



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Producción de hidrógeno verde mediante un aerogenerador
offshore y electrólisis de agua de mar*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Sergio Nieto Díaz-Robles

DIRECTORES: Víctor Ángel Alfonsín Pérez

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Producción de hidrógeno verde mediante un aerogenerador
offshore y electrólisis de agua de mar*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El panorama energético actual evidencia la necesidad de buscar nuevos combustibles que permitan abandonar los combustibles fósiles en favor de otros vectores energéticos con un menor impacto ambiental, sean baratos y universalmente accesible. Bajo esta circunstancia, el hidrógeno generado a través de energías renovables se presenta como una de las opciones más prometedoras para sustituir a los hidrocarburos en la mayoría de sus aplicaciones. Sin embargo, la producción de hidrógeno mediante electrólisis requiere de un elevado consumo de agua y electricidad, por lo que sustituir el actual consumo de combustibles fósiles con hidrógeno requeriría un consumo de energía y agua muy elevados dada la escasez de este último recurso en muchas partes del mundo. Como respuesta a este problema, el presente Trabajo de Fin de Grado propone un modelo de producción de hidrógeno basado en el empleo de energía eólica producida mediante aerogenerador *Offshore* y agua de mar destilada. El objetivo fundamental de este proyecto es desarrollar un modelo mediante software *Matlab Simulink*® con el que poder simular el comportamiento de dicha planta y estudiar la producción de hidrógeno que podría conseguirse, además de estudiar los efectos de emplear aerogeneradores con distintas características. El desarrollo de este tipo de plantas productoras de hidrógeno contribuiría a aumentar la producción de este combustible en el continente mediante su transporte a través de redes de gaseoductos para su empleo en tierra, pero también permitiría nuevas formas de aprovisionar de combustible lugares remotos como islas y archipiélagos o incluso para abastecer a buques de combustible en alta mar.

PALABRAS CLAVE

Hidrógeno verde, eólica marina, electrólisis, nuevos combustibles, energías renovables

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, gracias a mis padres, a mi hermana y a toda mi familia, por haber apoyado siempre para llegar hasta aquí. Gracias también al profesor Alfonsín, mi tutor, sin cuyo trabajo no habría sido posible llevar a cabo este proyecto y a todo el personal docente del CUD y la Escuela Naval Militar por haberme proporcionado, a lo largo de estos cinco años, la formación que ahora culmino.

Gracias, especialmente, a la promoción 423-153. Sin ellos, estoy seguro, nunca habría llegado hasta aquí, por eso me considero inmensamente afortunado de haber podido compartir estos años con unos compañeros a los que admiro y con los que espero compartir muchos años más.

Gracias también a mis amigos, civiles y militares, por su amistad incondicional. Sobre todo a Andrea, que ha sido mi apoyo incondicional en los momentos menos dulces de este proyecto.

A todos ellos, de corazón, muchas gracias

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y Objetivos	6
1.1 Introducción y motivación	6
1.2 Objetivos	8
2 Estado del Arte	10
2.1 Los combustibles tradicionales ante los retos del siglo XXI	10
2.1.1 El desafío climático	10
2.1.2 El mercado mundial de combustibles fósiles.....	12
2.2 Los nuevos combustibles	13
2.2.1 La Unión Europea.....	14
2.2.1.1 Esfuerzos de la UE para reducir su dependencia energética	14
2.2.1.2 Energía y el Pacto Verde	15
2.2.2 España.....	15
2.2.2.1 Hoja de Ruta del Hidrógeno	16
2.2.3 El Ministerio de Defensa	16
2.3 El Hidrógeno como combustible del futuro.....	17
2.3.1 La Producción de Hidrógeno	17
2.3.2 Transporte y almacenamiento.....	20
2.3.3 Aplicaciones del Hidrógeno	22
2.4 La energía eólica	25
2.4.1 La energía eólica para la producción de hidrógeno	25
2.4.2 La eólica marina	26
2.4.3 Situación actual de la energía eólica.....	31
3 Desarrollo del TFG.....	33
3.1 Generalidades.....	33
3.2 Software	33
3.3 Datos de viento.....	34
3.4 Modelado del aerogenerador.....	35
3.4.1 Obtención de los datos.....	35
3.4.2 Ajuste lineal en Matlab.....	36
3.4.3 Modelado en Simulink.....	37

3.5 Modelado del electrolizador.....	38
3.5.1 Base teórica del modelo.....	38
3.5.2 Parámetros del electrolizador	39
3.5.3 Adaptación en Simulink	40
3.6 Modelado de la planta de destilación	43
3.6.1 Modelo en DWSIM	43
3.6.2 Adaptación a Simulink	46
3.7 Modelo conjunto	47
3.7.1 Diseño del modelo global	47
3.7.2 Lógica de control	48
4 Validación del Modelo y Prueba	51
4.1 Introducción	51
4.2 Aerodyn Engineering SCD 8.0-168	51
4.3 Siemens Gamesa SG 8.0-167.....	53
4.4 Vestas V164/9500.....	56
4.5 Vestas V112	58
5 Conclusiones y Líneas Futuras	61
5.1 Conclusiones	61
5.2 Líneas Futuras	62
6 Bibliografía.....	63
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	67
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Esquema del sistema propuesto para la producción de hidrógeno. Fuente: autoría propia.	7
Figura 1-2 Proyecto de buque comercial Energy Observer 2, propulsado por hidrógeno. Fuente [1].	8
Figura 2-1 Emisiones de CO desde el periodo preindustrial hasta la actualidad. Fuente [4].	10
Figura 2-2 Previsión de la evolución de la temperatura en la superficie terrestre para el siglo XXI. Fuente: [4].	11
Figura 2-3 Motivos por los que la población encuestada considera necesario abandonar los combustibles fósiles. Fuente: [10].	13
Figura 2-4 Portada de las distintas publicaciones referentes al hidrógeno la UE, Gobierno de España y MINISDEF. Fuente: [12] [13] [14].	14
Figura 2-5 Esquema del proceso de electrólisis en medio ácido. Fuente: [24].	19
Figura 2-6 Esquema de funcionamiento de una celda de combustible. Fuente: [24].	23
Figura 2-7 Esquema de una planta de producción de hidrógeno a partir de energías renovables. Fuente: [32].	26
Figura 2-8 Partes de un aerogenerador. Fuente: [35].	27
Figura 2-9 Tipos de bujes. Fuente: [34].	28
Figura 2-10 Esquema de las tres cimentaciones flotantes: semi sumergible, <i>tension leg platform</i> y SPAR. Fuente: [37].	29
Figura 2-11 Bases de tipo monopilote, base de succión y gravedad. Fuente: [37].	30
Figura 2-12 Esquema de tres tipos de cimentaciones para aerogeneradores: Jackets, Tripods y Tripiles. Fuente: [37].	31
Figura 2-13 Ejemplo de generación de energía en tiempo real para el día 18 de marzo de 2023 a 15:00. Fuente: [38].	32
Figura 3-1 Ejemplo de curva de potencia para un aerogenerador marino. Fuente: [43].	35
Figura 3-2 Ejemplo de curva de potencia proporcionada por The Wind Power. Fuente: [44].	35
Figura 3-3 Interfaz de la aplicación Web Plot Digitalizaer. Fuente: [45].	36
Figura 3-4 Interfaz de la aplicación Matlab Curve Fitter. Fuente: [40].	36
Figura 3-5 Ejemplo de código de Matlab Function para el modelado de un aerogenerador. Fuente: Autoría propia.	37
Figura 3-6 Modelo de uno de los aerogeneradores en <i>Matlab Simulink</i> ®. Fuente: Autoría propia.	38
Figura 3-7 Esquema de componentes de un electrolizador bipolar. Fuente: [46].	39
Figura 3-8 Esquema del modelo del electrolizador en <i>Matlab Simulink</i> ®. Fuente: Autoría propia.	40
Figura 3-9 Detalle de la sección 1 del modelo del electrolizador. Fuente: Autoría propia.	40
Figura 3-10 Detalle de la sección 2 del modelo. Fuente: Autoría propia.	41
Figura 3-11 Detalle de la sección 3 del modelo. Fuente: Autoría propia.	42
Figura 3-12 Detalle de la sección 4 del modelo. Fuente: Autoría propia.	42

Figura 3-13 Modelo de planta destiladora creado en DWSIM. Fuente: Autoría propia.	44
Figura 3-14 sección de la planta destiladora que comprende flujo inicial, bomba de baja y filtro triple. Fuente: autoría propia.	44
Figura 3-15 Sección del modelo que comprende las bombas de alta presión, el evaporador, el separador y el intercambiador. Fuente: autoría propia.	45
Figura 3-16 Visión del modelo conjunto con todos los elementos. Fuente: Autoría propia.	47
Figura 3-17 Lógica de control empleada para el modelo conjunto.	49
Figura 3-18 Lógica de control empleada para la planta destiladora. Fuente: elaboración propia.	50
Figura 4-1 Imagen del Aerodyn Engineering SCD 8.0 - 168.	52
Figura 4-2 Curva de potencia para el SCD 8.0 – 168. Fuente: autoría propia.	52
Figura 4-3 Imagen del aerogenerador SG 8.0-167. Fuente: [41]	54
Figura 4-4 curva de potencia del aerogenerador Siemens Gamesa 8.0-167.	54
Figura 4-5 Imagen del aerogenerador Vestas V164/9500. Fuente: [42].	56
Figura 4-6 Curva de potencia de Vestas V164/9500.	56
Figura 4-7 Vestas V112 instalado en un campo eólico terrestre. Fuente: [42].	58
Figura 4-8 Curva de potencia del Vestas V112.	58
Figura 4-9 Gráfica comparativa que muestra la producción anual de los distintos generadores. Fuente: elaboración propia.	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros de la corriente de agua. Fuente: Autoría propia.	45
Tabla 2 Potencia consumida por la planta destiladora en función de los módulos encendidos	46
Tabla 3. Potencia total necesaria para encender la secuencia de los módulos.	48
Tabla 4 Relación de aerogeneradores modelados en el sistema.	51
Tabla 5 Resultados de la simulación para el Aerodyn Engineering SCD 8.0-168. Fuente: autoría propia.	53
Tabla 6 Resultados de la simulación para el aerogenerador SG 8.0-167. Fuente: autoría propia.	55
Tabla 7 Resultados de la simulación para Vestas V164/9500.	57
Tabla 8 Resultados de la simulación para Vestas V112.	59

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción y motivación

Desde la primera revolución industrial, aunque posiblemente también antes, el desarrollo humano se ha sostenido en la quema de combustibles fósiles para generar energía. Con el carbón mineral primero y con el petróleo y el gas natural después, el ser humano ha podido desarrollar energía y maquinaria con los que construir la sociedad tan tecnológicamente avanzada en la que vivimos actualmente. Sin embargo, doscientos años después, todo parece indicar que será necesario recurrir a fuentes energéticas alternativas. Existen diversos motivos con los que justificar esta decisión, como la baja eficiencia de estos combustibles o la variabilidad de su precio, pero el que impera por encima de todos es el medioambiental. La quema de estos combustibles para generar energía produce millones de toneladas de gases de efecto invernadero que se emiten a la atmósfera anualmente. Si bien los efectos que producen estos gases han sido motivo de controversia durante varias décadas, parece ya innegable que estos gases alteran gravemente el comportamiento de la atmósfera terrestre, provocando cambios extremos en el clima y un calentamiento progresivo de la atmósfera terrestre. Estas variaciones en el equilibrio natural de la atmósfera tienen consecuencias de distinta gravedad y entidad, pero en cualquier caso tendrá, y tiene ya, una repercusión negativa a nivel global.

Al mismo tiempo, existen otra serie de motivos que también invitan a considerar el abandono de los hidrocarburos. La dependencia de los productos petrolíferos y su relevancia en la economía dibuja un escenario de poder internacional desigual y una economía inestable muy afectada por el precio de estos productos. La presión rusa sobre Europa durante la invasión de Ucrania, las intervenciones militares destinadas a mantener el flujo de petróleo en Oriente Medio o las crisis del petróleo de 1973 y 1979 son buenas muestras de la debilidad que el empleo de este combustible supone para los países importadores de petróleo.

En consecuencia, gobiernos e instituciones están aumentando progresivamente su apoyo al desarrollo de nuevos modelos energéticos basados en combustibles sostenibles. En este aspecto, el hidrógeno es una de las posibilidades más prometedoras para sustituir a los combustibles tradicionales, tanto en el ámbito de la producción energética como en su uso industrial y de transporte, puesto que su empleo como combustible da como resultado únicamente oxígeno y vapor de agua. A diferencia de los combustibles derivados del petróleo, el hidrógeno puede producirse mediante electrólisis empleando para ello únicamente agua y energía. Por lo tanto, es un combustible accesible y fácil de generar, si bien es cierto que no es una fuente de energía en sí misma, sino que almacena la energía empleada para producirlo hasta que vuelva a obtenerse al emplear el hidrógeno en una celda de combustible o en un motor de hidrógeno. No obstante, nos permite almacenar y emplear una energía que de otra forma se desperdiciaría, como el excedente de producción eléctrica de las energías renovables cuando la

producción supera a la demanda energética. Además, también nos permite emplear la energía de formas más adecuadas; por ejemplo, empleándolo como combustible para vehículos que garanticen más autonomía que los coches eléctricos y sin necesidad de esperar para realizar recargas.

Sin embargo, como ya se ha mencionado, generar hidrógeno requiere energía y agua. Si bien son recursos que pueden obtenerse en prácticamente cualquier lugar del mundo y por cualquier nación, lo cierto es que son recursos con ciertas limitaciones. En primer lugar, para garantizar que no se producen emisiones de gases contaminantes, la energía para generar el hidrógeno debe provenir de fuentes de energía limpias como la eólica, la solar o la hidráulica, con lo que el hidrógeno producido se denomina *hidrógeno verde*. Por otro lado, se requiere una gran cantidad de agua para poder sostener la inmensa producción de hidrógeno que sería necesaria para sustituir al consumo de combustibles fósiles. Para que pueda emplearse en la producción de hidrógeno, el agua debe estar libre de impurezas y de sal, con lo que hasta el momento se ha recurrido a fuentes de agua dulce. En consecuencia, sustituir los hidrocarburos por hidrógeno requeriría emplear grandes volúmenes de agua dulce para la producción de hidrógeno, la cual es ya un recurso escaso en buena parte del mundo.

Tratando de dar solución a estos problemas, el presente Trabajo de Fin de Grado propone un modelo de producción de hidrógeno basado en el empleo de energía eólica offshore para la producción de hidrógeno verde mediante el uso de agua de mar destilada. De esta forma, la energía eléctrica generada a través del generador eólico marino se emplea para alimentar una serie de electrolizadores alcalinos para producir el hidrógeno y una planta destiladora con la que obtener agua apta para el proceso de electrólisis a partir del agua de mar.

La energía eólica *offshore* es un fuente de energía renovable que se encuentra en plena expansión. Actualmente, la eólica terrestre constituye una tecnología fiable y de empleo habitual en buena parte del mundo. Sin embargo, la eólica marina ofrece ciertas ventajas sobre su equivalente terrestre que actualmente la convierten una opción muy atractiva: menores efectos sobre la población, mayores potencias, generación más constante y mejor aprovechamiento del viento por la ausencia de barreras geográficas. Pese a que acarrea otros problemas, como la corrosión o la dificultad de construir sobre el lecho marino, actualmente es un sector energético en auge y el número de proyectos de este tipo, tanto en España como en Europa y el mundo, está en aumento. Es por ello que la posibilidad de poder emplear esta fuente de energía para la producción de hidrógeno se presenta como una opción prometedora para hacer frente al previsible incremento de la demanda de hidrógeno, especialmente si se complementa con el consumo de agua de mar en lugar de agua dulce.

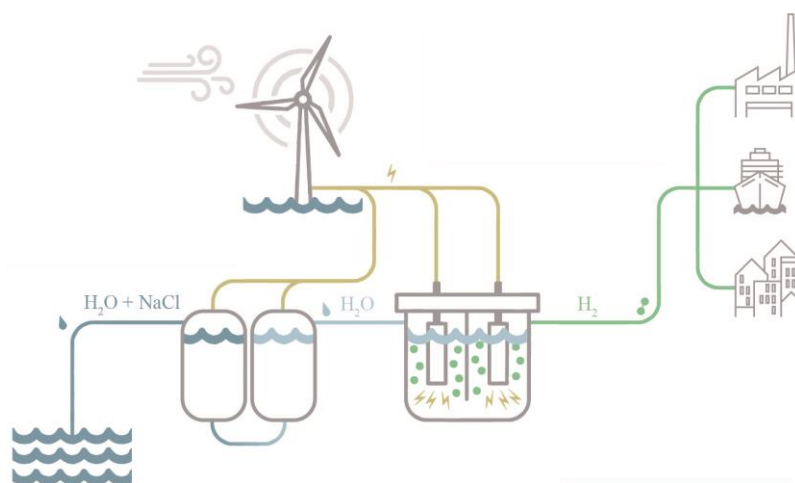


Figura 1-1 Esquema del sistema propuesto para la producción de hidrógeno. Fuente: autoría propia.

Si bien es cierto que en este proyecto se trabaja con un modelo sencillo formado por un único generador, como el que se muestra en la Figura 1-1, los resultados de este modelo podrían permitir abordar sistema más complejos, donde se empleen parque eólicos marinos completos para la producción

de grandes cantidades de hidrógeno de una manera autosuficiente. El desarrollo de este tipo de tecnologías abre la puerta a nuevas aplicaciones del hidrógeno y favorece las ya existentes. Un buen ejemplo de donde podrían resultar útiles este tipo de proyectos es en el caso de los archipiélagos o islas alejadas del continente, como pueden ser los estados archipelágicos del Océano Pacífico. Generalmente, estos emplazamientos son abastecidos con combustibles fósiles, puesto que carecen de la superficie suficiente para instalar energías eólica o solar suficiente y de suficiente agua dulce pero que, no obstante, disponen de grandes superficies de océano con las que producir hidrógeno para abastecerse gracias a la eólica marina.

Al mismo tiempo, este tipo de proyectos también podría resultar especialmente útil en el sector del transporte marítimo. A pesar de que solo existe a nivel experimental, ya se trabaja en el desarrollo de buques propulsados con hidrógeno en distintas investigaciones y proyectos, algunos de ellos con resultados prometedores (Figura 1-2). Así lo creen gobiernos e instituciones, que apuestan por esta vía como la principal opción para descarbonizar el sector del transporte marítimo. Por lo tanto, en un futuro no tan lejano ni tan hipotético en el que los buques se muevan propulsados por hidrógeno verde, este tipo de proyectos permitirá establecer puntos de abastecimiento de combustible autónomos alejados de costa, capaces de generar el propio hidrógeno con el que después proveerán a los buques. Esto supondría aumentar la capacidad del buque de navegar sin entrar en puerto y permitir a buques con poca autonomía navegar mayores distancias. Por último, también reduciría el tráfico marítimo en los puertos, ya que los buques podrían repostar en alta mar.



Figura 1-2 Proyecto de buque comercial Energy Observer 2, propulsado por hidrógeno. Fuente [1].

1.2 Objetivos

En base al desafío que supone el desarrollo un sistema innovador que permita obtener hidrógeno verde de la eólica marina y el agua de mar, se plantea como objetivo principal de este proyecto poder comprobar la viabilidad de la producción de hidrógeno de una planta de estas características y poder realizar una estimación de su producción anual en base a los datos reales de viento obtenidos de una localización completa. Complementariamente, para poder alcanzar este objetivo, se plantean otra serie de objetivos secundarios:

- Desarrollar un modelo funcional de una planta de producción de hidrógeno que emplee un aerogenerador *offshore* como fuente de energía y una serie de electrolizadores para la producción de hidrógeno.
- Modelar una planta destiladora que pueda ser empleada para destilar agua de mar y emplearla como materia prima para la producción de hidrógeno en procesos de electrólisis. Estudiar la integración de dicho sistema en el modelo propuesto en el punto anterior.
- Modelar la producción de hidrógeno de un año completo en base a datos reales de viento obtenidos de fuentes abiertas, empleando para ello varios modelos de aerogeneradores de

distintos fabricantes y distintas características, especialmente en lo referente a su potencia nominal, para observar las implicaciones de estas variaciones.

El desarrollo de estos objetivos persigue el fin último de poder comprobar la viabilidad de la producción de hidrógeno de una planta de estas características y poder realizar una estimación de la producción anual de dicha planta en base a datos reales de viento en una localización concreta.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Los combustibles tradicionales ante los retos del siglo XXI

Actualmente, los combustibles fósiles representan el 80% de la demanda de energía primaria a nivel mundial, generando dos tercios de la cantidad total de CO₂ emitida anualmente, aunque es probable que esta proporción sea aún mayor (Figura 2-1) [2]. Por otro lado, el sector del transporte depende casi por completo de los combustibles fósiles, según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y sus emisiones se han duplicado desde 1970 hasta suponer un cuarto del total anual [3]. Por tanto, pese a su peso mayoritario en las emisiones de gases de efecto invernadero, los combustibles fósiles siguen siendo la principal fuente de energía a nivel global. Sin embargo, es ya innegable que el modelo energético actual debe hacer frente a una serie de desafíos que obligan necesariamente a cuestionar la continuidad del empleo de los combustibles fósiles, por lo menos tal como se ha hecho hasta ahora, y dar pie a nuevas fuentes de energía más prometedoras. De todos ellos, necesariamente debe hacerse hincapié en dos, especialmente en las circunstancias actuales: el desafío climático y la volatilidad del mercado.

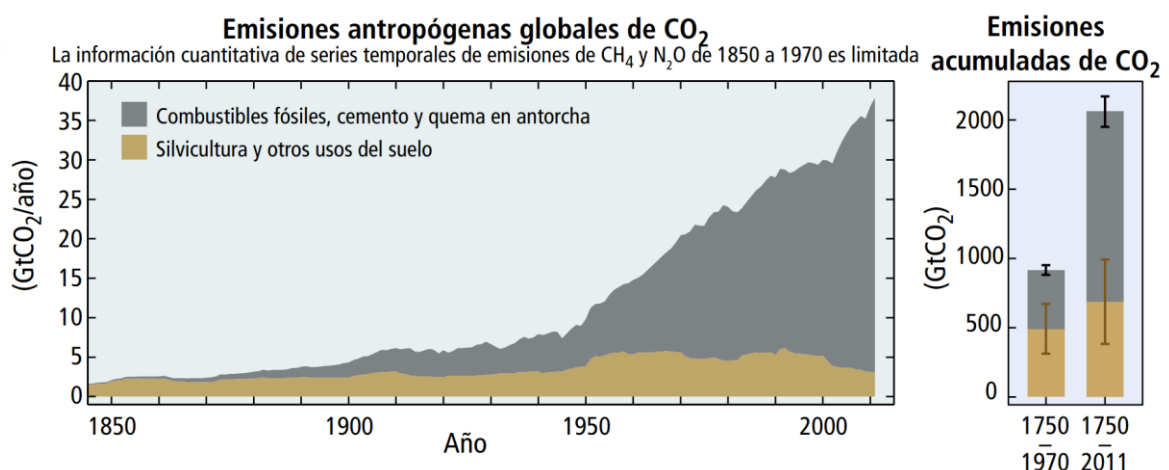


Figura 2-1 Emisiones de CO desde el periodo preindustrial hasta la actualidad. Fuente [4]

2.1.1 El desafío climático

Los términos *cambio climático* y *calentamiento global* son ya recurrentes en medios de comunicación, debates políticos, cumbres internacionales e incluso en conversaciones cotidianas de trabajo o de ocio. Desde hace décadas múltiples voces de la comunidad científica advierten alarmadas de las catastróficas consecuencias que las emisiones generadas por la quema de combustibles fósiles tienen sobre el clima y el medio ambiente. Pese a que no es objeto de este trabajo explicar con detalle

las causas y efectos del cambio climático y aunque aún exista un controvertido debate [5], los datos y análisis realizados por las distintas agencias nacionales e internacionales parecen apuntar con poco margen de duda a que se está produciendo un desequilibrio en la atmósfera terrestre que conduce a un aumento global de la temperatura media del planeta. Los estudios de las agencias meteorológicas muestran como cada año se batan récords de temperatura media [6], y a lo largo del planeta los fenómenos meteorológicos extremos se vuelven más habituales [7]. Los datos y las conclusiones de las principales autoridades en la materia apremian a contener las emisiones de gases de efecto invernadero para suavizar lo máximo posible sus consecuencias. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático trabaja con los resultados de distintos escenarios posibles, en los que la temperatura anual para finales de siglo (2081-2100) aumentaría entre 2 y 4,8° C respecto a los datos de finales del siglo XX [4].

Las consecuencias de este aumento son variadas y se distribuyen de forma dispar a lo largo del globo, aunque los riesgos son mayores para los lugares y comunidades más desfavorecidas de cada país, independientemente del nivel de desarrollo de éstos. Según el IPCC, los más relevantes en términos generales serán los cambios en las precipitaciones y la progresiva desaparición de las grandes superficies de hielo con el consecuente aumento del nivel de los océanos, los cuáles variarán su acidez, afectando significativamente a los ecosistemas marinos. Por otro lado, agravará los riesgos ya existentes, como el riesgo creciente de extinción de gran parte de las especies, especialmente de las vegetales, o la reducción de la biodiversidad marina en las zonas más sensibles [4].

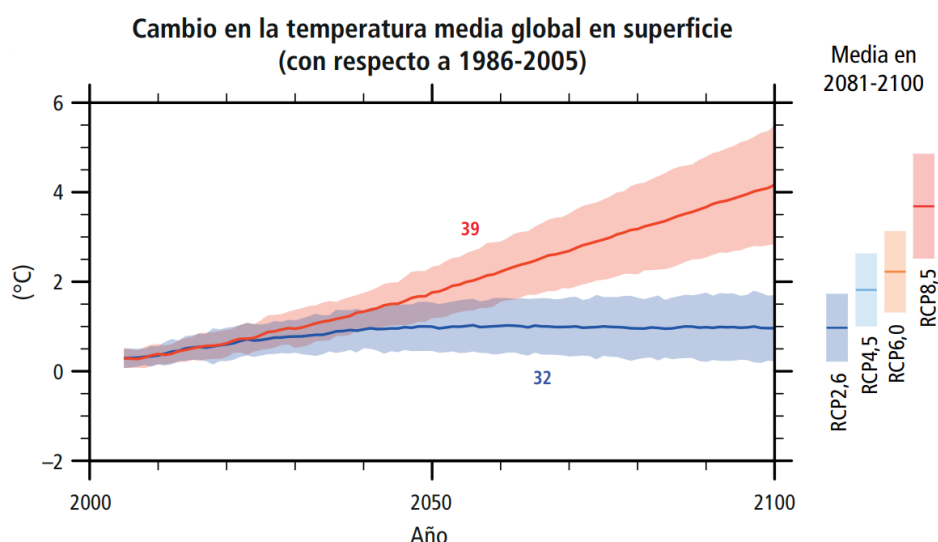


Figura 2-2 Previsión de la evolución de la temperatura en la superficie terrestre para el siglo XXI. Fuente: [4].

El IPCC concluye que la emisión continuada de gases de efecto invernadero provocará que continúe el aumento de la temperatura del planeta, así como variaciones a largo plazo del sistema climático. También advierte de que muchos de los aspectos del cambio climático y las consecuencias asociadas a éstos se mantendrán durante siglos, incluso aunque el ser humano detenga completamente sus emisiones de gases de efecto invernadero. Además, el riesgo de que se produzcan cambios irreversible o abruptos aumenta cuanto mayor sea el calentamiento del planeta. Sin embargo, también señala que los riesgos del cambio climático pueden contenerse a través de la adaptación y, especialmente, mediante una reducción sustancial y sostenida de las emisiones de gases de efecto invernadero. En ese aspecto, las emisiones acumuladas de dióxido de carbono serán las que determinen en su mayor parte el calentamiento medio de la superficie del planeta, presentando estas emisiones un amplio margen de variación en función del desarrollo socioeconómico y la política climática [4]. Es por ello que la comunidad internacional trabaja desde hace décadas en alcanzar una política y normativa que permita contener las emisiones y los efectos del cambio climático. Sin embargo, los intereses nacionales de las distintas potencias, los condicionantes de la geopolítica y el juego de intereses económicos, así como la manifiesta mala voluntad de algunos

actores, han imposibilitado, a lo largo de los años, poder alcanzar un acuerdo a escala global de las principales potencias económicas, responsables de las mayores emisiones de gases de efecto invernadero. Acciones como el protocolo de Kioto o la Conferencia de Río de Janeiro de 1992 son muestras de los intentos de alcanzar un acuerdo en la materia sin que se haya logrado un resultado significativo [8]. Sin embargo, la firma en 2015 del acuerdo de París ha permitido establecer un acuerdo jurídicamente vinculante ligado a un objetivo concreto. El compromiso de los países firmantes es evitar que la temperatura a del planeta aumente por encima de los 2° C con respecto a los niveles preindustriales, preferiblemente por debajo de 1,5° C, alcanzando cada uno su máximo de emisiones de gases de efecto invernadero antes de mediados de siglo para alcanzar un clima neutro [9]. Todo ello pasa, irremediablemente, por reducir el uso de los combustibles fósiles tradicionales en favor de nuevos combustibles más eficientes y que generen menores emisiones de gases de efecto invernadero [4].

