

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y
AUTOMÁTICA INDUSTRIAL



"Análisis de sistemas de propulsión para USV
de hidrógeno y baterías"

TRABAJO FIN DE GRADO

Julio -2026

AUTOR: Salvador Soriano Brotons

DIRECTOR/ES: Óscar Reinoso García

RESUMEN

El presente trabajo aborda, en el marco de un proyecto de I+D de ámbito empresarial, el análisis de distintos sistemas de propulsión para vehículos de superficie no tripulados (USV) basados en hidrógeno renovable. El objetivo es determinar qué sistema permite almacenar la mayor cantidad de energía a bordo por unidad de peso y, por tanto, ofrecer una mayor autonomía.

Para ello se emplea un software de simulación, desarrollado en Matlab, que reproduce el comportamiento del campo fotovoltaico, las cargas de consumo, la electrónica de control, la batería de litio, el electrolizador, el depósito de hidrógeno, la pila de combustible y el depósito de agua, permitiendo variar los parámetros de entrada y los escenarios de radiación y consumo.

Se estudian dos embarcaciones. Para el USV de 1,6 m se analiza la viabilidad de la producción de hidrógeno a bordo, concluyendo que solo es viable con relaciones potencia fotovoltaica/consumo muy elevadas; por las restricciones de espacio y peso se opta por un sistema eléctrico de baterías con una estación de carga autónoma patentada. Para el USV de 5 m se comparan un sistema de baterías, un sistema híbrido de pila de combustible sin generación a bordo y otro con generación a bordo, en distintas latitudes y épocas del año, complementando el análisis técnico con un estudio de costes.

Los resultados muestran que el sistema híbrido sin generación de hidrógeno a bordo ofrece la mejor combinación de autonomía, peso y coste.

Palabras clave: USV; hidrógeno renovable; pila de combustible; baterías de litio; energía solar fotovoltaica; autonomía; simulación.

ABSTRACT

This work addresses, within the framework of an industrial R&D project, the analysis of different propulsion systems for unmanned surface vehicles (USV) based on renewable hydrogen. The aim is to determine which system stores the greatest amount of energy on board per unit of weight and therefore provides the longest endurance.

A simulation software developed in Matlab is used, reproducing the behaviour of the photovoltaic array, the consumption loads, the control electronics, the lithium battery, the electrolyser, the hydrogen tank, the fuel cell and the water tank, allowing the input parameters and the radiation and consumption scenarios to be varied.

Two vessels are studied. For the 1.6 m USV, the viability of on-board hydrogen production is analysed, concluding that it is only viable with very high photovoltaic power/consumption ratios; due to space and weight constraints, a battery electric system with a patented autonomous charging station is chosen. For the 5 m USV, a battery system, a hybrid fuel-cell system without on-board generation and one with on-board generation are compared across different latitudes and seasons, complementing the technical analysis with a cost study.

The results show that the hybrid system without on-board hydrogen generation offers the best combination of endurance, weight and cost.

Keywords: USV; renewable hydrogen; fuel cell; lithium batteries; photovoltaic solar energy; endurance; simulation.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
ÍNDICE GENERAL	4
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. CONTEXTO Y MOTIVACIÓN	10
1.2. OBJETIVOS.....	10
1.3. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	11
2. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS PARA EL USV DE 1,6 M	12
2.1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN Y SIMULACIÓN... 12	
2.1.1. SOFTWARE DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA	12
2.2. RESULTADOS OBTENIDOS Y LECCIONES APRENDIDAS	14
2.2.1. RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA.....	14
2.3. MEJORAS IMPLEMENTADAS EN LA SIMULACIÓN	21
2.3.1. MEJORAS IMPLEMENTADAS.....	21
2.3.2. RESULTADOS DE SIMULACIÓN CON EL SISTEMA MEJORADO....	24
2.4. CONCLUSIÓN DE VIABILIDAD DEL USO DE HIDRÓGENO.....	25
2.5. ESTACIÓN DE CARGA AUTÓNOMA PARA EMBARCACIONES ELÉCTRICAS.....	26
2.5.1. EXPLICACIÓN DE LA INVENCION.....	26
2.5.2. DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS DE LA PATENTE	26
2.5.3. REALIZACIÓN DE LA INVENCION	27
2.5.4. PRUEBA PILOTO DE LA INVENCION	39
3. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS PARA EL USV DE 5 M	41
3.1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN Y SIMULACIÓN... 41	

3.1.1. SOFTWARE DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA	41
3.1.2. DIFERENTES SISTEMAS A MODELAR	41
3.1.3. RESULTADOS DE LAS DIFERENTES SIMULACIONES	42
3.2. RESULTADOS OBTENIDOS Y LECCIONES APRENDIDAS	42
3.2.1. SIMULACIÓN 1	42
3.2.2. SIMULACIÓN 2	50
3.2.3. PRIMERA CONCLUSIÓN.....	53
3.2.4. SIMULACIÓN 3	54
3.2.5. SEGUNDA CONCLUSIÓN	57
3.2.6. SIMULACIÓN 4	57
3.2.7. TERCERA CONCLUSIÓN	58
3.2.8. SIMULACIÓN 5	59
3.2.9. SIMULACIÓN 6	62
3.3. ESTUDIO DE COSTES PARA CADA SISTEMA.....	65
3.3.1. CONCLUSIÓN ECONÓMICA	69
4. CONCLUSIONES.....	70
4.1. CONCLUSIONES TÉCNICAS Y ECONÓMICAS.....	70
4.2. LÍNEAS FUTURAS.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de sistema de propulsión para simulación. Fuente: Creación propia.	13
Figura 2. Diagrama de bloques y nomenclatura de variables en la simulación.....	14
Figura 3. Escenarios de radiación solar simulados.....	15
Figura 4. Valor de simulación de parámetro Potencia en las cargas (W).....	17
Figura 5. Porcentaje de carga de la batería.....	17
Figura 6. Cantidad de H ₂ en el depósito.	18
Figura 7. Curvas de generación solar y consumo de cargas.....	19
Figura 8. Valor de simulación de parámetro Potencia en las cargas (W). Simulación 2.	19
Figura 9. Cantidad de H ₂ en el depósito. Simulación 2.	20
Figura 10. Estado de carga de la batería en %. Simulación 2.....	20
Figura 11. Cantidad de agua en el depósito para 70 días de simulación.	21
Figura 12. Curva de consumo variable.....	22
Figura 13. Cantidad de H ₂ en el depósito.	23
Figura 14. Cantidad de O ₂ en el depósito.	23
Figura 15. Evolución de la batería y de la cantidad de H ₂ en el nuevo modo.	24
Figura 16. Generación solar, consumo de cargas y estado de la batería. Simulación 1.	26
Figura 17. Dibujo asociado a la patente 1.	34
Figura 18. Dibujo asociado a la patente 2.	35
Figura 19. Dibujo asociado a la patente 3.	36
Figura 20. Dibujo asociado a la patente 4.	36
Figura 21. Dibujo asociado a la patente 5.	37
Figura 22. Dibujo asociado a la patente 6.	38
Figura 23. Dibujo asociado a la patente 7.	38
Figura 24. Dibujo asociado a la patente 8.	39

Figura 25. Dibujo asociado a la patente 9.	40
Figura 26. Imagen 1 de la prueba.	40
Figura 27. Imagen 2 de la prueba.	41
Figura 28. Curva de consumo para la Simulación 1.....	44
Figura 29. Curva de irradiancias por m2 para la Simulación 1.	44
Figura 30. Resultados de la autonomía obtenida para dos baterías en serie.....	45
Figura 31. Resultados de la autonomía obtenida para 7 baterías en cada casco.....	46
Figura 32. Resultados del almacenamiento de energía en la batería del sistema híbrido.	47
Figura 33. Resultados del consumo de hidrógeno y de la batería.	47
Figura 34. Resultados de la simulación alcanzando la máxima autonomía.	48
Figura 35. Potencia suministrada al USV.....	48
Figura 36. Resultados de la simulación para un depósito de agua de 40L.....	49
Figura 37. Resultados de la simulación para el tanque de hidrógeno.....	50
Figura 38. Resultados de la simulación para el tanque de agua.	50
Figura 39. Autonomía del tanque de 40L de agua.....	50
Figura 40. Comprobación del llenado para un tanque de agua de 60L.	51
Figura 41. Resultados de la autonomía para un tanque de agua de 60L.....	51
Figura 42. Curva de consumo Escenario 1.....	52
Figura 43. Curva de irradiancias por m2 en Alicante.....	52
Figura 44. Resultados de la autonomía para el sistema eléctrico en la simulación 2.....	53
Figura 45. Resultados de la autonomía para el sistema híbrido sin generación a bordo en la simulación 2.....	54
Figura 46. Resultados de la autonomía para el sistema híbrido con generación a bordo en la simulación 2.....	54
Figura 47. Curva de consumo Escenario 2.....	55
Figura 48. Curva de irradiancias por m2 en Noruega.....	56
Figura 49. Resultados de la autonomía para el sistema eléctrico en la simulación 3.....	56

Figura 50. Resultados de la autonomía para el sistema híbrido sin generación en la simulación 3.....	57
Figura 51. Resultados del consumo y generación de hidrógeno.	57
Figura 52. Resultados de la autonomía para el sistema híbrido con generación en la simulación 3.....	58
Figura 53. Curva de consumo para la simulación 4	59
Figura 54. Análisis del SOC para la simulación 4.....	59
Figura 55. Curva de consumo para la simulación 5.	60
Figura 56. Curva de irradiancias por m2 en Canarias.	61
Figura 57. Resultados de la autonomía en el sistema eléctrico.	61
Figura 58. Resultados de la potencia suministrada en el sistema eléctrico.	61
Figura 59. Resultados de la autonomía para el sistema híbrido sin generación.	62
Figura 60. Resultados de la masa de hidrógeno para el sistema híbrido sin generación.	62
Figura 61. Resultados de la potencia suministrada para el sistema híbrido sin generación.	62
Figura 62. Resultados del voltaje para el sistema híbrido sin generación.	62
Figura 63. Tabla de velocidades y consumo para las peores condiciones.....	64
Figura 64. Tabla de velocidades y consumo para las mejores condiciones.	65
Figura 65. Resultados de la autonomía en el sistema eléctrico para las peores condiciones.	65
Figura 66. Resultados de la autonomía en el sistema eléctrico para las mejores condiciones.	66
Figura 67. Resultados de la autonomía en el sistema híbrido para las mejores condiciones.	66
Figura 68. Resultados de la autonomía en el sistema híbrido para las mejores condiciones.	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de simulación.....	15, 42
Tabla 2. Parámetros de la simulación 1	16
Tabla 3. Parámetros de la simulación 2	18
Tabla 4. Parámetros de la simulación 1 embarcación pequeña	25
Tabla 5. Parámetros de superficie USV 5 metros.....	42
Tabla 6. Datos de la batería escogida para el sistema eléctrico de solo baterías.....	45
Tabla 7. Características de la batería para el modelo híbrido.....	47
Tabla 8. Costes de los productos para el sistema eléctrico.....	67
Tabla 9. Características del tanque de hidrógeno.	68
Tabla 10. Costes de los productos para el sistema de hidrógeno sin generación.	69



1. INTRODUCCIÓN

1.1. CONTEXTO Y MOTIVACIÓN

El presente Trabajo Fin de Grado tiene su origen en un proyecto de investigación y desarrollo (I+D) sobre sistemas de propulsión para vehículos de superficie no tripulados (USV) basados en hidrógeno renovable, desarrollado en el ámbito empresarial. El trabajo responde a la creciente demanda de alternativas más ecológicas y sostenibles en el ámbito marítimo [1], [2].

El objetivo general consiste en demostrar en qué condiciones un sistema híbrido de pila de combustible de hidrógeno permite una mayor autonomía que un sistema eléctrico compuesto únicamente por baterías, es decir, qué sistema permite almacenar la mayor cantidad de energía a bordo por unidad de peso. Para ello se analizan dos embarcaciones de distinto tamaño: un USV de 1,6 m y un USV de 5 m.

El estudio se apoya en un software de simulación que reproduce el comportamiento de todos los componentes del sistema de propulsión (campo fotovoltaico, cargas de consumo, electrónica de control, batería de litio, electrolizador, depósito de hidrógeno, pila de combustible y depósito de agua), permitiendo variar los parámetros de entrada y evaluar distintos escenarios de radiación solar y de consumo.

1.2. OBJETIVOS

Estudiar la viabilidad técnica de la producción y el consumo de hidrógeno a bordo de un USV de 1,6 m, determinando la relación óptima entre la potencia fotovoltaica instalada y el consumo de las cargas (PF/CC).

Implementar y validar mejoras en el software de simulación a partir de las conclusiones obtenidas (curva de consumo variable, generación de hidrógeno fuera de la embarcación, nuevo modo de funcionamiento y otros cambios menores).

Comparar, para un USV de 5 m, tres sistemas de almacenamiento y generación de energía: un sistema de baterías de litio, un sistema híbrido de pila de combustible sin generación de hidrógeno a bordo y un sistema híbrido con generación de hidrógeno a bordo.

Evaluar el comportamiento de cada sistema en distintas ubicaciones (latitudes alta, media y baja) y épocas del año, así como ante distintos perfiles de consumo.

Realizar un estudio de costes (CAPEX) de cada sistema para apoyar la conclusión técnica con criterios económicos.

Definir, en función de los resultados, la solución de propulsión más adecuada para cada tamaño de embarcación.

1.3. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La memoria se organiza en cuatro capítulos. Tras esta introducción, el capítulo 2 analiza los distintos sistemas para el USV de 1,6 m, incluyendo la descripción del software de simulación, los resultados obtenidos, las mejoras implementadas y la estación de carga autónoma desarrollada. El capítulo 3 analiza los sistemas para el USV de 5 m, comparando las distintas configuraciones mediante seis simulaciones y un estudio de costes. El capítulo 4 recoge las conclusiones y las líneas futuras. Finalmente, se incluye como anexo la descripción del software de simulación y el apartado de bibliografía.



2. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS PARA EL USV DE 1,6 M

2.1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN Y SIMULACIÓN

2.1.1. SOFTWARE DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA

Esta fase del proyecto comenzó en Mayo de 2023 y finalizó en septiembre de 2023. A continuación, se detallan todas las tareas realizadas y las instituciones ajenas al proyecto que han participado:

Diseño de sistema

En primer lugar, se llevó a cabo un diseño de todo el sistema de propulsión de la embarcación, el cual incluía todos los elementos necesarios para el buen funcionamiento. El objetivo de este diseño era poder explicar con bastante detalle a la institución encargada de realizar la simulación (Universidad Miguel Hernández de Elche), todos los componentes que se debían simular, así como la relación de operación entre todos ellos. También incluía los parámetros de diseño iniciales (potencia fotovoltaica instalada, depósito de agua, eficiencia de la pila de combustible, eficiencia de la electrólisis, demanda energética de la embarcación, etc) y los diferentes escenarios que se querían poder simular posteriormente [3], [4], [5].

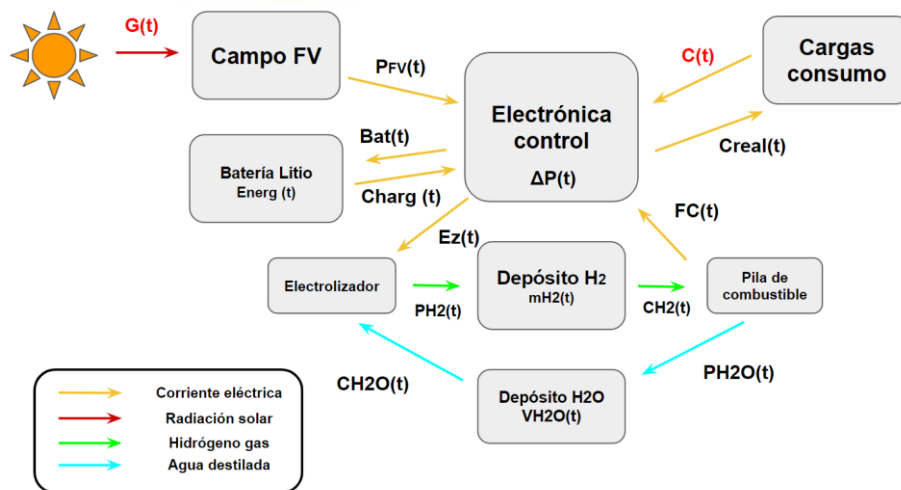


Figura 1. Esquema de sistema de propulsión para simulación. Fuente: Creación propia.

Programación del software de simulación

Una vez finalizado el diseño por parte del equipo de Hydros Power, se contactó con el departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la UMH. En noviembre de 2022

comenzó el trabajo de simulación, el cual fué subcontratado a este departamento. Esta simulación se realizó con la posibilidad de poder variar todos los parámetros de entrada en el programa. El programa utilizado fué Matlab, un software de cálculo y programación de bloques muy utilizado en el sector de la ingeniería [6], [7].

La simulación se llevó a cabo por Arturo Gil y Damián Crespi, ambos investigadores de la UMH. Como prueba de realización y para mejor comprensión del sistema planteado y las características de esta simulación informática se adjunta como anexo el documento descriptivo del trabajo realizado. Tanto el programa requerido, como las bases de datos de radiación solar solicitados para el estudio de diferentes escenarios fueron entregados a finales de enero de 2023 [8].

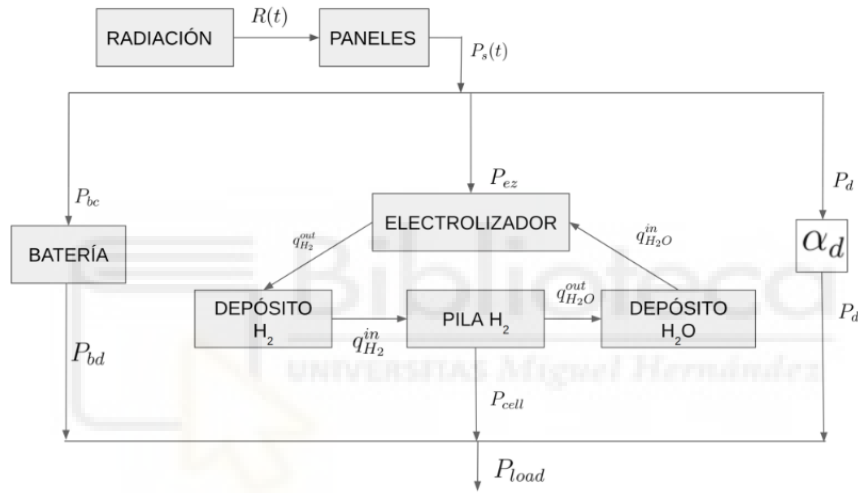


Figura 2. Diagrama de bloques y nomenclatura de variables en la simulación.

Simulación de diferentes escenarios

Una vez recibido el programa y el documento descriptivo, se llevó a cabo la simulación y el estudio de varias configuraciones de los parámetros de entrada para cada escenario (verano, invierno y primavera/otoño). El más restrictivo y desfavorable es el de invierno, donde la irradiancia (W/m^2) de luz que alcanza la superficie terrestre es mínima [9].

Las curvas de radiación consideradas dependen de la latitud y longitud, por lo que para obtener estos datos se han utilizado las coordenadas del puerto de Alicante. Esto hace válidos los resultados para ubicaciones próximas a esta provincia, siendo necesario modificar los datos de entrada al programa en caso de querer comprobar la viabilidad del sistema en otros territorios con distinta radiación. Se presentan en la siguiente figura los tres perfiles de radiación solar considerados para cada periodo.

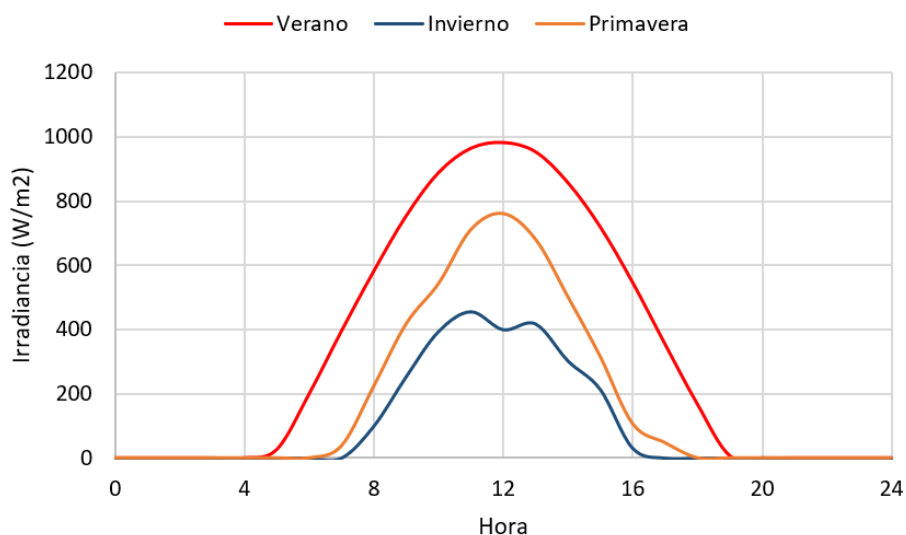


Figura 3. Escenarios de radiación solar simulados.

Por otro lado, los parámetros de simulación que se consideran constantes para todas las simulaciones son:

Rendimiento solar	Rendimiento electrolizador	Rendimiento pila de combustible	Pérdida de H2O por ciclo
93%	75%	70%	5%

Tabla 1. Parámetros de simulación

Estudio de resultados y conclusiones

Una vez obtenidas todas las gráficas resultado de las distintas simulaciones realizadas, se llevó a cabo un estudio de viabilidad del sistema, pudiendo comprobar en qué escenarios y a qué escala tiene sentido la producción de hidrógeno a bordo de la embarcación y qué autonomía permite para cada caso.

2.2. RESULTADOS OBTENIDOS Y LECCIONES APRENDIDAS

2.2.1. RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA

En primer lugar, se llevaron a cabo las simulaciones para los datos de partida del prototipo físico probado: 400 W de potencia solar instalada y 200 W de consumo. El objetivo fue estudiar la viabilidad de producción y consumo de hidrógeno a bordo de esta embarcación fabricada para poder compararlo con los resultados obtenidos de forma experimental. Se simularon los tres escenarios posibles de generación solar (verano, invierno y otoño/primavera).

Como criterio para considerar válida ésta y todas las configuraciones simuladas, se considera que el sistema de producción y almacenamiento de energía debe ser capaz de alimentar el USV o embarcación durante todo el día sin interrupciones. Este criterio se basa principalmente en que el sistema planteado tiene como objetivo principal dotar de autonomía prácticamente ilimitada al USV donde se instala. Por tanto, no estaría cumpliendo plenamente su función si no fuera capaz de proveer una alimentación continua a las cargas de consumo a bordo (propulsión, electrónica y carga útil).

Para poder estudiar si se cumple o no este criterio, la simulación incluye el cálculo de un parámetro denominado Potencia en las cargas. Este parámetro, cuya unidad de medida es el vatio, indica qué potencia se le está suministrando a las cargas de consumo en cada momento de la simulación. Su valor depende de la energía solar producida, la cantidad de energía disponible en la batería y la cantidad de hidrógeno disponible en el depósito. En el caso de que no haya suficiente excedente solar durante el día y no se consiga por tanto producir una gran cantidad de hidrógeno para la noche, llegará un momento que el hidrógeno y la batería se acabarán y no habrá energía para las cargas. En este preciso momento el parámetro Potencia en las cargas tendrá un valor de cero y por tanto se considerará no válida la configuración.

Para solventar el problema, habría que aumentar la ratio Potencia solar instalada / Consumo de cargas (PF/CC). Así, se consigue mayor excedente energético durante el día y por tanto aumenta la capacidad de consumir energía disponible durante la noche. El prototipo físico probado y la primera simulación realizada tiene una ratio de 2 (400 W / 200 W). La simulación se ha realizado para un periodo de 4 días, suficiente para poder comprobar la validez de esta configuración.

Simulación 1

Los parámetros variables de esta simulación son:

Potencia solar	Consumo cargas	Capacidad depósito H2	Volúmen tanque H2O	Energía batería	PF/CC
400 W	200 W	0,1 kg	0,5 L	160 Wh	2

Tabla 2. Parámetros de simulación 1

Primero se simuló el escenario más favorable (verano) para estudiar la viabilidad, ya que, si este escenario no daba buenos resultados, los otros dos tampoco.

Los resultados se muestran a continuación:

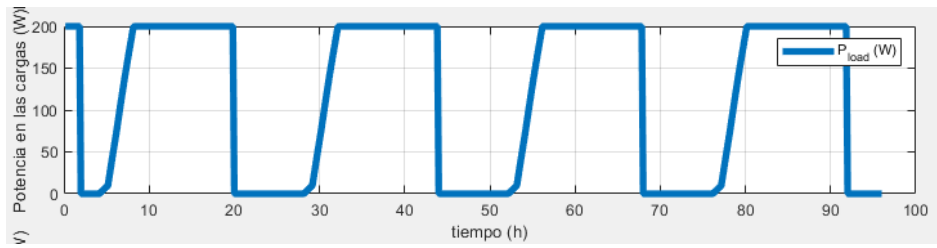


Figura 4. Valor de simulación de parámetro Potencia en las cargas (W).

Podemos ver cómo para esta configuración, la generación solar no es suficiente como para poder alimentar las cargas de continuo, por lo que no cumple el criterio establecido de alimentación continua y no sería válida. Podemos ver cómo de cada ciclo representado, el cual se corresponde a un día de la simulación, aproximadamente el 25% del tiempo (unas 8 horas) no es posible suministrar potencia a las cargas.

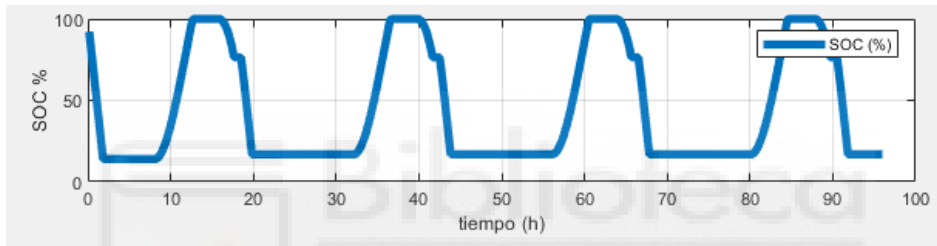


Figura 5. Porcentaje de carga de la batería.

En el caso de la batería, vemos como al principio se descarga por completo hasta alcanzar el valor de 20%. Esto se debe a que la simulación comienza en horario nocturno, por lo que la batería de 160 Wh no es suficiente para mantener el USV funcionando hasta que comiencen a generar energía los paneles solares. El valor de 20% es el mínimo que puede alcanzar, ya que se ha impuesto esta condición con el fin de protegerla de descargas que disminuyan su capacidad de almacenamiento con el tiempo. Cuando hay potencia de sobra se vuelve a cargar entera, y es entonces cuando comienza la producción de hidrógeno [10], [11].

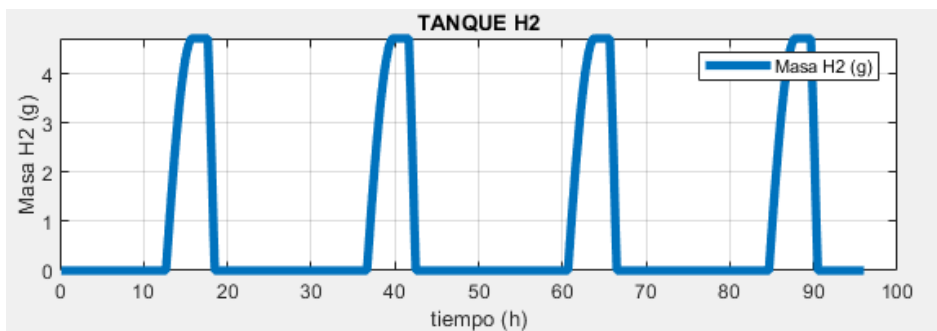


Figura 6. Cantidad de H2 en el depósito.

Se observa como en el momento en el que la batería está llena, aumenta la cantidad de hidrógeno en el depósito, el cual comienza vacío en la simulación. Esta cantidad crece hasta llegar a un punto donde ya no hay excedente. En este momento está atardeciendo y la poca luz provoca que la pila de combustible comience a consumir el hidrógeno generado hasta agotarse.

