas placas denominadas “placas bipolares” que están en permanente contacto con ambos lados de su superficie, con el ánodo y con el cátodo.

El diseño de estos canales que caracterizan a estas placas bipolares, desempeñan la función de alimentar los electrodos con los gases reactantes y evacuación de subproductos de la reacción química. Sus principales funciones pueden ser resumidas en:

- Pilar estructural del ensamblaje total.
- Aporta conexión eléctrica entre celdas.
- Evacuación de subproductos de la reacción, como es el agua y los reactantes sobrantes.
- Alimentación de reactivos sobre electrodos.

- Protección ante la corrosión.
- Aportación de una buena conductividad eléctrica.

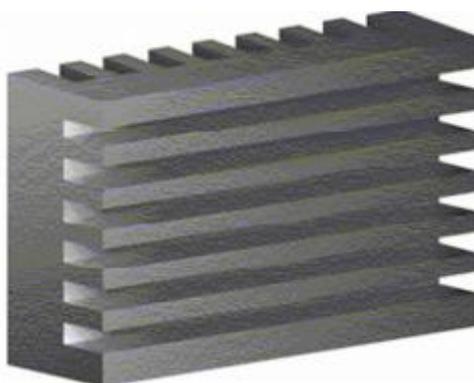


Figura 5-17 Forma de una placa bipolar de doble canalización [54].

Estas placas conocidas con el nombre “bipolar plates” aportan la conexión eléctrica entre celdas de una pila de combustible (Figura 5-17). El aumento de voltaje o corriente se consigue dependiendo si esta en serie o paralelo a través de sus canales horadados a cada extremo de las celdas. No existe un único diseño de placa bipolar, sino esta configuración es según la conveniencia de la pila de combustible que se quiera realizar. Estas placas deben de ser capaces de expulsar el calor que emite la reacción por los electrodos, de separar los flujos de los reactantes para que no se mezclen y aportar rigidez a la estructura del stack completo. Normalmente se utiliza un material de grafito para estas placas aunque también se pueden utilizar otros materiales que cumplan esta función. Finalmente, estas placas bipolares forman tres cuartas partes del peso total de la pila de combustible y en torno a la mitad de su coste.

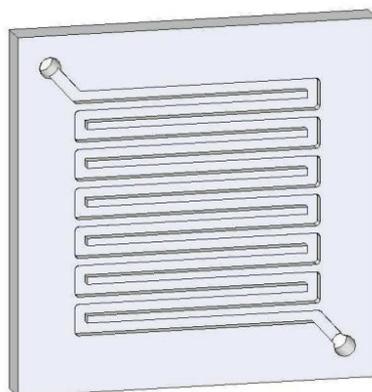


Figura 5-18 Vista en 3D de la placa bipolar del ánodo.

En la Figura 5-18 se representa el diseño de la placa bipolar adyacente al ánodo que tiene como cometido principal la circulación eficiente del hidrógeno. En contraposición, la Figura 5-19 se encuentra próxima al cátodo y está bajo encargo de la circulación del oxígeno.

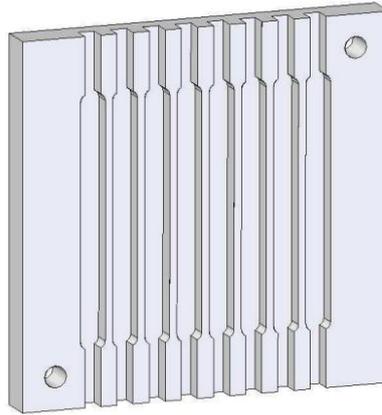


Figura 5-19 Vista en 3D de la placa bipolar del cátodo.

El número de placas de una pila de combustible puede variar en función de las celdas o stacks necesarias para proporcionar un voltaje. Una pila puede tener pocas celdas o cientos de ellas pero normalmente tendrá el doble de placas bipolar que de celdas en una pila de combustible. En la pila de combustible que se está diseñando la pila está formado por 84 celdas de combustible, por lo tanto, se necesitarán 168 placas bipolares en su totalidad.

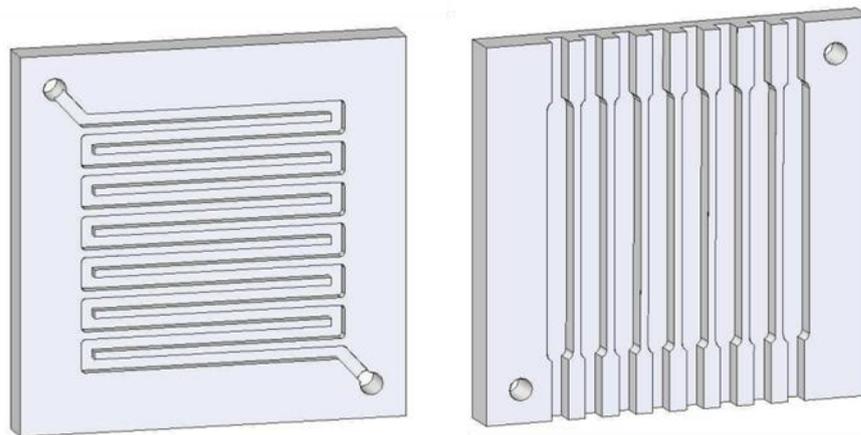


Figura 5-20 Vista en 3D de la placa bipolar de doble canalización.

La unión de celdas elementales se puede realizar mediante placas bipolares. Estas placas bipolares pueden ser de una o doble canalización como se puede ver en la Figura 5-20. Esta doble canalización es una forma de maximizar dos placas bipolares, una para el hidrógeno y otra para el hidrógeno, en una sola pieza. En la Figura 5-21 se muestra una pila de combustible compuesta por dos celdas en serie, por lo tanto, el voltaje total será la suma de los voltajes de ambas celdas.

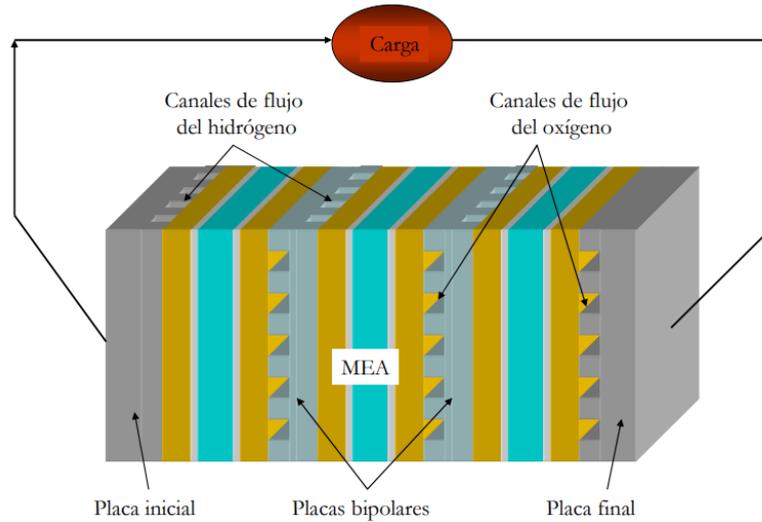


Figura 5-21 Unión de celdas elementales mediante placas bipolares de doble canalización [51].