2.1.2 El mercado mundial de combustibles fósiles

Pese a constituir un factor clave en las economías de todos los países, no puede obviarse que, en términos generales, los combustibles fósiles, en particular el petróleo y el gas natural, son un recurso económico más de las naciones. Constituyen, en esencia, una materia prima que puede comprarse y venderse, pero cuyas aplicaciones las convierten en un elemento crítico. Esta dualidad entre necesidad y comercio, sumado a la variabilidad en la producción y la demanda, dan lugar a un mercado potencialmente inestable con gran capacidad de fluctuación y, en especial, con capacidad para provocar cambios drásticos en las economías nacionales e internacionales.

La actual dependencia de los combustibles fósiles, para la producción de energía eléctrica, para el transporte de mercancías, para generar productos manufacturados e incluso para mantener operativa la maquinaria militar de las naciones, convierten al petróleo, al carbón y al gas natural en un recurso de carácter estratégico. Por norma general, cuanto mayor es la economía de un país, mayor es la cantidad de combustibles fósiles que necesita para mantener su buena salud. Esta dependencia proporciona clara ventaja a los países con amplias reservas de petróleo y gas, pero pone en una situación comprometida a aquellas potencias que carecen de estos recursos naturales y se ven obligados a comprarlos a los países productores. Como resultado de esta situación, un aumento del precio del petróleo encarecerá la economía de los países importadores de petróleo, mientras que una disminución de su precio reducirá los ingresos de los países productores. Este juego de pesos y contrapesos se complica aún más cuando entra a jugar la política internacional, y los intereses de las naciones, donde además debe tenerse en cuenta que la producción de petróleo no es estática y, además, las reservas de los países son limitadas.

La invasión rusa de Ucrania ha puesto de relieve esta situación. Los países europeos de la OTAN, al igual que el conjunto de los países de la Unión Europea, muestran una firme voluntad de aislar económicamente a Rusia y apoyar la defensa ucraniana, pero, al mismo tiempo, sus economías dependen en gran medida del petróleo y el gas natural que les proporciona Rusia, que es una fuente económica de donde obtiene grandes beneficios con los que financiar su maquinaria militar. Al mismo tiempo, y como consecuencia de lo anterior, el deseo de Europa de prescindir de la materia prima rusa y la voluntad rusa de emplearla como forma de presión hacia a Europa, han provocado una disminución de su oferta y, consecuentemente, a un aumento de los precios de los combustibles fósiles. Este aumento ha dado como resultado un encarecimiento generalizado del coste de la energía y del transporte, con grandes repercusiones en la economía de las naciones europeas importadoras de petróleo y gas.

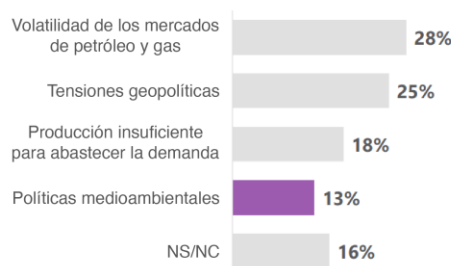
Por tanto, no puede obviarse el papel crucial que estos recursos juegan en el equilibrio de la geopolítica y la economía globalizada actuales. Lejos de ser una trivialidad, un estudio de la agencia IPSOS sobre 30 países en 2022 concluyó que el principal motivo por el que la opinión pública se posicionaba a favor abandonar el uso de los combustibles fósiles es debido a la volatilidad de los mercados mundiales de petróleo y gas (Figura 2-3). A lo largo del siglo XX, y también del siglo XXI, se han producido varias crisis económicas en Occidente, pero también a escala global, causadas por un drástico aumento del precio del petróleo o, por el contrario, por una acuciada depreciación del crudo. Es por ello por lo que, tanto líderes como ciudadanos de a pie, comienzan a ver en los nuevos combustibles

una puerta a una economía más estable y con menor dependencia, basada en fuentes de energía ilimitadas o que puedan ser obtenidas por cualquier estado. Este hecho, si bien no por sí mismo, pero sí junto a otra serie de factores, han dado lugar que distintas instituciones europeas y nacionales hayan puesto sobre la mesa objetivos concretos en la búsqueda de nuevas fuentes de energía.

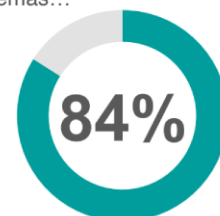
De media, en los 30 países encuestados...



...pero solo un 13% cree que las políticas medioambientales son la razón principal por la que el precio está subiendo.



Además...



...cree que es importante que sus naciones opten por fuentes de energía mas sostenibles y respetuosas frente a los combustibles fósiles.

Figura 2-3 Motivos por los que la población encuestada considera necesario abandonar los combustibles fósiles.
Fuente: [10].

En conjunto, cada vez resulta más evidente que el empleo de los combustibles tradicionales no se hace viable a largo plazo. No solo por los altos niveles de contaminación que producen, sino también porque resultan extremadamente ineficientes [2]. Es por ello que, actualmente, la opinión pública parece posicionarse claramente a favor de desarrollar un nuevo modelo energético, especialmente en los últimos años debido a la subida de precios y a unos efectos cada vez más palpables del cambio climático [10]. Por otro lado, la línea de pensamiento de los líderes internacionales parece avanzar en la misma dirección [11], especialmente entre los líderes europeos y de las instituciones comunitarias.

2.2 Los nuevos combustibles

Independientemente de la idoneidad de los combustibles fósiles ante la coyuntura actual, no puede plantearse su abandono si no es en favor de otras formas de energía que generen menores perjuicios con unas prestaciones y costes similares. Los combustibles fósiles, pese a sus inconvenientes, ofrecen grandes cantidades de energía a bajo coste que puede obtenerse en abundancia y de forma sencilla e inmediata. Además, el desarrollo industrial basado en estos combustibles ha dado lugar a sectores e industrias muy difíciles de descarbonizar, así como a una maquinaria específica que deberá ser sustituida para poder trabajar con otras fuentes de energía [2]. Por ejemplo, las industrias del cemento y el acero necesitan grandes cantidades de energía para poder desarrollar su actividad, por lo que es necesario recurrir a una fuente que pueda producir la potencia suficiente y a un coste asumible para evitar el encarecimiento del producto. Además, las emisiones en estas industrias no provienen solo de la producción de la energía, sino también de su uso, por lo que también es necesario sustituir la maquinaria en uso actualmente, altamente específica y con prestaciones concretas, por otra capaz de funcionar con otras fuentes de energía. Todo ello implica que el sustituto de estos combustibles deberá permitir una transición funcional, barata y sencilla. Ante este reto, los distintos gobiernos e instituciones exploran distintas soluciones. De todas ellas, ha sido pertinente incluir en este TFG las tendencias de la Unión Europea, España y el Ministerio de Defensa en particular (Figura 2-4).



Figura 2-4 Portada de las distintas publicaciones referentes al hidrógeno la UE, Gobierno de España y MINISDEF. Fuente: [12] [13] [14].

2.2.1 La Unión Europea

En las instituciones europeas se debate desde hace años la hoja de ruta a seguir sobre el futuro de los combustibles dentro de los países miembros. Sin embargo, la actual coyuntura originada por la pandemia del coronavirus y, especialmente, la tensión en las relaciones con Rusia, el principal punto de origen de gas y petróleo importado a Europa, debido a la guerra en Ucrania, han impulsado definitivamente la idea de una Europa energéticamente independiente. Esta idea de autosuficiencia energética pasa necesariamente por abandonar los combustibles fósiles tradicionales en favor de otros nuevos que puedan ser producidos por los países miembros [15].

En este sentido, las líneas de la Unión Europea se han centrado en una política ambiental que aglutine tanto las necesidades estratégicas de nuevos combustibles como las preocupaciones medioambientales ya existentes y sobre las que la población europea viene demandando soluciones políticas cada vez con más fuerza. Todo ello ha cristalizado en lo que la Comisión Europea ha bautizado como el *Pacto Verde Europeo*. Esta iniciativa materializa el compromiso de los países miembros de alcanzar un continente climáticamente neutro para el año 2050, reduciendo en un 55% las emisiones contaminantes respecto a los datos de 1990. El conjunto del Pacto Verde Europeo atañe un amplio conjunto de medidas que atañen a distintos ámbitos. Sin embargo, en lo referente al empleo de combustibles, es especialmente interesante la denominada RePower EU y las líneas establecidas dentro del Pacto Verde en materia energética. [12].

2.2.1.1 Esfuerzos de la UE para reducir su dependencia energética

A la vista de la desventaja estratégica en la que se encuentra Europa por su dependencia de unos combustibles fósiles que necesita pero que casi no produce, la Comisión Europea ha puesto en marcha una serie de acciones bajo el nombre de *RePower EU*. Esta iniciativa pretende acelerar de forma drástica la transformación energética que permita a Europa prescindir, mucho antes del objetivo marcado en 2030, de «proveedores poco fiables y combustibles fósiles volátiles». Para lograr este objetivo, RePower marca unos ambiciosos objetivos que permitan reducir en un corto periodo de tiempo el consumo del petróleo ruso y sus derivados en Europa. Estos objetivos se dividen en aquellos marcados para cumplirse al corto plazo, como el almacenamiento de gas o nuevos planes para la reducción de la demanda, y otros que deben alcanzarse no más tarde del año 2027, tales como invertir en una red integrada o nuevas propuestas para garantizar el acceso de las industrias de la UE a materias primas fundamentales. Sin embargo, de entre todos ellos, resultan especialmente interesantes las referentes al tema de nuevos combustibles.

En este aspecto, RePower EU contempla la realización de proyectos inmediatos de energía solar y eólica con adopción de hidrógeno renovable, una nueva legislación para autorizar más rápidamente

instalaciones de energías renovables, la aprobación de los primeros proyectos de hidrógeno a escala europea antes de verano de 2023, desarrollar un marco legal para el hidrógeno y acelerar la instalación de electrolizadores para conseguir abastecer al consumo europeo con 17,5 GW de hidrógeno autóctono antes de 2025. [16]

2.2.1.2 *Energía y el Pacto Verde*

El Pacto Verde presentado por la Comisión incluye un amplio abanico de objetivos y propuestas que atañen a una gran variedad de campos. Sin embargo, resultan especialmente relevantes para el objeto de estudio de este trabajo las que atañen al campo de la energía, donde los nuevos combustibles están llamados a tener un papel protagonista pues, tal como informa la propia Comisión Europea, la producción energética supone el 75% del total de gases de efecto invernadero emitidos anualmente en la UE. En este aspecto, la Comisión marca tres objetivos: garantizar el suministro eléctrico, desarrollar un mercado de energía europeo interconectado y el desarrollo de un sector energético basado en las energías renovables. Para ello el Pacto Verde establece varios puntos, pero de ellos destacamos dos: La Estrategia sobre el Hidrógeno y la Estrategia sobre las Energías Renovables Marinas [17].

A ojos de la Comisión, la Unión Europea presenta un enorme potencial para la producción de energía *Offshore*. Las compañías europeas poseen gran experiencia en este ámbito, puesto que fueron pioneras en el empleo de estas energías, siendo Europa el primer lugar en instalarse un campo eólico marino (Dinamarca, 1991). Además, Europa es líder en la producción de componentes clave para los aerogeneradores y casi la mitad de las compañías del sector eólico tienen su sede en Europa. Por ello, el pacto verde tiene puestas grandes expectativas en este sector. El objetivo es aumentar la potencia generada *offshore* hasta 25 veces respecto a la actual para 2030. Para ello se pretende aumentar la inversión en este tipo de tecnologías y poner en práctica nuevos avances desarrollados hasta este momento en laboratorios de investigación. [18]

A la vista de lo anterior, resulta evidente el interés que la Unión Europea, tanto a nivel social como político, muestra hacia la producción y empleo de nuevos combustibles, especialmente el hidrógeno, y a la potenciación de sus energías renovables, donde la eólica marina presenta un gran potencial de cara a los ambiciosos objetivos energéticos marcados por la Comisión.

2.2.2 *España*

A pesar del importante porcentaje que las energías renovables presentan en la producción energética española, lo cierto es que España es actualmente uno de los países europeos que menos ha reducido su dependencia de los combustibles fósiles [19]. Sin embargo, al igual que sucede en el caso de la Unión Europea, la nueva coyuntura generada a raíz del Acuerdo de París, la pandemia del Coronavirus, la guerra en Ucrania y, en especial, la nueva línea de futuro trazada por la Unión europea, han llevado a España a emprender acciones más significativas en favor de los combustibles alternativos que le permitan prescindir de los combustibles fósiles.

Este nuevo impulso se materializa en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) desarrollado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. En este documento se establecen las líneas generales para una descarbonización de España que le permita ser un país climáticamente neutro en 2050, de acuerdo con los compromisos europeos. El propio documento especifica que la intención final es conseguir que un 74% de la energía generada en España proceda de fuentes renovables, lo que implica un enorme desafío si se tiene en cuenta que a fecha de hoy el consumo de combustibles fósiles supone un porcentaje parecido de la energía bruta generada en España, en torno al 71%. El PNIEC es un documento sustancialmente más concreto y desarrollado que los elaborados por la Comisión Europea, pero porque pretende desarrollar, de forma más específica, los objetivos generales establecidos en el Pacto Verde. En este aspecto, el PNIEC recoge el objetivo concreto de desarrollar energías limpias, entre las que incluye la eólica marina y el hidrógeno, en particular el empleo de

hidrógeno 100% renovable. Además, el documento también incluye específicamente el desarrollo del empleo del hidrógeno como combustible para vehículos. [20]

Sin embargo, el PNIEC es un documento general de todo el abanico de medidas y objetivos que se proponen para alcanzar los compromisos de descarbonización de 2050. Pero en el aspecto concreto del hidrógeno, el Ministerio para la Transición Ecológica ha desarrollado un documento específico para tratar el desarrollo del hidrógeno, concretamente del hidrógeno verde, como combustible para abastecer de energía a España: *La Hoja de Ruta del Hidrógeno*.

2.2.2.1 Hoja de Ruta del Hidrógeno

En este documento se abarca de forma específica el papel del hidrógeno en la transformación energética de España. El documento aborda los objetivos energéticos de forma similar a la Unión Europea, con metas a medio plazo para el año 2030 y otras a largo plazo para el año 2050. Si bien el documento se centra en como producir hidrógeno, también contempla medidas para aquellos sectores en los que el hidrógeno verde tiene un alto potencial de desarrollo, esencialmente la industria y la movilidad.

En cuanto a las medidas para el año 2030, cuando se espera que se produzcan en torno a 1 millón de toneladas de hidrógeno en la UE, la Hoja de Ruta contempla que en España se genere un mínimo de 4 GW de potencia mediante electrolizadores (inicialmente ubicados en los emplazamientos de consumo, ya sea industrias u otro tipo de consumo como, por ejemplo, el de vehículos en puntos de abastecimiento, a fin de evitar costes de transporte y almacenamiento). Para la industria contempla que al menos un 25% del hidrógeno consumido en industrias (ya sea como fuente de energía o como materia prima) sea hidrógeno renovable. En cuanto al transporte, se espera que para 2030 exista una flota de al menos 150 autobuses de pila de hidrógeno renovable, un parque de no menos de 5000 vehículos de transporte y el empleo de trenes propulsados con hidrógeno en al menos dos líneas comerciales de larga distancia. Para que esto sea posible también contempla la implantación de 100 a 150 hidrogeneras públicas y la adaptación de los cinco principales puertos y aeropuertos para poder emplear tecnología *Handling*.

Para el año 2050, cuando se espera que en la UE se produzcan aproximadamente 10 millones de toneladas de hidrógeno al año, la Hoja de Ruta no establece objetivos concretos, pero aporta ciertas previsiones de lo que cabría esperar. En este aspecto, se espera que para esa fecha las tecnologías del hidrógeno se hayan desarrollado lo suficiente como para implantarse a gran escala. El aumento en la producción energética procedente de fuentes renovables permitirá abaratar la energía y emplearla para producir hidrógeno a bajo coste, lo que permitirá aumentar en gran medida la producción de hidrógeno y emplearlo en sectores actualmente difíciles de descarbonizar como el transporte. Además, si los avances tecnológicos lo permiten, para entonces se podrá implementar el empleo de hidrógeno en sectores como la aviación o el transporte marítimo [13].

Como puede verse, si bien España no parte de una situación ventajosa, se han establecido ya las líneas generales que apuntan a un futuro basado en el hidrógeno y las energías renovables. Además, la Hoja de Ruta también deja claro que el hidrógeno renovable se posiciona como uno de los principales vectores energéticos viables a largo plazo.

2.2.3 El Ministerio de Defensa

Dado el ámbito del que procede este proyecto, no puede obviarse las consideraciones que el Ministerio de Defensa tiene entorno al hidrógeno y los combustibles del futuro. Además, también es importante recalcar que los combustibles constituyen factores estratégicos fundamentales para la defensa nacional y, como tal, garantizar el suministro y la eficacia de los combustibles es prioritario para mantener la operatividad de las Fuerzas Armadas.

Es por ello por lo que el Ministerio de Defensa ha incluido las aplicaciones del hidrógeno y de otros nuevos combustibles en sus Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa. Concretamente, el Ministerio de Defensa centra sus prioridades en el desarrollo de sistemas de pilas de combustible que

empleen hidrógeno u otros combustibles alternativos como parte de un objetivo más completo para el desarrollo de sistemas de propulsión de plataformas no tripuladas o su empleo en campamentos y bases desplegadas. Por otro lado, a pesar de la actual política de la OTAN basada en el *Single Fuel Concept*, que pretende unificar a un único tipo de combustible para todos los vehículos y aeronaves con base en tierra, el Ministerio de Defensa pretende apoyar la investigación y evaluación de nuevos combustibles en aplicaciones específicas del ámbito de defensa, entre los que se incluyen el gas natural, el hidrógeno, el biogás y los hidrocarburos no convencionales. En relación con esto, también se incluye el desarrollo de sistemas que permitan producir combustible propio *in situ* que pueda emplearse para generar combustible en despliegues en el extranjero, eliminando la dependencia logística de combustible.

Sin embargo, la ETID también especifica que gran parte de las acciones previstas para los próximos años están orientadas a producir demostradores que permitan determinar la viabilidad de nuevas tecnologías de propulsión que puedan ser empleadas en el ámbito militar. En este aspecto, el Ministerio de Defensa pretende nutrir sus investigaciones a través del programa COINCIDENTE, que permite emplear las tecnologías desarrolladas en el ámbito civil al amparo del Plan Nacional de I+D. para su aplicación en el ámbito militar, por lo menos en lo referente al empleo de combustible para instalaciones y vehículos tripulados. Para las plataformas autónomas se prevé colaborar en el desarrollo de plataformas aéreas y navales con sistemas de propulsión híbridas con baterías a mediante pilas de combustible, así como tecnologías que requieran un menor desarrollo tecnológico, como desarrollar una capacidad nacional de pilas de combustibles o, en lo referente a plataformas navales, el estudio de la superconductividad en la propulsión [14].

Por tanto, puede verse aquí como el desarrollo de nuevos combustibles tiene también una orientación estratégica y especialmente un papel relevante en el futuro de la tecnología militar. No solo desde un punto de vista medioambiental, sino también orientado a la autosuficiencia logística de las operaciones militares.

2.3 El Hidrógeno como combustible del futuro

A lo largo de los apartados anteriores ha quedado de manifiesto la necesidad o, al menos, la importancia de buscar nuevos combustibles que permitan sustituir a los de origen fósil, ya sea por razones medioambientales, estratégicas u operativas. Sin embargo, dada la naturaleza de este trabajo, es necesario hacer hincapié en el hidrógeno, su producción, su uso y las posibilidades que este ofrece.

2.3.1 La Producción de Hidrógeno

El hidrógeno, como tal, es el primer elemento de la tabla periódica, formado por un protón y un electrón, estable en forma diatómica y es también el elemento más ligero que existe, que en su forma natural se muestra como un gas. Aproximadamente el 75% de la materia del universo está constituida por Hidrógeno, por lo que es el elemento más abundante, si bien no suele encontrarse aislado sino formando moléculas como el agua o las moléculas de carbono que componen la materia orgánica. Por lo tanto, si bien hemos considerado al hidrógeno como un combustible, lo cierto es que sería más apropiado denominarlo *vector energético*, es decir, una sustancia capaz de almacenar energía para desprenderla después. El hidrógeno no puede encontrarse naturalmente en la Tierra, como si ocurre con los combustibles fósiles, sino que debe generarse a partir de la disolución de moléculas que contienen hidrógeno, para lo cual es necesario aportar energía. Por tanto, la producción del hidrógeno está condicionada a un aporte de energía, que puede proceder del empleo de combustibles fósiles, de energías renovables, nucleares o una mezcla híbrida de estos. Existen esencialmente cinco procesos distintos a través de los cuales puede obtenerse hidrógeno [21]:

- **Conversión química:** permite extraer el hidrógeno de combustibles fósiles y otros como la biomasa. Dentro de este proceso se incluyen otros como el reformado (que puede ser mediante oxidación parcial o reformado autotérmico), pirólisis (empleando elevadas

temperaturas en régimen anaeróbico) o gasificación (empleando combustión con baja proporción de oxígeno, para carbón y biomasa)

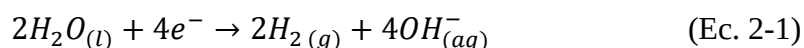
- **Termólisis:** El hidrógeno se obtiene empleando altas temperaturas provenientes de la combustión de una fuente externa. En estos procesos hay que distinguir entre los de clase I (emplean exclusivamente procesos de temperatura) y los de clase II (los que combinan una fuente de energía externa con procesos de conversión química o con reducción de óxidos metálicos)
- **Fermentación:** este proceso parte de la biomasa. La fermentación puede ser alcohólica (se obtiene etanol a partir de hidratos de carbono y de éste se obtiene el hidrógeno a través del reformado) o anaerobia (se realiza en ausencia de oxígeno, obteniéndose biogás del que se extrae posteriormente el hidrógeno)
- **Procesos fotolíticos, fotobiológicos y fotoelectroquímicos:** Se consigue la hidrólisis de agua a partir de luz solar, pueden emplearse organismos fotosintéticos que actúen como catalizadores biológicos o bien emplear semiconductores.
- **Electrólisis:** se obtiene el hidrógeno a partir de la disociación de la molécula de agua empleando una corriente eléctrica.

En la actualidad, la forma más común de producir hidrógeno actualmente es el reformado de gas natural. Las necesidades de buscar alternativas a los combustibles fósiles y la disminución de reservas de éstos propiciarán el empleo de nuevas formas de producir hidrógeno, por lo que actualmente se trabaja en el desarrollo de los métodos anteriores que hagan viable su producción a gran escala. En este aspecto, aquellos procesos que se basan en el empleo de energías renovables se presentan actualmente como la alternativa más viable en sustitución del gas natural. Cuando el hidrógeno se obtiene de fuentes de energía renovable se le denomina *Hidrógeno Verde*, y para producirlo es necesario recurrir al proceso de electrólisis.

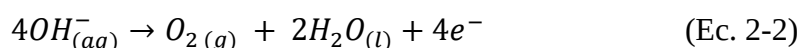
En el proceso de electrólisis se introducen dos electrodos en una cuba llena de agua, en lo que se denomina *celda electrolítica* (Figura 2-5). Por lo general, a este agua se le añade un electrolito fuerte (generalmente hidróxido de sodio) que mejore la conductividad del agua y, por tanto, la transmisión de la corriente. A continuación, se hace pasar una carga eléctrica por los electrodos de tal forma que uno quede cargado negativamente (cátodo) y otro positivamente (ánodo). Estos electrodos suelen estar fabricados en materiales inertes a fin de que no intervengan en la reacción. La carga de los electrodos da lugar a las siguientes reacciones según se trate de un medio básico o un medio ácido [22]:

- **Medio básico:**

En el cátodo se produce la descomposición del agua en hidrógeno y el ion OH^- , consumiendo para ello cuatro electrones:

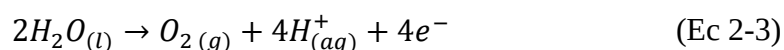


Al mismo tiempo, en el ánodo, el ion OH^- se descompone para dar lugar a oxígeno, agua y electrones, que pasarán a alimentar la reacción en el cátodo.



- **Medio ácido:**

En el ánodo se produce la descomposición del agua para dar lugar al ion H^+ y cuatro electrones



En el cátodo el ion H^+ reacciona con los electrones para dar lugar al hidrógeno.



En resumen, podemos condensar todo el conjunto del proceso de electrólisis en tres fases:

- **Ionización:** fase previa en la que la disolución del compuesto aún no ha entrado en contacto con la corriente eléctrica.
- **Orientación:** ocurre cuando se activa la corriente eléctrica de tal forma que los iones, según su carga positiva o negativa, se dirigen hacia el cátodo o al ánodo.
- **Descarga:** ocurre cuando los aniones, que ya están situados en el ánodo, ceden electrones, mientras que los cationes que se encuentran en el cátodo los adquieren. [23].

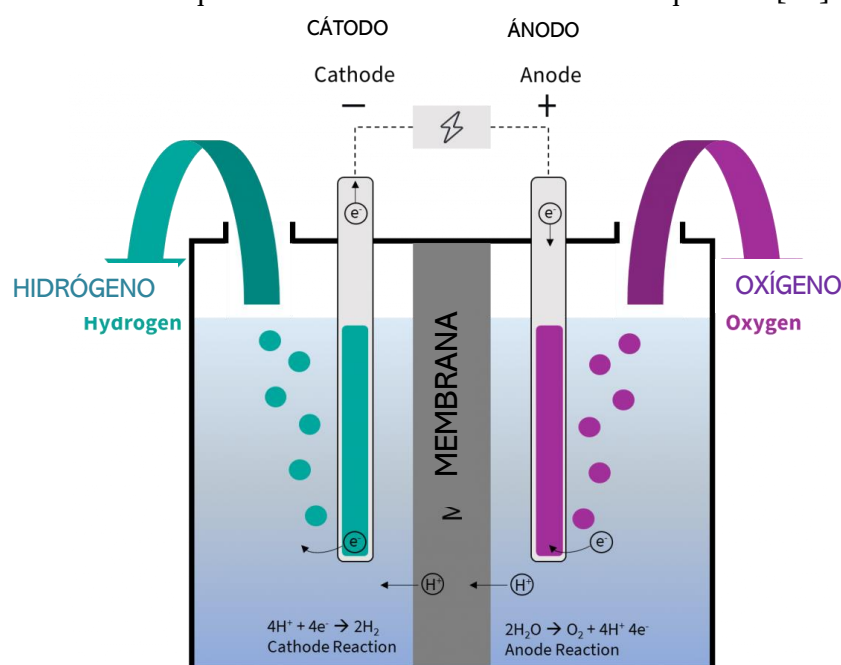


Figura 2-5 Esquema del proceso de electrólisis en medio ácido. Fuente: [24].