Simulación 2. Generación fotovoltaica para PF/CC óptima

Una vez comprobado que el sistema planteado no es válido para el prototipo físico testeado, se procedió a obtener el valor óptimo de la relación entre la potencia solar instalada y los consumos (PF/CC). Dado que en el caso anterior la generación fotovoltaica no fue suficiente, se probó a aumentar este parámetro hasta encontrar el mínimo valor que cumpliera el requisito de continua alimentación de las cargas. En este caso, el valor óptimo debe ser lo más bajo posible, ya que cuanto más elevado sea, más potencia fotovoltaica es necesario instalar con relación al consumo.

Tras varias simulaciones realizadas, el valor obtenido fue de 4,5. Esto quiere decir que el sistema planteado tiene sentido para configuraciones donde sea posible instalar una potencia solar 4,5 veces superior a la potencia consumida por las cargas de la embarcación. Este tipo de embarcaciones tienen aplicaciones limitadas, ya que casi todo el peso de la embarcación se emplea en las células solares. Además, solo pueden funcionar a velocidades muy reducidas y deben de ser lo más ligeras posible para poder disminuir al máximo las necesidades de potencia en la hélice. En cuanto a la escala, es totalmente escalable, siendo más fácil cumplir el parámetro de 4,5 para escalas más grandes, donde el peso de componentes que deben estar siempre independientemente del tamaño se diluye con el peso total de la embarcación a mover.

Es importante recalcar que los resultados positivos de la embarcación se han obtenido con el escenario más favorable de verano. Los parámetros utilizados en este caso han sido:

Potencia solar	Consumo cargas	Capacidad depósito H2	Volúmen tanque H2O	Energía batería	PF/CC
900 W	200 W	0,5 kg	2 L	426 Wh	4,5

Tabla 3. Parámetros de la simulación 2

Al haber más potencia sobrante solar, es necesario aumentar la cantidad de agua para tener más capacidad de producción de hidrógeno.

En la curva de generación solar se aprecia cómo la potencia máxima conseguida es de 700 W aproximados. Esto se debe a que, aunque la instalada sea de 900 W, hay pérdidas derivadas de que los paneles no tienen una inclinación óptima (30°). Se ha tenido en cuenta que la inclinación es de 0° ya que los paneles van paralelos a la superficie del agua [12].

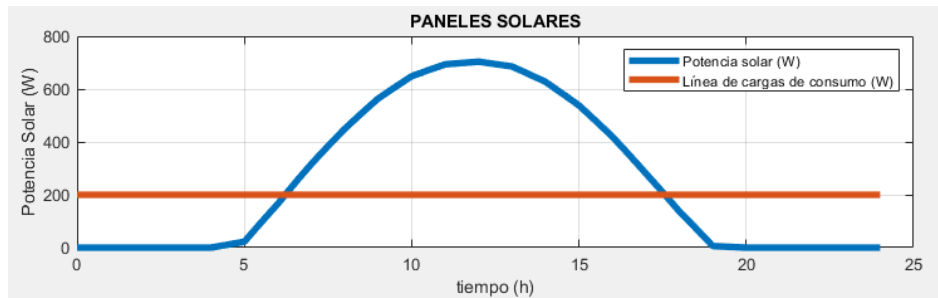


Figura 7. Curvas de generación solar y consumo de cargas.

En cuanto al perfil de potencia suministrada a las cargas se ha obtenido lo siguiente:

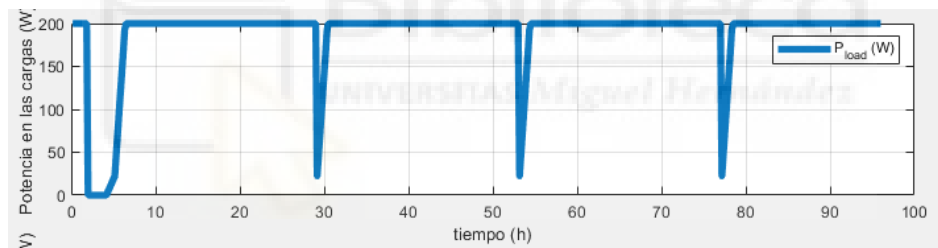


Figura 8. Valor de simulación de parámetro Potencia en las cargas (W). Simulación 2.

En este caso podemos ver como en los días simulados nunca llega a ser cero la potencia suministrada a las cargas. Al principio de la simulación se alcanza el valor cero, pero no se debe tener en cuenta ya que hace referencia a que la embarcación comienza a funcionar por la noche. Por tanto, esta configuración se consideraría válida para territorios o épocas del año donde la curva de radiación solar sea muy similar o superior a la del escenario de verano.

Se presenta a continuación la cantidad de hidrógeno producido.

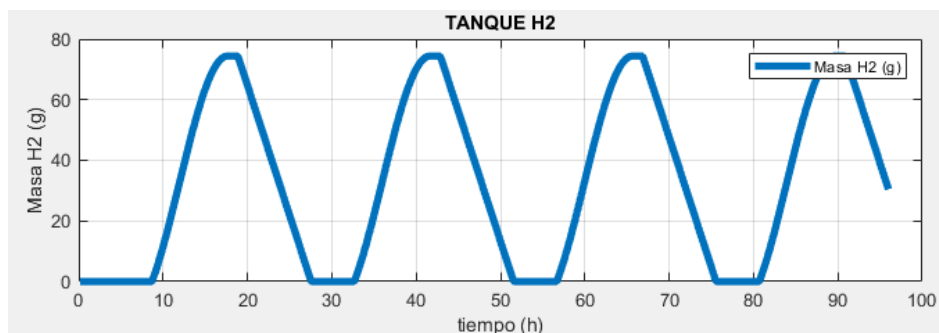


Figura 9. Cantidad de H2 en el depósito. Simulación 2.

Se observa como esta vez es muy superior a la anterior simulación, haciendo posible que la pila de combustible pueda dar alimentación a las cargas de la embarcación de manera continua. En los tramos en los que el hidrógeno es nulo y no se está generando ni consumiendo, es la batería de litio la que está alimentando la embarcación. Por esto, se observa cómo se produce una profunda descarga justo en esos tramos de la batería. Cuando vuelve a haber generación solar suficiente entonces se comienza cargando la batería hasta el 100% y posteriormente se sigue con la producción de hidrógeno.

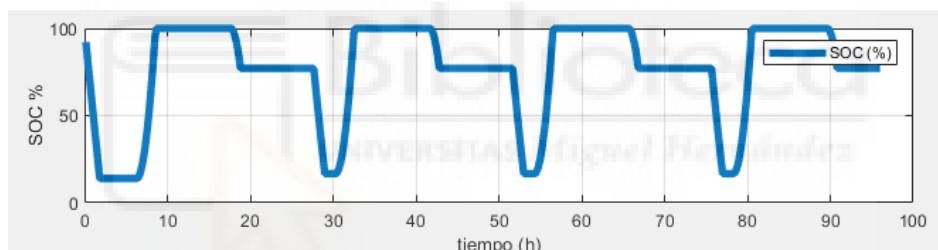


Figura 10. Estado de carga de la batería en %. Simulación 2.

Si no existiera la generación de hidrógeno a bordo, sería necesario aumentar en gran medida la batería para poder cubrir toda la demanda. El sistema de almacenamiento resultante sería más pesado que la variante híbrida con hidrógeno y por tanto se necesitaría más potencia en la hélice. Esto dificultaría el alcanzar el valor de 4,5 detallado anteriormente [13].

Una vez visto que esta configuración funciona para el perfil de radiación solar de verano, se ha simulado un número de días muy extenso para poder comprobar la autonomía total que tendría sin incluir ningún dispositivo de generación de agua pura. Esta autonomía dependerá de la cantidad de agua de partida, que es de 2 litros. Cuando la cantidad de agua llegue a cero a lo largo de un día y no haya suficiente como para generar más hidrógeno, entonces se considerará que la autonomía ha acabado.

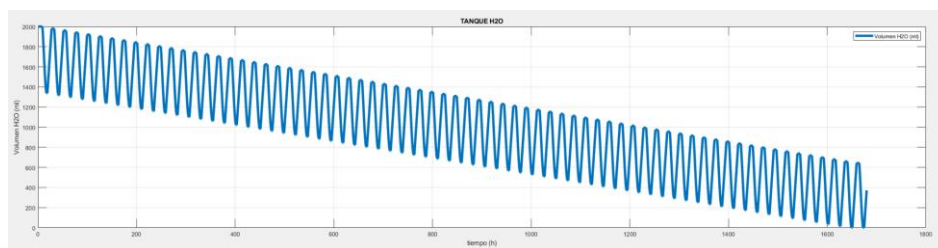


Figura 11. Cantidad de agua en el depósito para 70 días de simulación.

Tras hacer varias simulaciones es posible ver que la cantidad de agua llega a cero en el día 70, por lo que tiene sentido estimar que ésta sería la autonomía de la embarcación. La cantidad de agua disponible es menor cada vez, ya que se supone un escape del 5% del hidrógeno generador por cada ciclo, produciendo en consecuencia un 5% de agua utilizada en cada ciclo de simulación.

Simulación 3. PF/CC óptimo para escenario desfavorable: invierno

En el caso de la curva solar de invierno, se ha obtenido un valor de potencia instalada / consumo de cargas cercano a 10. Esto supone que una embarcación que lleve una potencia fotovoltaica instalada de 2000 W tiene que poder alimentarse con 200 W. Esto es inviable técnicamente hablando, por lo que para ubicaciones o misiones donde no hubiera generación solar suficiente habría que hacer uso de otras fuentes de energía renovables (eólica, undimotriz, etc.)

Conclusiones.

Tras todas las simulaciones realizadas se ha llegado a las siguientes conclusiones:

El sistema de generación de hidrógeno y consumo a bordo de una embarcación sólo tiene viabilidad técnica en dispositivos que necesitan muy poco consumo y presentan una gran superficie (suficiente para alcanzar el valor de 4,5 comentado).

Este sistema puede ser viable para territorios con curvas de radiación solar diarias cercanas a la radiación de verano en la provincia de Alicante.

Para embarcaciones que necesiten funcionar en otros territorios o bien no tengan superficie suficiente para paneles fotovoltaicos, es mucho más viable la generación de hidrógeno fuera de la embarcación. De esta manera, se eliminan consumos internos y se hace posible tener una instalación fotovoltaica muy superior. Sin embargo, este modelo tiene la problemática de que necesita unos depósitos mucho más pesados y grandes para poder alcanzar autonomías muy elevadas.

2.3. MEJORAS IMPLEMENTADAS EN LA SIMULACIÓN

2.3.1. MEJORAS IMPLEMENTADAS

A partir de las conclusiones a las que se llegaron tras realizar las distintas simulaciones, se plantearon una serie de cambios para mejorar el software de simulación implementado. A continuación, se detallan todos estos cambios:

Curva de consumo variable

En la anterior simulación el consumo de todo el sistema se estableció en un valor constante de 200 W. Sin embargo, esto no es del todo fiel a la realidad, pues debido a las condiciones ambientales y otros factores, el consumo es variable a lo largo del día. Por esta razón se introdujo como nuevo parámetro de entrada el perfil de consumo durante un día. De esta forma ahora era posible simular distintos escenarios de consumo para el sistema.

A continuación, se muestra el perfil de consumo simulado para una embarcación pequeña. Se puede observar como en las horas nocturnas, al no haber producción solar, entra en “stand by” y reduce el consumo, alargando así su autonomía.

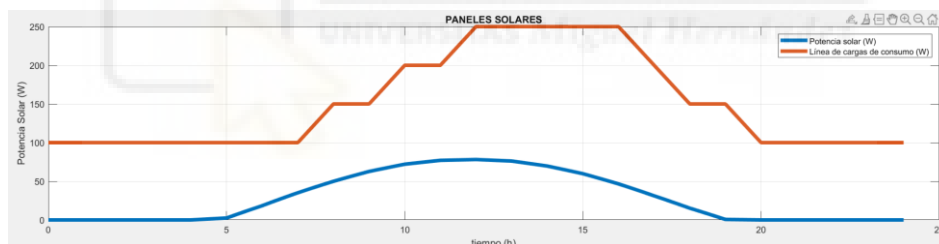


Figura 12. Curva de consumo variable.

Generación de hidrógeno fuera de la embarcación

Como ya se ha comentado, la producción de hidrógeno a bordo sólo es viable técnicamente en dispositivos que necesitan muy poco consumo y presentan una gran superficie. Además, la propia morfología de la embarcación, donde la parte delantera y trasera no se pueden utilizar pues se inundan de agua para asegurar la flotabilidad, existe poco espacio para introducir un electrolizador y un tanque de H₂O. Por ambas razones se optó por la generación de hidrógeno fuera de la embarcación.

Para reflejar este cambio en la simulación fueron necesarias algunas modificaciones en el software. En primer lugar, se eliminó el electrolizador y el tanque de H₂O pues ya no eran necesarios. Tras ello, se modificó el tanque de hidrógeno para que ya no tuviera en

cuenta ningún caudal de entrada, pues no había producción. Además, se creó un nuevo parámetro correspondiente a un tanque de oxígeno, necesario junto al hidrógeno para producir energía en la pila de combustible. La masa inicial de oxígeno se calcula automáticamente en el software en función de la masa inicial de hidrógeno que se ha introducido en la embarcación (parámetro configurable). Para ello, se tiene en cuenta la relación estequiométrica de la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno en la pila de combustible (4 g de O₂ por cada g de H₂). Además, se incluyó un “backup” de alrededor del 10-15 % de la masa inicial de oxígeno para casos de emergencia en las cuales se hayan podido producir fugas [14].

A continuación, se muestra la cantidad de H₂ y O₂ en los tanques a lo largo de dos días de simulación. Como se puede observar, al no haber producción de hidrógeno, este únicamente se va consumiendo poco a poco hasta acabarse. Por otra parte, el oxígeno sigue la misma evolución, con la diferencia de que, al terminarse el hidrógeno, sigue quedando oxígeno, correspondiente al “backup” de emergencia.