5.5.6 Dimensionado de los sellos

Los sellos y juntas son necesarios para evitar fugas al exterior de la celda de combustible o el cruce incorrecto del combustible. Habitualmente se utiliza materiales termoplásticos ya que soportan condiciones de una pila de combustible.

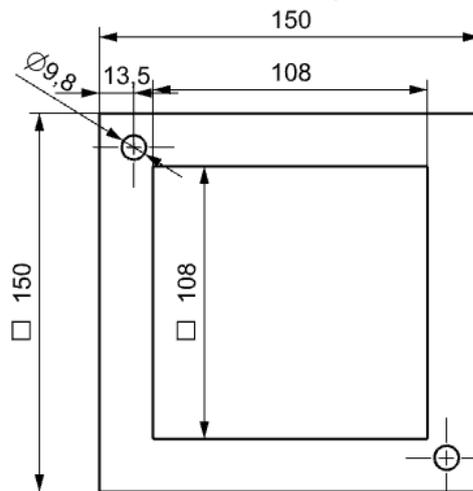


Figura 5-22 Diseño del sello

La Figura 5-22 representa el alzado de un sello de la pila de combustible de 5kW que se está diseñando para el vehículo tripulado no sumergido. Estos sellos se colocan normalmente entre las MEAs para asegurar la estanqueidad con las placas bipolares y así mantener la eficiencia del sistema. Los agujeros superior e inferior del sello sirven para la unión a través de varillas con los demás componentes de la pila y la cavidad rectangular de 108mm es el lugar de la membrana protónica de área activa de 120cm².

5.5.7 Dimensionado de placas colectoras de corriente

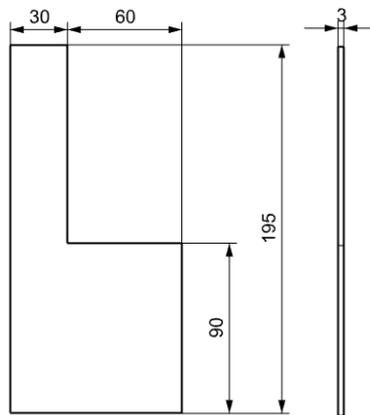


Figura 5-23 Placa colectoras de corriente eléctrica.

Las placas colectoras de corriente son placa metálica normalmente de cobre (en nuestro caso de 3 mm de espesor, Figura 5-23) situadas en los extremos de la pila, que se construye de cobre para garantizar una buena conductividad, resistencia mecánica y no corrosión.

Además, se pueden colocar colectores de corriente en ambos lados de cada membrana, para permitir el flujo de fluidos a través suyo y recoger la corriente generada por la membrana (este papel puede es asumido por las placas colectoras en este caso)

5.5.8 Dimensionado de las tapas

Para cada extremo de la pila de combustible necesita un soporte que asegure el apilamiento de los “stacks”. Estas tapas normalmente alojan tornillos que soportan esfuerzos de la pila o exteriores. Este es el motivo del diseño de las tapas con agujeros. Sirven de flujo de entrada y salida de productos y reactivos que permiten la reacción química. Para el cumplimiento de esta función se mecanizará unos orificios aparte de los agujeros para comunicarse con las placas bipolares. Además se diseña con unas cajeras en su interior para el encaje de las placas de corriente, faciliten el contacto con las placas bipolares y acoger unas juntas tóricas.

El material de la tapa será metacrilato ya que presenta unas series de ventajas como; la resistencia de choque, resistente al aire libre y rayos ultravioleta, a compuesto químicos como butanol, acetona o ácido y es fácil de manejar en cuanto a la fabricación se refiere.

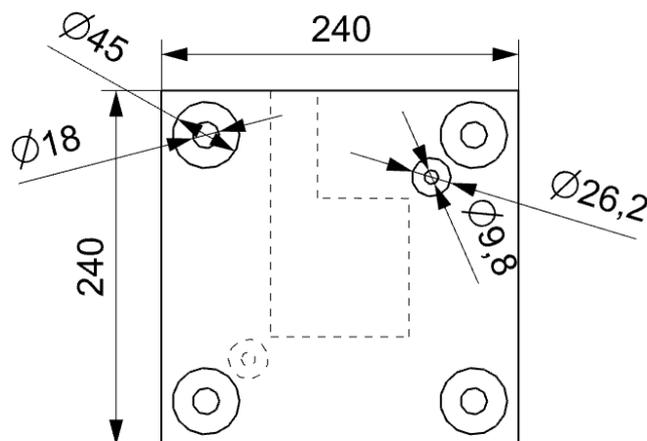


Figura 5-24 Diseño de la cara exterior de la tapa delantera.

En la Figura 5-24, los agujeros de cada una de las esquinas son para los tornillos que unirán la pila aunque se pueden usar varillas o cualquier mecanismo de unión. Los diámetros de 45mm están diseñados para los pasantes de los tornillos y así proporcionar el apriete necesario. El agujero más pequeño de diámetro de 9,8mm permite la entrada del combustible, en este caso hidrógeno, a la pila. Las dos tapas, tanto la delantera como la trasera, tienen una superficie de 240x240mm, que es ligeramente mayor a la superficie de los componentes internos.

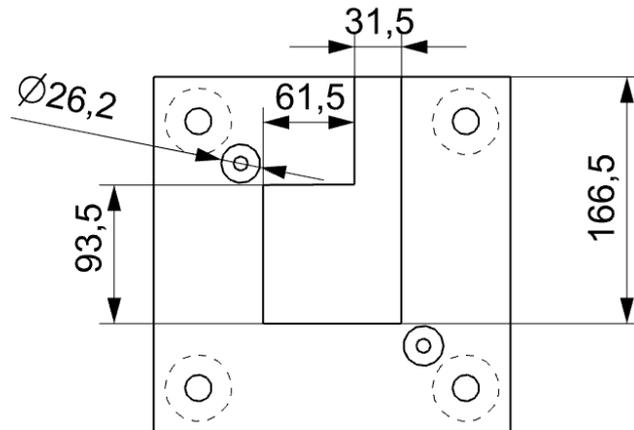


Figura 5-25 Diseño de la cara interior de la tapa delantera.