La primera vez que se llevó a cabo la electrólisis del agua en el año 1800, de mano de William Nicholson y Sir Anthony Carlisle, se realizó en disolución ácida, si bien posteriormente se optó por emplear electrólisis en medio básico debido a los problemas de estabilidad de los materiales. Sin embargo, quien enunció los principios de la electrólisis fue Michael Faraday en base a dos leyes:

- **1ª Ley:** la masa de material depositada en los electrodos es directamente proporcional a la cantidad de electricidad transferida en ese electrodo, entendiéndose esta como la cantidad de carga eléctrica medida en Coulomb.
- **2ª Ley:** Para una determinada cantidad de electricidad, es decir, para una determinada carga eléctrica, la masa depositada de una especie química en particular en un electrodo es directamente proporcional al peso equivalente de ese elemento, siendo este su masa molar dividido por un número entero que variará según la reacción que tiene lugar en el material

Por tanto, el volumen de sustancia depositada en un electrodo variará según la intensidad eléctrica que se haga circular y según el peso equivalente que la sustancia tenga en la reacción. [22]

Este proceso se realiza en los denominados *electrolizadores*. Estos dispositivos, de mayor o menor envergadura, se basa en el empleo de varias celdas electrolíticas colocadas en paralelo, si bien su número variará según la cantidad de hidrógeno que estén diseñados para producir. Una de las características más importantes de este proceso es que estos electrolizadores solo requieren agua y una corriente eléctrica para producir hidrógeno, por lo que son relativamente autónomos y pueden emplearse para producir hidrógeno en lugares remotos mientras tengan un suministro de agua y electricidad. Además, el hidrógeno es el combustible que más energía genera por unidad de masa, aproximadamente el triple que la gasolina, generando como único producto de la reacción vapor de agua, por lo que su empleo no genera impacto ambiental. Sin embargo, conviene tener presente que este proceso tiene importantes limitaciones, puesto que el rendimiento de este proceso relativamente bajo y, además, las dos únicas fuentes que emplea, el agua y la energía, son recursos limitados. Por ejemplo, para poder instalar una potencia de 4GW en hidrógeno sería necesario consumir la misma cantidad anual de agua que 250000 personas y varios miles de hectáreas de placas solares [25].

2.3.2 Transporte y almacenamiento

Como ocurre con cualquier otro combustible, para poder emplearlo a gran escala y en aplicaciones cotidianas como las que tienen actualmente los combustibles fósiles es necesario garantizar la seguridad de almacenamiento, transporte y operación, además de realizarlo en condiciones óptimas. Sin embargo, el hidrógeno, por sus características, presenta ciertas particularidades a las que debe atenderse a la hora de diseñar los sistemas de almacenamiento y distribución.

En primer lugar, debe prestarse especial atención a la seguridad. El hidrógeno tiene un rango de inflamabilidad muy amplio (que oscila entre el 5 y el 75% de concentración en el aire) y requiere la aplicación de muy poca energía para iniciar la combustión, aproximadamente 0,02 mJ o superior. Sin embargo, también debe tenerse en cuenta que la combustión del hidrógeno produce únicamente calor y agua por lo que, al no haber presencia de carbono y solo de vapor de agua, gracias a su capacidad de absorción de calor un fuego producido por hidrógeno tiene menos poder de dispersión de calor que uno producido por un hidrocarburo. Además, el riesgo de explosión en el hidrógeno es mucho menor que en otros combustibles, pues el hidrógeno no se vuelve explosivo hasta alcanzar concentraciones superiores al 18% mientras que otros, como la gasolina, son explosivos a partir de concentraciones de vapores superiores al 1%, a lo que hay que añadir que mientras el hidrógeno tiende a dispersarse rápidamente debido a su ligereza, otros combustibles como el propano o los gases emitidos por la gasolina son mucho más densos y permanecen a nivel del suelo, aumentando el riesgo de que se produzca una explosión. Por último, en lo que refiere a su toxicidad, una de las grandes ventajas que aporta el hidrógeno es que se trata de una sustancia no tóxica, no contaminante, inolora e incolora cuya emisión no perjudica al medio ambiente [26].

En lo que se refiere al almacenamiento, el hidrógeno presenta un condicionante muy importante. Al tratarse del elemento más ligero de la tabla periódica, le permite fugarse de los espacios contenedores con relativa facilidad, llegando a alcanzar un 3% de volumen de pérdida diaria, lo que además puede provocar pérdida de propiedades en los materiales de las conducciones y los depósitos. Partiendo de esta base, podemos entender el almacenamiento del hidrógeno de dos formas distintas: por un lado podremos hablar del almacenamiento estacionario, que es el que debe emplearse en los lugares donde se produce, se distribuye y se consume el hidrógeno, mientras que hablaremos de almacenamiento para la distribución y para el consumo durante el transporte, es decir, el almacenamiento que permita transportar el hidrógeno de un lado a otro o bien almacenarlo mientras se consume al ser empleado como combustible para vehículos. De ambas concepciones, es la segunda la que presenta mayores desafíos, especialmente en lo referente al consumo en el transporte, puesto que el almacenamiento de hidrógeno en este caso debe ser compacto para maximizar la capacidad de carga y el espacio disponible en el vehículo, además de ligero y con capacidad suficiente para dotar de cierta autonomía al vehículo. De hecho, entre los principales problemas a la hora de producir vehículos y plataformas propulsadas por hidrógeno está el de encontrar una forma de almacenamiento que permita suministrar la cantidad suficiente de hidrógeno con los niveles adecuados de volumen, peso coste y seguridad. En ambas formas

de almacenamiento se han desarrollado distintos métodos sin encontrar uno claramente superior ni completamente satisfactorio [27].

Sin embargo, son cuatro los que actualmente se consideran más viables para poder emplearse a gran escala [27]:

- **Almacenamiento mediante tanques de hidrógeno comprimido:** con este sistema el hidrógeno se almacena en estado gaseoso a temperatura ambiente. Por lo general, el hidrógeno debe almacenarse a altas presiones debido a su baja densidad energética por unidad de volumen, es decir, se necesita un gran volumen de hidrógeno para generar una cantidad de energía significativa, lo que obliga a almacenar grandes volúmenes de hidrógeno comprimidos a altas presiones, de entre 200 y 700 bares. Para poder almacenar el hidrógeno en estas condiciones, los tanques de almacenamiento se construyen empleando un revestimiento interior hecho a partir de una malla de polietileno o nylon cubierta con una fibra de grafito y un refuerzo de epoxy. El diseño parte de los que se emplean para almacenar gas metano, si bien es necesario adaptar el tanque para soportar la fatiga que provoca la penetración del hidrógeno. Para ello se contempla incorporar al tanque una barrera de difusión de hidrógeno en el revestimiento interior. Sin embargo, existen pocos avances en este aspecto y actualmente aún se trabaja en un modelo de tanque viable para su uso en gran escala que resulte resistente y ligero sin encarecer los costes de operación.
- **Almacenamiento mediante tanques de almacenamiento de hidrógeno líquido:** en este proceso se pasa de hidrógeno gas a hidrógeno líquido, que es el que después pasa a almacenarse en los tanques. Sin embargo, el proceso para licuar el hidrógeno es complejo y requiere de una sucesión de compresores e intercambiadores de calor. Por lo general, para el licuado de gases se emplea el ciclo de Linde, que consta de:
 - Compresión isotérmica a temperatura ambiente.
 - Enfriamiento a presión constante.
 - Expansión isoentálpica (en esta fase parte del gas se licua y parte se recircula de vuelta al compresor).

El problema de este ciclo es que el hidrógeno, contrariamente a otros gases como el nitrógeno, se calienta al expandirse a temperatura ambiente. Para que el hidrógeno se enfríe al expandirse es necesario que su temperatura sea menor a la temperatura de inversión, que para el hidrógeno se sitúa en los 202K, para lo cual se emplea nitrógeno líquido que enfría el hidrógeno gas hasta los 78K antes de la expansión isoentálpica.

Sin embargo, existe un proceso de licuado alternativo que consiste en hacer pasar el hidrógeno gas a alta presión a través de una turbina, que enfría el gas sea cual sea su temperatura y si se encuentra por encima o por debajo de la temperatura de inversión. En este caso se emplea un compresor isotérmico seguido de una expansión isentrópica para enfriar el gas y producir líquido, aunque solo teóricamente, pues en la práctica solamente puede enfriarse el gas y no condensarlo, ya que de lo contrario el líquido dañaría la turbina.

Uno de los principales inconvenientes que presenta el almacenamiento de hidrógeno es que, en las condiciones en las que se almacena el hidrógeno licuado, este se encuentra en el punto límite de ebullición, es decir, en el límite entre el líquido y el gas, por lo que cualquier transferencia de calor (bombeo, trasiego, transferencia de calor radiante...) provocará que parte del hidrógeno se evapore, lo que producirá pérdidas. Para evitarlo, los contenedores criogénicos deben evitar al máximo posible la transferencia de calor entre el líquido y el exterior, para lo que se emplean varias capas reflexivas para envolver al contenedor y se protege con una doble pared con un vacío entre ambas, para garantizar el máximo aislamiento posible.

No obstante, el mayor obstáculo para emplear este método de almacenamiento a gran escala es la cantidad de energía que consume. El trabajo requerido para licuar hidrógeno, por lo menos de forma ideal, es de 3,228 kW por kilogramo de hidrógeno licuado, muy superior a la de otros

como el nitrógeno (0,207 kW por kg). Por tanto, debe tenerse en cuenta que es un proceso con un alto consumo de energía y en el que no se eliminan los problemas de pérdidas por difusión.

- **Hidruros metálicos:** pese a no ser el método de almacenamiento más común hoy en día, el empleo de los hidruros metálicos es una de las opciones más prometedoras. De hecho, desde hace años ya se emplean para almacenar hidrógeno en estado sólido a pequeña escala en las baterías de hidruros metálicos. Estos materiales tienen la capacidad de absorber hidrógeno en su estructura de forma reversible, es decir, pueden absorber el hidrógeno de tal forma que después pueda extraerse para volver a disponer de él. El hidrógeno se absorbe o se libera a través de reacciones químicas provocadas por la variación en la presión o la temperatura del hidrógeno.

Pero esta forma de almacenamiento también presenta problemas. El primero es el desgaste de los hidruros, puesto que estos se rompen después de varias absorciones y liberaciones de hidrógeno. El segundo es que los hidruros se ven altamente condicionados por las impurezas, como el oxígeno o el monóxido de carbono, lo que daría como resultado la incapacidad del hidruro para absorber el hidrógeno, lo que obligaría a trabajar siempre con hidrógeno de alta pureza. Para evitar esto se ha propuesto descomponer el hidruro y encapsularlo en una matriz porosa hecha de sílice, formando así un material compuesto lo bastante poroso para que el hidrógeno alcance los hidruros, pero con poros lo bastante pequeños como para que las moléculas más grandes de las impurezas no puedan penetrar. Además, la matriz porosa tiene espacio suficiente en su interior como para permitir que los hidruros alteren su volumen en la absorción de hidrógeno sin romperse. Todo ello da lugar a que el coste de empleo de este método de almacenamiento es sustancialmente mayor que el hidrógeno comprimido, lo que dificulta enormemente su empleo generalizado, pero resulta prometedor porque resulta más seguro de operar y requiere menos volumen que el resto de las técnicas.

Existen distintos tipos de hidruros, cada uno con distintas características y diferente capacidad de almacenamiento. Entre ellos podemos destacar los hidruros activados de magnesio, los hidruros metálicos compuestos y los hidruros metálicos de base circonio, siendo estos los más interesantes y más ampliamente utilizados.

- **Hidruros químicos:** se trata de hidruros que, al mezclarse con agua se transforman en hidróxidos, provocando como consecuencia la liberación de hidrógeno. La reacción puede realizarse también de forma inversa, denominada reciclado, con la que se almacena el hidrógeno dentro del hidruro. Los hidruros que se emplean en este tipo de aplicaciones son hidruros bimetálicos que se hidratan al reaccionar con agua, dando lugar a hidróxidos hidratados que se descomponen si adquieren una temperatura superior a la de evaporación del agua. En esta descomposición se libera el hidrógeno y se obtiene el hidróxido. Para volver a obtener el hidruro a partir del hidróxido se pasaría por un proceso de regeneración en el que el hidróxido absorbe hidrógeno. Para este proceso de regeneración es necesario ponerlo en contacto con un corriente de dióxido de carbono

A pesar de que tanto investigadores como instituciones han puesto gran interés en desarrollar un sistema de almacenamiento que permita una conservación segura y eficiente, lo cierto es que aún no ha podido desarrollarse un método que satisfaga plenamente los requerimientos necesarios para el empleo de hidrógeno a gran escala, especialmente para poder hacerlo viable como medio de propulsión de vehículos.

2.3.3 Aplicaciones del Hidrógeno

El hidrógeno no es, en absoluto, un recurso de reciente descubrimiento, pues desde hace décadas ya se le daba distintos usos en distintos ámbitos. Sin embargo, si ha sido objeto de mayor atención en los últimos años pues, como ya se ha comentado en los apartados anteriores, el hidrógeno constituye actualmente una de las alternativas más prometedoras para sustituir a las fuentes de energía de origen fósil. Esto se debe en gran medida al desarrollo de tecnologías que permiten emplear este combustible en aplicaciones antes reservadas a los combustibles fósiles, además de las tecnologías que se siguen

desarrollando actualmente y en las que se tienen puestas grandes esperanzas para poder emplearlo en sectores que actualmente resultan prácticamente imposibles de descarbonizar. Por todo ello, es necesario ofrecer una perspectiva de las aplicaciones del hidrógeno en su conjunto, tanto de las que se le han dado tradicionalmente, como las que han sido posibles en los últimos años y las que cabría esperar en el futuro.

Las aplicaciones tradicionales que se le han dado al hidrógeno son en su mayoría de tipo industrial. El principal uso que ha recibido tradicionalmente el hidrógeno es para la producción de amoníaco, hasta el punto de que el mayor consumidor de hidrógeno (con un consumo que oscila en torno al 40% del total) es la industria química, principalmente para producir amoníaco, pero también otros productos como fertilizantes o metanol, y otros usos minoritarios como materia prima para la producción de vidrio o en la industria alimentaria para la hidrogenación de aceites. El segundo uso más importante que se le da al hidrógeno es en la industria petroquímica para el refinado de crudos. (con un 37% del consumo de hidrógeno). El hidrógeno se emplea para el *hidroprocesado*, el proceso por el cual se eliminan altos contenidos de compuestos pesados y de compuestos contaminantes de los combustibles, aumentando su valor. Dentro de este proceso pueden realizarse dos procesos distintos según las condiciones en las que se lleven a cabo. El primero es el *hidrotratamiento*, que se emplea principalmente en las naftas para la eliminación de compuestos como el azufre o el hidrógeno, y que incluye además otros procesos más específicos (hidrodesulfuración, hidrodearomatización hidrodesmetalización e hidrodesnitrificación). El segundo proceso es el de *hidrocraqueo*, que incluye procesos de hidrotratamiento, pero también de craqueo, y cuyo objetivo es la transformación de fracciones pesadas en fracciones medias y ligeras [28]. En este aspecto, es especialmente relevante el empleo de hidrógeno verde, que contribuiría a disminuir en gran medida la emisión de gases contaminantes asociados a la producción de combustibles [29].

Sin embargo, el uso que ha popularizado el hidrógeno en los últimos tiempos es su capacidad de almacenamiento de energía actuando como vector energético. Las primeras intenciones del uso de hidrógeno como fuente de energía provienen del sector del transporte de mediados del siglo pasado, cuando se especulaba con la posibilidad de desarrollar un motor propulsado por agua, sin que se haya podido alcanzar un resultado viable. Sin embargo, si se ha conseguido desarrollar motores de combustión y turbinas alimentadas con hidrógeno y que se presentan como opciones prometedoras para su empleo en el sector del transporte. Sin embargo, el factor fundamental proviene del desarrollo de las células de combustible (Figura 2-6), que abren la posibilidad de emplear hidrógeno como fuente de energía para su consumo en industrias y viviendas. Este elemento es el que centra todas las expectativas de poder emplear el hidrógeno como combustible alternativo a los de origen fósil, por lo que resulta conveniente analizar su funcionamiento con cierto detalle.

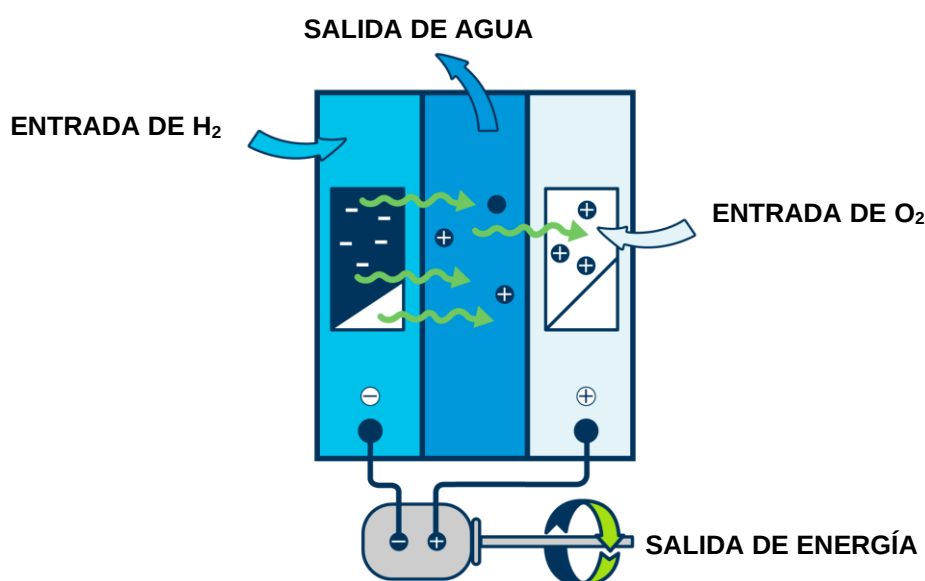


Figura 2-6 Esquema de funcionamiento de una celda de combustible. Fuente: [24]

En una celda de combustible tiene lugar un proceso contrario al que ocurre en una celda electrolítica, si bien son elementos con muy similares a nivel componentes y reacciones. Al igual que en una celda electrolítica, la celda de combustible está formada por dos electrodos, un ánodo y un cátodo, entre los que se sitúa un electrolito. El hidrógeno es introducido en la celda a la vez que es descompuesto por un catalizador en protones y electrones, de tal forma que los protones se dirigen al ánodo mientras los electrones lo hacen al cátodo. Estos electrones pasan del cátodo a un circuito para generar la energía eléctrica. A continuación, electrones y protones se encuentran al final del circuito, junto con oxígeno, para formar H_2O . Por lo tanto, a partir de hidrógeno y un catalizador se obtiene energía (eléctrica, pero también en forma de calor) y agua sin generar, por tanto, ningún producto contaminante. Al igual que ocurre con los electrolizadores, existen distintos tipos de células de combustible [27]:

- **Alcalinas:** En estas células se emplea como electrolito el hidróxido de potasio, con una concentración variable según la temperatura a la que opere la célula, en una matriz de amianto. Es importante tener en cuenta que esta célula admite distintos tipos de catalizadores, pero no así a la presencia de CO_2 en la corriente de hidrógeno ni en la corriente de oxígeno
- **De carbonatos fundidos:** emplean como electrolito una combinación de litio, potasio y sodio en una matriz cerámica. Operan a temperaturas elevadas, entre 600 y $700^\circ C$, provocando que los carbonatos se fundan en una sal muy conductora que es la que realmente actúa como electrolito y que permiten que no sea necesario emplear catalizadores de metales nobles. También pueden ser alimentadas con combustibles que provengan del gas natural y del carbón, mientras lo hagan en estado gaseoso. Su eficiencia oscila en torno al 60% y son mucho menos sensibles a la presencia de óxidos de carbono, llegando incluso a poder emplearlos como combustibles, ya que las altas temperaturas permiten obtener el hidrógeno gracias a un proceso de reformado interno. Sin embargo, presentan el problema de ser poco duraderas, debido en gran parte a las altas temperaturas de elevación y a la corrosión que provocan los electrolitos.
- **De óxidos sólidos:** el electrolito usado es Y_2O_3 y ZrO_2 , a temperaturas que oscilan entre 900 y $1000^\circ C$ para permitir la conducción de iones de oxígeno. Al igual que ocurre en las de carbonatos fundidos, las altas temperaturas evitan tener que emplear catalizadores de metales nobles y admitir una mayor variedad de combustibles al poder obtener el hidrógeno por reformado interno, así como aumentar su resistencia a óxidos de carbono y al azufre, frente al cual son las más resistentes. Este tipo de células podrían resultar especialmente útiles para aplicaciones de alta potencia de uso industrial.
- **De ácido fosfórico:** como su propio nombre indica, estas células emplean ácido fosfórico como electrolito, en concentraciones cercanas al 100%, en una matriz de SiC y empleando platino negro como catalizador. Operan a temperaturas más bajas, que oscilan entre los 150 y los $220^\circ C$. Estas células son, hasta cierto punto, tolerantes con las impurezas, aunque estas disminuyen su eficiencia, que oscila entre el 35 y el 50%.
- **De membranas poliméricas o PEM:** En este caso el electrolito es una membrana de un polímero especial conductor de protones H^+ . Por lo general el polímero empleado es el Nafion, que actúa como un excelente conductor de protones en presencia de agua. Este material presenta poca estabilidad si trabaja a altas temperaturas, pero este tipo de celdas opera a temperatura,s que se sitúan alrededor de los $80^\circ C$. Como consecuencia de esto, requieren el empleo de catalizadores de platino, pero a la vez les permite comenzar a funcionar rápidamente (puesto que tienen un menor tiempo de calentamiento) y estar sometidas a un menor estrés térmico. El platino que emplea como catalizador es altamente sensible a la presencia de CO en la corriente de entrada, por lo que es necesario emplear hidrógeno que no proceda del reformado de hidrocarburos o bien reducir el CO mediante un reactor externo. Presentan el inconveniente de que tanto el Nafion de la membrana como el platino presentan un coste muy elevado, pero este tipo de celda, con un rendimiento entre el 35 y el 60%, son las más prometedoras para su uso en vehículos eléctricos propulsados por hidrógeno.

- **De metanol directo:** Este tipo de células se basan en la tecnología de las células de membrana polimérica, con dos electrodos separados por una membrana conductora de protones que actúa como electrolito. Sin embargo, se diferencian de estas en que el ánodo se alimenta con metanol en estado gaseoso, bien humidificado o en una disolución acuosa en estado líquido, mientras que el cátodo realiza la misma operación que en célula de membrana polimérica, reduciendo oxígeno para formar agua. El resultado es una reacción que da lugar a CO_2 e hidrógeno, lo que resulta relevante al ser la única celda que genera gases contaminantes como producto. Sin embargo, resultan especialmente interesantes porque cubren un amplio rango de necesidades, pudiendo emplearse tanto instalaciones de gran potencia (5-100kW), como podría ser instalaciones residenciales o incluso industriales, hasta elementos portátiles de bajo consumo (1-100 W) como ordenadores o teléfonos, incluyendo también potencias intermedias (3-50 kW) que incluyen fuentes auxiliares o incluso la propulsión de vehículos, si bien estos no resultan competitivos frente a los motores de combustión interna por el momento.

El almacenamiento de energía para uso doméstico e industrial, así como sus aplicaciones en el transporte terrestre, han colocado al hidrógeno en un lugar fundamental en la transición energética. Sin embargo, el desarrollo tecnológico aspira a dotar al hidrógeno de nuevos usos, especialmente en los sectores que actualmente se presentan muy difíciles de descarbonizar. Son especialmente interesantes las orientadas a la propulsión de buques [30] y aeronaves [31] y la producción de acero [29], los tres sectores especialmente relevantes en la emisión de gases contaminantes en los que ya se han llevado a cabo pruebas con relativo éxito.

2.4 La energía eólica

Si bien es cierto que este trabajo se articula sobre el hidrógeno y su producción, no puede obviarse el aspecto fundamental que supone la energía eólica como medio para hacer posible la producción de hidrógeno. En especial, debe prestar atención a las posibilidades que ofrece la eólica marina, y las implicaciones que pueden derivarse del empleo de estas tecnologías *offshore*.

2.4.1 La energía eólica para la producción de hidrógeno

En los apartados anteriores ya se ha comentado que el hidrógeno no es una fuente de energía como tal, sino un vector energético, es decir, un elemento que permite almacenar energía generada por otras fuentes. Es por esto que, según el origen que tenga la energía para generar el hidrógeno, podemos clasificarlo en distintas categorías: hidrógeno gris si procede de la quema de combustibles fósiles, hidrógeno azul si procede de combustibles fósiles sin emisiones de CO_2 (puesto que este queda contenido y no se libera a la atmósfera) e hidrógeno verde si procede de fuentes de energía renovable (Figura 2-7). Este último es el que resulta interesante, pues es el que verdaderamente puede jugar un papel relevante en la transición energética que permita abandonar los combustibles fósiles, puesto que abre la puerta a solucionar uno de los principales inconvenientes que presentan las energías renovables: la falta de constancia en el suministro. Por lo general, la producción de energías renovables depende de las condiciones del medio: las horas de luz solar y su intensidad, la velocidad del viento, el caudal de los ríos o la fuerza de las olas son ejemplos de factores ambientales cambiantes con capacidad para modificar sustancialmente la tasa de producción de energía de las fuentes renovables. De esta forma, se dan situaciones en las que la producción de las energías renovables se sitúa por encima de la demanda, con lo que el excedente de energía se desperdicia, mientras que otras veces la producción es inferior a lo necesario, obligando a recurrir a otras fuentes de energía. Gracias al hidrógeno este excedente puntual de energía puede emplearse en producir hidrógeno y almacenarlo, de tal forma que puede emplearse para producir energía cuando la producción de las fuentes renovables sea insuficiente o para alimentar otros consumos, como el transporte.

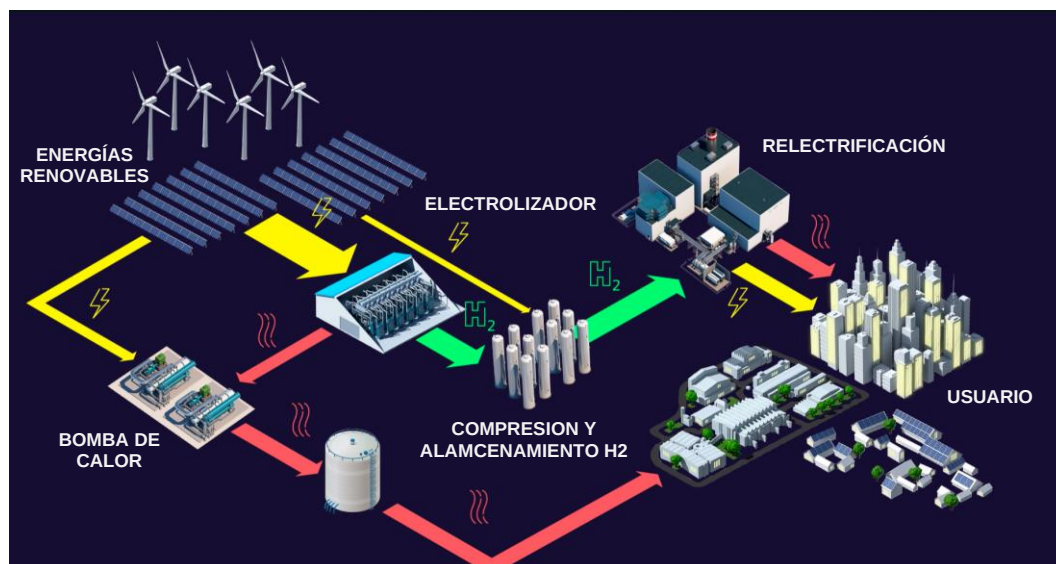


Figura 2-7 Esquema de una planta de producción de hidrógeno a partir de energías renovables. Fuente: [32].

Por lo tanto, el futuro del hidrógeno como combustible va ligado íntimamente al empleo de las energías renovables, de tal manera que no se pueden obviar a la hora de hablar de las posibilidades del hidrógeno en los sistemas energéticos del futuro. Sin embargo, dada la naturaleza de este trabajo, resulta conveniente centrarse particularmente en la energía eólica y, más concretamente, en la eólica marina.