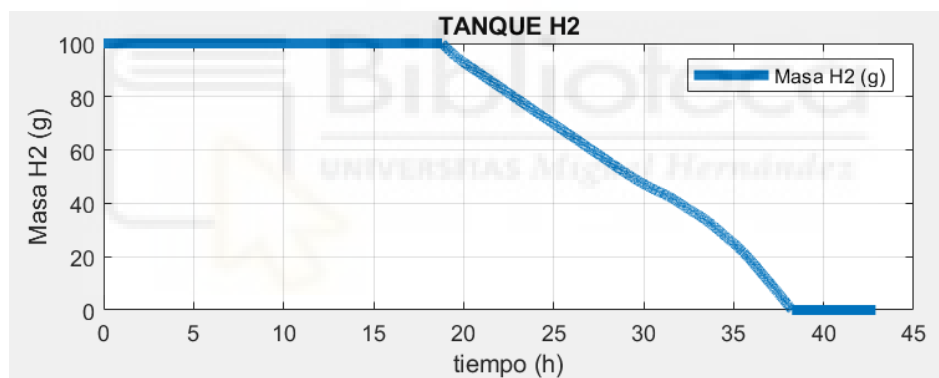


Figura 13. Cantidad de H₂ en el depósito.

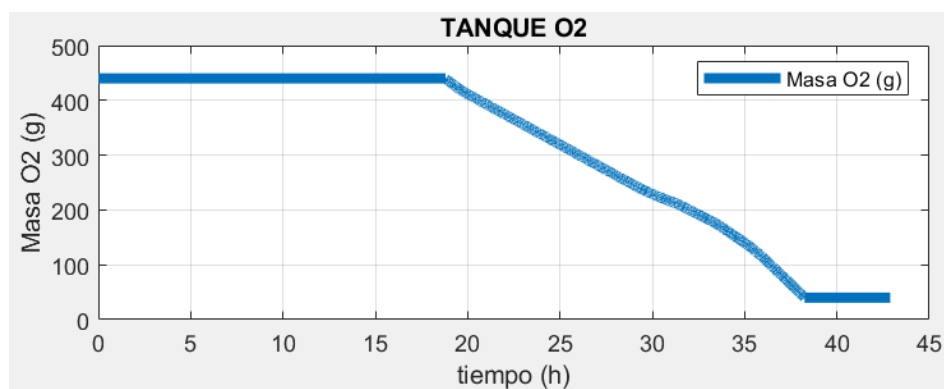


Figura 14. Cantidad de O₂ en el depósito.

Nuevo modo de funcionamiento

Otros de los cambios realizados fue la implementación de un nuevo modo de funcionamiento de la simulación. En la anterior versión del software se simulaba hasta que se alcanzaba el número de días indicados en la configuración, aunque en muchas ocasiones el hidrógeno y la batería se acababan antes. En ese momento, la potencia a las cargas es cero hasta que vuelve a haber exceso de producción y las baterías se recargan. En el nuevo modo de funcionamiento esto ya no es así. La simulación se detiene cuando el hidrógeno y la batería se han acabado, indicando por terminal la autonomía, en días y horas, que se ha alcanzado con esa configuración. Desde la configuración del programa se puede variar entre estos dos modos de funcionamiento.

A continuación, se muestran los resultados de una simulación (% batería y masa H₂) con el nuevo modo de funcionamiento. Como se observa, a pesar de que en la configuración se había indicado 2 días de simulación, esta termina cuando el hidrógeno se acaba y la batería cae por debajo del 20%.

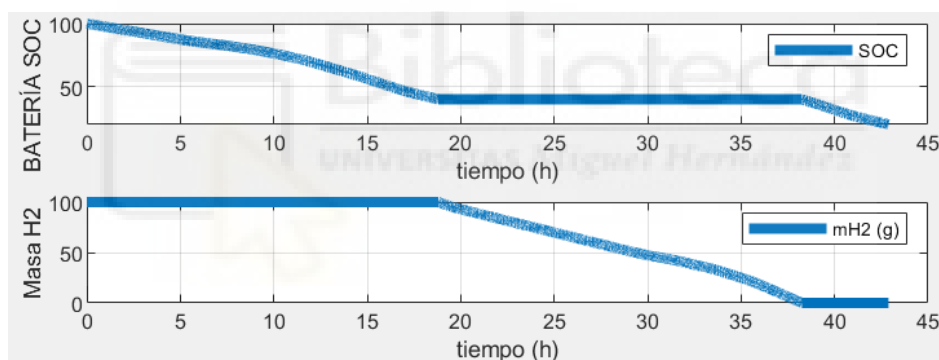


Figura 15. Evolución de la batería y de la cantidad de H₂ en el nuevo modo.

Cambios menores

Además de todas las mejoras que se han comentado, se realizaron una serie de pequeños cambios en la simulación. El primero de ellos es que se añadió un nuevo parámetro en la configuración que permite variar la hora de inicio de la simulación. En la anterior versión, únicamente era posible empezar desde las 00:00, mientras que ahora es posible seleccionar a qué hora se desea empezar. El segundo cambio tiene relación con el momento en el que se deja de utilizar la batería y se emplea la pila de combustible. En la anterior versión, esto ocurría cuando la batería bajaba hasta el 80%. Con este cambio, este porcentaje de batería se convierte en un parámetro variable desde la configuración, por lo que se puede elegir en qué momentos desea que se empiece a consumir hidrógeno.

Gracias a estos cambios es posible variar los parámetros comentados, buscando así encontrar los valores óptimos que maximicen la autonomía

2.3.2. RESULTADOS DE SIMULACIÓN CON EL SISTEMA MEJORADO

Tras realizar todos los cambios comentados en el software, se realizaron nuevas simulaciones con el nuevo sistema implementado sin producción de hidrógeno.

Simulación 1. Embarcación pequeña.

En primer lugar, se llevó a cabo la simulación con la embarcación pequeña, un prototipo de menor tamaño de la embarcación grande. En este dispositivo el espacio es mucho más limitado, por lo que no es viable incluir un tanque de hidrógeno. Por esta razón el sistema de propulsión está únicamente formado por las baterías, las cuales tienen una capacidad de almacenamiento de energía de 4000 Wh. Por otro lado, al ser una embarcación más pequeña, la superficie para paneles fotovoltaicos es menor, por lo que la potencia solar instalada es de solo 100 W. El consumo de cargas sigue el perfil variable indicado en la figura 12.

Teniendo en cuenta los siguientes parámetros de configuración, se utilizó el nuevo modo de funcionamiento para medir la autonomía de la embarcación:

Potencia solar	Consumo cargas	Masa H ₂	Hora de inicio	Energía batería	Escenario generación solar
100 W	Variable	0,0 kg	10:00 h	4000 Wh	Verano

Tabla 4. Parámetros de la simulación 1 embarcación pequeña

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

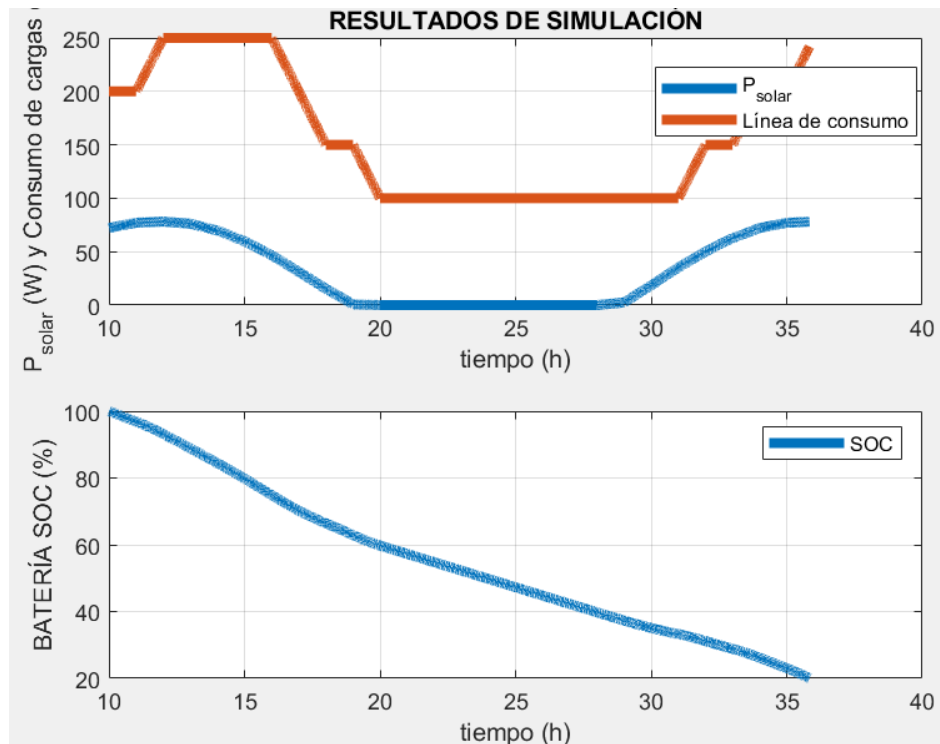


Figura 16. Generación solar, consumo de cargas y estado de la batería. Simulación 1.

Como se puede observar, la potencia solar nunca supera las cargas de consumo, por lo que nunca hay exceso de producción. Debido a esto y a que no hay tanque de hidrógeno, las baterías nunca se cargan y se van descargando de forma constante hasta alcanzar el 20%, momento en el que se detiene la simulación. A pesar de ello, se consigue una autonomía de 1 día y 1,84 horas con una distancia recorrida estimada de 72.65 km.

2.4. CONCLUSIÓN DE VIABILIDAD DEL USO DE HIDRÓGENO

El USV necesita cumplir unos requisitos debido a su tamaño, el vehículo no debe generar ningún inconveniente si debido a un fuerte oleaje se da la vuelta, ya que no tiene las dimensiones necesarias para resistir tal situación. En consecuencia, debe de ser totalmente estanco, por lo que no podremos tener ningún orificio para coger el oxígeno. Esta limitación conlleva la necesidad de añadir un tanque de oxígeno al sistema. Sin embargo, debido a restricciones de espacio y peso, no resulte viable el modelo para un USV de 1,6 metros.

El resultado obtenido indica que el sistema más adecuado sería el eléctrico, basado únicamente en baterías. Para implementarlo de manera efectiva, requerimos una fuente de carga, y se ha decidido desarrollar un diseño de carga automático que se presentará en el siguiente apartado.

2.5. ESTACIÓN DE CARGA AUTÓNOMA PARA EMBARCACIONES ELÉCTRICAS

La invención se trata de una estación de carga autónoma para embarcaciones eléctricas, adaptable a diferentes tamaños y ubicaciones, ya sea en puertos, tierra o aguas interiores. Su objetivo es ofrecer una solución de carga versátil para embarcaciones propulsadas por motores eléctricos, facilitando su operación autónoma o control remoto. Este avance responde a la creciente demanda de alternativas más ecológicas y sostenibles en el ámbito marítimo.

2.5.1. EXPLICACIÓN DE LA INVENCION

La estación de carga autónoma para embarcaciones propuesta aborda la necesidad de infraestructuras de recarga eléctrica adaptables y versátiles para barcos eléctricos de diferentes tamaños y ubicaciones. Su diseño se basa en una estructura con un pescante giratorio que permite maniobras de montaje y mantenimiento, junto con una cesta sumergible para recibir las embarcaciones. Esta cesta, equipada con medios de elevación mediante cabestrantes, permite elevar la embarcación hasta el conector de carga en la parte superior de la estación. Además, la estación puede incorporar paneles solares fotovoltaicos y baterías de acumulación para proporcionar energía adicional, así como un sistema de auto-limpieza para las embarcaciones.

Adicionalmente, la estación puede incluir una conexión de toma de agua dulce para alimentar un sistema de auto-limpieza con agua a presión, y posiblemente un sistema de impulsión de aire a presión para su secado. También se ha previsto la instalación de un sistema de visión artificial que ayuda en la maniobra de aproximación de las embarcaciones, utilizando etiquetas o marcadores de referencia distribuidos sobre la cesta para guiarlas hacia su posición de carga.

En resumen, esta estación ofrece una solución completa y efectiva para la carga de embarcaciones eléctricas, con una combinación de características que incluyen adaptabilidad, eficiencia energética y facilidad de uso, lo que la convierte en una opción atractiva para la industria marítima en busca de alternativas sostenibles y ecológicas.

2.5.2. DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS DE LA PATENTE

Para complementar la descripción que seguidamente se va a realizar y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características del invento, de acuerdo con un

ejemplo preferente de realización práctica del mismo, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, un juego de planos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

La figura 1.- Muestra una vista en perspectiva lateral superior de una estación de carga autónoma para embarcaciones eléctricas realizada de acuerdo con el objeto de la presente invención.

La figura 2.- Muestra una vista en una perspectiva lateral del conjunto de la figura 1.

La figura 3.- Muestra un detalle en perspectiva de la cesta para embarcaciones que participa en la estación de la invención.

La figura 4.- Muestra una vista en perfil de la estación, con su carcasa transparente, para mostrar la estructura interna de la misma.

La figura 5.- Muestra una vista en perspectiva similar a la de la figura 1, pero en la que la carcasa de la estación aparece representada en transparencia, para permitir mostrar la estructura interna de la misma.

La figura 6.- Muestra una vista similar a la de la figura 4, pero en la que pescante de la estructura aparece girado 180°.

La figura 7.- Muestra un detalle en perspectiva de los conectores de carga previstos en la estación de la invención.

La figura 8.- Muestra una vista en perfil y en sección de uno de los conectores de la figura anterior.

La figura 9.- Muestra, finalmente, un detalle en perspectiva del sistema de auto-limpieza que participa en la estación de carga de la invención.

2.5.3. REALIZACIÓN DE LA INVENCION

A la vista de las figuras reseñadas, puede observarse como la estación de carga de la invención se constituye a partir de una estructura de soporte en la que se define una plataforma en voladizo a modo de pescante (6), provisto de unos conectores de carga (8) complementarios a las placas de carga que presentan las embarcaciones eléctricas, y unos cables de acero (4) vinculados a una cesta (1) receptora de las embarcaciones eléctricas, cesta (1) destinada a quedar sumergida bajo el nivel del agua para recibir en su seno a la

correspondiente embarcación eléctrica, la cual una vez estabilizada sobre la cesta (1) es elevada hasta la zona superior de la estación mediante los cables de acero (4).