La cara interior de la tapa delantera (Figura 5-25) alberga una de las placas de corriente cuyas propiedades fueron descritas en el punto 5.5.7. La figura que a continuación se muestra, es una vista en 3D de la tapa delantera desde dos perspectivas diferentes; la cara interior (izquierda) y la cara exterior (derecha).

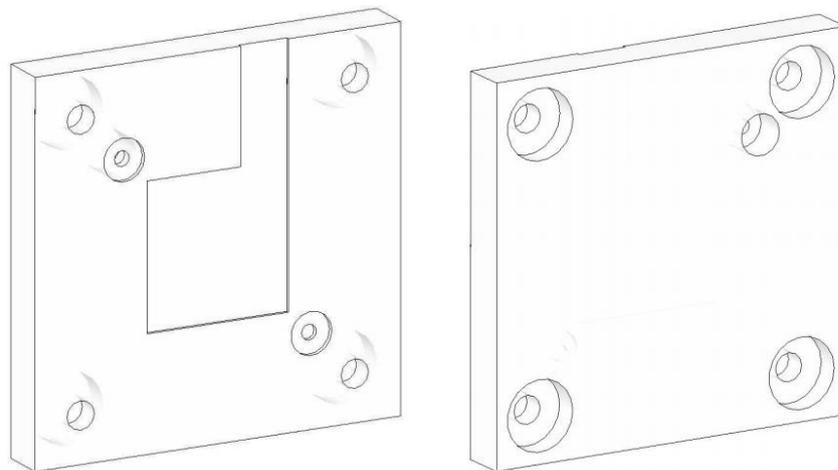


Figura 5-26 Vista isométrica de la tapa delantera de la pila de células de combustible.

La Figura 5-26 es igual a la tapa delantera descrita con anterioridad, con la diferencia de que el agujero de la parte inferior derecha es para el escape de los gases. A continuación, se muestran los diseños de la cara interior (Figura 5-27) y exterior (Figura 5-28) de la tapa trasera de la pila de combustible.

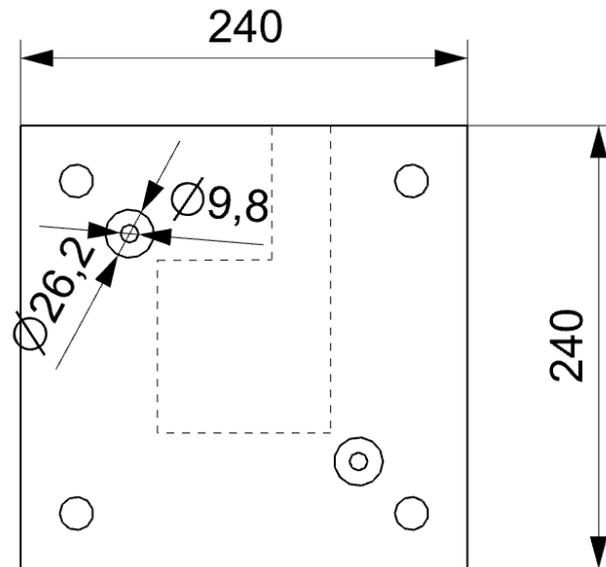


Figura 5-27 Diseño de la cara interior de la tapa trasera.

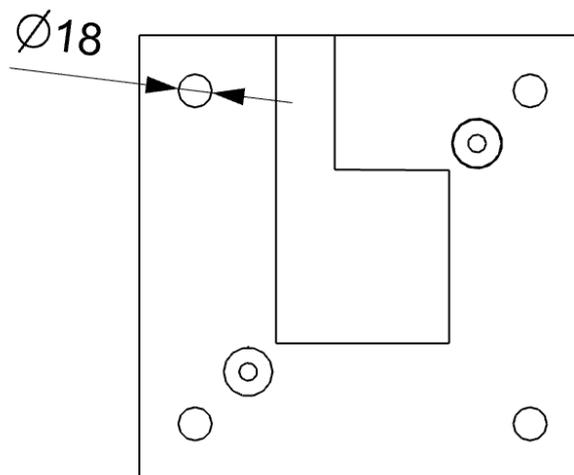


Figura 5-28 Diseño de la cara interior de la tapa trasera.

Esta vez, la Figura 5-29 que a continuación se muestra, es una vista en 3D de la tapa trasera desde dos perspectivas diferentes; la cara interior (izquierda) y la cara exterior (derecha).

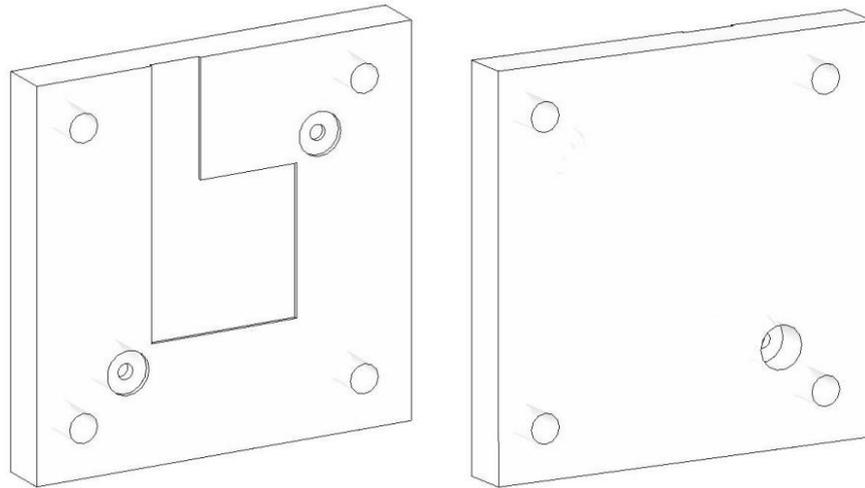


Figura 5-29 Vista isométrica de la tapa trasera de la pila de células de combustible.

5.5.9 Dimensionado de los sistemas de fijación

Ya resuelta el tema de diseño es necesario una serie de elementos que asegurar el correcto funcionamiento de la célula de combustible; desde los electrodos, placas bipolares, MEA hasta las tapas para evitar el desprendimiento de algún reactante o rotura de alguno de los componentes de la pila como exhibe la Figura 5-30:

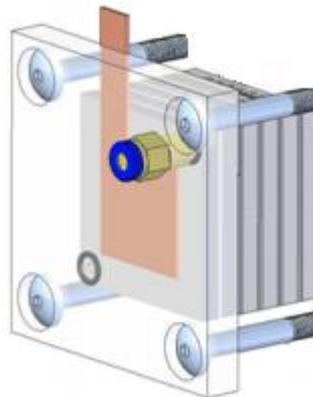


Figura 5-30 Modelo 3D de una celda de la pila de combustible.