2.4.2 La eólica marina

Como indica su propio nombre, la eólica marina consiste en la aplicación de las tecnologías de la producción eólica terrestre al ámbito marino. La principal diferencia es que los aerogeneradores deben estar preparados para instalarse en el mar, pero con la ventaja de que, al no existir barreras geográficas, la potencia generada a partir del viento es mayor y más constante, por lo que el rendimiento de los aerogeneradores es perceptiblemente mayor. Además, la generación eólica permite solventar la falta de terreno adecuado para la construcción de parques eólicos en tierra, además de evitar el tener que transportar y levantar los aerogeneradores en terrenos agrestes y de difícil acceso donde suelen instalarse los parques terrestres, abaratando así el coste de construcción. Por último, tienen un impacto sonoro y visual muy reducido, puesto que se ubican en alta mar y a cierta distancia de costa, donde no puedan ser vistos desde tierra ni generen ruidos molestos para las poblaciones más cercanas [33].

Sin embargo, también presenta varias desventajas que deben tenerse en cuenta, si bien estas representan escollos cada vez menos decisivos para su construcción. El principal es el coste de construcción y de operación que tienen estos parques pues, si bien su acceso y el transporte es más sencillo, su construcción requiere de operaciones complejas y muy específicas, como emplear buques y maquinarias empleadas exclusivamente para este propósito y que no son abundantes. Además, debe sumarse el coste de construir el cableado submarino e instalaciones de contratación necesarias, cuya construcción también se ve encarecida por tener que realizarla en el mar. Esta complejidad no implica solo un problema de costes, sino de tiempo, pues la construcción de estos campos requiere de un estudio de la zona y de una construcción lenta para poder satisfacer los todos los requerimientos, además de estar expuesto al clima marino, donde resulta sencillo que las condiciones meteorológicas imposibiliten los trabajos y obliguen a detener los trabajos. Por último, implica también un problema medioambiental, pues las alteraciones de un medio tan delicado como el marino debido a los trabajos de construcción y a las vibraciones originada por su funcionamiento pueden tener un impacto tremendamente negativo sobre las especies e incluso obligarlas a desplazarse a otros entornos [33].

No es objeto de este trabajo detallar en profundidad el funcionamiento de los aerogeneradores marinos ni explicar detalladamente el proceso por el que obtienen la energía, pero si resulta necesario y conveniente dar una orientación de los elementos que componen estos sistemas y cuáles son las

características generales de su funcionamiento. Resulta especialmente conveniente describir, aún de manera somera, el elemento principal que permite el funcionamiento de estos sistemas: el aerogenerador marino. Estos elementos funcionan, esencialmente, de la misma manera que sus homólogos en tierra, pero con ciertas adaptaciones que les permitan trabajar en el entorno marítimo, como la unión hermética de los elementos para protegerlos de las condiciones del medio, la aplicación de tratamientos para proteger los materiales de la corrosión y la salinidad o el empleo de un sistema de deshumidificación. A parte de estas salvedades, los componentes que podemos encontrar en el aerogenerador son prácticamente los mismos que en un aerogenerador terrestre (Figura 2-8) [34]:

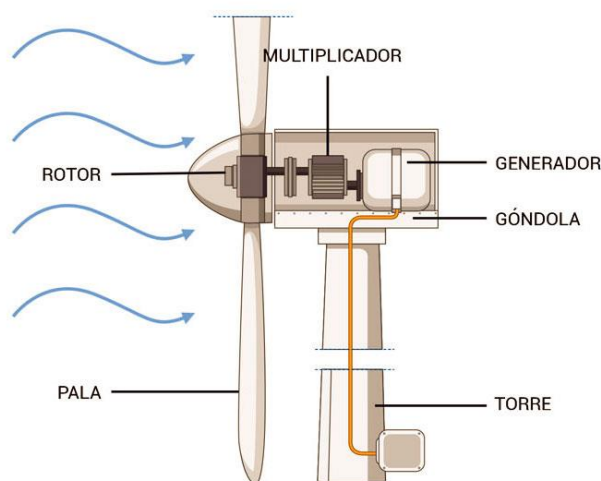


Figura 2-8 Partes de un aerogenerador. Fuente: [35].

- **Torre:** la torre es el soporte vertical sobre el que se sustenta el conjunto de la góndola y el rotor. Su función principal es proporcionar al aerogenerador la altura necesaria para funcionar y soportar los esfuerzos a los que se verá sometido por acción del viento. El adecuado diseño de estos elementos es fundamental para la construcción de los aerogeneradores, no solo porque deban resistir con seguridad las cargas que se apliquen sobre el aerogenerador, también porque un adecuado dimensionamiento aumentará la eficiencia del aerogenerador. Evidentemente un aerogenerador no podrá tener una altura menor al radio de sus palas, pero instalar un gran aerogenerador en una torre de poca altura sería desperdiciar recursos, pues una torre alta permitiría obtener velocidades de viento más altas y mayor energía, aunque con mayor coste de construcción. Sin embargo, en el caso concreto de los aerogeneradores marinos, la baja rugosidad del suelo permite que los aerogeneradores no necesiten tanta altura. Además, estas torres pueden ser hechas con distintos materiales y distintas estructuras, pero lo más común en la eólica marina es emplear torres tubulares de acero [36].
- **Góndola:** es la parte superior de la estructura, que contiene el multiplicador, el generador y el acople con las palas. La misión fundamental de la góndola es proteger de la intemperie y la corrosión a estos elementos.
- **Palas:** son los elementos que captan la energía cinética del viento para generar el movimiento del aerogenerador gracias a su forma aerodinámica. Por tanto, el diseño de estos elementos debe buscar la máxima eficiencia aerodinámica y el mínimo peso, por lo que se construyen principalmente de fibra de carbono y aleaciones metálicas. Por lo general, la disposición más habitual de las palas es en un ángulo de 120° y, en el caso concreto de la eólica marina, pueden conseguirse velocidades de palas más altas que en tierra puesto que no están limitadas por los ruidos y las vibraciones sobre las poblaciones cercanas, consiguiendo una mayor producción de energía.

- **Buje:** el buje es elemento móvil central sobre el que se fijan las palas, acoplándose éste a su vez al eje del aerogenerador. Por lo general está construido con aleaciones metálicas, pero se protege de la intemperie y la corrosión con una cubierta ovalada, puesto que se trata de un elemento crítico para el funcionamiento del rotor, encargado de transmitir las fuerzas de la pala al eje. Además, el diseño del buje condiciona en cierta medida el rendimiento del aerogenerador, puesto que permite, o no, cierta movilidad de las palas según la forma de operación del generador. Distinguimos así los bujes rígidos, basculantes o de palas abisagradas (Figura 2-9).

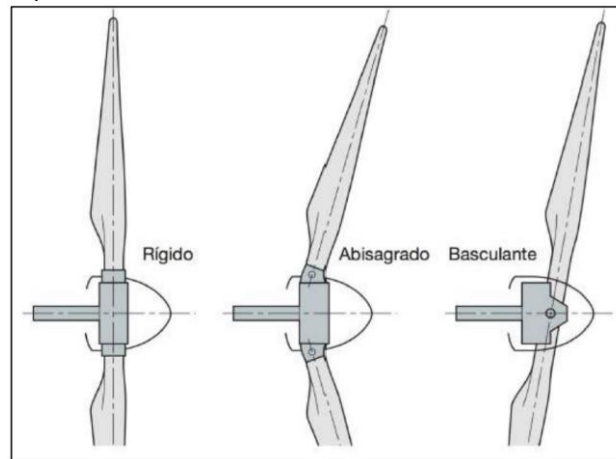


Figura 2-9 Tipos de bujes. Fuente: [34].

- **Multiplicador:** si bien este no es un elemento que exista en todos los generadores, lo cierto es que es habitual encontrarlo. Su función, en esencia, es transformar las bajas velocidades a las que gira el rotor de las aspas en las altas velocidades de giro que requiere la generación eléctrica. Consecuentemente, aquellos generadores que empleen un multiplicador tendrán dos ejes, uno con giro a altas velocidades y otro con velocidades de giro mucho menores.
- **Generador:** este elemento es fundamental para el funcionamiento del aerogenerador, puesto que es el elemento que transforma la energía cinética del movimiento del rotor en energía eléctrica. Los generadores pueden ser síncronos o asíncronos, aunque el más empleado en la producción de energía eólica es el segundo tipo, que requiere más mantenimiento y estar sincronizado con la red, pero que admite velocidades variables.
- **Sistema de orientación:** este es el sistema que permite al aerogenerador adaptarse a las variaciones en la dirección del viento para maximizar la producción de energía, orientando las palas del aerogenerador en la dirección del viento. Estos sistemas pueden ser pasivos o activos, aunque en los parques eólicos (incluidos los offshore) suelen emplearse los activos. Estos requieren la instalación de veletas y anemómetros en el aerogenerador para conocer la dirección del viento y un accionamiento eléctrico que desplace el aerogenerador en orientación hacia la dirección de la que viene el viento.
- **Sistema de regulación:** es lo que permite al aerogenerador hacer frente a las variaciones en la intensidad de viento. Generalmente lo hace variando el ángulo de ataque de las palas para maximizar o minimizar la acción del viento sobre su superficie, pudiendo colocarlas de canto al viento, en posición de bandera, de mínima resistencia o de máxima captación. Con ello puede incluso detenerse el aerogenerador por seguridad si se programa para ello.

Como se ha comentado, no existen grandes diferencias de diseño y de funcionamiento entre los generadores marinos y los terrestres. Donde sí va a existir una gran diferencia es en la fijación del aerogenerador en el terreno, es decir, en su cimentación. Los aerogeneradores terrestres se instalan directamente sobre el terreno, pero los aerogeneradores marinos deben colocarse sobre la superficie del mar, cimentándose sobre el lecho marino y siendo lo bastante resistentes para resistir los embates de las olas y las corrientes, la fuerza del viento y la corrosión inherente al entorno marino y al agua de mar.

Esta circunstancia complica en gran medida su instalación, hasta el punto de que la cimentación de la turbina supone en torno al 20% del coste total de instalación. Es por ello por lo que, para hacer frente a estos condicionantes, se han desarrollado distintos tipos de cimentación para adecuarse a las distintas posibilidades que puedan darse. Estas cimentaciones se agrupan principalmente en aquellas pensadas para ubicarse en sondas inferiores a los 50 metros, las cimentaciones poco profundas, y las pensadas para sondas mayores, que requerirían emplear cimentaciones flotantes.

Las cimentaciones flotantes se basan en asentar los aerogeneradores sobre elementos flotantes anclados mediante líneas de fondeo al lecho marino para evitar que se desplacen. Es por ello por lo que requieren un diseño y una instalación más complejas, además de sistema de posicionamiento y fijación muy avanzados, por lo que su coste es muy elevado. Es por ello por lo que en la actualidad los parques eólicos solo emplean cimentaciones poco profundas. Sin embargo, estas cimentaciones siguen desarrollándose, pues muchas zonas costeras carecen de las condiciones y el perfil de costa necesario para que sea posible emplear cimentaciones poco profundas, como es el caso de gran parte de las costas atlánticas y mediterráneas, por lo que desarrollo de estas estructuras abre la puerta a la construcción de campos eólicos en lugares hasta el momento inviables. Además, ofrece otras ventajas frente a las fijas, ya que transfieren los esfuerzos al mar en lugar de al lecho marino, aumentando su resistencia, y resulta mucho más sencillas de desinstalar [33]. Actualmente se han desarrollado tres modelos que podrían resultar prometedores (Figura 2-10) [34]:

- **Estructura semi sumergible:** este tipo de estructura parte de las que ya se emplean para las explotaciones gasísticas y petrolíferas en altamar, con una parte de la estructura en la superficie mientras que a la parte sumergida se le colocan tres flotadores, con lo que la estructura se sustenta en su propia flotabilidad, de tal forma que la estructura pueda moverse verticalmente con el movimiento de las olas, regulándose mediante lastres y la fijación al lecho marino. Sin embargo, presenta el inconveniente de que este movimiento vertical podría llegar a introducir parte de la estructura en el agua
- **Estructura *Tension Leg Platform*:** funciona de forma similar a la semi sumergible, solo que la su flotabilidad es mucho mayor y los anclajes al lecho marino se hacen con cables tensionados mucho más rígidos y menos flexibles, que limitan el movimiento horizontal y vertical del flotador. Es una tecnología probada con éxito en plataformas petrolíferas, pero con un coste de instalación elevado.
- **Estructura SPAR:** en este caso se utiliza un flotador cilíndrico con un lastre que baja su centro de gravedad para mantenerla vertical y semisumergida. El flotador se fija al lecho marino con anclajes tradicionales, dando como resultado un diseño relativamente estable y una estructura con una instalación relativamente sencilla y que puede emplearse en sondas muy elevadas, pero que a su vez es sensible al oleaje de gran periodo y requiere un coste elevado para el desplazamiento de los flotadores.

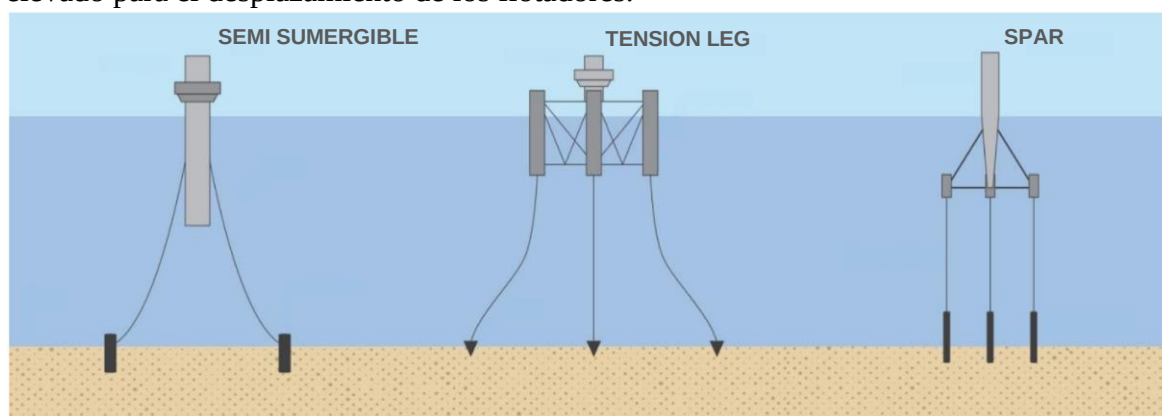


Figura 2-10 Esquema de las tres cimentaciones flotantes: semi sumergible, *tension leg platform* y SPAR.
Fuente: [37].

Para las cimentaciones poco profundas, por el contrario, existe una mayor variedad, pues en este caso la cimentación puede transferir los esfuerzos al lecho marino y este nunca se encontrará más allá de los 50 metros de profundidad (Figura 2-11, Figura 2-12) [34]:

- **Monopilotes:** este método de cimentación es el más común actualmente en los campos *offshore* actuales, basada en métodos similares empleados en explotación de gas y petróleo, y en ciertos aspectos muy similar a la de los aerogeneradores en tierra. Se trata de un pilote vertical construido en acero y clavado en el terreno, pudiendo alcanzarse sondas de hasta 25 metros. El problema que presenta este método son los requerimientos del fondo, pues no es posible introducirlo en un lecho demasiado duro ni es lo bastante resistente si se fija en un lecho blando. También debe tenerse en cuenta la desinstalación, que resulta compleja con este método.
- **Bases de gravedad:** este sistema se basa en emplear un pilote muy ancho en su base, con lo que genera una superficie de contacto mayor y, sobre todo genera un gran peso. Este sistema mantiene fijo al generador por la acción de la gravedad en la base, de tal forma que esta solo penetra levemente en el terreno. Son las segundas más usadas, puesto que son fáciles de construir y de desinstalar, pudiendo alcanzarse profundidades de hasta 30 metros. El inconveniente que presentan es la dificultad en el transporte, debido a su gran peso, y el que solamente puedan ubicarse en lechos marinos que sean horizontales y permitan acomodar la base.
- **Cubos de succión:** en esta forma de cimentación se emplea un cilindro de gran radio y parcialmente enterrado, quedando anclado al fondo mediante succión. A este cilindro se fija un soporte cilíndrico hasta la superficie, donde se colocaría la torre del generador. Sin embargo, este sistema es poco interesante, puesto que ya ha presentado fallos y actualmente se encuentra en desuso.

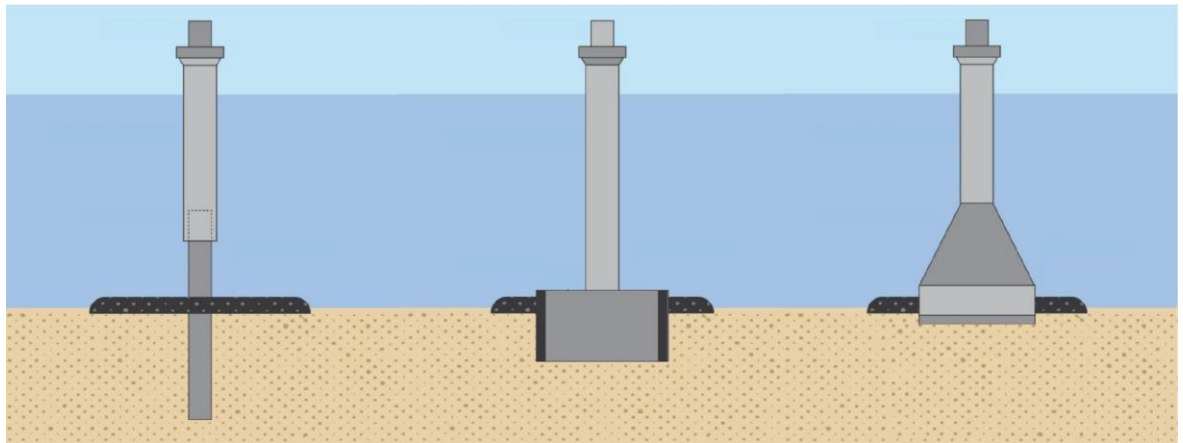


Figura 2-11 Bases de tipo monopilote, base de succión y gravedad. Fuente: [37].

- **Jackets:** se trata de estructuras tubulares construidas en acero fijas al fondo empleando cubos de succión o pilotes, lo que les permite tener gran resistencia con un peso mucho más bajo que el de otras cimentaciones, pudiendo instalarse en profundidades que superen los 40 metros. Al tratarse de estructuras más complicadas, su construcción también es más compleja y, por tanto, de mayor coste.
- **Tripods:** parte del diseño del monopilote, solo que en este caso se emplean tres más pequeños que soportan el peso de un cuarto pilote central, de tal forma que la carga se reparte entre los tres anclajes, aumentando la resistencia del conjunto, con lo que pueden instalarse en profundidades que varían entre los 20 y los 40 metros. Sin embargo, presentan varios inconvenientes pues, al igual que los monopilotes, necesita que el fondo no sea

demasiado duro ni demasiado blando para poder lograr una buena resistencia y, al igual que los jackets, su diseño es más complejo y requiere de un estudio más detallado.

- **Tripiles:** es una cimentación similar a la anterior, con la salvedad de que no existe un pilote central sustentando por los otros tres, sino que los tres pilotes se unen sobre la superficie del mar y, sobre esta unión, se coloca la torre del aerogenerador. Permite construir campos en profundidades entre los 25 y los 50 metros, pero presentan inconvenientes similares al anterior: el elevado coste de su diseño y construcción, si bien permite más flexibilidad para adaptarse al terreno, así como unas adecuadas características del fondo.

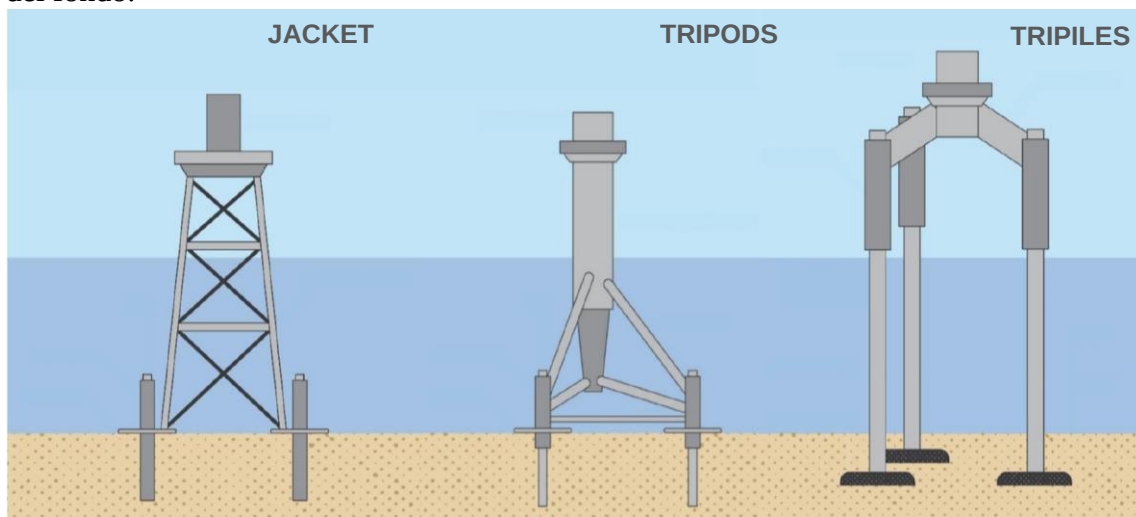


Figura 2-12 Esquema de tres tipos de cimentaciones para aerogeneradores: Jackets, Tripods y Tripiles. Fuente: [37].

2.4.3 Situación actual de la energía eólica.

La energía eólica es, junto con la solar fotovoltaica y la hidráulica, la fuente de energía que más energía aporta a la red eléctrica nacional, con una producción media en torno al 20% del consumo total [38]. De hecho, España parte de una situación privilegiada, con un clima y una geografía que favorecen el empleo de estas fuentes energéticas, llevándola a ser líder en este sector eólico durante varios años y ocupando actualmente el segundo puesto en potencia eólica instalada, solo superada por Alemania, y se sitúa también entre los países que más nueva potencia eólica crean cada año. Si bien su distribución es irregular, todos los territorios han desarrollado en mayor o menor medida la instalación de potencia eólica en sus territorios, a excepción de Madrid y las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla. Además, se ha visto impulsada por el impulso que ha recibido la tecnología de producción eólica en España, donde se han establecido 20 centros de investigación y varias universidades trabajan también orientadas a las tecnologías de este sector, con intención de posicionar al país como una potencia eólica y con resultados tangibles, como las 680 patentes registradas en los últimos doce años [33].

Sin embargo, estos datos son muy distintos cuando nos referimos a la eólica marina, donde la potencia instalada es casi testimonial, de apenas 5 MW, en instalaciones frente a la costa de Canarias, Euskadi y Cantabria. Sin embargo, pese a los pocos avances que se han realizado en este sector en la mayoría de los países europeo, lo cierto es que Europa lidera actualmente la generación eólica marina, con el 70% de las instalaciones eólicas marinas del mundo, gracias en gran medida a las iniciativas de Reino Unido, Alemania, Países Bajos y Bélgica. No obstante, juegan un papel cada vez más importante los países asiáticos, liderados por China, que es desde hace varios años el país que más nueva potencia instala anualmente [33].

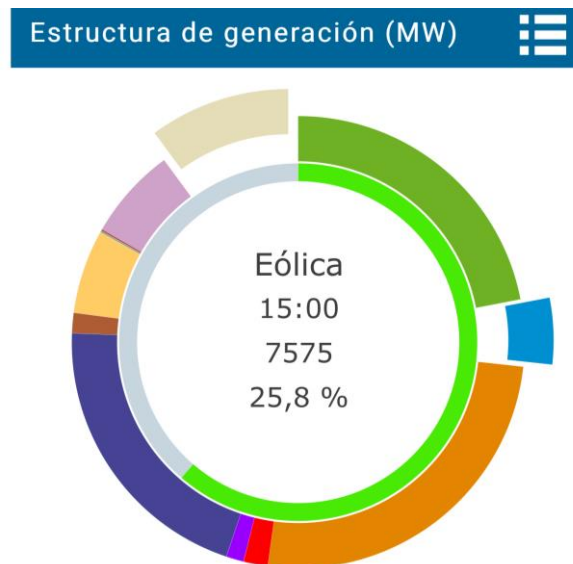


Figura 2-13 Ejemplo de generación de energía en tiempo real para el día 18 de marzo de 2023 a 15:00. Fuente: [38].

En el caso concreto de la eólica marina española, las pocas potencias instaladas en este sector se deben fundamentalmente al perfil de costa, muy distinto al de los países del norte del continente, con una variación muy pronunciada en el gradiente de profundidades, alcanzándose cerca de costa valores de sonda que exceden los 50 metros máximos a los que puede colocarse un aerogenerador marino. Este problema podría evitarse situando los campos de aerogeneradores más cerca de costa, aunque esta opción no se contempla por el impacto visual que podría tener en la costa, afectando significativamente a uno de los principales motores económicos del país: el turismo. Sin embargo, la escasez de terreno rentable para la explotación en tierra firme y el desarrollo de las tecnologías *offshore* han dado lugar a la aparición de nuevos proyectos de este tipo en Canarias, Galicia, Cataluña y Andalucía, que supondrían la instalación de un total de 14 GW de energía en 45 campos de distintas características y en diferentes localizaciones [39].

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Generalidades

Para poder llevar a cabo los objetivos propuestos en este trabajo se ha procedido a realizar una simulación del sistema propuesto en los primeros apartados de este documento. La simulación final del sistema se ha desarrollado el entorno de simulación *Matlab/Simulink*®. Sin embargo, ha sido necesario explorar otros recursos y emplear otra serie de programas para poder modelar todos los elementos de la simulación, que consta de

- Aerogenerador para la producción de energía
- Datos de viento reales con los que alimentar la simulación
- Electrolizador alcalino con el que generar el hidrógeno a partir de la energía eólica.
- Planta destiladora para generar agua destilada a partir del agua salada

El objetivo final es poder combinar estos elementos para poder generar un conjunto que permita abastecer a un electrolizador de energía procedente de un aerogenerador eólico y de agua destilada procedente del mar, a partir de los cuales el electrolizador produciría el hidrógeno.

3.2 Software

El software principal que se ha empleado para poder realizar la simulación es la herramienta *Simulink*® desarrollada dentro del entorno de *Matlab*®, por la compañía Math Works. Este software es una herramienta de modelado multi dominio que resulta especialmente útil a la hora de realizar simulaciones previas a ser aplicadas en un modelo real. Esencialmente, *Simulink*® permite construir simulaciones matemáticas y modelos complejos de forma gráfica empleando bloques independientes con distinta operaciones. Esencialmente, permite traducir el lenguaje de programación de Matlab a un entorno gráfico con el que resulte más sencillo modelar sistemas matemáticos de cierta complejidad empleando distintos bloques capaces de realizar distintas operaciones. Algunas de estas operaciones permiten emplear también el lenguaje de Matlab o sus *scripts* para definir el funcionamiento de alguno de los bloques, pero también permite aplicar puertas lógicas, integración, operaciones matemáticas sencillas, etc. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el software es, en sí, una traducción del lenguaje Matlab, por lo que el programa siempre necesitará un espacio de trabajo de Matlab con el que trabajar y con el que interactuar con el resto de datos del programa. Por ejemplo, para que el programa reconozca los datos de entrada de viento, será necesario importarlos primero al espacio de trabajo de Matlab para que *Simulink*® pueda acceder a ellos [40].

En este caso particular, el software nos permitirá modelar las distintas ecuaciones y cálculos con los que representar el comportamiento de los distintos componentes para obtener un resultado de producción

de hidrógeno. En este aspecto, una de las principales ventajas que presenta el programa es que trabaja realizando sucesivas iteraciones, por lo que puede modelarse no solo una producción instantánea, sino la evolución de dicha producción a lo largo del tiempo. Además, el software permite interpolar para ofrecer una aproximación entre los valores de dos resultados, con lo que será posible obtener unos datos de producción de hidrógeno continuos a partir de una entrada de datos discretos.

Por otro lado, en lo referente al aspecto concreto de modelar la planta destiladora de agua, se ha visto la necesidad de recurrir a un tipo de software que nos permita modelar de forma precisa los procesos que tiene lugar en este elemento para poder realizar una estimación más precisa de su comportamiento en *Simulink*®. Para ello se ha optado por realizar en primer lugar un modelo de la planta destiladora empleando el software *DWSIM*.