En tal sentido, se ha previsto que las embarcaciones eléctricas incluyan placas de carga en ambos cascos, destinadas a entrar en contacto con los correspondientes conectores de carga (8) cuando se está realizando la maniobra de elevación de la cesta (1) con la embarcación eléctrica, tal y como se describirá con mayor detalle más adelante.

Para facilitar la maniobra de elevación, la cesta (1) incluye unas barras de guiado (3), que se introducen y autocentran en el seno de unos conos (7) previstos en el pescante (6) durante la maniobra de elevación de la cesta (1), y donde los conectores de carga (8) del pescante incluyen unos soportes (19) vinculados a unas varillas roscadas (18) con resorte (17) cuya terminación incluye unos pines de contacto (14) que quedan enfrentados y conectados a las placas de carga de las embarcaciones eléctricas tras finalizar la maniobra de elevación de la cesta (1), tal y como se muestra en las figuras 1 y 2. Como se observa en la realización ilustrada en las figuras que acompañan la presente memoria, el soporte (19) consiste en un conjunto de perfiles metálicos atornillados a la estructura interna del pescante (6).

Tal y como se ha dicho con anterioridad, los conectores de carga (8) incluirán pines de contacto (14), estos pines de contacto (14) a su vez internamente tiene muelles que permiten un margen de 5 mm en el cambio de forma de la superficie, permitiendo contacto eléctrico, aunque las placas no sean completamente planas, como los que se muestran en las figuras 7 y 8, garantizando así una perfecta conexión eléctrica.

De forma más concreta, la conexión eléctrica se realiza por la presencia en los conectores de carga (8) de dos elementos paralelos e independientes, uno de polaridad positiva y otro de polaridad negativa, estableciéndose en contrapartida en cada embarcación eléctrica una placa metálica de tamaño adecuado, que recibe la electricidad y la transmite a la batería a bordo.

De esta forma, tal y como se observa en detalle en la figura 3, la cesta (1) contará con un marco de metal (2), resistente a la corrosión, que sirve para fijar la cesta (1). De acuerdo con otra de las características de la invención, la cesta (1) presenta una geometría cónica, en orden a definir una superficie convexa que permita el posicionamiento de la embarcación eléctrica sobre la cesta (1), y esta provista de orificios (12) para la entrada y salida del agua salada en su superficie.

Paralelamente, se ha previsto que la cesta (1) presente en el marco de metal (2), al menos, una etiqueta de identificación, preferentemente etiquetas tipo apriltags, para el guiado de las embarcaciones eléctricas, mediante un sistema de visión artificial para facilitar la alineación entre la cesta (1) y la embarcación eléctrica, cuando la embarcación comienza la maniobra de entrada a la estación de carga.

Como se ha indicado anteriormente, la estación de carga (1) presenta un cono (7), para el correcto guiado de la embarcación eléctrica cuando se está realizando la maniobra de elevación de la cesta (1), en correspondencia con unas barras de guiado (3) presentes en la cesta (1), de esta forma se asegura que en todo momento el conector de carga (8) este alineado con las placas de carga (8) de la embarcación eléctrica.

Concretamente, este mecanismo permite que exista una tolerancia entre la posición inicial de la cesta (1) y su posición final, ya que la apertura de los conos (7) permite que las barras de guiado (3) se introduzcan y vayan dirigiéndose conforme se está realizando la maniobra de elevación de la cesta (1) hasta quedar encajados en el cono (7). Así se asegura que la posición final esta alineada con los conectores de carga (8), y en consecuencia que las placas de carga de la embarcación hacen contacto con los pines (14) de los dos conectores de carga (8), tal y como puede observarse en la figura 4.

A partir de esta estructuración, las embarcaciones eléctricas que presentan un nivel bajo de energía en las baterías reciben la orden de ir a la estación de carga autónoma. Es entonces cuando el dispositivo receptor de señales emitidas por los sistemas de posicionamiento global (GPS), que incluye la estación de carga autónoma, capta la señal de aproximación emitida por la embarcación eléctrica, y da la orden a los cabestrantes eléctricos (10) instalados en el pescante (6) para que se pongan en marcha y suelten el cable de acero (4) vinculado a la cesta (1).

Una vez la cesta (1), que inicialmente se encontraba subida y dentro de la carcasa (5) de la estación, ha bajado lo suficiente, los cabrestantes (10) detienen el descenso de la cesta (1). La cesta (1) tiene que quedar sumergida por debajo del nivel del agua, a una distancia de la superficie que dependerá del calado de la embarcación que se quiera recargar.

Es entonces cuando la embarcación eléctrica, de forma autónoma, se alinea y se dirige hacia la cesta (1) hasta posicionarse justo encima de esta, que aún sigue sumergida.

Una vez se ha posicionado la embarcación eléctrica encima de la cesta (1), ésta se eleva recogiendo la embarcación eléctrica mediante los cables de acero (4). Así, la geometría

cónica de la cesta (1) está diseñada para que la embarcación, por su propio peso se quede encajada siempre en la misma posición exacta, independientemente de que inicialmente la embarcación se haya dispuesto de forma desalineada con respecto a la cesta (1).

Los cabestrantes (10) realizan el ascenso de la cesta (1) hasta que un sensor de posición detecta la cesta (1) y ordena la parada de los cabestrantes (10), deteniendo el movimiento ascendente de la cesta (1). Cabe señalar que se ha previsto que cuando se dispone la embarcación sobre la cesta (1) y se inicia su desplazamiento, la cesta (1) presente una posición ligeramente inclinada hacia la parte delantera con respecto al plano horizontal, de esta forma se asegura la estabilidad de la embarcación.

Este ángulo de inclinación se consigue jugando con la longitud de los dos cables de acero (4) unidos a la cesta (1), de esta forma se consigue que, el peso propio del barco se encuentre desplazado de su centro y por lo tanto que sea muy difícil que pueda salirse de la cesta (1). Así, se evita que, ante posibles oscilaciones debidas al viento, el barco se desplace y salga de la cesta (1), y que el barco este orientado en la posición correcta para su posterior acoplamiento al conector de carga (8).

El sensor de posición encargado de la detección de la cesta (1), se materializará preferentemente en un sensor de final de carrera y estará localizado a una distancia tal que detiene el desplazamiento de la cesta (1), en el momento en el que el conector de carga (8) haga contacto con las placas de la embarcación eléctrica, es decir, cuando el resorte (17) de las varillas roscadas (18) del conector de carga (8) presente un incremento de longitud negativo entre un 5% y un 10%,

De esta forma, una vez finalizada la subida de la cesta (1) junto con la embarcación eléctrica, las placas de carga instaladas en ambos cascos de la embarcación eléctrica entrarán en contacto con los conectores de carga (8).

De esta forma, tal y como se observa en detalle en las figuras 7 y 8. Para asegurar una correcta conexión entre los pines de contacto (14) y las placas de carga de la embarcación eléctrica, la varilla roscada (18) está vinculada a un soporte (19) para su desplazamiento ascendente y descendente consiguiendo de esta forma que, durante la carga de la embarcación eléctrica, siempre se ejerza la presión necesaria para el correcto funcionamiento.

Para ello, en posición de carga, es decir, cuando las placas de la embarcación se encuentran en contacto con los conectores de carga (8), los resortes (17) se comprimen

hasta su valor máximo de trabajo, generando una fuerza de presión constante entre los pines (14) del conector de carga (8) y las placas de carga de la embarcación eléctrica, y asegurando el contacto entre el conector de carga (8) y las placas de la embarcación.

Así, en relación con la terminación de las varillas roscadas (18) donde se localizan los pines (14), dicha terminación consiste en dos piezas de impresión en plástico rígido. Donde, la pieza superior (21) tiene dos agujeros pasantes a ambos lados para sujetarse a las varillas roscadas metálicas (18) con un mecanismo de tuerca y contratuerca, y la pieza inferior (20) tiene una geometría que se adapta a los pines de contacto (14).

Por otro lado, en el hueco interior (16) que se genera entre la pieza superior (21) y pieza inferior (20), donde se encuentran la parte soldada de los pines (14) y la salida del polo o cable de carga (15), se aplica una resina sellante y aislante para proteger la unión eléctrica. Finalmente, el cable de carga (15) sale del conector por la pieza superior (21) y se dirige hasta la toma de carga.

De esta forma, cada una de las placas de la embarcación eléctrica corresponde a un polo y se instalan en la superficie del barco a cada lado del casco de la embarcación, en la parte delantera de la embarcación eléctrica. Así, se elimina el problema de riesgo de cortocircuito por restos de agua entre los dos polos, ya que están físicamente separados y por la geometría de la embarcación se hace imposible que la misma masa de agua esté en contacto con las dos placas a la vez mientras el barco está en la estación.

De este modo, se consigue que la carga de la embarcación se realiza automáticamente al detectar contacto eléctrico entre los pines (14) de los conectores de carga (8) dispuestos en la estación de carga y las placas de la embarcación.

Con el objetivo de evitar cortocircuitos entre las dos placas externas de carga de la embarcación en contacto con el agua, estas se encuentran desconectadas. Así, una vez se detecta el contacto eléctrico para la carga, un interruptor cierra el circuito eléctrico entre las placas y la batería de la embarcación para proceder a cargarse.

Ventajosamente, la configuración de la estación de carga permite que, la estación pueda funcionar como un hangar para la embarcación/vehículo de superficie no tripulado, protegiéndola del acceso no autorizado y de las condiciones meteorológicas.

De esta forma, tal y como se observa en las figuras que acompañan a la presente memoria, el pescante (6) presenta una carcasa (5) que abarca toda la extensión de la estación de carga para la protección de la embarcación, resistente a la intemperie.

Adicionalmente, de manera opcional la carcasa (5) de la estación de carga también está equipada con:

Un sistema de autolimpieza y/o auto-mantenimiento de alta presión para eliminar el agua salada antes de conectarse a la fuente de energía y limpiar y secar la embarcación. Concretamente, se ha previsto que la carcasa (5) incluya un sistema de auto-limpieza asistido por una red de tuberías (9) dotadas de boquillas (13) de impulsión de agua a presión conectada a una toma de agua dulce, y medios de impulsión de aire de secado.

Baterías acumuladoras de energía asociadas paneles solares (11) que se disponen sobre la superficie de la carcasa (5) de la estación de carga para el suministro en caso de cortes de electricidad.

Tal como queda representado en la figura 6, opcionalmente el pescante (6) incluye medios de rotación para su giro sobre el plano horizontal. Concretamente, los medios de rotación presentes en el pescante (6) permiten girar la estación 180° hacia el lado de tierra para facilitar el montaje y mantenimiento de la estación.

Finalmente, indicar que la estación de carga también alberga baterías para asegurar la supervisión y control de la misma en caso de un corte de energía eléctrica, así como diversos sensores y equipamiento electrónico adicional para apoyo a la operativa de recolección de datos y monitorización automática

En general, para el correcto funcionamiento de la estación y todos sus equipos, se requiere una conexión a la red eléctrica y a una línea de agua dulce. Opcionalmente, se puede instalar un sistema de desalinización y filtración para utilizar directamente el agua de mar para la limpieza.

Tal y como se ha dicho con anterioridad, la estación incorporará medios para detectar las embarcaciones a recargar situadas en el entorno, contando para ello con un sistema informático dotado de una o más antenas, y medios de localización GPS de dichas embarcaciones. Estas dispondrán de conexión WiFi y 4G LTE para su manejo y control. También tendrá un sistema de emergencia en el que se conectará al router disponible en la estación por WiFi y por el cual se enviará la señal a los cabestrantes (10) para posicionar la cesta (1).

Por otra parte, en una realización no representada en las figuras que acompañan a la presente memoria se ha previsto que, la parte superior de la estación presente una cámara para la lectura de etiquetas de identificación dispuestas en la embarcación para su guiado.

Así, justo en el momento en el que las etiquetas identificadoras presentes en la embarcación entren en la región determinada como posición de ascenso, el sistema dará la orden de subir los cabestrantes (10).

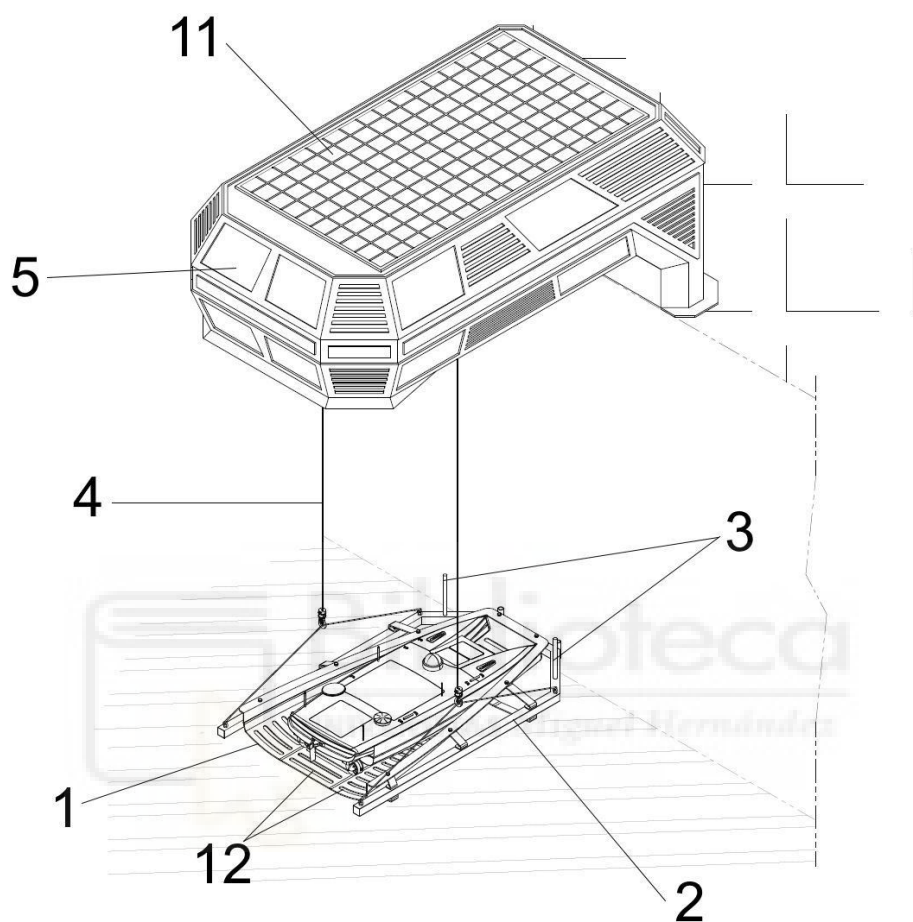


FIG.1

Figura 17. Dibujo asociado a la patente 1.