5.5.10 Modelo final de la pila de celdas de combustible del UUV

La Figura 5-31 refleja una pila similar a la necesaria para alimentar a un motor eléctrico de 5kW de un vehículo submarino no tripulado. Esta pila de 5kW tiene que estar compuesto por:

- **Celdas en la pila de combustible:** 84 celdas
- **Placas colectoras de corriente:** 2 placas, una en cada extremo.
- **Tapas de la pila:** 2 tapas, una en cada extremo
- **Placas bipolares:** 168 placas bipolares unitarias (solo una cara) o 83 placas bipolares de doble canalización (doble cara) y dos placa bipolares unitarias.
- **Sellos:** 168 sellos.
- **GDL(Capa difusora):** dos capas por cada celda, es decir, 168 capas difusoras
- **MEA:** 84 (cada una con 2 electrodos, 2 catalizadores y una membrana de intercambio protónico)
 - o **Electrodos:** 168 electrodos (84 ánodos y 84 cátodos)
 - o **Electrolito (Membrana de intercambio protónico):** 84 membranas

- **Catalizadores:** Capa pulverizada de 0,4g de Pt en cada electrodo
- **Sistema de fijación:** 4 varillas con sus respectivas tuercas



Figura 5-31 Pila de celdas de combustible de 5kW [55].

5.6 Estudio económico de una pila de 5kW

En este apartado se procederá a analizar el coste total de una pila de combustible tipo PEM para un UUV, en concreto, el ROV Pluto Plus de la Armada Española. Para no generar ninguna duda, este coste total incluirá el precio unitario de cada material de la pila de combustible, sumándole la mano de obra que incluye desde la construcción de la pila hasta los ensayos de comprobación de eficiencia de la pila.

Descripción	Material	Precio Unitario	Unidades	Total
Electrodos con catalizador (ánodo y cátodo)	Tela de carbono con capa de platino (0,4g)	13,5€	84 MEA/45,2€	3.797€
Membrana protónica	PFSA, Nafion	31,7€		
GDL	Papel carbón	35,95€	168	6.040€
Sellos	Silicona	0,3€	168	50,4€
Placas bipolares*	Compuesto de grafito	2,14€	83 DC + 2 UC	182€
Placas colectoras de corriente	Cobre	1,2€	2	2,4€
Tapas	Aluminio	8,06€	2	16,12€
Bridas de sujeción	Acero	1,12€	4 varillas con 4 tuercas	5€
Mano de obra	10€/h		5h/celda	5.000€
Total				15.100€

Tabla 5-5 Coste de fabricación de la pila de celdas de combustible de 5kW [56].

En la tabla anterior, Tabla 5-5, observamos el coste de los materiales necesarios para construir una pila de combustible de 5kW. Aunque parece un precio elevado, siempre se debe pensar en las ventajas

que obtendremos en comparación con el uso único de las baterías de ion litio. El precio total es de **15.000€** aproximadamente ya que se tiene en cuenta desde el diseño hasta su construcción (mano de obra), aunque no es un precio exacto de venta. Eso sí, es una buena estimación del precio real y se puede considerar un buen punto de partida a la hora de considerar la compra de esta pila de 5kW. En cuanto al precio de los materiales, diferenciando con claridad los dos materiales que elevan el precio, las capas difusoras y la membrana protónica. Las capas difusoras situadas a continuación de los electrodos junto a la membrana están hechas de tela de carbono, que permite la conducción de los electrones. Al lado de las capas difusoras se encuentra la membrana protónica o electrólito, formado por un polímero conocido como PFSA o Nafion, es un fluoropolímero constituido por carbón(C) y flúor (F). El Nafion se caracteriza de tener unas propiedades resistentes a cualquier ataque químico, además de ser un material conductor de los cationes e impermeable al agua. Sin embargo, es poco tolerante a las temperaturas de trabajo de las pilas PEM y para ello se le añade algunos materiales como el óxido de silicio para aumentar esa temperatura. En tercero en cabeza de los precios de mayor coste se encuentra los electrodos, que tienen incluidos una capa pulverizada de platino de aproximadamente 0,4g que actúan de catalizador y ayudan a acelerar la reacción química.

5.7 Sistemas auxiliares del diseño del UUV

A todo este coste habría que sumar el precio del tanque de hidrógeno y si se quiere calcular el precio a lo largo de un periodo de tiempo, el coste del hidrógeno que se estima en torno a 9€/kg ya que el consumo por hora del hidrógeno es **0,213kg/hora** [57]. El almacenamiento de hidrógeno solo existe de forma líquida entre 14 K y 20 K, siendo el más volátil de todos salvo el helio. La temperatura de ebullición a una presión en condiciones estándar, es decir 1 atm, es de 20,39 K (-252,76 °C). En la actualidad se trabaja con ciertos sistemas de almacenamiento de hidrógeno viables [58]:

- Tanques de almacenamiento de hidrógeno líquido criogénico.
- Hidruros químicos.
- Materiales en estado sólido:
 - Hidruros metálicos compuestos
 - Nanoestructuras de carbono

En la Tabla 5-6 se muestra las principales ventajas y desventajas de los diferentes sistemas de almacenamiento previamente mencionados:

Método	Ventajas	Inconvenientes
Hidrógeno comprimido	<ul style="list-style-type: none"> - La más experimentada, se puede transportar por carretera, mar, aire y subterráneo a 50 bar en estacionario o 350 a 700 en transporte. 	<ul style="list-style-type: none"> - La compresión del hidrógeno hasta 350bar consume el 20% de la energía contenido en el hidrógeno. - La energía por unidad de volumen en el tanque es menor.
Hidrógeno líquido	<ul style="list-style-type: none"> - Puede almacenar seis veces más que el hidrógeno comprimido a 700 bar. - Es el método más económico para almacenamiento a largo plazo. 	<ul style="list-style-type: none"> - La licuación (enfriamiento a 20K) consume en torno a 30% de la energía contenida en el hidrógeno. - Expone la seguridad en el momento de la evaporación.
Hidruros metálicos y químicos	<ul style="list-style-type: none"> - Más seguro de todos los tipos de almacenamiento. - Mayor almacenamiento de hidrógeno. - Temperatura ideal para pilas PEM. - Se adapta a todo tipo de volumen. 	<ul style="list-style-type: none"> - Es un almacenamiento pesado. - Se puede degradar con el tiempo. - Es una tecnología costosa en la actualidad. - Se necesita suministrar calor la liberación de hidrógeno.
Nanoestructuras de Carbono	<ul style="list-style-type: none"> - Más seguro que el almacenamiento de hidrógeno comprimido y líquido 	<ul style="list-style-type: none"> - Esta tecnología está en desarrollo todavía, los últimos resultados no fueron buenos.