DSWIM es un software libre desarrollado por el ingeniero Daniel Wagner Oliveira. Esta aplicación permite simular distintos tipos de reacciones químicas y, en especial, cálculos termodinámicos, además de poder combinarlas para crear modelos complejos. Estableciendo previamente un modelo de cálculo y los flujos necesarios de materia y energía, incluyendo el estado y composición de la materia, el programa permite trabajar con elementos como bombas, filtros, reactores, evaporadores o separadores [41].

3.3 Datos de viento

Conseguir unos datos reales y fiables y lo bastante abundantes como para poder modelar con la necesaria exactitud es un requisito indispensable para que los resultados obtenidos de ellos posean el rigor necesario como para poder ser estudiados. Por lo tanto, se hace necesario detallar aquí el origen de los datos de viento empleados y el proceso por el cual se han obtenido.

Por lo tanto, para comenzar el modelo es necesario crear primero una entrada de datos. Estos datos de viento provienen de la agencia meteorológica MeteoGalicia [42]. Este organismo dependiente de la Xunta de Galicia proporciona información meteorológica para toda la geografía gallega, pero también de sus costas. A lo largo de la costa de Galicia se encuentran repartidas diversas boyas meteorológicas que recogen, entre otros datos, los valores de intensidad y dirección del viento cada diez minutos. Estos datos pueden consultarse y obtenerse de forma libre gratuita desde su página web. En este caso, se han recogido los datos de viento para todo el año 2022, mes a mes, de la boya situada en las inmediaciones de las Islas Cíes, frente a la ría de Vigo. No obstante, cualquier otro dato de viento obtenido de cualquier otra fuente en cualquier otra ubicación son perfectamente válidos en este modelo, por lo que puede estudiarse la producción de hidrógeno en distintas ubicaciones y en distintos periodos mientras existan registros de viento.

Para trabajar con ellos debemos crear una matriz numérica en el entorno de trabajo base de Matlab. La particularidad aquí es que se trata de datos diezminutales que abarcan un mes completo, por lo que el número de datos será mucho mayor, del orden de, aproximadamente, 4300 datos. Además, es importante asignar a cada dato el segundo del mes en que fue tomado, pues la simulación trabaja empleando el segundo como unidad de cálculo, por lo que el programa realizará un cálculo para cada segundo del mes. Como los datos están separados por diez minutos entre ellos, la diferencia será de 600 segundos. Esto quiere decir que al primer dato de viento del mes se le asignará el segundo 0, al segundo dato se le asignará el segundo 600, al tercero el segundo 1200 y así sucesivamente. Por último, para que el modelo pueda acceder a esa matriz de datos desde *Simulink*, se introduce el tipo de fuente *From Workspace* que permite acceder a datos del espacio de trabajo de Matlab, y seleccionamos la matriz correspondiente al mes que pretendemos estudiar.

3.4 Modelado del aerogenerador

El primer elemento a modelar es aquel que permitirá obtener los datos de potencia con los que poder dimensionar y adecuar a la simulación los siguientes sistemas, por lo que se hace necesario comenzar modelando el aerogenerador marino que abastece al sistema de energía. Para hacer esto posible, es necesario obtener primero los parámetros reales de funcionamiento de los distintos aerogeneradores con los que se pretende trabajar y modelar a continuación un sistema que imite este comportamiento.

3.4.1 Obtención de los datos

Para poder modelar correctamente el funcionamiento del aerogenerador se requiere poder transformar una entrada de viento en datos de potencia. Estos datos, deben calcularse experimentalmente y se plasman en una gráfica de potencia del aerogenerador como la que se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, que suele ser proporcionada por el fabricante, aunque cada compañía puede ser más o menos reservada con el empleo de estos datos. Para realizar este trabajo se han recogido datos de múltiples aerogeneradores, intentando seleccionar modelos de distintas compañías y distintas potencias para poder ofrecer una comparativa de las posibilidades que ofrecen y cuales se adecúan más a las características de la instalación. Por ello, ha sido necesario recoger datos de distintas fuentes y mediante distintos procedimientos.

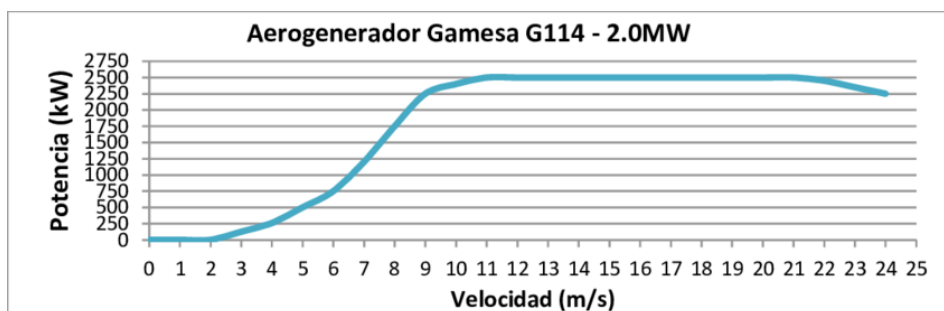


Figura 3-1 Ejemplo de curva de potencia para un aerogenerador marino. Fuente: [43].

En primer lugar, la primera fuente de información ha sido la plataforma *The Wind Power* [44]. Esta empresa se dedica profesionalmente a recopilar información técnica sobre la industria eólica para proporcionar datos fiables en el estudio y desarrollo de proyectos eólicos, así como investigación e innovación en la industria de la generación eólica. Estos datos son muy diversos y comprenden desde la potencia de los aerogeneradores hasta la altura de los rotores o información relevante sobre los desarrolladores de los molinos eólicos. Los datos se actualizan cada seis meses para garantizar su fiabilidad, aunque en su mayoría no se ofrecen de forma abierta, sino de pago. No obstante, sí ofrece ciertos datos de forma libre y gratuita, entre los que figuran los datos de los aerogeneradores *offshore* empleados para este trabajo. La ventaja que aporta emplear los datos de esta fuente es que facilita los valores de potencia directamente en función del viento empleando gráficas interactivas como la mostrada en la Figura 3-2 por lo que no es necesario ningún proceso adicional para recopilar los datos.

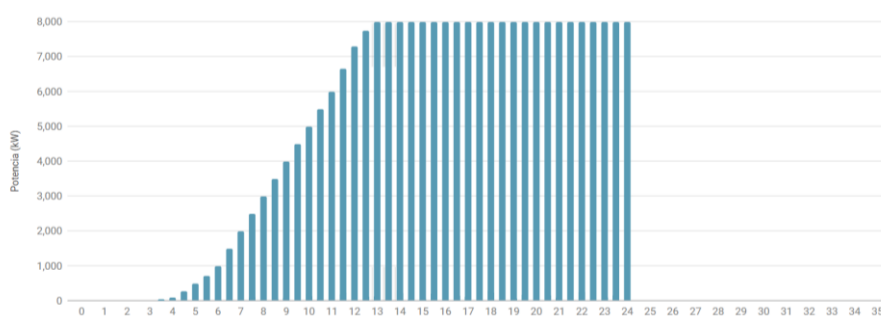


Figura 3-2 Ejemplo de curva de potencia proporcionada por The Wind Power. Fuente: [44].

No obstante, para los datos de otros aerogeneradores se ha recurrido a otras fuentes de información de las que se ha podido conseguir la curva de potencia del generador, es decir, la curva gráfica en la que se representa la potencia generada frente a la intensidad de viento. Para poder obtener los datos a partir de estas curvas se ha empleado la herramienta *Web Plot Digitalizer* [45]. Esta aplicación en línea permite obtener los datos numéricos a partir de la imagen de una gráfica. Para ello basta con subir a la plataforma la imagen de la curva de la que se quiere obtener los datos y marcar tanto el origen de las coordenadas y dos valores aleatorios de los ejes x e y . A continuación, se marcan sobre la imagen todos los puntos de los que se desea obtener los valores numéricos y el programa proporciona automáticamente dichos valores (Figura 3-3). Sin embargo, comparando los datos obtenidos por este medio con los obtenidos en *The Green Power*, se ha considerado que los segundos eran más apropiados por su coherencia y su precisión, por lo que se han descartado aquellos obtenidos a través de esta aplicación web.

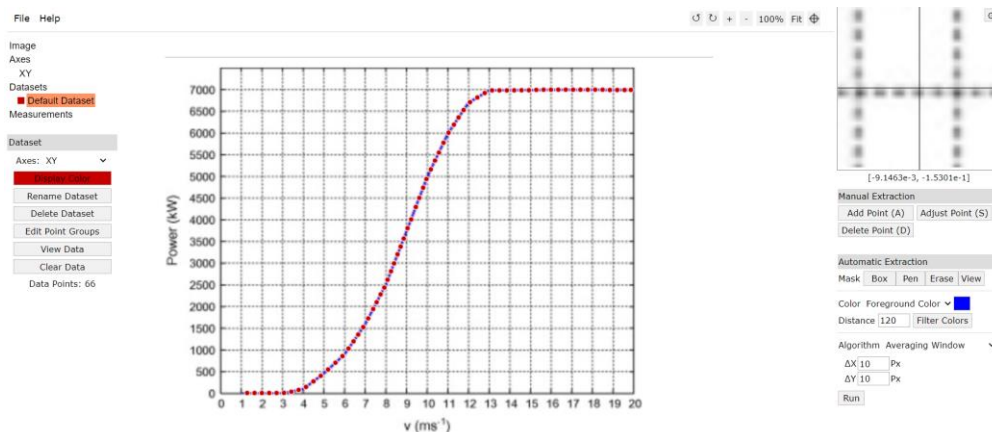


Figura 3-3 Interfaz de la aplicación Web Plot Digitalizer. Fuente: [45].

3.4.2 Ajuste lineal en Matlab

Una vez obtenido los datos de potencia generada en función de intensidad de viento ha sido necesario obtener un ajuste lineal con el que obtener una función lo más ajustada posible a los datos reales que proporcione la potencia generada según los datos de viento, a fin de poder emplearla para modelar matemáticamente el comportamiento del generador en *Simulink*®. Para ello se ha empleado otra de las aplicaciones del programa *Matlab*, el *Matlab Curve Fitter*.

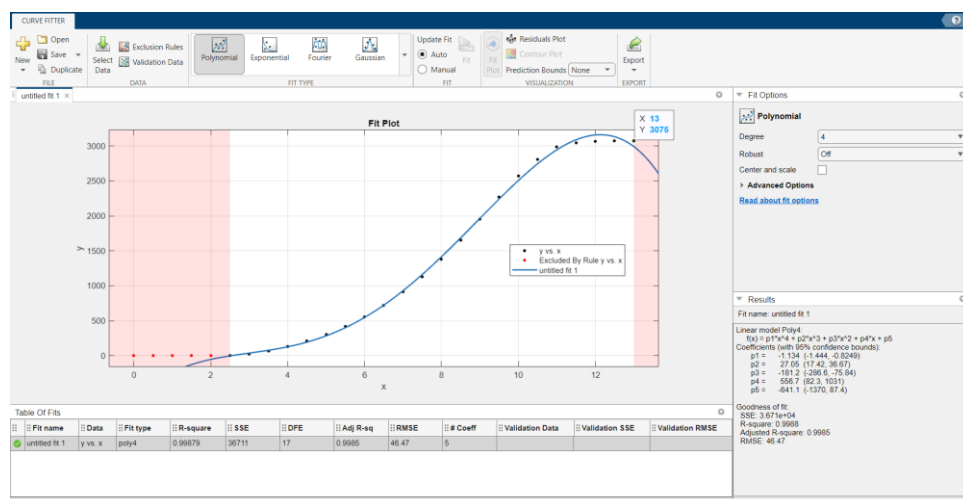


Figura 3-4 Interfaz de la aplicación Matlab Curve Fitter. Fuente: [40].

En primer lugar, es necesario crear una matriz de datos en el espacio de trabajo básico de Matlab, lo cual se consigue importando estos datos directamente de la hoja de cálculo Excel empleando la función *Import Data* y seleccionando como modo de salida la forma de Matriz Numérica. No puede obviarse

este paso, pues la aplicación solo puede trabajar con los datos que se encuentren en el espacio de trabajo de Matlab. Generada la matriz de datos basta con seleccionar en la aplicación qué columna de la matriz es el eje X y cual eje Y para generar una tabla de datos y representarla en la gráfica (Figura 3-4). Con la tabla creada es suficiente con seleccionar la forma de realizar el ajuste según la distribución de los datos: exponencial, Gaussiana, Fourier, etc. Dadas las características de los datos de los aerogeneradores el ajuste polinómico resulta el más adecuado. Dentro del ajuste polinómico, la aplicación muestra también el coeficiente de ajuste R, que debe ser lo más próximo posible a 1, y que se puede ajustar modificando el grado del polinomio. Para la mayor parte de los aerogeneradores, el polinomio de grado 4 ha sido el que mejor se ha ajustado a los datos de la curva, si bien es cierto que para algunos ha sido más adecuado un polinomio de grado cinco.

Es importante destacar que todos los aerogeneradores tienen un comportamiento similar. Para todos ellos existe una velocidad de viento mínima (propia de cada generador, pero aproximadamente de 3 m/s) por debajo de la cual la potencia generada es prácticamente cero. Además, en el límite superior, existe una velocidad del viento óptima a partir de la cual la potencia del aerogenerador es máxima y se mantiene constante, aunque se alcancen mayores velocidades de viento. Por tanto, y para facilitar la aproximación lineal, se ha optado por trabajar con una función definida a trozos tal que:

$$\begin{cases} \text{Potencia} = 0 & \text{si Viento} < V.\text{min.} \\ \text{Potencia} = \text{Resultado polinomio} & \text{si } V.\text{max} < \text{Viento} < V.\text{min.} \\ \text{Potencia} = P.\text{max.} & \text{si Viento} > V.\text{max.} \end{cases}$$

Para poder hacer esto, la propia aplicación permite descartar ciertos valores extremos para calcular el ajuste lineal, tanto en el límite inferior de la curva como en el superior. Por lo tanto, se descartan los valores por debajo del que la gráfica muestra como la velocidad de viento mínima y todo los que se encuentran por encima de la que se haya establecido como velocidad de viento máxima en base a la curve de potencia. Con esta selección hecha, el programa procede a calcular entonces el ajuste lineal.

3.4.3 Modelado en Simulink

Para poder modelar el aerogenerador en *Simulink* es necesario crear un sistema tal que, a partir de unos datos de entrada, proporcione una serie de datos de salida, siendo los primeros datos de viento y datos de potencia generada los segundos.

Una vez se consigue una entrada de viento, el siguiente paso es transformarla en una salida de potencia. Para ello se emplea el operador *Matlab Function*, que permite desarrollar una función empleando lenguaje de Matlab. Como vimos en el punto anterior, la función de potencia está definida a trozos, así que para poder replicar esta lógica se emplea el comando *if/else* como puede verse en Figura 3-5. De esta forma, cuando el valor de entrada de viento se sitúa entre el valor máximo y mínimo, el operador ejecuta la función del ajuste lineal y devuelve el resultado correspondiente. Sin embargo, si el valor de viento está por encima del valor máximo de viento o por debajo del valor mínimo, el operador devuelve automáticamente el valor de potencia máxima o bien un valor de potencia cero.

```

1  function y = fcn(u)
2
3  y = 0.3067*u^4-18.06*u^3+353.5*u^2-1802*u+2716;
4  if u<3
5      y=0;
6  end
7  if u>13
8      y=8000;
9  end
10 end
11

```

Figura 3-5 Ejemplo de código de Matlab Function para el modelado de un aerogenerador. Fuente: Autoría propia.

Por último, deben colocarse en las entradas y salidas de la función varios operadores *Scope*, que permiten visualizar gráficamente el valor de la señal en cada momento de la simulación, a fin de obtener datos, poder comprobar el buen funcionamiento de la simulación o localizar un error. A lo largo de la simulación, estos elementos se colocarán en muchas de las señales de las que consta la simulación. El resultado final es tal como se muestra en la Figura 3-6.

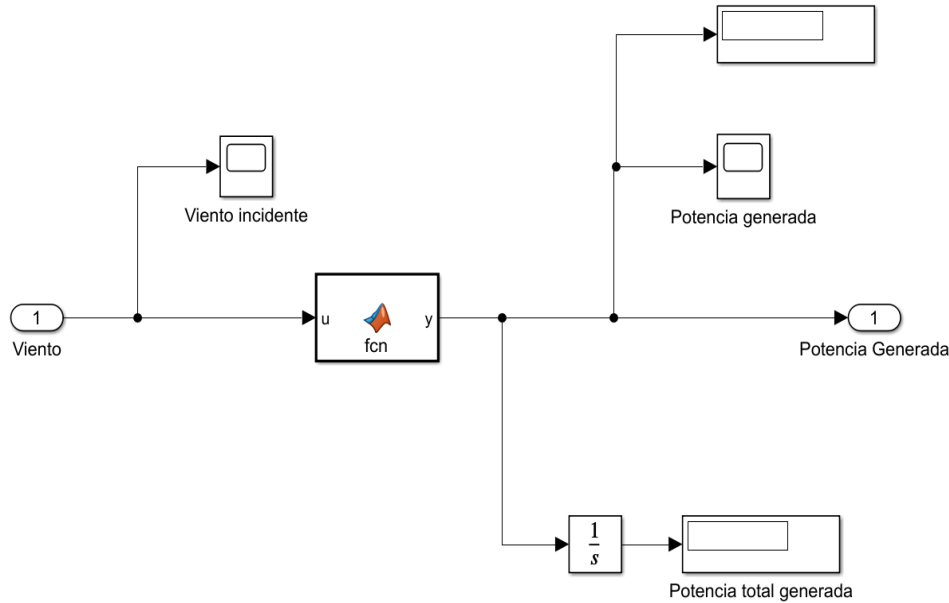


Figura 3-6 Modelo de uno de los aerogeneradores en *Matlab Simulink*®. Fuente: Autoría propia.

3.5 Modelado del electrolizador

Una vez obtenido un dato de potencia a partir del viento que incide sobre el aerogenerador, el siguiente paso es modelar un electrolizador que permita conocer cuanto hidrógeno es posible producir con esa potencia generada.

3.5.1 Base teórica del modelo

Como ya se ha detallado en puntos anteriores, el proceso de electrólisis que ocurre dentro de un electrolizador está sometido a las leyes de la electrólisis desarrolladas por Faraday. En ellas se establece que la cantidad de material resultante en el electrodo depende de la cantidad de carga (esto es, intensidad por unidad de tiempo) transferida al electrodo y de la reacción que esté teniendo lugar. Como resultado de la aplicación de este principio, la tasa de producción del hidrógeno se calcula como [46]:

$$\dot{n}_{H_2} = \eta_F \frac{n_c I}{zF} \quad (\text{Ec. 3-1})$$

Donde:

- $\dot{n}_{H_2}$: tasa de producción de hidrógeno del electrolizador en mol/s
- η_F : rendimiento de Faraday
- n_c : número de celdas.
- z : número de electrones transferidos por reacción. En el caso del hidrógeno tiene valor 2.
- F : constante de Faraday (96485 °C/mol).

Por lo tanto, para poder conocer la tasa de producción de hidrógeno será necesario conocer el número de celdas, siendo este un dato incluido en las especificaciones técnicas del electrolizador y que suele proporcionar el propio fabricante. Sin embargo, el rendimiento de Faraday del electrolizador no es una

especificación y variará según la condición en la que opere el electrolizador, por lo que es necesario calcularla. Para ello se emplea la fórmula:

$$\eta_F = \frac{(I/A)^2}{f_1 + (I/A)^2} f_2 \quad (\text{Ec. 3-2})$$

Donde:

- η_F : rendimiento de Faraday.
- I : Intensidad que circula por la celda.
- A : Área del electrodo
- f_1 y f_2 : son valores constantes cuyo valor depende de la temperatura a la que opere el electrolizador. Sin embargo, cuando la tensión de celda supera los 1,8 V su valor deja de variar con la temperatura [46].

Como podemos ver, para poder realizar un modelo adecuado de un electrolizador se requiere conocer ciertos parámetros de diseño y operación del electrolizador, por lo que nuestro modelo podrá imitar el comportamiento de un electrolizador real conociendo los datos necesarios.

3.5.2 Parámetros del electrolizador

Para poder modelar el sistema, es necesario obtener los datos del punto anterior de un electrolizador real, que será el que se simule en nuestro sistema. Para ello se han obtenido los datos del electrolizador de la planta PHOEBUS en Jülich, Alemania. Este electrolizador alcalino opera a una presión de 7 bares y una temperatura de 80°C, con un consumo nominal de 26 kW de potencia. Si bien este electrolizador se instaló en un principio para ser alimentado mediante energía procedente de placas solares, lo cierto es que este electrolizador ha sido objeto de diferentes investigaciones en el ámbito energético y de producción de hidrógeno, por lo que sus características, especificaciones y funcionamiento están perfectamente estudiadas. Esto no solo facilita obtener los datos de la simulación, sino que también permite comparar el funcionamiento del modelo con el real y detectar errores en la simulación.

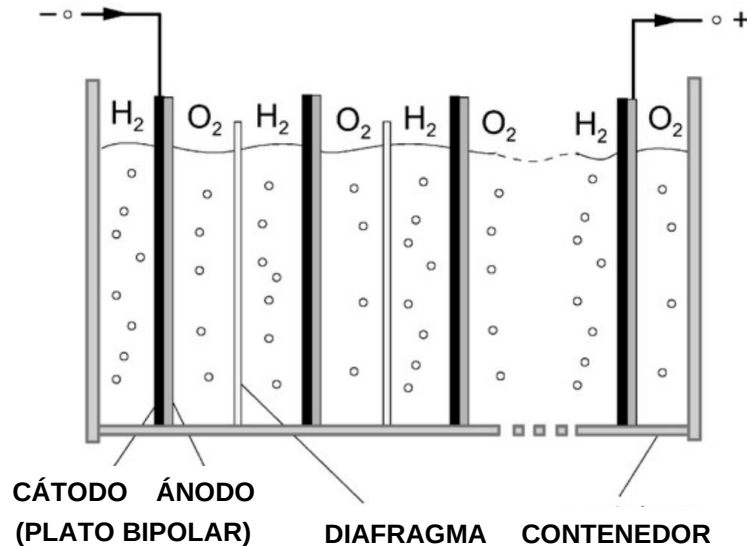


Figura 3-7 Esquema de componentes de un electrolizador bipolar. Fuente: [46].

Este electrolizador alcalino emplea celdas circulares y bipolares. Esto implica que, en el interior de las celdas, en un mismo panel pueden encontrarse juntos el ánodo y el cátodo (Figura 3-7), de lo contrario, si se encontrasen en paneles separados, hablaríamos de un electrolizador monopolar. Entre los electrodos se emplea como electrolito una disolución de hidróxido de potasio al agua en una

concentración del 30%, trabajando en estado estacionario. Sin embargo, los datos que nos resultan relevantes para la simulación son los siguientes:

- Área del electrodo: 0.25 m².
- Número de celdas: 21 (agrupadas en unidades de 6 celdas cada una).
- Tensión de celda: 1,998 V
- Valores de f_1 y f_2 : Al trabajar por encima de 1,8 V y una temperatura de 80°C
 - f_1 : 250 mA²/cm⁴
 - f_2 : 0,96

Sin embargo, es importante destacar que el modelo en *Simulink* del electrolizador ha sido diseñado de tal forma que pueda ser modificado para adaptarse a las características de cualquier otro electrolizador mientras se conozcan los datos expuestos en este punto.

3.5.3 Adaptación en Simulink

Para poder llevar a cabo la simulación, hemos creado un sistema en *Simulink* que opere con las ecuaciones anteriormente descritas empleando los datos extraídos del electrolizador PHOEBUS. No obstante, debido al tamaño del sistema y para poder dar una explicación adecuada de su funcionamiento, el sistema está dividido en cuatro secciones, como se refleja en la Figura 3-8. A continuación, procederemos a detallar el funcionamiento de cada una de estas secciones.

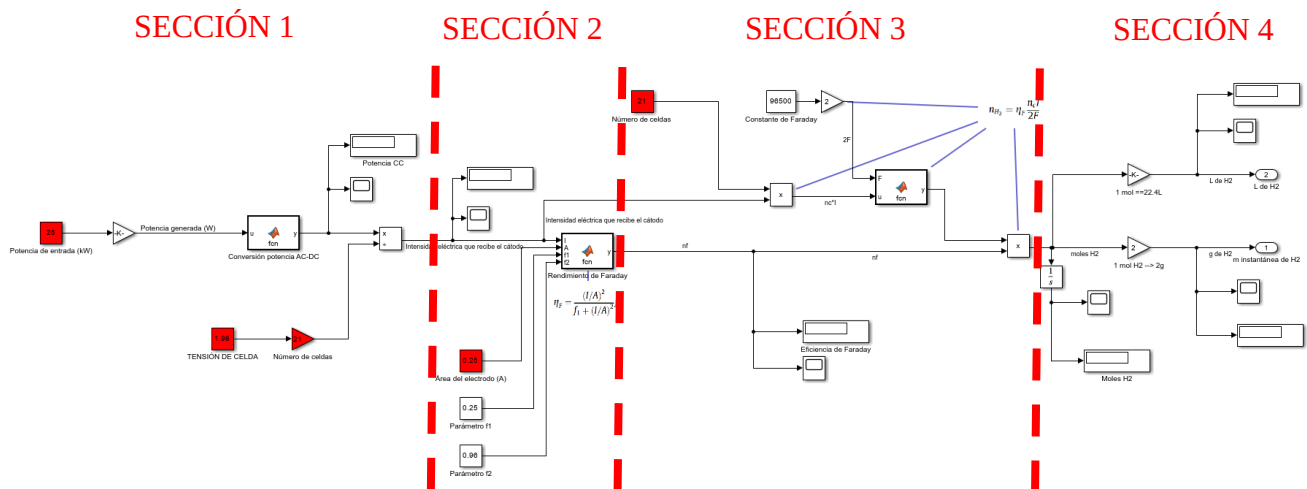


Figura 3-8 Esquema del modelo del electrolizador en Matlab Simulink ®. Fuente: Autoría propia

- **Sección 1** (Figura 3-9): en esta sección se transforma la potencia de entrada en kW producida por el aerogenerador en una intensidad con la que poder resolver las ecuaciones que hemos descrito en la Base Teórica del Modelo.

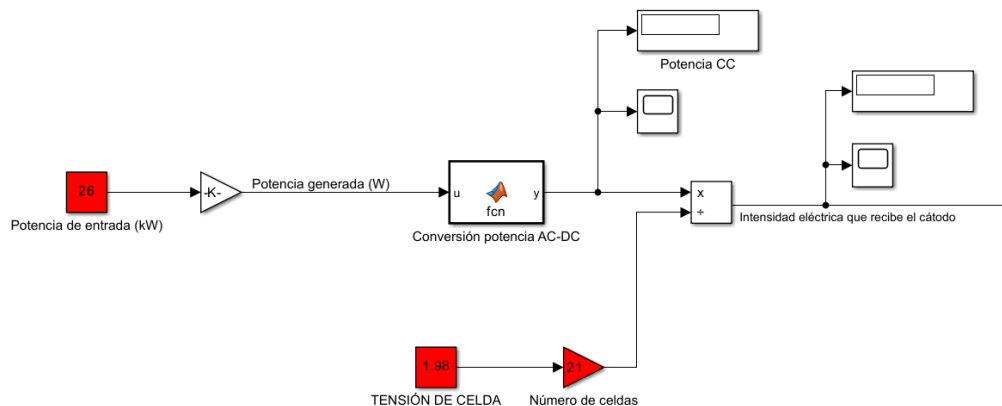


Figura 3-9 Detalle de la sección 1 del modelo del electrolizador. Fuente: Autoría propia

El modelo ha sido diseñado de tal forma que el electrolizador siempre trabaje en su potencia nominal. De esta forma el electrolizador solo estará encendido si el generador produce suficiente energía como para alimentar al electrolizador con su potencia nominal, o de lo contrario la corriente de entrada será 0 y el electrolizador estará apagado.