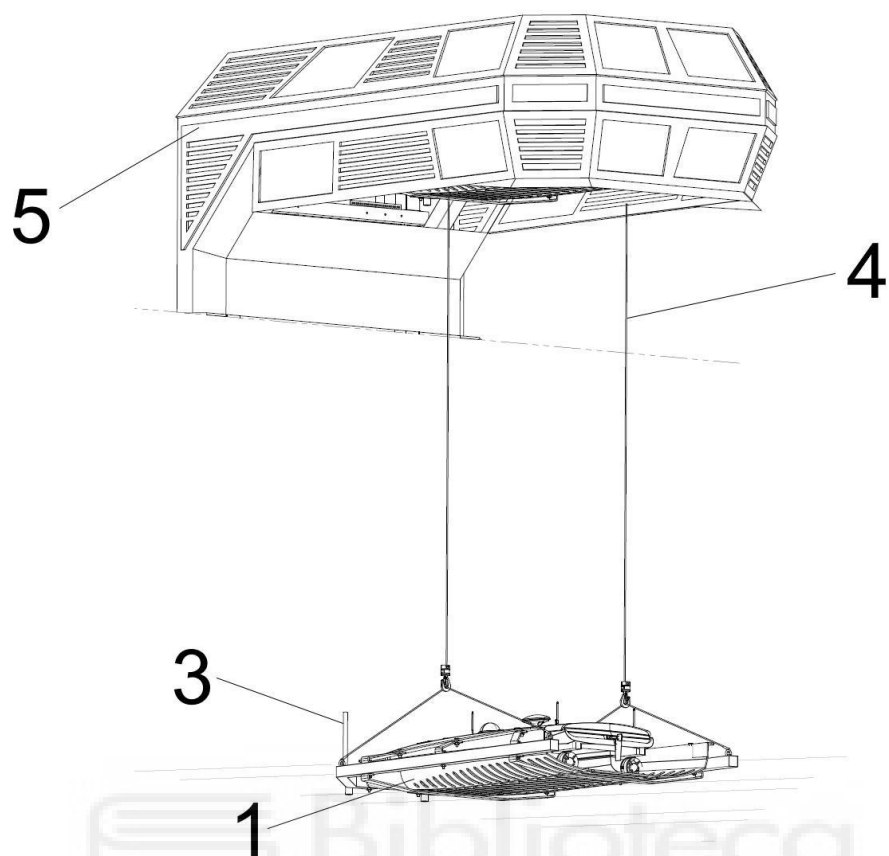


FIG.2

Figura 18. Dibujo asociado a la patente 2.

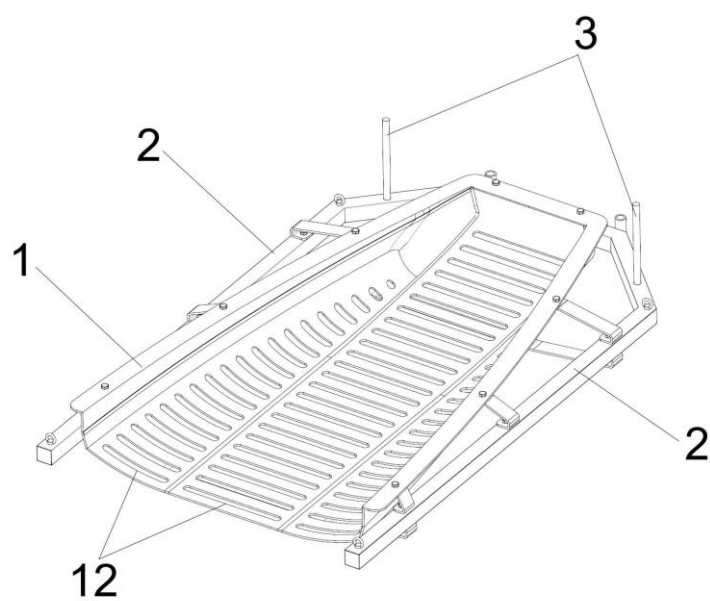


FIG.3

Figura 19. Dibujo asociado a la patente 3.

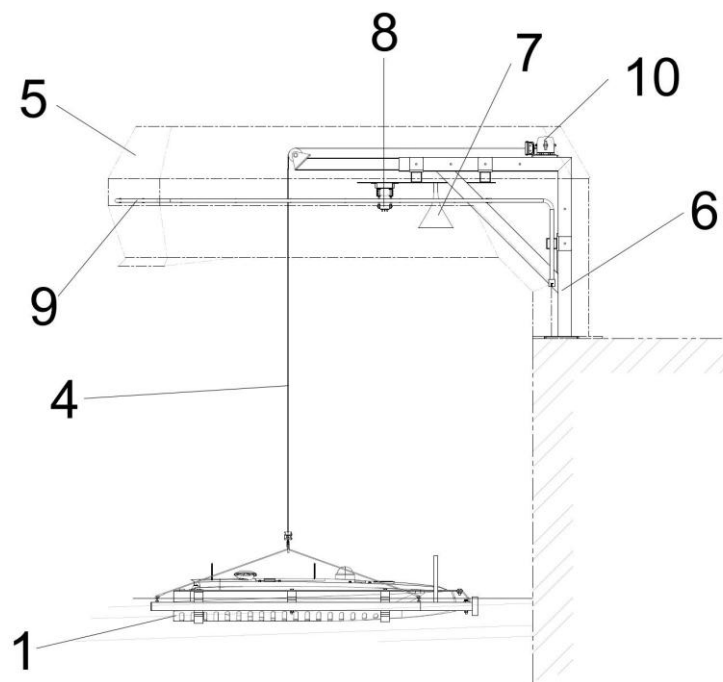


FIG.4

Figura 20. Dibujo asociado a la patente 4.

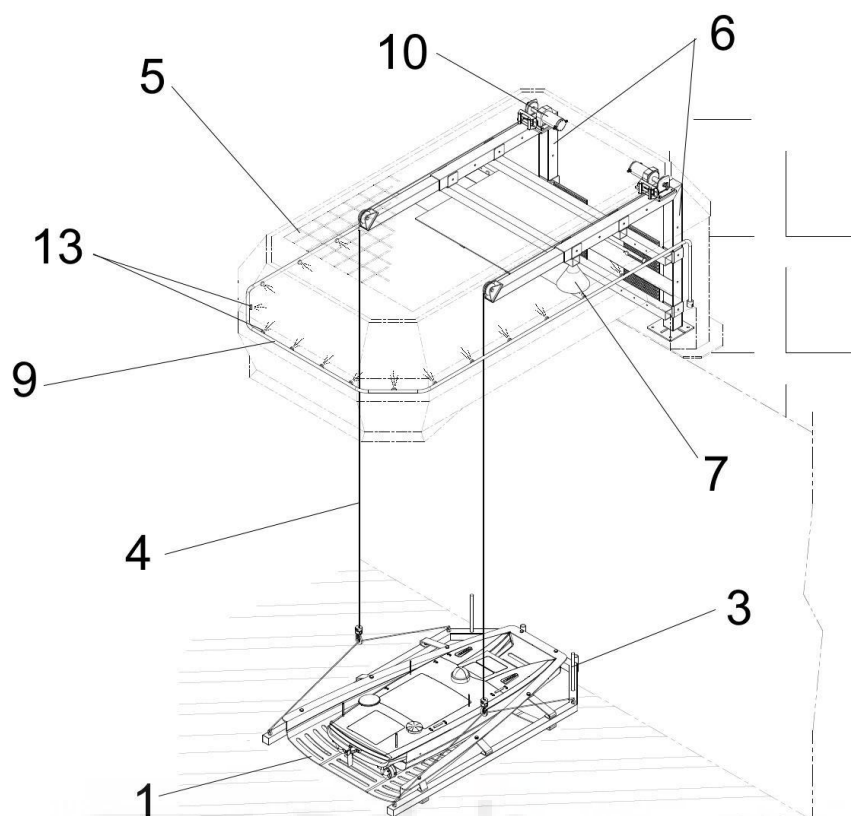


FIG.5

Figura 21. Dibujo asociado a la patente 5.

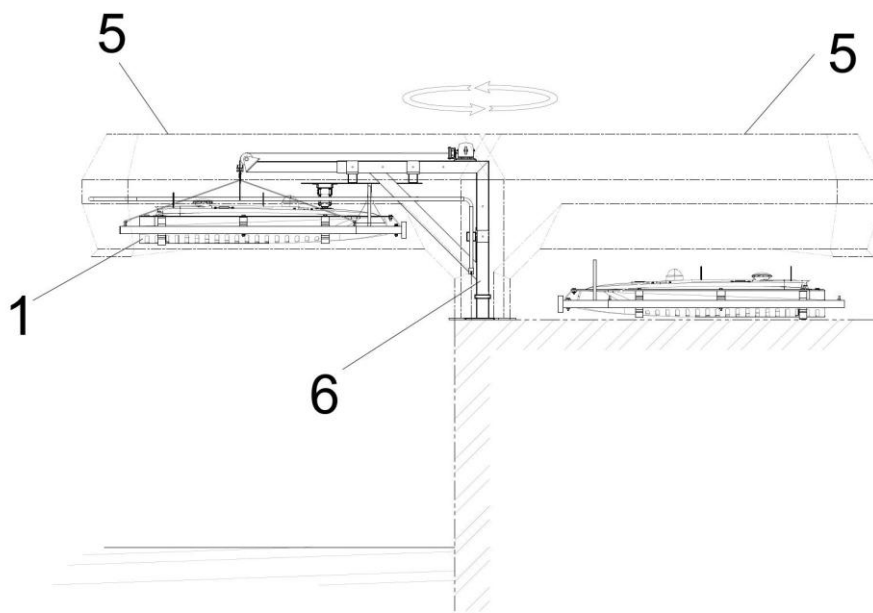


FIG.6

Figura 22. Dibujo asociado a la patente 6.

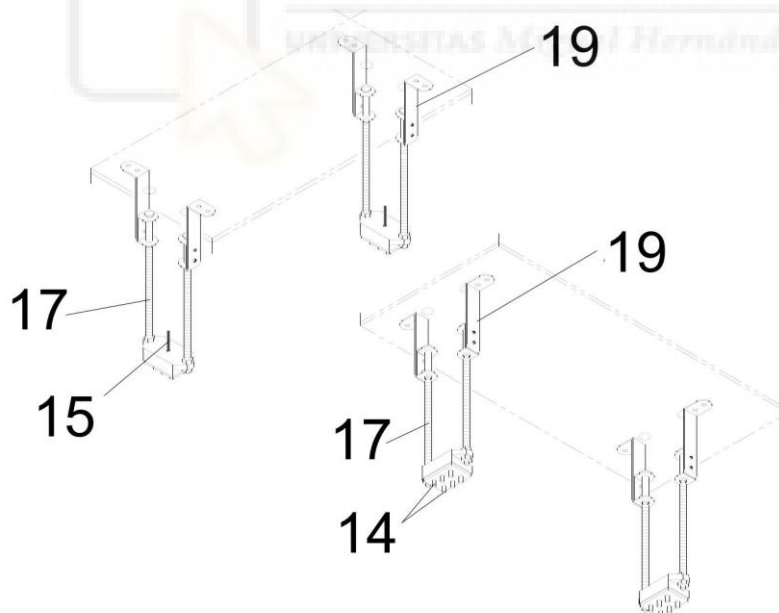


FIG.7

Figura 23. Dibujo asociado a la patente 7.

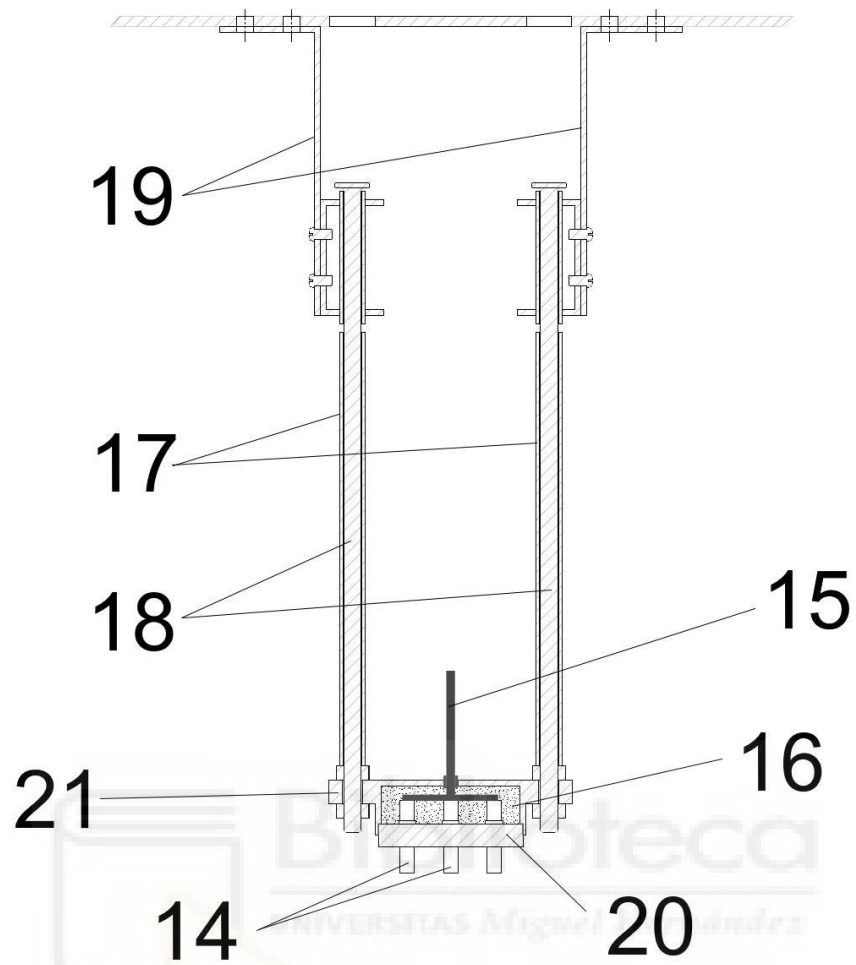


FIG.8

Figura 24. Dibujo asociado a la patente 8.