Tabla 5-6 Ventajas y desventajas de los distintos almacenamientos de hidrógeno.

El mejor método de almacenamiento de hidrógeno implantado en los submarinos hasta la fecha es el de hidruros metálicos de la empresa HDW. El UUV que se está estudiando se puede asimilar a un submarino pero de menor potencia y dimensión, motivo por el cual no es recomendable insertar un reformador de bioetanol. El reformador de bioetanol para la obtención de hidrógeno es un sistema costoso que se utiliza para sistemas complejos de gran tamaño y el ROV Pluto Plus tiene un tamaño de 2,25m de largo y 58cm de diámetro.

Es por esto que la mejor opción, teniendo en cuenta la seguridad y fiabilidad dentro del vehículo sumergible no tripulado, es el almacenamiento de **hidrógeno por hidruros metálicos** (Figura 5-32). Estos tanques de hidruros metálicos son ideales para todo tipo de volumen, en nuestro caso sería para un tanque de bajo volumen. A pesar de esto, el precio de la obtención de hidrógeno desde esta opción es muy costoso, por lo que hay que hacer un balance entre la seguridad y precio. Se basa en que ciertos metales sometidos a una presión elevada (mayor que la del hidrógeno), formen enlaces con el hidrógeno para formar hidruros metálicos. No obstante, los tanques de metal-hidruro tienen dos inconvenientes; la necesidad de aportar energía para recuperar el hidrógeno en su estado inicial y la pérdida de hidrógeno al introducir metales disminuyendo su eficiencia a menos del 100%.



Figura 5-32 Tanque de metal hidruro MH7000 de 21kWh [59].

No hay que olvidarse de una parte muy importante en el sistema AIP, el tanque de oxígeno. Este tanque es la esencia de este sistema propulsivo, ya que permite eliminar la dependencia del submarino con el aire exterior. Es la parte menos apreciada debido a su sencillez, pero sin este tanque de almacenamiento de oxígeno nada sería posible. El oxígeno puede ser almacenado en forma de gas o en estado líquido en los tanques criogénicos. El oxígeno líquido (Figura 5-33) o llamado LOX en submarinos, tiene una densidad ligeramente mayor que el agua, 1,149 kg/L con un punto de congelación de 54,36 K y punto de ebullición de 90,19 K a 760mmHg y es almacenado en un tanque de oxígeno criogénico. El sistema se ajusta a las necesidades de un sistema AIP y puede entregar caudales a bajas, altas presiones o una combinación de las dos. Las ventajas del tanque de oxígeno criogénico que lo hacen apropiado a un submarino o un UUV en nuestro caso son:

- Los materiales son compatibles con el oxígeno, con temperaturas criogénicas resistentes a los impactos, vibraciones, movimiento de la plataforma, salinidad y fuego que puede verse expuesto a estos riesgos en operaciones militares.
- Seguridad a la hora de trabajar con el oxígeno líquido en cualquier entorno marino.
- Proporciona una calidad elevada de oxígeno para la tecnología basada en pilas de combustible y en caso de submarinos tripulados, para la dotación.



Figura 5-33 Tanque criogénico de oxígeno [60].

Estos dos tanques son culpables de que se produzca la reacción, siendo necesario un flujo continuo de ambos. Pueden ser suministrados por un compresor o un ventilador. Este último se suele usar en sistemas abiertos cuando se trabaja a temperatura ambiente. En cuanto los compresores, proporcionan

una autonomía y flexibilidad al sistema que permite un control preciso de las presiones con las que se trabaja. Normalmente, los compresores están conectados a la pila de celdas de combustible, y suelen trabajar con compuestos puros para obtener la mejor eficiencia posible.

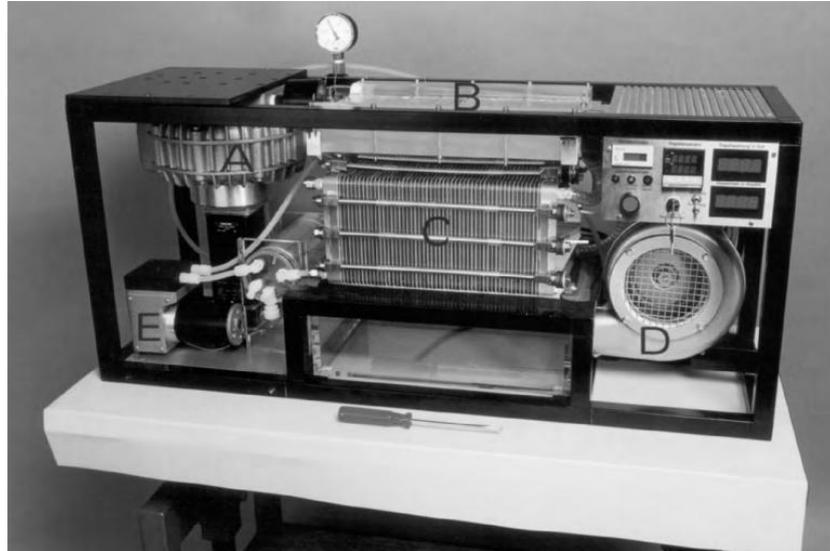


Figura 5-34 Sistema auxiliar de una pila de combustible [58].

En la Figura 5-34 se muestran los equipos auxiliares de una pila de celdas de combustible a excepción de los tanques de hidrógeno y oxígeno. Las diferentes letras (A-E) que aparecen reflejadas en la imagen son:

- A. Bomba de oxígeno que proviene del aire exterior o del tanque de oxígeno.
- B. Humidificador para hidratar la membrana y fomentar la circulación protónica.
- C. Pila de celdas de combustible o “Stack”.
- D. Bomba para el movimiento de hidrógeno.
- E. Bomba de hidrógeno que proviene de una fuente exterior, normalmente un tanque.