Por lo tanto, en la entrada de potencia siempre se proporcionarán 0 o 26 kW. A continuación, la señal se multiplica por una ganancia de valor 1000 para transformar los kW en W. Sin embargo, para poder operar es necesario trabajar con una intensidad de corriente y no con potencia. Para ello es necesario dividir esa potencia entre el voltaje del electrolizador para obtener la intensidad de corriente

$$I (A) = \frac{P (W)}{V (V)} \quad (\text{Ec. 3-3})$$

El voltaje del electrolizador se calcula a través del voltaje de celda, que es un dato obtenido de las especificaciones del electrolizador. El voltaje total del electrolizador será el resultado de multiplicar el voltaje de celda por el total de celdas del electrolizador. Calculado el voltaje, dividimos la potencia entre el resultado y obtenemos la intensidad.

- **Sección 2** (Figura 3-10): calculada la intensidad y conocidos al área de celda y los valores de las constantes f_1 y f_2 , puede calcularse el rendimiento de Faraday empleando la fórmula correspondiente:

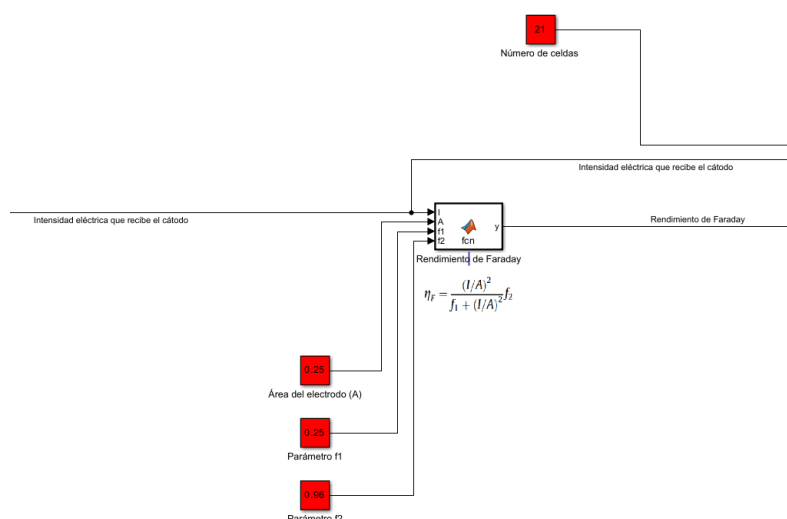


Figura 3-10 Detalle de la sección 2 del modelo. Fuente: Autoría propia.

Como puede verse en la figura, para realizar la operación se ha empleado el operador *Matlab Function* que, como ya se ha mencionado anteriormente, permite realizar una función matemática empleando lenguaje de Matlab. En este Script se desarrolla la fórmula de la eficiencia de Faraday tal como se refleja en la imagen. Por otro lado, se desvía una señal de la intensidad para poder trabajar con ella en la siguiente sección. Es importante destacar también que los valores del área del electrodo, f_1 y f_2 se introducen en la función a través de valores constantes independientes que es posible variar fácilmente si se pretende modelar otro electrolizador con características diferentes.

- **Sección 3** (Figura 3-11): En la sección tres, habiendo establecido ya el valor de la intensidad y calculado el rendimiento de Faraday, es posible calcular entonces la tasa de producción de hidrógeno a partir de la fórmula descrita anteriormente.

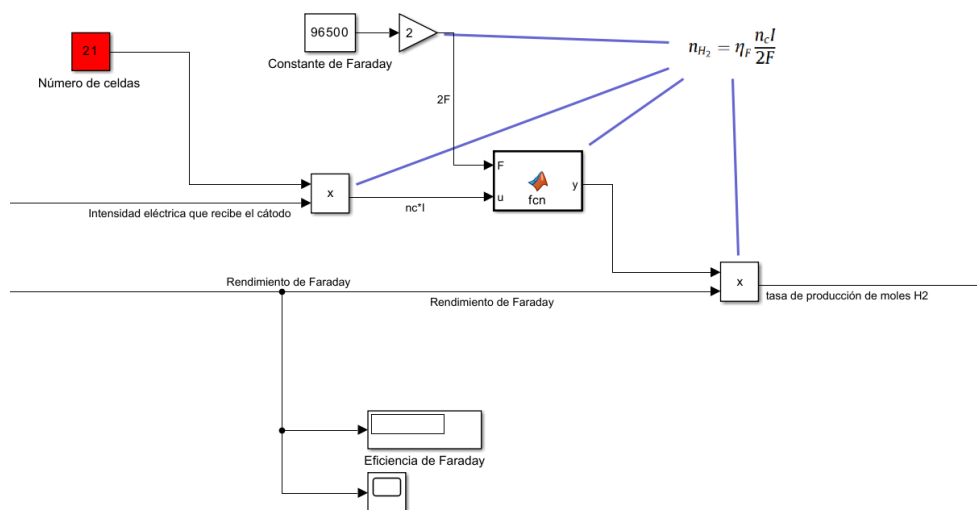


Figura 3-11 Detalle de la sección 3 del modelo. Fuente: Autoría propia

En este caso, ya se conoce el rendimiento de Faraday y la intensidad por lo que, junto con los datos de los que ya se disponen del electrolizador, es posible calcular la tasa de producción de hidrógeno. En este caso, en lugar de incluir todos los datos en una única función en lenguaje Matlab, hemos dividido en operaciones individuales a fin de poder visualizar mejor el papel que juega cada factor y que, visualmente, sea más sencillo comprender las operaciones que se llevan a cabo. Sin embargo, para el cociente entre numerador y denominador de la ecuación, se ha empleado el operador *Matlab Function* en lugar de operador *Division*. Se ha optado por esta opción para incluir un condicionante *if / else* para que, si el valor de la intensidad de corriente es menor a 0, la tasa de producción sea 0, evitando así valores problemáticos, como valores negativos.

- **Sección 4** (Figura 3-12): en esta última sección, se procede a cuantificar la producción de hidrógeno y convertirla a las distintas magnitudes que podrían ser útiles en la simulación.

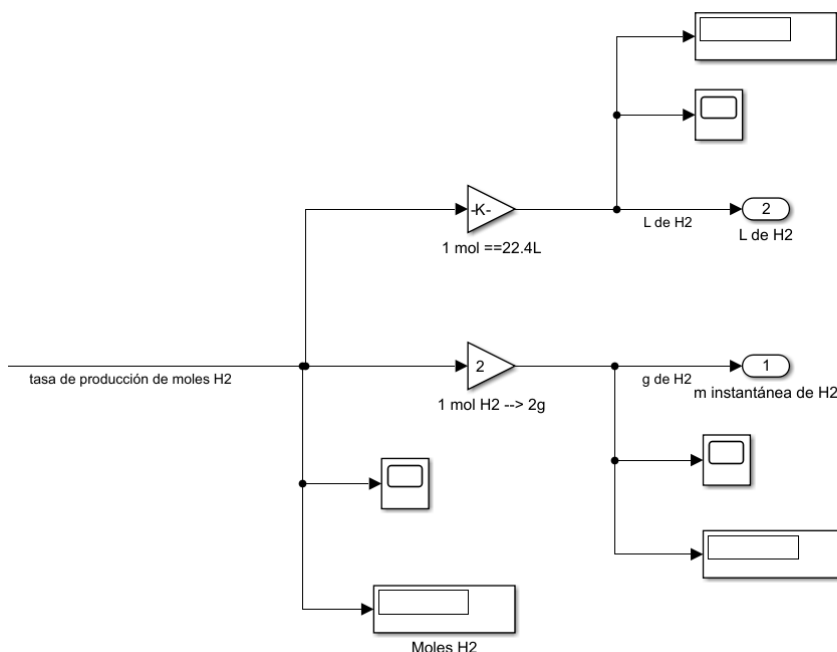


Figura 3-12 Detalle de la sección 4 del modelo. Fuente: Autoría propia.

Como se puede observar, el valor resultante de las secciones anteriores es una tasa de producción de hidrógeno en mol/s. Sin embargo, conociendo el valor de la masa molar del hidrógeno (2 g/mol) y, en base a la ley de los gases ideales, es posible calcular la masa y el volumen de hidrógeno producidos en cada instante de la simulación. Para el total de hidrógeno generado durante la simulación, es necesario incluir en el modelo el operador *integrator* que calcula el área bajo la curva de producción de hidrógeno, es decir, el total producido durante la simulación. Sin embargo, este operador no se ha incluido en el modelo del electrolizador, sino en el modelo conjunto de todos los elementos, como se describirá más adelante.

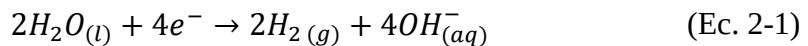
3.6 Modelado de la planta de destilación

Frente a otros estudios de naturaleza similar basados en la producción de hidrógeno a partir de energía eólica, en este proyecto se incluye el aspecto diferenciador de emplear eólica *offshore* para la obtención de energía. Como consecuencia natural, consideramos la posibilidad de emplear agua de mar, lo que abriría la puerta a crear sistemas de producción de hidrógeno autónomos en la costa y en alta mar, requiriendo únicamente la energía proporcionada por el aerogenerador y el agua extraída del mar. Para que esto sea posible se ha incluido en el sistema un modelo de planta destiladora capaz de convertir el agua de mar en agua destilada empleando parte de la potencia generada por el aerogenerador. De lo contrario la salinidad del agua de mar provocaría una rápida corrosión de los electrodos, con lo que resultaría imposible seguir produciendo hidrógeno. Sin embargo, es importante reseñar que ya se trabaja en investigaciones destinadas a producir hidrógeno directamente a partir del agua de mar, sin necesidad de destilado, obteniendo algunos de ellos resultados prometedores [47], pero sin que se hayan podido desarrollarse aún producciones a gran escala.

3.6.1 Modelo en DWSIM

En primer lugar, nos encontramos con la limitación de que el software *Simulink*® nos permite crear simulaciones de los elementos en base a operaciones matemáticas. Sin embargo, para poder obtener esos datos sobre los que construir el modelo, es necesario obtenerlos experimentalmente de un modelo real o bien, como se ha hecho en este proyecto, emplear un software específico con el que diseñar una simulación de la que poder extraer los datos necesarios para poder aplicarlos a *Simulink*® (Figura 3-13). Es por ello por lo que se emplea el software DWSIM, a fin de poder crear un modelo de planta destiladora funcional de la que obtener su consumo de potencia con el que poder trabajar después a la hora de modelar el sistema conjunto de la planta.

En primer lugar, el elemento fundamental que determinará el dimensionamiento y las capacidades de la planta destiladora es el flujo de agua que deberá destilar. Por una pura cuestión de estequiometría, para una determinada tasa de producción se puede conocer la tasa de agua destilada que es necesario suministrar al electrolizador y, por tanto, la tasa de agua que es necesario destilar para satisfacer la demanda.



En consecuencia, podemos concluir que, para producir una determinada tasa de hidrógeno será necesario proporcionar una tasa igual de agua dulce

$$\dot{n}_{H_2O} = \dot{n}_{H_2} = 2\dot{n}_{O_2}$$

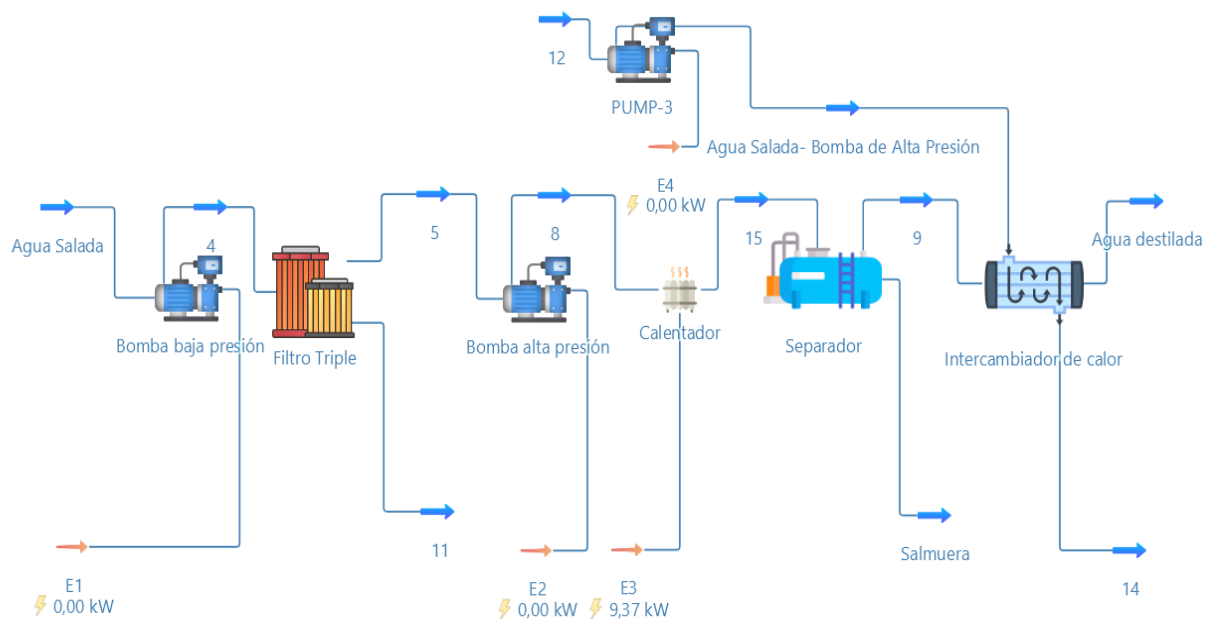


Figura 3-13 Modelo de planta destiladora creado en DWSIM. Fuente: Autoría propia.

Además, destilar una determinada tasa de agua requerirá determinada cantidad de energía, que deberá suministrar el aerogenerador. Es por ello por lo que, para poder simular correctamente un sistema de destilación que satisfaga estos requisitos, se ha recurrido al software específico *DWSIM*, tal como se ha descrito en el punto 3.2. El modelo de la planta destiladora resultante consta de distintos elementos que realizan procesos específicos dentro de la simulación:

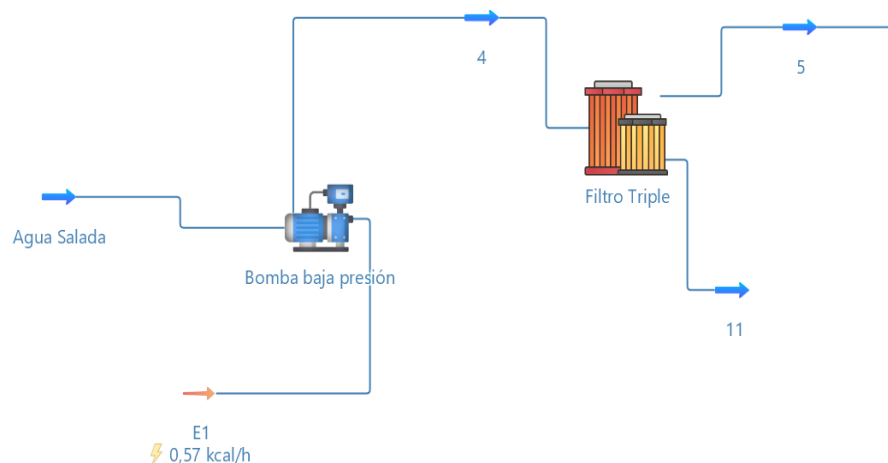


Figura 3-14 sección de la planta destiladora que comprende flujo inicial, bomba de baja y filtro triple. Fuente: autoría propia.

- Flujo de agua de mar (Figura 3-14):** para modelar la planta destiladora es necesario crear primero un flujo de materia, que en este caso será agua de mar. Por lo tanto, ajustamos las proporciones de agua y sal para replicar las condiciones del agua de mar, al igual que la presión y la temperatura, que se detallan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** El flujo variará dependiendo del volumen de agua que sea necesario suministrar al número de electrolizadores que estén en funcionamiento, aunque para la base de cálculo se ha supuesto un único módulo de tres electrolizadores en funcionamiento, con lo que el flujo de agua es de 0,188 mol/s

Parámetro	Valor
Fracción H ₂ O	0,99
Fracción NaCl	0,01
Temperatura	13° C
Presión	1 atm

Tabla 1 Parámetros de la corriente de agua. Fuente: Autoría propia.

- **Bomba de baja presión** (Figura 3-14): el agua que procede del mar se encuentra a presión atmosférica (1 atm) por lo que es necesario incluir una bomba con la que presurizar el flujo de agua. Además, cuando el agua de mar se filtre en los procesos sucesivos, dicho filtrado provocará una reducción en la presión del circuito, por lo que la bomba en cuestión deberá dotar al flujo de agua de presión suficiente para contrarrestar la depresión provocada por el filtrado. El programa permite modelar las bombas de la simulación en función de la presión de salida que queramos obtener, el suministro de potencia que se requiera, el flujo de energía, las curvas de rendimiento de la bomba o en función del incremento de la presión. Para poder modelar correctamente debe seleccionarse esta última opción y definir un aumento de presión igual a la depresión que provocará el filtro, que debe establecerse al modelar el filtro.
- **Filtro triple** (Figura 3-14): el siguiente paso es hacer pasar el flujo de agua por un filtro triple para eliminar las impurezas de mayor diámetro, como fango o arena en suspensión. El programa permite dos funcionalidades sobre los filtros: dimensionarlos (*sizing*) o evaluar el funcionamiento de un filtro de dimensiones dadas (*evaluation*). En este caso se emplea la opción *sizing*, a fin de obtener las dimensiones y parámetros necesarios para el filtro. En este caso el factor con el que se ha definido el filtro es con la depresión provocada en el filtrado, con un valor 1,5 atm. Este valor se ha definido a partir de los datos del filtro triple de una planta osmotizadora de la marca MARCO ESPAÑA S.A. modelo 8003 [48].

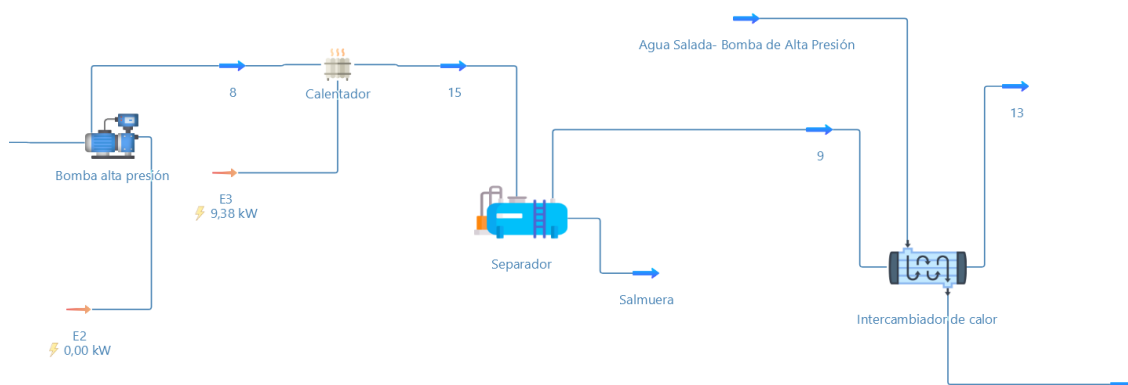


Figura 3-15 Sección del modelo que comprende las bombas de alta presión, el evaporador, el separador y el intercambiador. Fuente: autoría propia.

- **Bomba de alta presión** (Figura 3-15): A la salida del filtro el flujo ha perdido presión como consecuencia del filtrado, por lo que reduce la presión hasta 1 atm. En consecuencia, es necesario que el flujo de agua vuelva a presurizarse con otra bomba, la cual se define mediante una presión de salida de 5 atm. El resultado de esta aumento de esta presurización es un flujo a 5 atm a 13,2° C y misma composición. La salida de esta bomba se conecta a un circuito que conduce el agua hasta un calentador para vaporizarla.
- **Vaporizador** (Figura 3-15): en este elemento el flujo de agua se calienta para vaporizarla completamente. En este caso podemos definir el vaporizador según el calor añadido o

retirado, el cambio de temperatura, la fracción molar de vapor generada, el flujo de energía o la temperatura de salida del evaporador. En este caso se define en base a la temperatura de salida y se le da un valor de 300° C. Como consecuencia obtenemos un valor de consumo de potencia del evaporador en función del caudal de agua a evaporar.

- **Separador** (Figura 3-15): este elemento resulta más sencillo de modelar al no tener que definir ningún parámetro concreto de su funcionamiento. El flujo de vapor generado en el evaporador se conduce al separador y allí se separan el vapor de agua de la salmuera, con lo que se obtiene un flujo de vapor de agua libre de sal.
- **Intercambiador de calor** (Figura 3-15): por último, es necesario enfriar el líquido destilado para poder suministrárselo al electrolizador, por lo que se hace circular el vapor a través de un intercambiador de calor. En este proceso el flujo de agua destilada intercambia calor con agua procedente del mar sin destilar. Esta agua se hace circular por el intercambiador gracias a segunda bomba de alta presión de iguales características a la empleada en el flujo de agua destilada que da lugar a una corriente de agua salda a 5 atm de presión y 13° C de temperatura que se hace pasar por el intercambiador para condensar el flujo de agua destilada. El resultado final es agua destilada a una temperatura de 50° C.

Definidos todos los elementos, es necesario sumar cada uno de los distintos consumos de potencia que se generan en el modelo para obtener el consumo total de energía. Este valor total es la potencia que sería necesario consumir para destilar el agua suficiente para abastecer un único módulo de electrolizadores. Abastecer a más módulos, requeriría mayor potencia. Por lo tanto, es necesario calcular los distintos flujos necesarios y potencias consumidas para los distintos estados de funcionamiento de la planta de producción de hidrógeno.

3.6.2 Adaptación a Simulink

Para adaptar el modelo creado en *DWSIM* al sistema completo diseñado en *Simulink* hemos calculado, a partir de las simulaciones de la planta destiladora, el consumo de potencia que se requiere para destilar el flujo de agua necesaria para poder alimentar al electrolizador el volumen de agua destilada necesaria para mantener su tasa nominal de producción de hidrógeno.

Por tanto, la simulación en *DWSIM* nos ha permitido, en base a los caudales necesarios y las condiciones de operación de la planta destiladora, establecer que cantidad de potencia de la generada por el molino es consumida para el aerogenerador. Por lo tanto, para un sistema de seis módulos con tres electrolizadores en cada módulo, el consumo de energía resultante es tal como se refleja en la Tabla 2.

Módulos encendidos	Potencia planta destiladora (kW)
1	9,38
2	18,76
3	28,14
4	37,52
5	46,9
6	56,28

Tabla 2 Potencia consumida por la planta destiladora en función de los módulos encendidos

A partir de estos datos podemos establecer una lógica de control completa tal que el electrolizador solo entrará a funcionar si el aerogenerador produce suficiente potencia como para alimentar al electrolizador en su potencia nominal y a la planta destiladora para generar el flujo de agua destilada suficiente para mantener la producción de hidrógeno.

3.7 Modelo conjunto

Una vez se han modelado los distintos elementos individualmente, estamos en disposición de combinar las distintas partes para generar un modelo conjunto con el que simular un sistema completo.

En primer lugar, es conveniente el dejar claro un aspecto particular sobre el que se construye el sistema. El aerogenerador *offshore*, por su diseño, produce una potencia muy superior a la consumida por un electrolizador e incluso por un módulo de tres electrolizadores. Por ello, con el objetivo de aumentar la producción de hidrógeno y maximizar las posibilidades que nos ofrece la potencia del aerogenerador, hemos empleado un total de seis módulos en paralelo con tres electrolizadores en cada uno. De esta forma podemos aumentar la capacidad de producción del hidrógeno a la potencia que este proporcionando el aerogenerador en cada momento, de tal forma que el número de módulos apagados o encendidos dependerá de cuanta potencia se esté generando. Sin embargo, para que esto sea posible, es necesario dotar al sistema de una lógica de control con la que controlar el encendido y apagado de los electrolizadores.

Además, esta lógica de control no debe tener en cuenta únicamente el consumo de los electrolizadores, sino también el consumo de potencia necesario para destilar el flujo de agua que requieren los electrolizadores, el cual variará según el número de electrolizadores encendidos.

3.7.1 Diseño del modelo global

A la hora de trabajar con múltiples modelos en un mismo sistema, vamos a transformar cada modelo en un subsistema, de tal forma que el sistema resultante esté formado por un conjunto de subsistemas interconectados. Por lo tanto, tendremos:

- **Fuente de datos de viento.**
- **Subsistema del aerogenerador.**
- **Subsistemas de electrolizadores.**
- **Subsistema destilador.**

En la Figura 3-16 puede observarse la construcción del modelo completo a partir de los mencionados subsistemas. Para facilitar la comprensión del modelo, cada subsistema incorpora una imagen del elemento que está simulando.

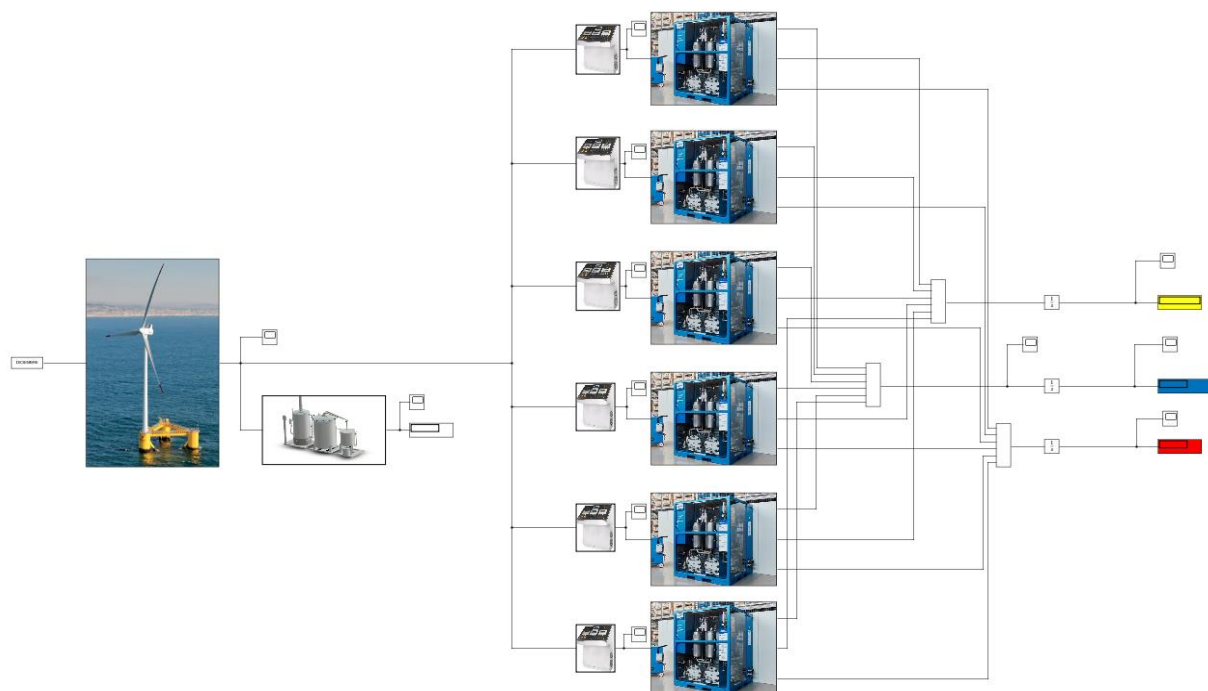


Figura 3-16 Visión del modelo conjunto con todos los elementos. Fuente: Autoría propia.

En primer lugar, se conecta la fuente con los datos de viento al subsistema del aerogenerador, de tal forma que éste dé como salida el dato de potencia generada gracias a la acción del viento. Esta señal de potencia generada se conecta entonces tanto al subsistema de la planta destiladora como a los subsistemas de los módulos de electrolizadores. La conexión con los subsistemas de los módulos se realiza a través de un operador *Matlab Function* en cada uno de los módulos. Gracias a estos operadores podremos aplicar después la lógica de control con la que hacer funcionar apropiadamente el sistema.

3.7.2 Lógica de control

Como ya se ha mencionado anteriormente, la finalidad de la lógica de control implementada en el sistema tiene como finalidad principal regular el encendido y apagado de los módulos de electrolizadores y ajustar la producción de agua destilada para maximizar el aprovechamiento de la energía disponible.