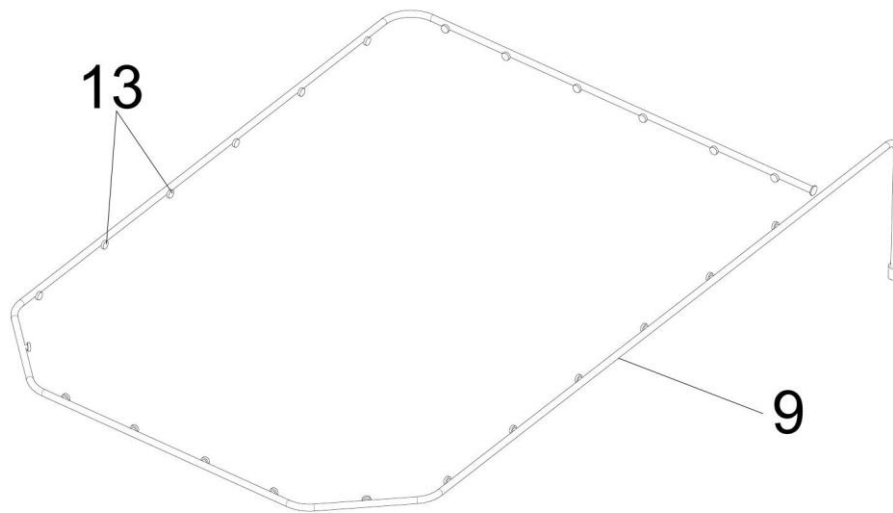


FIG.9

Figura 25. Dibujo asociado a la patente 9.

2.5.4. PRUEBA PILOTO DE LA INVENCION

Gracias a la colaboración del instituto de materiales compuestos y fabricación aditiva de la Universidad de Cádiz hemos podido realizar la prueba piloto en el Puerto de Algeciras.

Se realizó un simulacro de su comportamiento para un vehículo pequeño.



Figura 26. Imagen 1 de la prueba.

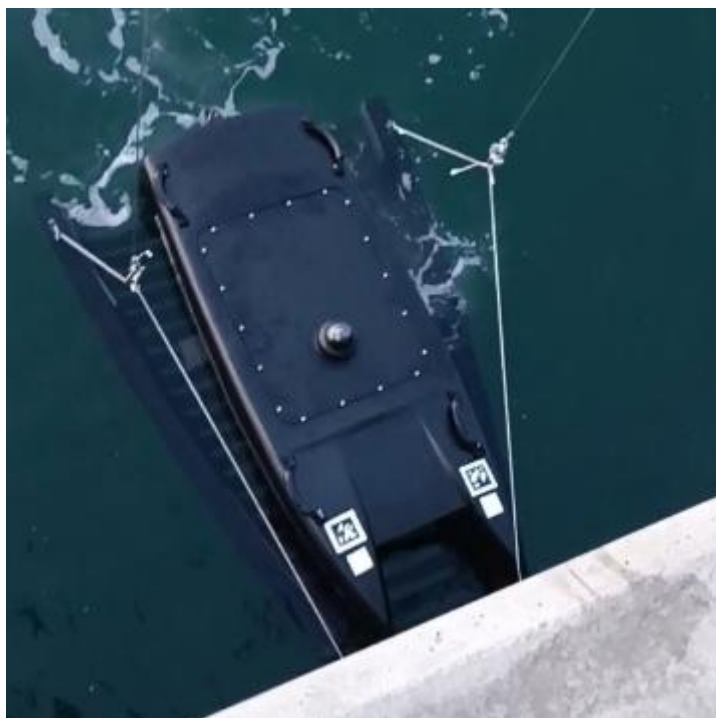


Figura 27. Imagen 2 de la prueba.

Este MVP (mínimo producto viable) nos permitió comprobar la funcionalidad de la patente, por lo tanto, podremos cargar el vehículo pequeño de forma autónoma sin tener la necesidad de estar presente para realizar la carga.

3. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS PARA EL USV DE 5 M

3.1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN Y SIMULACIÓN

3.1.1. SOFTWARE DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA

El software que vamos a utilizar es el modificado anteriormente para el estudio del vehículo de 1,6m. Es decir, podremos introducir las curvas de consumo e irradiancia solar para poder simular diferentes escenarios.

Los siguientes parámetros se mantienen constantes en todas las simulaciones:

Rendimiento solar	Rendimiento electrolizador	Rendimiento pila de combustible	Pérdida de H ₂ O por ciclo
93%	75%	70%	5%

Tabla 1. Parámetros de la simulación.

Debido a la diferencia de tamaño la superficie solar variará en las simulaciones siguientes de la siguiente forma:

Superficie a 0 grados	Superficie a 90 grados	Potencia solar a 0 grados	Potencia solar a 90 grados	Potencia solar total
7 m ²	2.5 m ²	1610 W	575W	2185 W

Tabla 5. Parámetros de superficie USV 5 metros.

3.1.2. DIFERENTES SISTEMAS A MODELAR

El objetivo de esta memoria es demostrar por qué el sistema híbrido de pila de combustible nos va a permitir una mayor autonomía que un sistema eléctrico compuesto solo de baterías. Es decir, el sistema que nos permite almacenar la mayor cantidad de energía a bordo por unidad de peso.

Para llevar a cabo esta tarea, vamos a simular el comportamiento de tres sistemas distintos de almacenamiento y generación de energía:

Utilizando baterías de litio como única fuente de energía.

Implementando un sistema híbrido que combina una pila de combustible de hidrógeno y baterías LIPO.

Dentro del sistema híbrido, distinguiremos dos configuraciones:

- a) Generación de hidrógeno a bordo.
- b) Sin producción de hidrógeno a bordo.

Los distintos sistemas serán evaluados en diversas situaciones, considerando ubicaciones en diferentes países con variaciones en latitudes (alta, media, baja) y fechas, con el fin de obtener una comprensión detallada de cómo cada sistema responde ante diferentes niveles de radiación solar.

3.1.3. RESULTADOS DE LAS DIFERENTES SIMULACIONES

En cada prueba, realizaremos comparaciones entre los tres sistemas mencionados anteriormente. Esto implica simular y analizar el comportamiento de cada sistema en las diversas condiciones establecidas, con el objetivo de llegar a conclusiones específicas para cada prueba. Al finalizar todas las pruebas, podremos relacionar y argumentar de manera más sólida una conclusión final, respaldada por un análisis detallado y comparativo de cada sistema en diferentes escenarios.

3.2. RESULTADOS OBTENIDOS Y LECCIONES APRENDIDAS

3.2.1. SIMULACIÓN 1

Vamos a utilizar una curva de consumo donde la potencia demandada va a ser constante, concretamente de 900 W para alcanzar la velocidad de 4 nudos y 200 W para la navegación autónoma.



Figura 28. Curva de consumo para la Simulación 1.

Las irradiancias que vamos a utilizar van a ser el promedio de las irradiancias durante el año en Canarias.

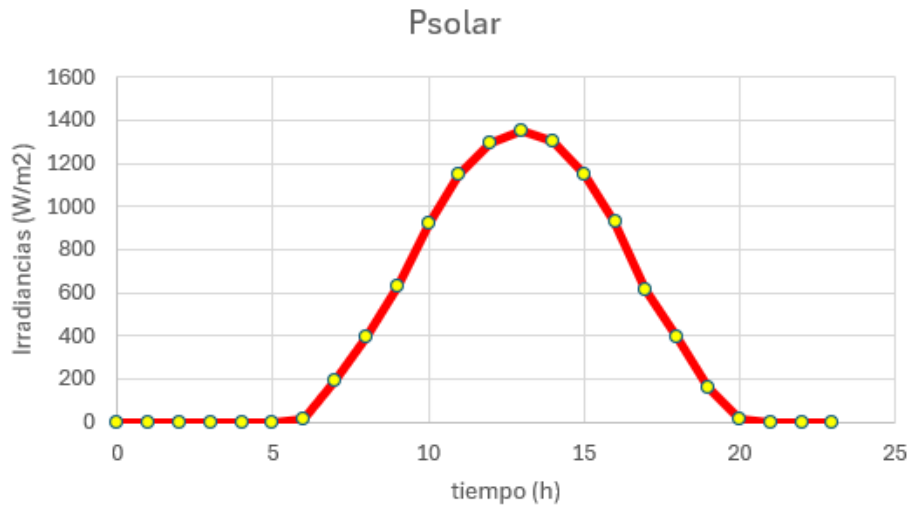


Figura 29. Curva de irradiancias por m2 para la Simulación 1.

Sistema eléctrico de baterías.

Para dimensionar la batería, contamos con una capacidad máxima de peso a ocupar de 850 kg y una capacidad máxima de almacenamiento de energía de 213 KWh, según un cálculo previo. Con estos parámetros, nuestro objetivo es dimensionar el sistema eléctrico de baterías y calcular su autonomía.

Para satisfacer los picos de demanda de energía, necesitaremos una batería con una tensión mínima de 24V, aunque se prefiere una de 48V [15], [16].

Vamos a utilizar para el sistema la batería: MG LFP 304

Tipo de batería	Litio hierro fosfato
Tensión nominal	25,6 V
Capacidad	7800 Wh / 304 Ah
Peso	54 Kg
Dimensiones	652 x 294 x 193 mm
Tensión mínima	24 V
Tensión máxima	28 V
Máxima Corriente de descarga continua	304 A
Circuito en serie	Hasta 6 módulos
Circuito en paralelo	Hasta 16 módulos

Tabla 6. Datos de la batería escogida para el sistema eléctrico de solo baterías.

Vamos a hacer una primera simulación con tan solo 2 baterías en serie y observar los resultados.

Hemos obtenido una autonomía de 19.63 h.

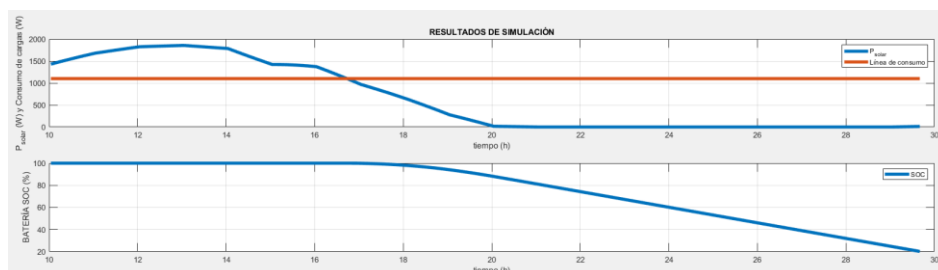


Figura 30. Resultados de la autonomía obtenida para dos baterías en serie.

Para lograr la máxima autonomía para este sistema, aprovecharemos el espacio disponible en los cascos para colocar las baterías que cumplan con los límites de peso y energía calculados. Después de realizar los cálculos pertinentes, determinamos que podemos instalar 7 celdas de batería de este tipo en cada casco (2 en serie y 5 en paralelo). Esta configuración nos permite alcanzar un peso total añadido de 760 kg, lo que no excede el límite máximo permitido (850 kg). En términos de energía almacenada, aún estamos lejos de alcanzar el límite establecido (213 kWh).

Ante este cálculo, es importante considerar dos aspectos:

Aunque tengamos un excedente de 90 kg y cada batería pese 54 kg, no podemos distribuir 8 baterías en un casco y 7 en otro debido a limitaciones estructurales.

Para el software de simulación, la configuración de las baterías (dos en serie y cinco en paralelo o siete en paralelo) no afectará los resultados, ya que seguirán siendo los mismos, debido a que en la simulación estamos haciendo cálculos de energía para obtener la autonomía. Por lo tanto, en la realidad optaremos por conectar dos baterías en serie para alcanzar el voltaje de 48V y luego conectar cinco baterías en paralelo, formando así una estructura de 7 baterías.

Estos han sido los resultados obtenidos al realizar los cambios:

Autonomía total de 11 días y 12.04h.



Figura 31. Resultados de la autonomía obtenida para 7 baterías en cada casco.

En las horas donde la Potencia solar que obtenemos es mayor que la Potencia consumida logramos cargar las baterías un 2.5%, consiguiendo así aumentar un poco más la autonomía.

Sistema híbrido de pila de combustible de hidrógeno sin generación a bordo.

El comportamiento de la simulación en el sistema se describe de la siguiente manera:

La batería se empleará para suministrar energía al USV hasta que el nivel de carga de la batería (SOC) alcance el 40%. Este parámetro es ajustable en la simulación y será modificado según sea necesario para optimizar la autonomía. Cuando el SOC sea inferior al 40%, se comenzará a utilizar el hidrógeno para generar la energía requerida por el USV.

La potencia solar generada se utilizará para cargar la batería.

La autonomía del sistema finalizará cuando no quede hidrógeno y la batería se agote por completo.

Para seleccionar la batería adecuada, es crucial dimensionar los excedentes de energía diarios producidos para evitar desperdiciar la potencia solar obtenida. Dado que la principal fuente de energía será el hidrógeno, la batería debe ser de tamaño reducido.

Se cuenta con dos tanques de hidrógeno, cada uno con una capacidad de 4 kg. Al inicio del trayecto del USV, los tanques estarán llenos, ya que no es posible generar hidrógeno a bordo.

Batería seleccionada para que no generemos ningún excedente de energía: MG LFP 230

Tipo de batería	Litio
Tensión nominal	25,6 V
Capacidad	5800 Wh / 230 Ah
Peso	41 Kg
Dimensiones	517 x 294 x 193 mm
Tensión mínima	27 V

Tensión máxima	21 V
Máxima Corriente de descarga continua	230 A

Tabla 7. Características de la batería para el modelo híbrido.

Habrán 2 baterías en serie para llegar al voltaje de 48V.