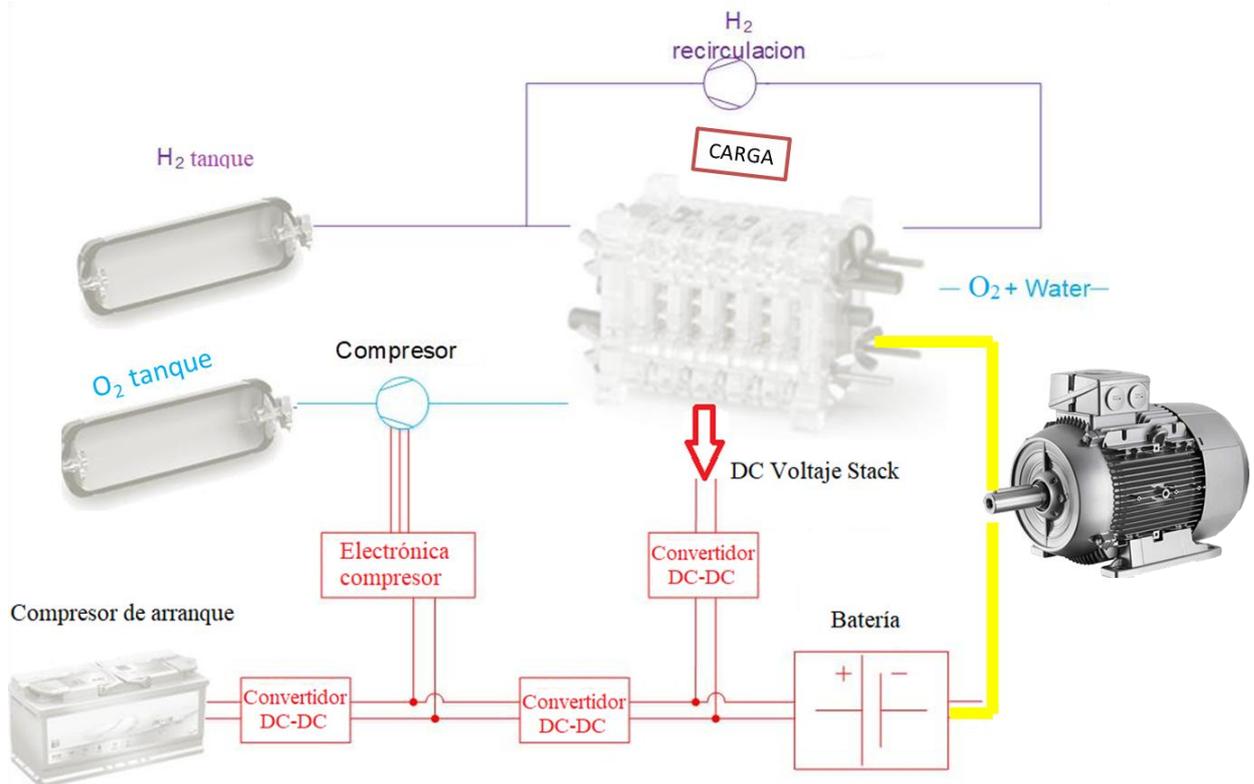


Figura 5-35 Sistema de pila de combustible del UUV.

La Figura 5-35 muestra el sistema de la pila de combustible completa diseñada para el “Pluto Plus”. Existen formas para mejorar este sistema, con una reducción en su coste y mejora de eficiencia. Una de estas formas es utilizando un compresor adecuado. Un compresor puede suponer entre un 10% a 20% de la energía producida por la pila, por lo que hay que saber cual elegir [61]. Lo que está claro es una cosa, “antes de enfrentarte a una situación, hay que hacer un estudio a la perfección”.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 Cumplimiento de objetivo

Teniendo en consideración todo lo que se ha pretendido exponer, así como, explicar en este trabajo, se puede afirmar con cierta objetividad que los objetivos que inicialmente se plantearon han sido cubiertos con satisfacción.

Por un lado, se ha mostrado la situación tecnológica del sistema AIP en la actualidad, sus ventajas, desventajas, capacidades en otros escenarios diferentes y sus limitaciones, así como los proyectos que se están desarrollando a nivel nacional e internacional.

Por otro, se ha expuesto un análisis del sistema AIP que se pretende implantar en el proyecto S-80, como una “**solución energética**” del futuro ya que combinan los recursos más ventajosos para solucionar el creciente problema de contaminación del medioambiente que tanto nos preocupa.

Cabe indicar que esta solución innovadora podrá situar a España entre uno de los países europeos con mayor potencial en este área. Para ello, se ha estudiado el **crucial futuro del sector de la biomasa** y la gran capacidad que tiene España en la producción del bioetanol. Todo ello, con el fin de lograr una reducción de dependencia de los combustibles.

Una vez establecido el papel del bioetanol en España, se estudia las aplicaciones que tiene este biocombustible en forma de hidrógeno para el abastecimiento de las pilas de combustible en sectores navales, aeroespaciales, transporte o producción de energía eléctrica por medio de plantas de hidrógeno.

Por último, se propone un **diseño básico de una pila de combustible** de un vehículo submarino no tripulado (UUV) como referencia alternativa de posibles sistemas no tripulados de la Armada Española.

Con todo esto, se ha pretendido proporcionar una visión global sobre el sistema AIP y su posible uso como alternativa energética, que sirva de precursor para futuros estudios y desarrollos de este sistema para su posible integración en diferentes escenarios energéticos, ubicando a la Armada Española y a España como máximos exponentes.

6.2 Conclusiones y líneas futuras

6.2.1 *Relativas al empleo del sistema AIP en plataformas navales*

La Industria Naval Militar Española y, por tanto, nuestra Industria Nacional, se encuentra ante uno de los mayores retos en los últimos años que no es más que el diseño y construcción de submarino propio (S-80) que debido a sus características y prestaciones será revolucionario. Una de estas características será el empleo del sistema AIP.

La viabilidad y consecución de este sistema AIP en el S-80 como una fuente de energía alternativa, tiene como principio el alimentar una pila de combustible de tipo PEM por el hidrógeno producido a bordo proveniente de reformar bioetanol y del oxígeno almacenado en el tanque LOX. Esta peculiaridad, es decir, el producir el hidrogeno a bordo diferencia al S-80 de otras plataformas en donde el hidrógeno se almacena en el exterior con las desventajas que ello implica.

El sistema AIP situará al S-80 entre uno de los submarinos más silenciosos, con la enorme ventaja que ello significa para el combate. Esta importante ventaja pondrá a España a la vanguardia entre las armas submarinas del mundo, además de suponer un gran prestigio en el ámbito de la construcción naval en la figura de Navantia.