Para hacer esto posible, cada uno de los módulos está controlado, como se ha indicado previamente, por un operador *Matlab Function*, dentro de los cuales se ha implementado un comando *if / else*. Para cada uno de los operadores se ha calculado cual es la potencia generada necesaria para alimentar el módulo indicado y los anteriores, así como la consumida para destilar el agua necesaria. Esto quiere decir, por ejemplo, para encender el tercer módulo de generadores, es condición necesaria que la potencia generada sea suficiente para proporcionar la potencia nominal al tercer módulo, pero también al primero y al segundo, así como para alimentar a la planta destiladora con la potencia necesaria para producir el agua destilada necesaria para alimentar a los tres módulos. En consecuencia, las potencias necesarias (en kW) para encender cada módulo son tal como se reflejan en la Tabla 3:

Módulo	Potencia electrolizadores (kW)	Potencia planta destiladora (kW)	Total (kW)
1	78	9,38	81,38
2	156	18,76	174,36
3	234	28,14	262,14
4	312	37,52	349,52
5	390	46,9	436,9
6	468	56,28	524,28

Tabla 3. Potencia total necesaria para encender la secuencia de los módulos.

Por tanto, dentro de los operadores *Matlab Function* existe una estructura condicional tal que, si el valor de potencia generada es igual o mayor a la potencia total necesaria para arrancar el módulo, la función da como valor de salida la potencia necesaria para mantener el módulo en su potencia nominal.

La lógica empleada para regular el funcionamiento de este modelo puede resultar compleja en un principio incluso poco intuitiva. Por lo tanto, para proporcionar una visión más sencilla, directa y, sobre todo, más visual, se ha optado por incluir un diagrama de flujo que recoja el funcionamiento del modelo conjunto y un segundo diagrama que recoja la lógica de control concreta de la planta destiladora. Se ha separado en dos diagramas distintos para reducir la carga de información en cada uno y facilitar su comprensión, pero lo cierto es que ambas lógicas están íntimamente relacionadas, pues una necesita de la otra para que el modelo pueda funcionar correctamente. En la Figura 3-17 puede observarse el diagrama de flujo del modelo conjunto.

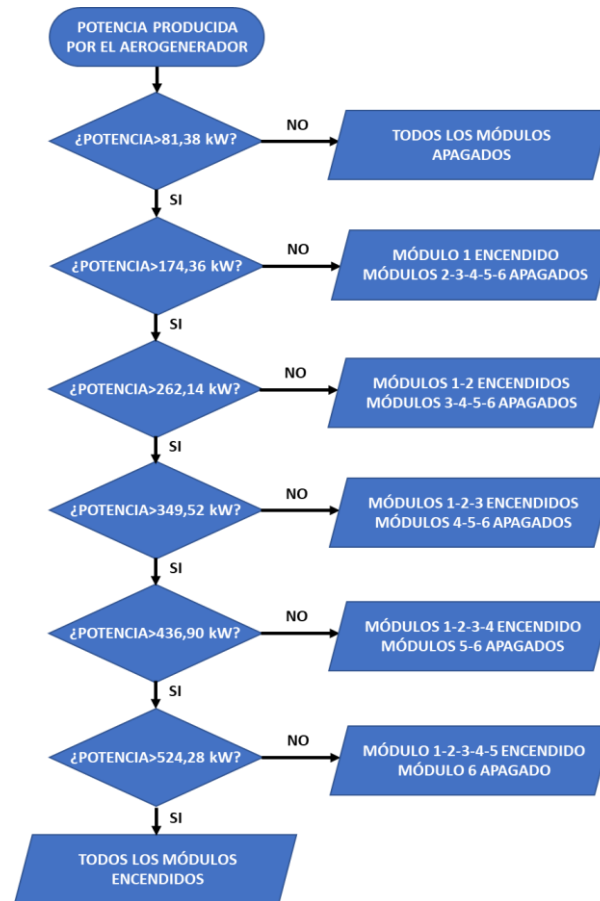


Figura 3-17 Lógica de control empleada para el modelo conjunto

Como puede verse en el diagrama, si la potencia generada no es suficiente para alimentar el siguiente módulo con sus potencias nominales, entonces este permanece apagado totalmente. Si es importante destacar que, como puede verse, una vez la potencia excede el valor de potencia necesario para arrancar el sexto módulo, mayores niveles de potencia no van a poder emplearse para alimentar más electrolizadores, con lo que ese superávit de energía no se estaría aprovechando. Sin embargo, esta energía puede derivarse a las redes de consumo mediante cableado submarino o bien para alimentar los servicios de la propia planta generadora de combustible

En sincronía con lo anterior, el módulo de la planta destiladora funciona de la misma manera. De manera que, si el valor de potencia es igual o superior al total requerido para encender cada uno de los módulos, la función dará como valor de salida la potencia necesaria para producir la cantidad de agua que se requiere para satisfacer el suministro de los módulos encendidos. Igual que en el caso anterior, el diagrama de flujo de la lógica de control de este sistema puede observarse en la Figura 3-18.

En este diagrama de flujo puede observarse como la planta destiladora consume energía para destilar el flujo de agua necesario para abastecer al número de módulos que estarán arrancados con esa producción de potencia. Sin embargo, también se tiene en cuenta que el propio funcionamiento de la planta destiladora provocará un consumo de potencia, por lo que no podrán arrancarse tantos módulos como permita la potencia bruta generada por el aerogenerador, sino la resultante de descontar el consumo de la destiladora. Por ejemplo, si se generan 360 kW en el aerogenerador, no podrá arrancarse el tercer módulo, puesto que la planta destiladora consume 28,14 kW, por lo que solo se dispondrá de 331,86 kW, que no son suficientes para alimentar el tercer módulo a su potencia nominal.

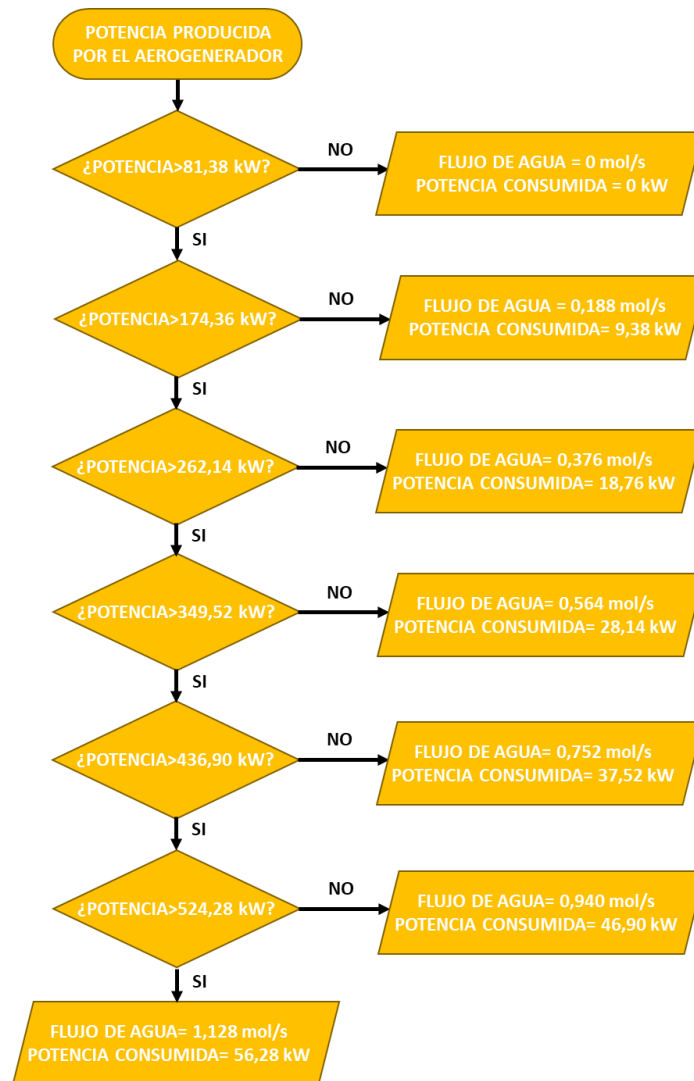


Figura 3-18 Lógica de control empleada para la planta destiladora. Fuente: elaboración propia

4 VALIDACIÓN DEL MODELO Y PRUEBA

4.1 Introducción

A lo largo de este apartado se recoge el análisis de los resultados obtenidos de la simulación del modelo construido en *Simulink*®. Para obtener los resultados de la simulación se ha partido de los datos obtenidos para distintos generadores marinos. En total, se han obtenido datos de cuatro molinos eólicos *offshore*, a partir de sus curvas de potencia con los que modelar su comportamiento en el programa empleando el método de trabajo descrito en el apartado de Desarrollo. Los modelos empleados y sus potencias nominales aparecen reflejados en la Tabla 4.

Modelo de Aerogenerador	Potencia (kW)
Aerodyn Engineering SCD 8.0-168	8000
Siemens Gamesa SG 8.0-167	8000
Vestas V164/9500	9500
Vestas V112	3500

Tabla 4 Relación de aerogeneradores modelados en el sistema.

Creado un modelo completo con los datos de cada generador se ha procedido a simular el funcionamiento de dicho sistema empleando como datos de entrada las velocidades de viento obtenidas de la web MeteoGalicia a partir de los datos procedentes de su boya meteorológica situada en las inmediaciones de las Islas Cíes. Los datos comprenden registros de dirección e intensidad de viento obtenidos cada 10 minutos durante todo el año 2022. Los datos se han agrupado por meses, pudiendo simular así la producción mensual que el sistema hubiese tenido en cada mes del 2022 con cada uno de los generadores empleados

A continuación, se recogen los datos obtenidos para poder crear el modelo y los resultados de la simulación para cada uno de los generadores.

4.2 Aerodyn Engineering SCD 8.0-168

El primer modelo estudiado es el Aerodyn Engineering SCD 8.0-168. Este aerogenerador de construcción alemana tiene una potencia nominal de 8000 kW y un diámetro de hélice de 168m. En la Figura 4-1 puede observarse el aspecto de este generador cuya particularidad es el empleo de únicamente dos palas.



Figura 4-1 Imagen del Aerodyn Engineering SCD 8.0 - 168

Este aerogenerador puede instalarse tanto en tierra firme como en alta mar y puede trabajar con velocidades de viento de hasta 25 m/s. A partir de sus datos de potencia, cuya curva se refleja en la Figura 4-2, el ajuste lineal resultante es:

$$y = 0,3067x^4 - 18,06x^3 + 353,5x^2 - 1802x^2 + 2716 \quad (\text{Ec. 4-1})$$

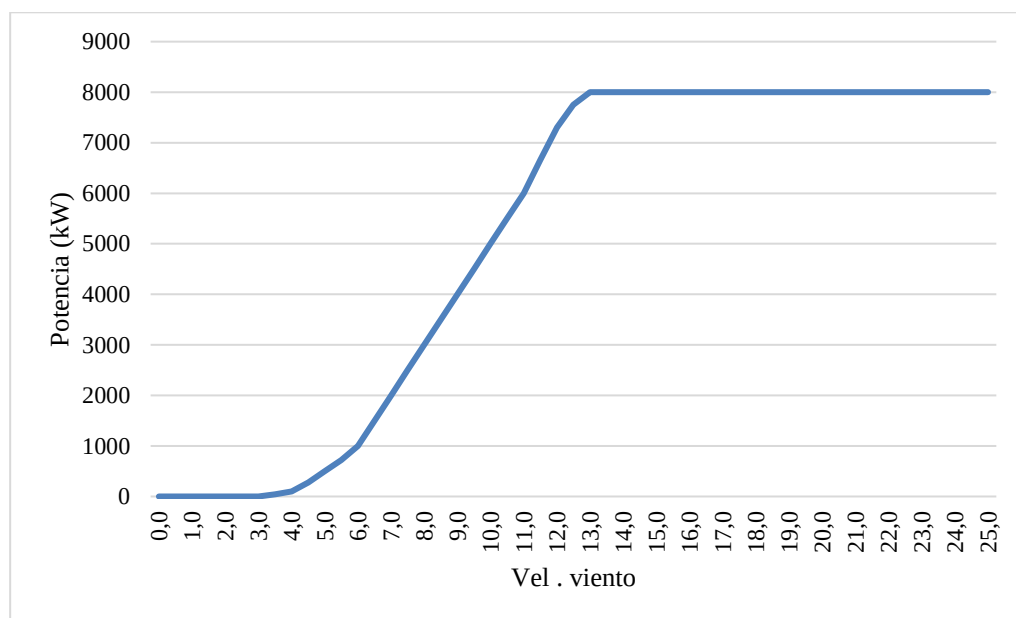


Figura 4-2 Curva de potencia para el SCD 8.0 – 168. Fuente: autoría propia

A partir de esta información se ha creado un modelo conjunto que emplee este generador como fuente de alimentación. Los datos obtenidos de la simulación de dicho sistema a partir de las matrices de viento son los siguientes, reflejados en la Tabla 5,.

Mes	Potencia total generada (kW) ($\times 10^9$)	Hidrogeno producido (moles) ($\times 10^6$)
Enero	2,422	1,212
Febrero	2,919	1,390
Marzo	5,595	1,727
Abril	5,531	1,812
Mayo	4,110	1,393
Junio	3,054	1,392
Julio	2,545	1,353
Agosto	2,520	1,123
Septiembre	4,430	1,313
Octubre	9,458	1,701
Noviembre	6,010	1,812
Diciembre	7,451	1,916
Total	56,045	18,144
Media	4,670	1,512

Tabla 5 Resultados de la simulación para el Aerodyn Engineering SCD 8.0-168. Fuente: autoría propia.

Como puede apreciarse, la potencia total generada por el aerogenerador a lo largo del año superaría los 55 Gigawatios, con una producción mensual media de 4,670 Gigawatios. Como resultado, a lo largo del año se habrían producido más de 18 millones de moles, produciendo, de media, aproximadamente un millón y medio de moles al mes. En total se habrían generado 36000 kg de hidrógeno o, lo que es lo mismo, 2,5 millones de litros si se almacenase a 200 bares de presión. Con este hidrógeno podría producirse, por tanto, 1,2 millones de kW.

4.3 Siemens Gamesa SG 8.0-167

El segundo modelo estudiado emplea un aerogenerador de diseño y producción española: el Siemens-Gamesa SG 8.0-167. De hecho, la firma Siemens Gamesa trabaja desde hace años en sistemas de funcionamiento similar al propuesto en este proyecto, a través de la división Siemens Energy. Esta firma propone la creación de plantas de producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno basadas en la energía solar y eólica, donde sus generadores marinos pueden jugar un papel fundamental.. Este aerogenerador también tiene una potencia nominal de 8000 kW, con un tamaño de rotor de 167 m como el que se muestra en la Figura 4-3.



Figura 4-3 Imagen del aerogenerador SG 8.0-167. Fuente: [49]

A diferencia del modelo de Aerodyn Engineering, este modelo está diseñado específicamente para instalarse en alta mar, por lo que no existe una versión para su empleo en tierra. La curva de potencia se refleja en la Figura 4-4. El resultado del ajuste lineal a partir de los datos de su curva de potencia es:

$$y = 0,3791x^5 - 16,94x^4 + 269,3x^3 - 1832x^2 - 5859x - 7162 \quad (\text{Ec 4-2})$$

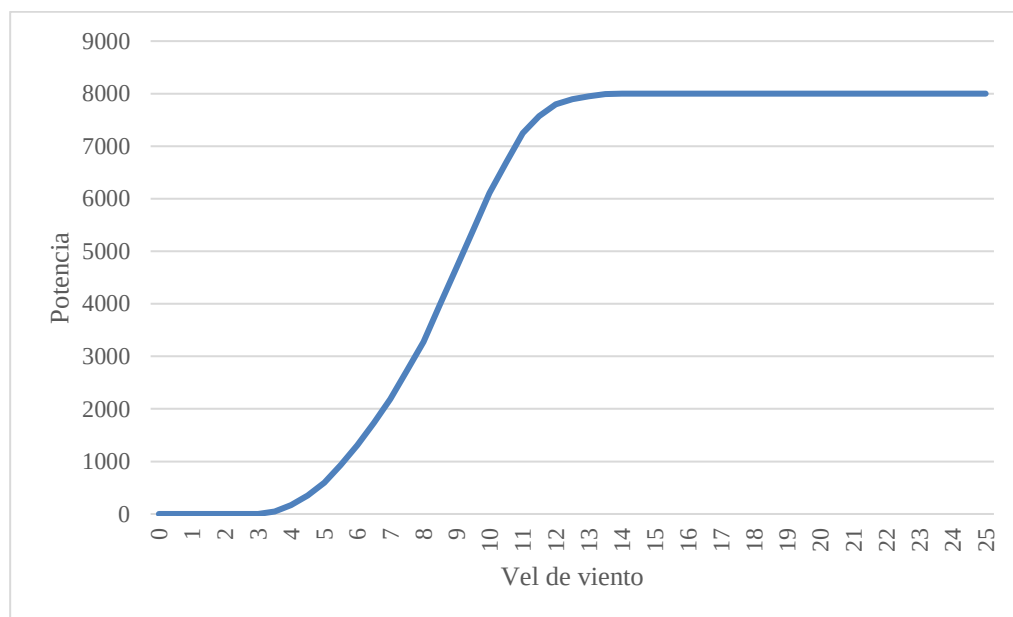


Figura 4-4 curva de potencia del aerogenerador Siemens Gamesa 8.0-167

Los resultados obtenidos de la simulación generada a partir de los datos de viento del año 2022 se reflejan en la Tabla 6.

Mes	Potencia total generada (kW) ($\times 10^9$)	Hidrogeno producido (moles) ($\times 10^6$)
Enero	2,676	1,429
Febrero	3,385	1,570
Marzo	6,330	1,865
Abril	6,333	1,958
Mayo	4,577	1,525
Junio	3,594	1,580
Julio	2,972	1,532
Agosto	3,018	1,351
Septiembre	5,010	1,428
Octubre	9,819	1,792
Noviembre	6,698	1,985
Diciembre	7,869	1,937
Total	62,281	19,952
Media	5,190	1,663

Tabla 6 Resultados de la simulación para el aerogenerador SG 8.0-167. Fuente: autoría propia.

Como puede observarse, a pesar de que este aerogenerador tiene la misma potencia nominal que el anterior, 8000 kW, el resultado de potencia generada a lo largo del año es mayor en este caso, superando los 62 MW, y con una potencia media de aproximadamente 5,2 MW. Como resultado la producción anual de hidrógeno también es mayor, situándose en casi 20 millones de moles de hidrógeno y una producción media mensual de más de un millón y medio de moles. La producción en masa es de 40000 kg y la producción en volumen de 2,8 millones de litros almacenado a 200 bares. Con esta cantidad de hidrógeno habría sido posible generar aproximadamente 1,3 millones de kW.

4.4 Vestas V164/9500

Este aerogenerador está diseñado y producido por una de las empresas más reconocibles del sector de la energía eólica, la danesa Vestas. Tiene la mayor potencia nominal de todos los estudiados, 9500 kW, un tamaño de rotor de 164 m. y también está específicamente diseñado para su empleo en alta mar, En la Figura 4-5 puede observarse el aspecto de este aerogenerador empleado en alta mar



Figura 4-5 Imagen del aerogenerador Vestas V164/9500. Fuente: [50].

La curva de potencia del aerogenerador se refleja en la Figura 4-6 y el ajuste lineal obtenido para crear el modelo es:

$$y = -1,94x^4 + 50,84x^3 - 365,5x^2 - 1277x - 1760 \quad (\text{Ec. 4-3})$$

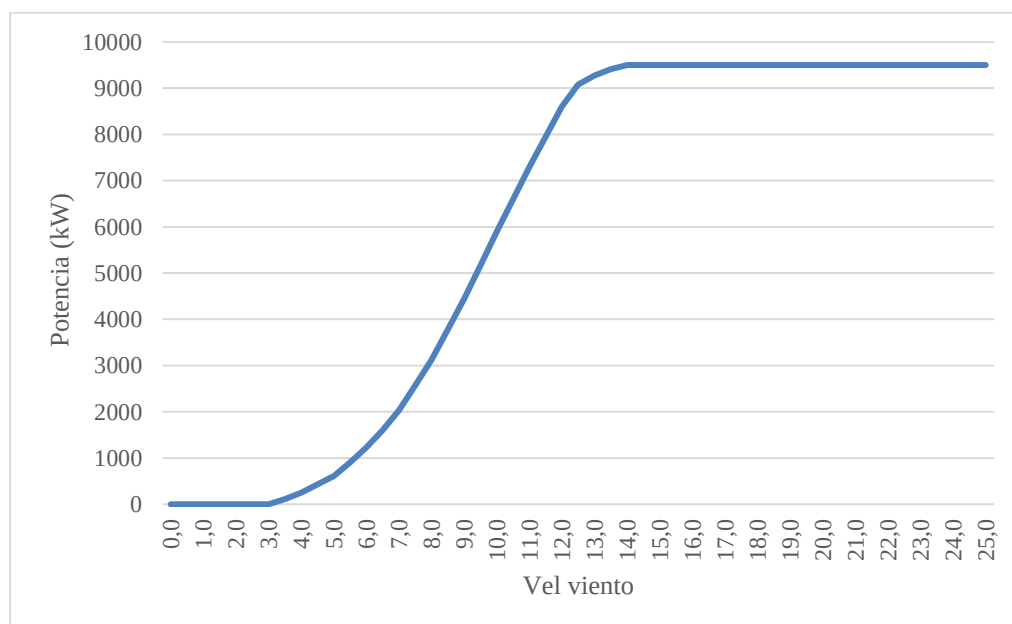


Figura 4-6 Curva de potencia de Vestas V164/9500

De nuevo, se ha simulado el comportamiento del conjunto completo empleando los datos de viento obtenidos de MeteoGalicia, obteniéndose los siguientes resultados reflejados en la Tabla 7:

Mes	Potencia total generada (kW) ($\times 10^9$)	Hidrogeno producido (moles) ($\times 10^6$)
Enero	2,895	1,473
Febrero	3,394	1,587
Marzo	6,486	1,893
Abril	6,349	1,964
Mayo	4,719	1,553
Junio	3,538	1,611
Julio	2,927	1,556
Agosto	2,947	1,375
Septiembre	5,145	1,450
Octubre	1,121	1,795
Noviembre	6,990	1,993
Diciembre	8,617	1,970
Total	55,128	20,22
Media	4,594	1,685

Tabla 7 Resultados de la simulación para Vestas V164/9500

Como puede observarse a la luz de los resultados, su mayor potencia nominal no se traduce en un mayor aumento de la potencia total generada a lo largo del año, pues el total producido se sitúa en poco más de 55 GW. La producción total de energía es, por tanto, muy similar a los otros dos generadores de 8000 GW, e incluso inferior a generada por el modelo de Siemens-Gamesa. Sin embargo, este aerogenerador si tiene la tasa de producción de hidrógeno más alta, superando los 20 millones de moles de hidrógeno al año, con una media de casi 1,7 millones al mes. En masa, equivalen a 40440 kilos de hidrógeno, y en volumen a 2,81 millones de litros en condición de 200 bares de presión. LA energía equivalente de esta producción sería de 1,35 millones de kW.

El hecho de que la producción de hidrógeno sea superior pese a que la producción de potencia no lo sea se explica por la forma en la que está construido el modelo. Como se refleja en el punto 3.7, un módulo de electrolizadores solo se enciende si el aerogenerador produce energía suficiente como para alimentar a los electrolizadores con su potencia nominal. Por lo tanto, si la potencia genera de forma más homogénea a lo largo del año, puede mantenerse un número mayor de módulos encendidos durante más tiempo aún con la misma potencia total. De esta forma se explica que la producción sea superior a la de los otros dos generadores, aunque la potencia generada no lo sea.

4.5 Vestas V112

El último modelo de aerogenerador también ha sido desarrollado por la compañía danesa Vestas, aunque este modelo guarda muchas diferencias con el otro aerogenerador del mismo fabricante empleado en este proyecto. La más importante, y la que convierte este aerogenerador en un caso particular, es que modelo no cuenta con una versión apta para su empleo en instalaciones *offshore*, por lo que se trata de un aerogenerador de uso exclusivamente terrestre. La Figura 4-7 permite ver el modelo Vestas V112 instalado en un parque eólico en tierra.



Figura 4-7 Vestas V112 instalado en un campo eólico terrestre. Fuente: [50].

Sin embargo, se ha incluido este aerogenerador porque el Vestas V112 tiene una potencia nominal sustancialmente menor que el resto de los generadores estudiados, de 3500 kW. Esta potencia tan baja no puede encontrarse en un generador marino, pero se ha incluido para poder estudiar también como afecta a la producción de hidrógeno emplear una potencia sustancialmente inferior. Su curva de potencia puede verse en la Figura 4-8. Por lo tanto, el ajuste lineal del aerogenerador resulta:

$$y = -1.134x^4 + 27,05x^3 - 181,2x^2 + 556,7x - 641,1 \quad (\text{Ec. 4-4})$$

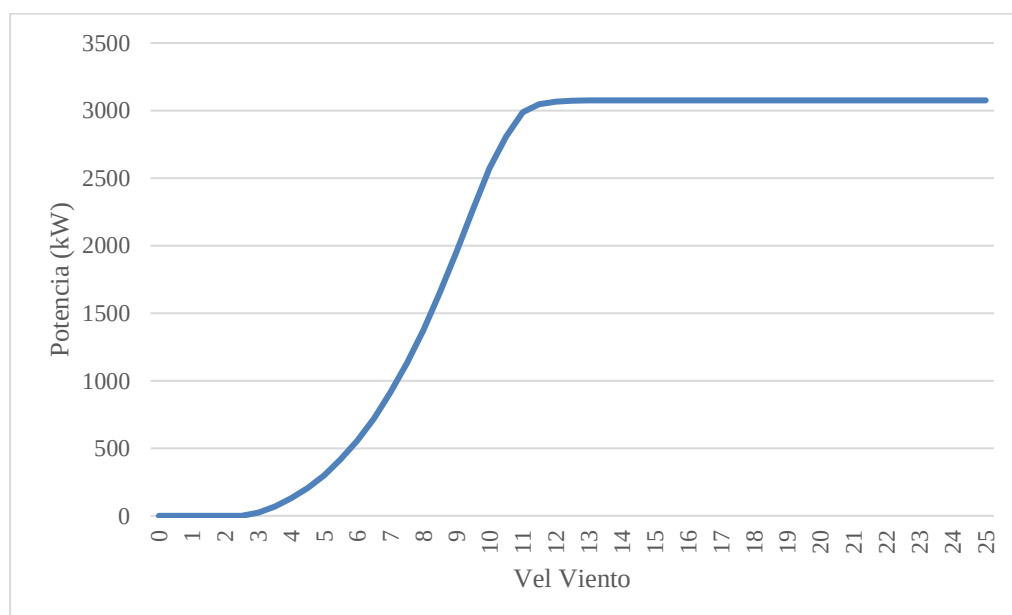


Figura 4-8 Curva de potencia del Vestas V112

Con ello, de la misma forma que con el resto de los aerogeneradores incluidos en este trabajo, se ha modelado un sistema conjunto empleando este modelo de molino eólico para producir la potencia y se ha sometido a los mismos datos de viento que en el resto de casos. Los resultados se muestran en la tabla Tabla 8

Mes	Potencia total generada (kW) ($\times 10^9$)	Hidrogeno producido (moles) ($\times 10^6$)
Enero	1,151	1,037
Febrero	1,457	1,220
Marzo	2,659	1,592
Abril	2,674	1,736
Mayo	1,907	1,330
Junio	1,549	1,258
Julio	1,304	1,221
Agosto	1,305	1,027
Septiembre	2,101	1,295
Octubre	3,888	1,600
Noviembre	2,792	1,698
Diciembre	3,292	1,849
Total	26,079	16,863
Media	2,173	1,405

Tabla 8 Resultados de la simulación para Vestas V112

Como cabe esperar, la producción de potencia resultante también es sustancialmente menor que en el resto de los aerogeneradores sometidos a estudio, aproximadamente un 60% menos, con un total de 26 GW producidos. Consecuentemente, la media de producción mensual también es menor en una proporción similar, con aproximadamente 2,2 GW.