La utilización de sistemas basado en el AIP se mostrará útil no solo para el ámbito del arma submarina, sino en otras plataformas. Así, en este Trabajo de Fin de Grado se ha propuesto un sistema AIP, por lo tanto, un sistema sostenible, para un vehículo submarino no tripulado. En concreto, se ha mostrado un estudio CAD y económico de una pila de celdas de combustible o “stack” compuesto por 84 celdas y voltaje nominal 50V, que alimenta un motor eléctrico de 5kW de un UUV que podría tener utilidad en nuestra Armada Española. Este diseño básico es un ejemplo de otra posible integración de este tipo de sistema en el ámbito militar y las cuantiosas ventajas que pueden llevar consigo.

6.2.2 *Relativas al empleo de la biomasa*

El desarrollo de este sistema AIP dispone del potencial suficiente, no solo en relación con los cometidos que incumben a los sistemas o plataformas militares, sino también en el futuro tecnológico en otras áreas o campos de investigación. Esta visión de futuro conjunta permite dar un paso decidido al frente para intentar reducir la dependencia de los combustibles fósiles y otras fuentes contaminantes que en la actualidad supone el 80% de la energía mundial. Es aquí en donde el empleo de la biomasa por medio de una pila de combustible jugará un papel importante.

Existen numerosas formas de obtención de bioetanol y su vez de hidrógeno, todas ellas de fácil producción y almacenamiento. España está entre las primeras naciones del mundo y tercera de Europa en la producción de bioetanol con las ventajas que ello puede reportar en el ámbito naval, sino también en el civil como puede ser el sector automovilístico, transporte terrestre y marítimo, sector de la vivienda, centrales térmicas, en resumidas cuentas, dentro del amplio espectro que conforma nuestra vida cotidiana.

Aunque España sea uno de los mayores productores de bioetanol sigue siendo éste un gran desconocido en nuestra nación aún queda mucho “por andar” para extender su empleo. Por ello, es necesario concienciar sobre la importancia del empleo y ventajas de este tipo de energía alternativa. Existen diversas formas e iniciativas para favorecer su empleo, incitativas que podrían ir desde una mayor inversión en I+D+i, disminución de tasas fiscales en diferentes sectores o bien la aplicación de diversas subvenciones.

6.2.3 Conclusión final

Nuestra Industria Naval Militar, España, mediante el desarrollo del peculiar Sistema AIP de los nuevos submarinos S-80 hace que todos seamos unos testigos privilegiados de un salto cualitativo tecnológico de enorme envergadura, inicialmente circunscrito al ámbito submarino, pero abierto su empleo a otros ámbitos no solo militares, sino también civiles. El que seamos, por un lado, dueños de esta novedosa tecnología AIP, y por otro, España uno de los primeros productores de biomasa, lo permiten, no debemos dejar de aprovechar esta ocasión.

Tal como se mencionó al principio de este trabajo TFG, concretamente en la introducción y motivación: “toda historia tiene su prehistoria y no es más que aquella que vivieron nuestros antepasados que, gracias a sus conocimientos, imaginación, ilusión, sacrificio, altruismo y que, en no pocas ocasiones, arriesgaron su propia fortuna”,.... quizá es el momento que hagamos prehistoria pensando en las generaciones venideras.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Los 10 primeros submarino de la historia,» *Revista del Sector marítimo*, 17 Agosto 2012.
- [2] A. R. R. González, «Precusores de arma submarina española,» *Revista general de la Armada*, pp. 13-18.
- [3] A. Á. Usábel, «Nocturnos cantos ruanos,» Nocturnos cantos ruanos, 12 Septiembre 2013. [En línea]. Available: www.nocturnoscantosruanos_blogspot.com/2013/09/?m=1. [Último acceso: 25 Febrero 2019].
- [4] J. A. Crespo-Francés, «Isaac Peral, patriota y leal, pero denigrado y olvidado,» *El espía digital*, 2015.
- [5] «Suecia inica la construcción de su segundo submarino saab kockums A26,» 08 Julio 2014.
- [6] F. V. Andreu, «Facultad de Náutica de Barcelona,» Marzo 2014. [En línea]. [Último acceso: 25 Febrero 2019].
- [7] C. Puig-Pla and A. R. Rosell, “Narcís Monturiol (1819–1885), pioneer of submarine navigations,” *Reserach Gate*, 2009.
- [8] F. J. Á. Laita y M. L. M. Arnáiz, «Propulsión anaerobia en submarinos, estado de la cuestión,» *infodefensa.com*, 09 Diciembre 2009.
- [9] N. A. Fontela y P. Á. Llana, «Funcionamiento AIP S-80,» Armada Española, 2018.
- [10] “saab.com,” Saab group, [Online]. Available: <https://saab.com/naval/submarines-and-surface-ships/submarines/submarines/>. [Accessed 18 Febrero 2019].
- [11] N. A. Fontenla y P. Á. Llana, «Funcionamiento AIP,» Armada Española, 2018.
- [12] G. Walker, “A Stirling engine is a mechanical device which operates on a *closed* regenerative thermodynamic cycle, with cyclic compression and expansion of the working fluid at different temperature levels,” Oxford, 1980.
- [13] “DCNS group,” [Online]. Available: <http://www.dcnsgroup.com/files/pdf/Mesma.pdf>.

- [Accessed 5 Febrero 2019].
- [14] J. M. T. Ruiz, «Los submarinos del siglo XXI,» *Revista general de Marina*, Diciembre 2018.
- [15] S. Thomas and M. Zalbowitz, “Fuel Cells- Green Power,” [Online]. Available: <http://www.dartmouth.edu/~cushman/courses/engs171/FuelCells-article.pdf>. [Accessed 1 Marzo 2019].
- [16] L. P. Moreno, *Producción de hidrógeno mediante reacciones de reformado*, Zaragoza: Tesis de la Universidad de Zaragoza, 2012.
- [17] «Aprovechamiento de recursos energético renovables no integrables en la red eléctrica,» Sevilla, 2009.
- [18] L.-M. Corredor-Rojas, «www.Scielo.org.co,» *Ingeniería y Universidad*, 23 Septiembre 2011. [En línea]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-21262012000100014. [Último acceso: 18 Febrero 2019].
- [19] F. C. B. T. Types, «<http://www.fuelcelltoday.com>,» [En línea]. Available: http://www.fuelcelltoday.com/media/1637138/fc_basics_technology_types.pdf. [Último acceso: 27 Febrero 2019].
- [20] Y. Shao, J. Liu, Y. Wang and Y. Lin, “PEM fuel cells: current status and future prospects,» *ResearchGate*, pp. 4-15, 2008.
- [21] J. A. Cano, *Diseño y Fabricación de una Pila de Combustible de Hidrógeno de Baja Potencia*, Cataluña: Universitat Politècnica de Catalunya, 2003.
- [22] L. G. Nuñez, «<https://pilascombustible.wordpress.com>,» Julio 2014. [En línea]. Available: <https://pilascombustible.wordpress.com/profundizando/eficiencia/>. [Último acceso: 26 Enero 2019].
- [23] A. I. C. Romero, *Pilas de combustible en el sector aeronáutico*, 2011.
- [24] P. S. Sobrini y V. M. Vélez-Bracho, «Sistema de pila de combustible de carbonatos fundidos para abastecer las necesidades de edificios y distritos,» *Construible*, 2014.
- [25] «Divulga H2,» Julio 2017. [En línea]. Available: <https://divulgah2.es/aprende-sobre/pilas-de-combustible/>. [Último acceso: 20 Enero 2019].
- [26] F. Barreras y A. Lozano, «Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM,» 2018.
- [27] Ebasl, Ed. «La biomasa: producir energía con un sistema ecológico».
- [28] «bgreenproject,» 7 Mayo 2013. [En línea]. Available: <https://bgreenproject.wordpress.com/2013/05/07/biomasa-conversion-en-energia-y-sistemas-de-aprovechamiento/>. [Último acceso: 12 Enero 2019].
- [29] E. M. M. Santos, «Laboratorio de energías renovables, pilas de combustible de hidrógeno,» Madrid, 2017.
- [30] «Abengoa,» 2006. [En línea]. Available: http://www.abengoa.es/export/sites/abengoa_corp/resources/pdf/gobierno_corporativo/informes_anuales/2006/2006_Tomo1_IA_Bioener

- gia.pdf. [Último acceso: 8 Enero 2019].
- [31] D. Morán, «El sector del bioetanol en España según el USDA FAS,» [En línea]. [Último acceso: 14 Febrero 2019].
- [32] «Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España,» Abril 2000. [En línea]. Available: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FISQ/Ficheros/0a100/nspn0057.pdf>. [Último acceso: 6 Febrero 2019].
- [33] ¿Sabe cuál es la diferencia entre etanol y metanol?, mguaman, ueves 26 de Octubre de 2017.
- [34] R. Martínez, «Ficha de datos de seguridad (FDS) del Metanol (Alcohol Metílico),» RAMS-MARTINEZ, S.L. (T3 QUÍMICA), 2007.
- [35] K. y. Rudd, «Métodos para la identificación de riesgos químicos,» 2001. [En línea]. Available:http://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta22/guiatec/Metodos_cualitativos/cuali_215.htm. [Último acceso: 18 Febrero 2019].
- [36] “Ethanol market and pricing data,” U.S grains council, 2018.
- [37] F. J. Á. Laita, pp. 18-20, 2010.
- [38] «Submarinos: Defensa prevé invertir 1.500 millones adicionales para el nuevo S-80,» ABC, 2 Enero 2018.
- [39] «Armada española,» 7 Marzo 2018. [En línea]. Available: <http://www.armada.mde.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/buquessubmarinos/pr efLang-es/02s80--02fichatecnica-es>. [Último acceso: 11 Enero 2019].
- [40] J. M. N. García, «El S-81 recibe su motor eléctrico principal,» *defensa.com*, 2018.
- [41] «<https://www.navantia.es>,» Navantia, [En línea]. Available: <https://www.navantia.es/ckfinder/userfiles/files/SUBMARINO%20S-80%20ESP%2003112011%20baja.pdf>. [Último acceso: 28 Enero 2019].
- [42] A. C. d. I. Ríos, «El mercado de submarinos y la oportunidad de Navantia,» *Instituto Español de Estudios Estratégicos*, 2019.
- [43] D. A. Mesa, «El snorkel,» 14 Diciembre 2009. [En línea]. Available: elsnorkel.com. [Último acceso: 2019 Enero 18].
- [44] A. Otero, «Coches de hidrógeno: así funciona esta tecnología de cero emisiones contaminantes,» *Motor pasión*, 18 Febrero 2018.
- [45] J. C. Rodríguez, *Estudio de requisitos y posibles aplicaciones de vehículos marinos no tripulados para la Armada Española.*, Marín: Universidad de Vigo, 2018.
- [46] J. S. García, «Los cazaminas de clase Segura,» 2003.
- [47] Á. D. Sabater, *Cálculo y adaptación de un Vehículo Autónomo Submarino para el incremento de su capacidad operacional en visión artificial*, Universidad Politécnica de Cartagena, 2014.
- [48] M. A. D. Pérez, *Influencia del CO2 alimentado en la corriente de combustible en pilas de*

- combustible tipo PEM de baja y alta temperatura*, Universidad de Huelva, 2015.
- [49] C. Y, E. O. and M. D, “A Review of Computational Fluid Dynamics Simulations on PEFC Performance,” *Journal of Applied Mechanical Engineering*, 2016.
- [50] E. M. Martín, D. M. Guinea, E. Chinarro and D. Guinea, *Durability of own design PEM Fuel Cells*, Oporto, 2017.
- [51] A. M. Aguirre, *Descripción y Modelado de una Pila de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico*, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [52] C. Kunusch and F. Barbir, *PEM Fuel Cell Systems*, Academic Press, 2012.
- [53] B. Moreno, E.M.Martín, M.C.García-Alegre, D.Guinea y E.Chinarro, *Post-mortem characterization of MEAs after different failure modes*, Zaragoza, 2016.
- [54] D. P. Wilkinson, “Bipolar Plates for PEM Fuel Cells,” *Industrial Machinery*, 27 Enero 2005.
- [55] «Direct Industry,» [En línea]. Available: <http://www.directindustry.es>. [Último acceso: 22 Enero 2019].
- [56] P. K. J. S. S. Y. Y. E.J. Carlson, “Cost Analysis of PEM Fuel Cell Systems for Transportation,” National Renewable Energy Laboratory, Cambridge, Massachusetts, 2005.
- [57] E.Martín, B.Moreno, E.Chinarro, M.C.García-Alegre and D.Guinea., *Electrolysis assisted by organic compounds on hydrogen production at room temperature*, Zaragoza, 2016.
- [58] J. Larminie and A. Dicks, “Fuel Cell Systems Explained,” Oxford Brookes University, UK, Wiley.
- [59] “Pragma industries, the fuel cell company,” [Online]. Available: <https://www.pragma-industries.com/products/hydrogen-storage/>.
- [60] M. D. Mane, “Indiamart,” IndiaMART , [Online]. Available: <https://www.indiamart.com/proddetail/low-pressure-dura-cylinders-for-liquid-nitrogen-7116485433.html>. [Accessed 3 Febrero 2019].
- [61] D. C. Zwysig, “Energy saving potential with oil-free turbo compressors in fuel cell systems,” *Celeroton*, 6 Noviembre 2017.