Sin embargo, pese a que la producción de hidrógeno es claramente menor, la diferencia es proporcionalmente mucho menor que con la potencia. La producción de hidrógeno total se sitúa por encima de los 16 millones de moles, es decir, el equivalente a 32000 kg de hidrógeno, 2,25 millones de litros a 200 bares o el equivalente energético a 1,06 millones de kW lo que supone una reducción de solamente el 20% frente a los datos del resto de aerogeneradores. Al igual que en el caso anterior, la explicación a esto se encuentra en la lógica de control del sistema. Si el aerogenerador produce potencia para mantener encendidos un determinado número de módulos, pero no la suficiente para encender uno más, toda la potencia por encima de la necesaria para mantener los módulos encendidos no se está aprovechando para producir hidrógeno (aunque podría enviarse directamente a la red eléctrica o a alimentar al propio complejo para aumentar la eficiencia energética). Por lo tanto, si generamos menos potencia, pero es suficiente para mantener el mismo número de módulos encendidos, no habrá una reducción en la producción de hidrógeno. Por lo tanto, una reducción sustancial de la potencia no tiene porqué implicar una reducción sustancial de la producción

Por último, a modo de conclusión, puede observarse como en todos los casos las mayores tasas de producción de hidrógeno se dan en los últimos meses del año (octubre, noviembre y diciembre) aunque también existe un pico de producción en el mes de abril. Por el contrario, el periodo de menor producción tiene lugar en los meses de verano (junio, julio y agosto), cuando las velocidades de viento son menores durante el periodo estival. En este caso los picos y valles de la producción de hidrógeno se corresponden con los momentos de mayor y menor producción de potencia.

Como información suplementaria, en la Figura 4-9 se incluye una gráfica comparativa de las producciones de hidrógeno de los distintos aerogeneradores a lo largo del año estudiado, en base a los datos obtenidos de las distintas simulaciones. En esta gráfica puede comprobarse como los máximos y mínimos de producción tienen lugar en los periodos señalados en el párrafo anterior, así como las diferentes tasas de producción de los distintos generadores.

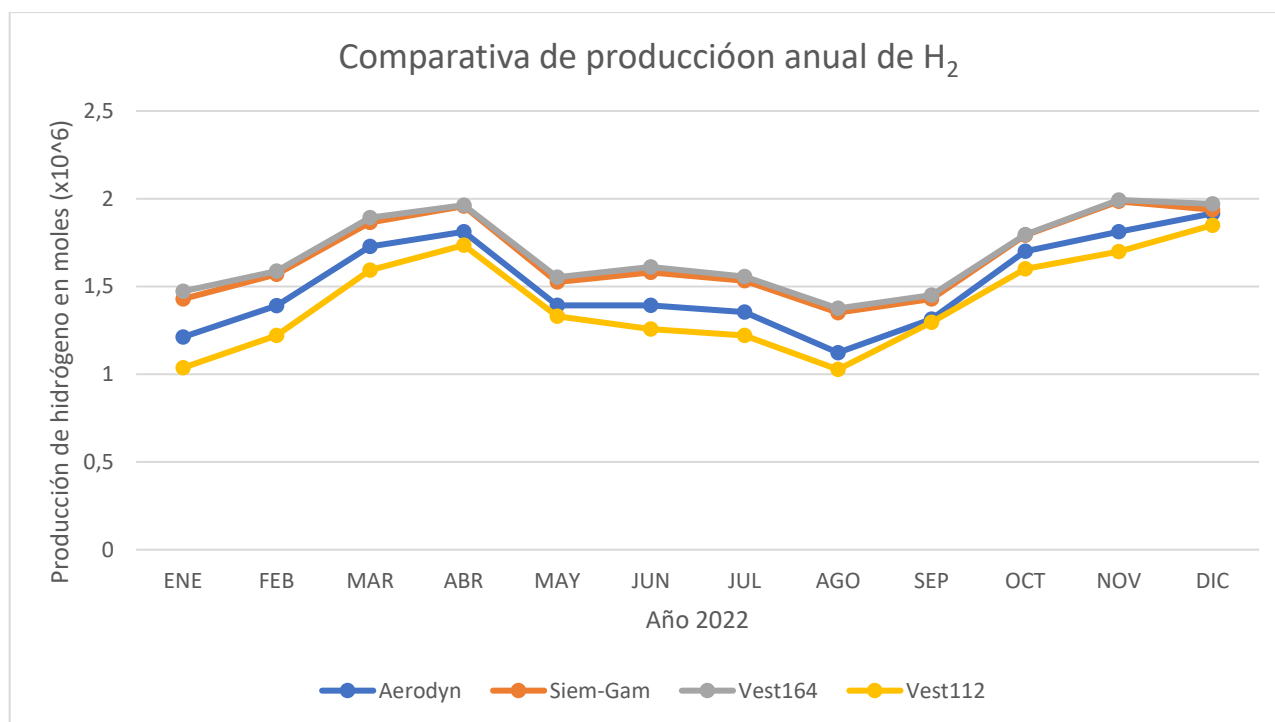


Figura 4-9 Gráfica comparativa que muestra la producción anual de los distintos generadores. Fuente: elaboración propia.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Objetivo principal que tiene este trabajo es conseguir un modelo funcional de un sistema de producción de hidrógeno verde a partir de energía eólica marina y agua salada con el que realizar una estimación de la capacidad de producción de dicho sistema. Para alcanzar este resultado ha sido necesario alcanzar una serie de objetivos secundarios que permitiesen alcanzar un modelo final.

En primer lugar, se estudió con el funcionamiento de las herramientas informáticas y el software necesario, mediante la realización de diferentes ejercicios que permitiesen familiarizarse con el empleo y las funcionalidades de los distintos programas, especialmente el de *Matlab Simulink*. A partir de ese punto, fue necesario conocer los métodos a partir de los cuales se produce el hidrógeno verde y las leyes por las que se rigen estos procesos. A continuación, se obtuvo la información necesaria para poder modelar los aerogeneradores y los datos de potencia propios de cada uno, con lo que obtener el ajuste lineal que permitiese modelarlos. Después se pasó a obtener la información necesaria sobre los procesos sobre los que se basa el funcionamiento de un electrolizador y, en concreto, las características técnicas del electrolizador empleado. También fue necesario conocer cierta información que permitiese modelar el funcionamiento de la planta de destilación, particularmente en lo que se refiere a las características de bombas, filtros y evaporadores. Por último, se obtuvieron los datos de viento con los que poder proporcionar datos de entrada al modelo con los que calcular la producción de hidrógeno. Simultáneamente se comenzó a modelar los distintos elementos que componen el conjunto del sistema, comenzando por los aerogeneradores, después el electrolizador y, por último, la planta destiladora. Sin embargo, por estar realizada esta última en el software *DWSIM*, fue necesario realizar una primera simulación únicamente de la planta destiladora con la que obtener los resultados con los que poder trabajar después en *Matlab Simulink*.

Fue posible, por tanto, alcanzar un modelo plenamente funcional que permitiese simular el comportamiento de la planta productora de hidrógeno y poder obtener unos datos aproximados, pero fiables, de la producción de hidrógeno con cada uno de los aerogeneradores. Además, fue posible hacer el modelo de tal forma que pudiese adaptarse a cualquier otro aerogenerador, electrolizador o planta destiladora.

Con el modelo completamente operativo se pudo proceder entonces a simular con cada uno de los modelos a partir de los datos de viento para obtenerla producción de hidrógeno estimada para cada mes del año 2022. Con estos resultados, fue posible observar los resultados producidos por cada uno de los generadores. Pese a que ha existido cierta variabilidad en los resultados por causa de las diferencias de potencia nominal, si ha permitido realizar una estimación sobre la producción de este tipo de plantas. En cualquiera de las simulaciones, un solo generador ha sido capaz de dar una producción que excedía el

millón de kW. Estos resultados abren la puerta a plantear la instalación de parques completos con varias decenas de generadores que podrían producir varios millones de kW de potencia anualmente.

Sin embargo, por las limitaciones surgidas a lo largo del proyecto, no ha sido posible aventurarse más allá e intentar implementar mejoras en modelo, como un sistema de baterías alimentado por los superávits de potencia que permitiese mantener encendido permanentemente al menos uno de los módulos para generar así una producción más constante

En conclusión, se ha conseguido crear un modelo con el que probar la viabilidad de la producción de hidrógeno verde con energía renovable marina y agua de mar, con lo que se ha podido estudiar las capacidades que este tipo de sistema podría llegar a aportar al sector energético y, en particular, al campo de la producción de combustibles renovables.

5.2 Líneas Futuras

En base al proyecto desarrollado a lo largo de este trabajo y a los resultados obtenidos, se hace patente las posibilidades que este campo de investigación puede ofrecer. Este proyecto aborda un problema, el energético, muy popular en los últimos años, y que suscita el interés general de muchos gobiernos, instituciones y también de empresas. La producción de hidrógeno con agua de mar puede presentar la oportunidad para obtener un combustible barato, accesible y respetuoso con el medio, por lo que continuar investigando en ese sentido puede ser ampliamente beneficioso.

En especial, se hace especialmente relevante continuar con el desarrollo de esta tecnología para poder aplicarla a gran escala, es decir, poder emplear varios generadores con varios módulos con los que poder crear auténticas plantas de producción de hidrógeno en el mar.

Por otro lado, también es necesario investigar en como poder almacenar de forma segura toda esa producción de hidrógeno y como distribuirlo eficazmente. El almacenamiento del hidrógeno ya presenta, por sí mismo, grandes desafíos para poder emplearlo a gran escala, pero este problema es aún mayor si se pretende emplear para almacenar el combustible en un ambiente marino y expuesto a los factores condicionantes del mar (salinidad, humedad, oleaje...). Al mismo tiempo, es imprescindible poder distribuir convenientemente este combustible para poder emplearlo eficazmente, ya sea a través de redes fijas de canalización o a bordo de buques.

También es imprescindible avanzar en las tecnologías eólicas *offshore*, especialmente en la capacidad para instalar estas estructuras. Aunque pueda parecer un tema menor, es fundamental poder desarrollar nuevas técnicas que permitan instalar este tipo de generadores en cotas más profundas y con peores condiciones de fondo. De lo contrario la construcción de estas estructuras se verá limitada aquellas zonas que reúnan los requisitos necesarios para su instalación, en lugar de poder situarlos en aquellas zonas donde las condiciones del viento permitan obtener mayores rendimientos, sin que existan limitaciones provocadas por las condiciones del lecho marino

Por último, no puede obviarse que es absolutamente necesario e irrenunciable continuar investigando las posibles aplicaciones del hidrógeno y aumentar sus capacidades como combustible. No existirá mejor impulso para la producción de hidrógeno que comenzar a sustituir los combustibles tradicionales por hidrógeno en nuestra vida cotidiana. Sin embargo, no se han desarrollado aún las tecnologías que nos permitan descarbonizar nuestras acciones cotidianas, como el empleo de vehículos de hidrógeno o su empleo para producir energía o materias primas. Por lo tanto, aumentar el empleo y el consumo de hidrógeno resultan claves para impulsar las tecnología de producción de hidrógeno.

6 BIBLIOGRAFÍA

A continuación, se relacionan todas las referencias bibliográficas empleadas para la elaboración de este proyecto, incluyendo recursos web, informes, noticias de periódicos y de cualquier otro tipo

- [1] D. Zorrero, «Infobae,» 23 Febrero 2022. [En línea]. Available: <https://www.infobae.com/autos/2022/02/23/como-es-el-buque-de-carga-que-puede-generar-su-propio-hidrogeno-y-hacer-viajes-cero-emisiones/>. [Último acceso: 19:34 Marzo 2023].
- [2] S. Foster y D. Elzinga, «Crónica ONU,» UN Organization, [En línea]. Available: <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible>. [Último acceso: 31 Enero 2023].
- [3] Noticias ONU, «Noticias ONU,» UN Organization, 10 Noviembre 2021. [En línea]. Available: <https://news.un.org/es/story/2021/11/1499832>. [Último acceso: 31 Enero 2023].
- [4] IPCC, «Cambio climático 2014 - Informe de síntesis,» IPCC c/o Organización Meteorológica Mundial (OMM), Ginebra, Suíza, 2014.
- [5] D. G. Maciejewski, «4 teorías negacionistas sobre el cambio climático desmontadas por un científico del CSIC,» *El Español*, 18 Noviembre 2022.
- [6] AEMET, «Agencias estatal de meteorología,» 23 01 2023. [En línea]. Available: https://www.aemet.es/es/noticias/2023/01/resumen_anual_2022#:~:text=AEMET%20acaba%20de%20hacer%20p%C3%BAblico,temperatura%20media%20sobre%20la%20Espa%C3%B1a. [Último acceso: 5 Febrero 2023].
- [7] Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, «Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático,» 1 Septiembre 2021. [En línea]. Available: <https://unfccc.int/es/news/el-cambio-climatico-provoca-mas-fenomenos-meteorologicos-extremos-pero-las-alertas-tempranas-salvan>. [Último acceso: 5 Febrero 2023].
- [8] C. M. Duarte, «El Protocolo de Kioto: ¿logro o fracaso?,» *El Español*, 5 Enero 2018.
- [9] UNFCC, «UNFCC,» [En línea]. Available: <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>. [Último acceso: 5 Febrero 2023].
- [10] IPSOS, "Views about sustainable energy," 2022.

- [11] Euronews, «Finaliza el Foro de Davos con avances hacia el comercio sostenible y la energía verde,» Euronews, 25 Enero 2023. [En línea]. Available: <https://es.euronews.com/green/2023/01/19/foro-economico-de-davos-comercio-sostenible-cambio-climatico-ucrania-tanques-en-directo>. [Último acceso: 31 Enero 2023].
- [12] Unión Europea, «Web Oficial de la Unión Europea,» [En línea]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_es. [Último acceso: 16 febrero 2023].
- [13] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Hoja de Ruta del Hidrógeno: Una apuesta por el Hidrógeno Renovable,» 2020.
- [14] Dirección General de Armamento y Material, «Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa,» Ministerio de Defensa, 2020.
- [15] I. Fariza, «El veto europeo al diésel ruso: el último embudo de la crisis energética,» *El País*, 5 Febrero 2023.
- [16] RePower EU, «Web de la Comisión Europea,» UE, [En línea]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_es. [Último acceso: 23 Febrero 2023].
- [17] Comisión Europea, «Web de la Comisión Europea,» 11 Diciembre 2019. [En línea]. Available: https://commission.europa.eu/document/download/954374b5-2f9a-48f3-882c-07d9afddbabd_es. [Último acceso: 17 Marzo 2023].
- [18] EU strategy on offshore renewable energy, "Web de la Comisión Europea," UE, [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/offshore-renewable-energy_en. [Accessed 23 Febrero 2023].
- [19] La Vanguardia, *España es el tercer país de la UE que menos ha reducido su dependencia de energía fósil desde 1990*, 30 Enero 2023.
- [20] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico,» 20 Enero 2020. [En línea]. Available: https://www.miteco.gob.es/images/es/pnieccompleto_tcm30-508410.pdf. [Último acceso: 23 Febrero 2023].
- [21] «Centro Nacional del Hidrógeno,» [En línea]. Available: <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/>. [Último acceso: 26 Febrero 2023].
- [22] J. Romero Polanco, «Producción de hidrógeno vía electrolítica,» Universidad de Valladolid, Valladolid, 2018.
- [23] E. Fabrega y B. Rendé Huertas, «Desarrollo de un modelo de funcionamiento de,» Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 2020.
- [24] National Energy Education Development, «National Energy Education Development,» [En línea]. Available: <https://www.need.org/>. [Último acceso: 18 Marzo 2023].
- [25] D. V. Rodríguez, «Los riesgos del hidrógeno,» *El País*, 27 Abril 2021.

- [26] Centro Nacional del Hidrógeno, «Centro Nacional del Hidrógeno,» Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, [En línea]. Available: <https://www.cnh2.es/seguridad/>. [Último acceso: 27 Febrero 2023].
- [27] C. Fernández-Bolaños Badía y R. Velázquez Vila, «Energética del Hidrógeno. Contexto, estado actual y perspectivas de futuro,» Sevilla, 2005.
- [28] D. Urricelqui Goñi, A. Gutiérrez Lorenzo y R. Palos Urrutia, «Efecto de las condiciones de operación en el hidrocraqueo conjunto de gasóleo de vacío y polímeros oxigenados no olefínicos,» 2021.
- [29] J. A. Roca, «ArcelorMittal prueba con éxito la producción de acero con hidrógeno verde,» *El Periódico de la Energía*, 09 Mayo 2022.
- [30] La Vanguardia, «Así es el Energy Observer, el primer barco propulsado por hidrógeno y energías renovables del mundo,» *La Vanguardia*, 15 Mayo 2023.
- [31] M. Ormazabal, «El primer motor de avión propulsado por hidrógeno con tecnología española arrancará en 2025,» *El País*, 28 Febrero 2023.
- [32] Siemens Energy, "Siemens Energy," [Online]. Available: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offers/power-generation/power-plants/hydrogen-power-plants.html>. [Accessed 18 Marzo 2023].
- [33] A. Arce Canga-Argüelles y A. Iranzo Paricio, «Análisis del Estado del Arte de aerogeneradores offshore. Estado de la tecnología, ventajas competitivas limitaciones y principales fabricantes.,» Sevilla, 2021.
- [34] B. Solana santillana y F. Ballester Muñoz, «Diseño de cimentaciones de gravedad para eólica offshore,» Santander, 2015.
- [35] «Renergy,» 15 Junio 2021. [En línea]. Available: <https://ronergy.com/funcionamiento-de-un-aerogenerador/>. [Último acceso: 23 Marzo 2023].
- [36] «Danish Wind Industry Association,» 31 Julio 2003. [En línea]. Available: <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wtrb/tower.htm>. [Último acceso: 6 Marzo 2023].
- [37] B.O.E.M., "Comparison of Environmental Effects from different offshore wind turbine foundations," 2020.
- [38] «RED ELECTRICA DE ESPAÑA - Seguimiento de la demanda de energía eléctrica.,» 5 Marzo 2023. [En línea]. Available: <https://demanda.ree.es/visiona/peninsula/demandaqh/total>. [Último acceso: 5 Marzo 2023].
- [39] S. Acosta y R. Roca, «Estos son los 45 proyectos de eólica marina que se quieren desarrollar en España con una potencia total de más de 14 GW,» *El periódico de la energía*, 1 Marzo 2023.
- [40] MathWorks, «MathWorks,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/videos/simulink-overview-61216.html>. [Último acceso: 2023 Marzo 18].
- [41] DSWIM, "DSWIM," [Online]. Available: <https://dwsim.org/>. [Accessed 18 Marzo 2023].

- [42] «MateoGalicia,» Xunta de Galicia, [En línea]. Available: <http://www2.meteogalicia.gal/galego/observacion/plataformas/plataformas.asp?idEst=15002>. [Último acceso: 2023 Febrero 24].
- [43] F. F. Quezada, «Research Gate,» Septiembre 2015. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Curva-de-potencia-del-Aerogenerador-G114-20MW-Gamesa-9-Encontrado-el-tiempo_fig2_282993854. [Último acceso: 18 Marzo 2023].
- [44] «The Wind Power,» 25 Octubre 2022. [En línea]. Available: https://www.thewindpower.net/turbine_es_1119_aerodyn-engineering-gmbh_scd-8.0-168.php. [Último acceso: 18 Marzo 2023].
- [45] "Web Plot Digitalizer," [Online]. Available: <https://apps.automeris.io/wpd/>. [Accessed 23 Marzo 2023].
- [46] O. Ullerberg, "Modeling of Advanced," International Jurnal of Hydrogen Energy, Kjeller, 2023.
- [47] Y. Kuang, M. J. Keneddy, Y. Meng, W.-H. Hung y Y. Liu, «PNAS,» 18 Marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1900556116>. [Último acceso: 8 Marzo 2023].
- [48] ENM, B/E Juan Sebastián Elcano - Servicio de Energía y propulsión, Armada Española, 2017.
- [49] Siemens-Gamesa, «Siemens-energy,» [En línea]. Available: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/power-plants/hydrogen-power-plants.html>. [Último acceso: 18 Marzo 2023].
- [50] "Vestas," [Online]. Available: <https://us.vestas.com/en-us/products/offshore/V164-9-5-MW>. [Accessed 20 Marzo 2023].
- [51] UNEP, «The Closing Window - Climate crisis calls for rapid transformation,» UN publications, 2022.
- [52] Europa Press, «España, entre los países de la UE con mayor dependencia de importaciones de combustibles fósiles,» *Europa Press*, 20 Febrero 2017.
- [53] J. A. Roca, «ArcelorMittal prueba con éxito la producción de acero con hidrógeno verde,» *El periódico de la energía*, 09 Mayo 2022.
- [54] C. Hussy, «International Ptx-Hub,» [En línea]. Available: <https://ptx-hub.org/water-electrolysis-explained/>. [Último acceso: 18 Marzo 2023].
- [55] «Aerodyn Engineering,» [En línea]. Available: https://aerodyn-engineering.com/fileadmin/Download/aerodyn_engineering_Data_sheet_offshore_family_2015.pdf. [Último acceso: 20 Marzo 2023].
- [56] | «Siemens Gamesa,» [En línea]. Available: <https://www.siemensgamesa.com/es-es/products-and-services/offshore/aerogenerador-sg-8-0-167-dd>. [Último acceso: 20 Marzo 2023].

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

Durante los dos últimos siglos los combustibles fósiles han permitido al ser humano desarrollar las sucesivas revoluciones industriales que hemos experimentado hasta modelar la sociedad en la que vivimos hoy día. Sin embargo, todo parece apuntar a que el futuro a medio y largo plazo irá marcado por un progresivo abandono de estos combustibles fósiles. Es por ello que trabajar en campos de investigación como el de este trabajo resulta imprescindible si queremos desarrollar la tecnología que nos permita abandonar la quema de hidrocarburos sin que esto suponga un cambio significativo en las capacidades energéticas actuales. El desarrollo de nuevas fuentes energéticas responde, más que a una solución a los problemas actuales, a un compromiso de las generaciones presentes con aquellas que vendrán después, y que necesitarán de fuentes de energía sostenibles plenamente desarrolladas. Cada vez más instituciones y gobiernos apuestan por contribuir a un futuro energético viable a largo plazo, lo que se traduce en una clara oportunidad de desarrollar ahora las fuentes de energía del mañana. No obstante, no puede obviarse que satisfacer las demandas energéticas actuales sin comprometer el futuro del planeta es un objetivo colosal, y las implicaciones que ello supone se manifiestan y se manifestarán de muchas formas y en muchos planos distintos.

En primer lugar, como es lógico, está el plano medioambiental. Como se ha reflejado en los primeros puntos de este trabajo, la quema de combustibles fósiles y la emisión de gases de efecto invernadero que resultan de su combustión, provocan serios daños sobre el medioambiente y, especialmente, sobre la atmósfera. El calentamiento global, el cambio climático o la disminución en la capa de ozono son consecuencias claras y cada vez más evidentes del daño que las emisiones generadas por los hidrocarburos producen sobre la Tierra. Buscar fuentes de energía y vectores energéticos libres de estas emisiones resultará beneficioso tanto en el corto como en el medio y largo plazo, especialmente poder limitar las catastróficas consecuencias que la comunidad científica prevé de continuar en la línea actual.

En el plano económico abandonar los combustibles fósiles en favor de nuevas formas de energía también tendrá importantes repercusiones. El primero y más importante es que el precio del petróleo dejará de ser un factor clave de la economía mundial, que pasará a estar controlada por otros factores distintos, si bien aún es imposible determinar cuáles serán. El segundo, inevitablemente, será la variación en el precio de la energía, así como el coste del transporte, lo que repercutirá en el coste de bienes y servicios y, consecuentemente, en los mercados mundiales.

También es importante a nivel social, puesto que el empleo de nuevas formas de energía y de nuevos combustibles condicionaran nuestras costumbres, nuestros hábitos y la forma de relacionarnos. Cambiará, por ejemplo, nuestra forma de viajar, pues las autonomías de los vehículos o el precio de los desplazamientos también variará como consecuencia del abandono de los combustibles tradicionales.

También transformará el orden mundial actual y tendrá repercusiones en la geopolítica. Actualmente, el petróleo tiene carácter de recurso estratégico, ya que es fundamental para las economías y los ejércitos, por lo que aquellos países que poseen petróleo cuentan con un enorme peso en la geopolítica mundial. El ejemplo de Rusia en la invasión de Ucrania y el peso de su influencia sobre Europa, ponen de manifiesto este desequilibrio de poder causado por los recursos petrolíferos. Además, garantizar el suministro de petróleo, o impedirlo, ha sido a lo largo de los años fuente de innumerables conflictos, guerras y enfrentamientos entre las distintas potencias. El nuevo modelo energético reequilibrará este balance de pesos y contrapesos, seguramente en favor de un orden mundial más igualitario, ya que todos los países podrán crear su propia energía.

ne.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

A lo largo de los primeros puntos de este trabajo se ha expuesto brevemente cual es la situación energética actual y que medidas se están llevando a cabo o, al menos, se planea llevar a cabo al corto y medio plazo. Puede parecer que las consecuencias del empleo de los combustibles tradicionales de combustión y las emisiones de gases resultantes se limitan a un incremento de la temperatura terrestre y de una alteración más extrema del clima. Sin embargo, lo cierto es que el resultado puede acarrear (y de hecho así ocurre ya) consecuencias desastrosas para la actividad y la vida humana. La reducción del suelo agrícola, muertes prematuras y aumento de las enfermedades, sequías o inundaciones son quizá las más ilustrativas del grave riesgo al que nos enfrentamos. Por ello, resulta imperativo que se desarrolle a la mayor brevedad una base tecnológica suficiente que nos permita producir energía sin hipotecar el futuro del planeta.

El abandono de los combustibles tradicionales en favor de otros más sostenibles como el hidrógeno son una respuesta a una situación acuciante. Pese a que aún existen multitud de posturas respecto a este tema, que recorren todo un amplio abanico desde el compromiso total hasta el escepticismo manifiesto, lo cierto es que los gobiernos y las instituciones internacionales que apuestan por esta idea lo hacen movidos por las evidencias, cada vez más habituales y perceptibles, del impacto que el empleo de los hidrocarburos tiene sobre la atmósfera y el medioambiente. No obstante, no puede pasarse por alto el papel fundamental que juega una sociedad concienciada y comprometida con la protección del medio ambiente. Este nuevo modelo energético que se pretende conseguir, gracias en parte al hidrógeno pero también a otras tecnologías y otros materiales fundamentales para hacerlo posible, se enmarca dentro de una acción mucho mayor, que es garantizar nuestro desarrollo sostenible.

Por lo tanto, no se trata únicamente de dar una solución a los problemas actuales y evitar las consecuencias inmediatas de la contaminación atmosférica, sino de proporcionarle a las próximas generaciones una tecnología que les permita desarrollarse en las mismas condiciones en las que lo hacen las generaciones actuales. Es, por tanto, un compromiso intergeneracional para garantizar un futuro viable para aquellos que nos sucederán. Las peores consecuencias climáticas que la ciencia pronostica parecen muy lejanas en el tiempo para nosotros, pero no lo serán para nuestros hijos y nuestros nietos.

Sin embargo, esta responsabilidad no se limita a las generaciones futuras, sino que se trata de un compromiso humano, también entre los distintos países. Los diversos estudios sobre las consecuencias climáticas coinciden en que serán los países más pobres los que sufran las mayores y más graves resultados de las emisiones de gases contaminantes, pese a ser responsables de una mínima parte de las emisiones. En consecuencia, intentar garantizar un camino sostenible para nuestro modo de vida es también un acto de solidaridad entre humanos.

La amenaza a la que nos enfrentamos, por su carácter global, proporciona una perspectiva igualitaria, ya que todo el planeta experimentará las consecuencias independientemente de su patrimonio, etnia, religión, género o raza. En consecuencia, estamos ante una amenaza para toda la humanidad, pero no exclusivamente humana. De hecho, las consecuencias para nuestra especie serán mucho menores que aquellas a las que se enfrentarán, o se enfrentan ya, el resto de las especies y ecosistemas del planeta. Por lo tanto, ante enfrentarnos a un problema a escala global, la respuesta que ofrezcamos debe serlo también. Intereses económicos, políticos o estratégicos son importantes, por supuesto, pero deben dejarse a un lado antes la idea de lo que supone un problema capaz de alterar profundamente nuestra forma de vida.