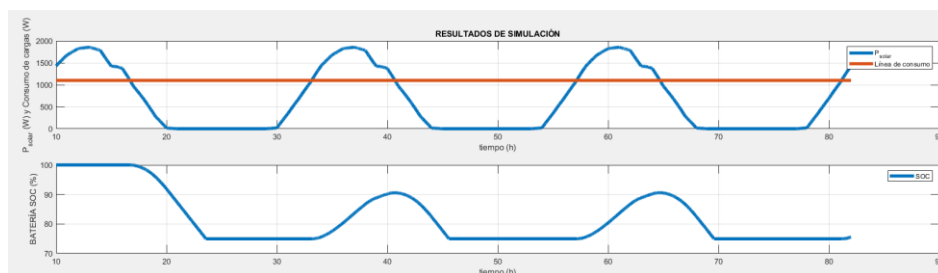


Figura 32. Resultados del almacenamiento de energía en la batería del sistema híbrido.

Con esta batería somos capaces de almacenar toda la energía producida gracias a las irradiancias solares.

Observemos los resultados de la autonomía:

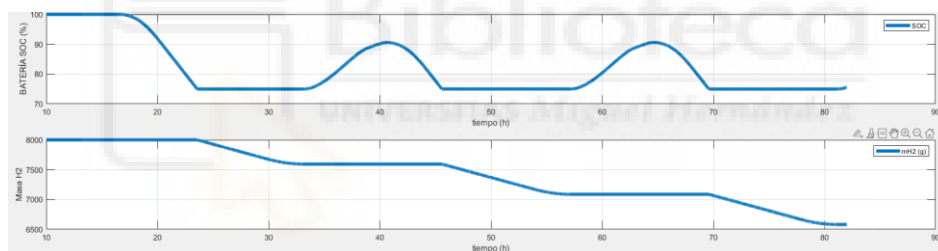


Figura 33. Resultados del consumo de hidrógeno y de la batería.

Durante las horas de sol, consumiremos la energía proveniente de la batería, lo que mantendrá el nivel de hidrógeno constante. Esto continuará hasta que no se logre generar suficiente potencia solar para seguir cargando la batería, lo que provocará que el SOC descienda hasta el 75%. En este punto, comenzaremos a utilizar el hidrógeno para proporcionar la energía necesaria hasta que la potencia solar sea suficiente para permitir el uso exclusivo de la batería para satisfacer la demanda de energía del USV.

El hidrógeno se utilizará durante 11 horas al día, mientras que las 13 horas restantes se utilizará la energía almacenada en la batería.

La autonomía es de 17 días y 13.17 horas.

Al comparar la autonomía del sistema híbrido con el sistema de sólo baterías, se observa una notable diferencia en eficiencia. El sistema híbrido ofrece una autonomía que es 6 días más larga que la del sistema eléctrico.

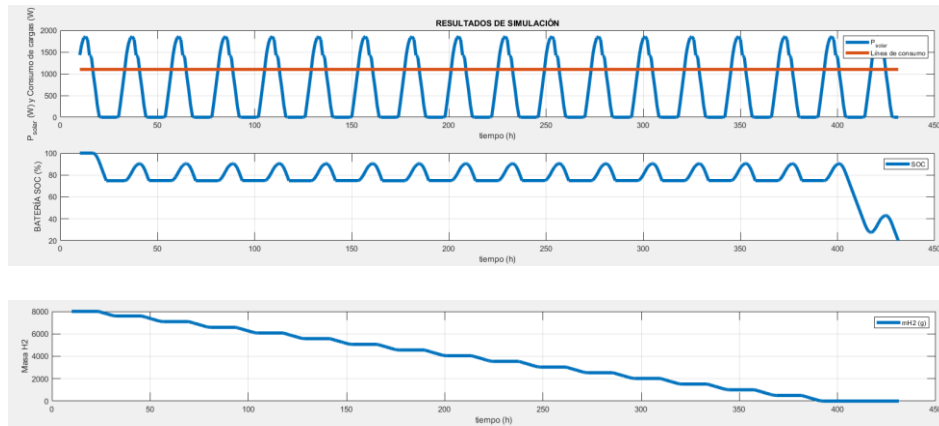


Figura 34. Resultados de la simulación alcanzando la máxima autonomía.

Un aspecto positivo a recalcar es que siempre estamos suministrando la potencia demandada a las cargas, por lo que el USV estará en constante movimiento en todo momento, navegando a una velocidad de 4 nudos.

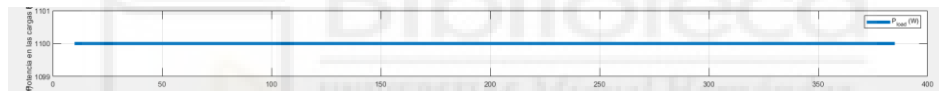


Figura 35. Potencia suministrada al USV.

Sistema híbrido de pila de combustible de hidrógeno con generación a bordo.

El comportamiento del sistema en la simulación se describe de la siguiente manera:

1. La batería se utilizará cuando esté al 100% de carga y haya déficit de energía, comenzando a descargarse en este caso. Si la carga de la batería cae por debajo del 80%, y hay exceso de energía disponible, se recargará. Si hay déficit de energía, se generará mediante la pila de combustible.
2. El electrolizador sólo recibirá potencia para producir hidrógeno cuando la batería esté al 100% de carga y haya exceso de energía disponible.
3. La autonomía del sistema finalizará cuando no quede hidrógeno y el SOC de la batería sea del 20%, para evitar dañar la batería por descargas profundas.

Una vez comprendido este comportamiento, debemos dimensionar el tanque de agua para maximizar la autonomía del sistema.

La batería utilizada será la misma que la empleada para el sistema híbrido sin generación de hidrógeno a bordo.

Considerando que 1 kg de hidrógeno ocupa aproximadamente 10 litros de agua, y que tenemos dos tanques de hidrógeno de 4 kg cada uno, en la primera simulación dimensionamos el tanque de agua en 40 litros. La relación de volumen ocupado de hidrógeno y volumen ocupado de agua será de 2 (80 litros de hidrógeno y 40 litros de agua).

Todas las simulaciones iniciarán con la cantidad mínima de agua en el tanque necesaria para generar hidrógeno, siendo un litro de agua la cantidad mínima en el tanque al comenzar la navegación.

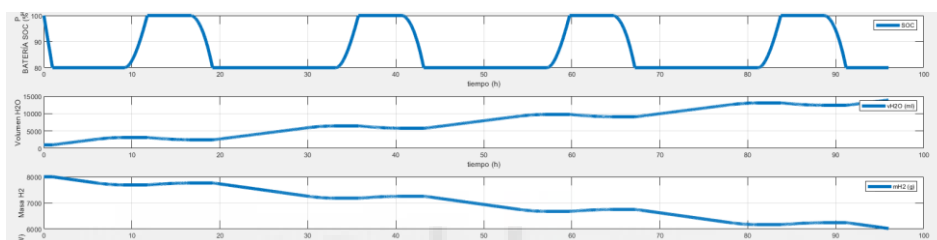


Figura 36. Resultados de la simulación para un depósito de agua de 40L.

La cantidad de hidrógeno que generamos cuando la batería está al 100% es de 0,06 kg, lo que representa apenas el 0,75% del total. Este hecho presenta el primer inconveniente del sistema: para generar más hidrógeno, necesitaríamos consumir menos, pero en este escenario el consumo se mantiene constante. Además, mejorar la eficiencia del electrolizador sería prácticamente imposible, ya que la mayoría de los electrolizadores en el mercado no superan el 75% de eficiencia.

Además de esto, es importante considerar que los electrolizadores no soportan presiones mayores de 30 bares. Si optamos por almacenar hidrógeno a esta presión, ocuparía mucho espacio, lo que requeriría que el USV fuera mucho más grande para poder almacenar los 8 kg de hidrógeno necesarios.

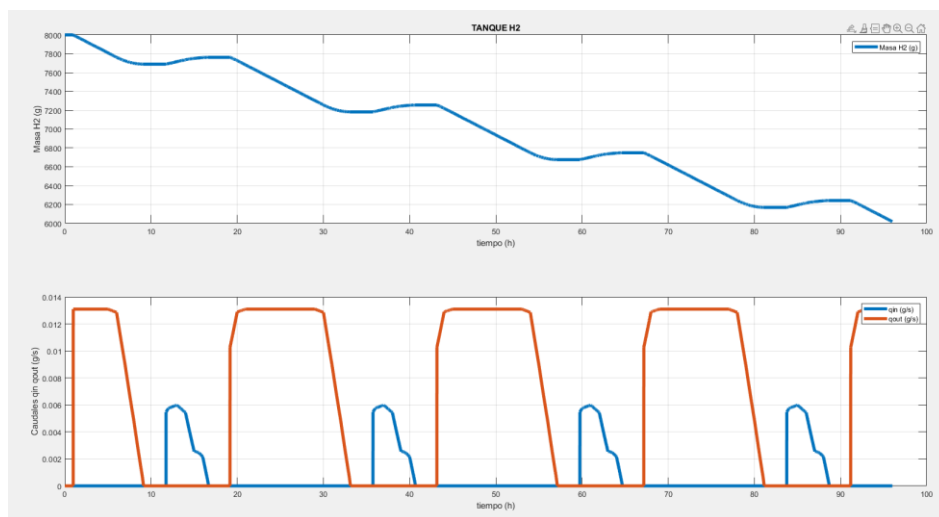


Figura 37. Resultados de la simulación para el tanque de hidrógeno.

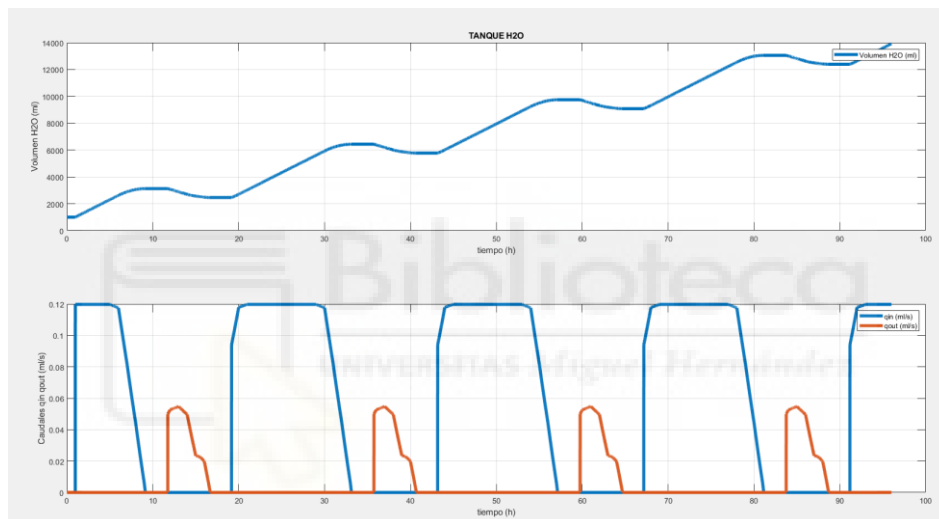


Figura 38. Resultados de la simulación para el tanque de agua.

Es crucial considerar que cada vez que el electrolizador recibe potencia, genera 0,06 ml/s de hidrógeno. Sin embargo, al observar que el caudal de entrada de agua siempre es el doble que el de hidrógeno, nos indica que en algún momento el tanque de agua se llenará y no podremos producir más hidrógeno.

A continuación, observamos los días que tarda en llenarse el tanque de 40L.

```
Day: 12

94Error using TankH2O/step
TANKH2O: WATER TANK IS FULL. CANNOT STORE MORE WATER

Error in run_simulation (line 80)
    [tankH2O] = step(tankH2O, qoutH2O, qinH2O);
```

Figura 39. Autonomía del tanque de 40L de agua.

Esto nos indica que se ha llenado el tanque de agua antes de que se acabe el hidrógeno, y su autonomía ha sido de 12 días.

Para la siguiente simulación aumentaremos el volumen del tanque de hidrógeno a 60 L:

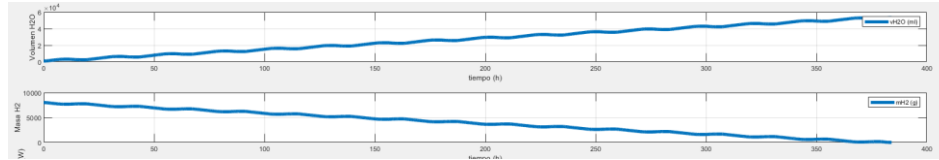


Figura 40. Comprobación del llenado para un tanque de agua de 60L.

Con una autonomía de 18 días y 10 horas, el tanque de agua nunca llega a llenarse por completo, y la autonomía termina cuando no queda hidrógeno en el tanque y la batería alcanza el 20% de su capacidad.

Si simulamos más días, es probable que ocurran periodos durante el día en los cuales el barco se encuentre a la deriva, ya que no podremos generar la potencia demandada con ningún elemento. Esto continuará hasta que haya exceso de energía generado, lo que nos permitirá cargar la batería y generar hidrógeno nuevamente.

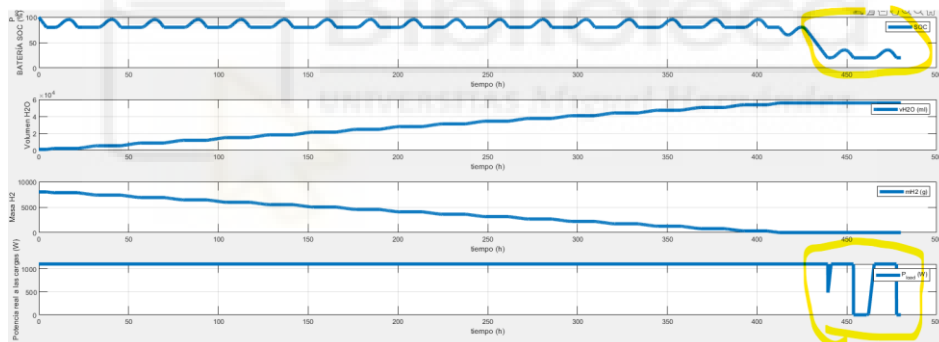


Figura 41. Resultados de la autonomía para un tanque de agua de 60L.

Los tramos señalados son en los que durante 8 horas el vehículo se encuentra a la deriva.

3.2.2. SIMULACIÓN 2

Para esta prueba seleccionaremos las peores condiciones ambientales, lo que implica el consumo del escenario 1 y las fechas con la menor irradiancia solar posible. Utilizaremos como referencia el puerto de Alicante durante los meses de invierno para garantizar condiciones desafiantes.



Figura 42. Curva de consumo Escenario 1.

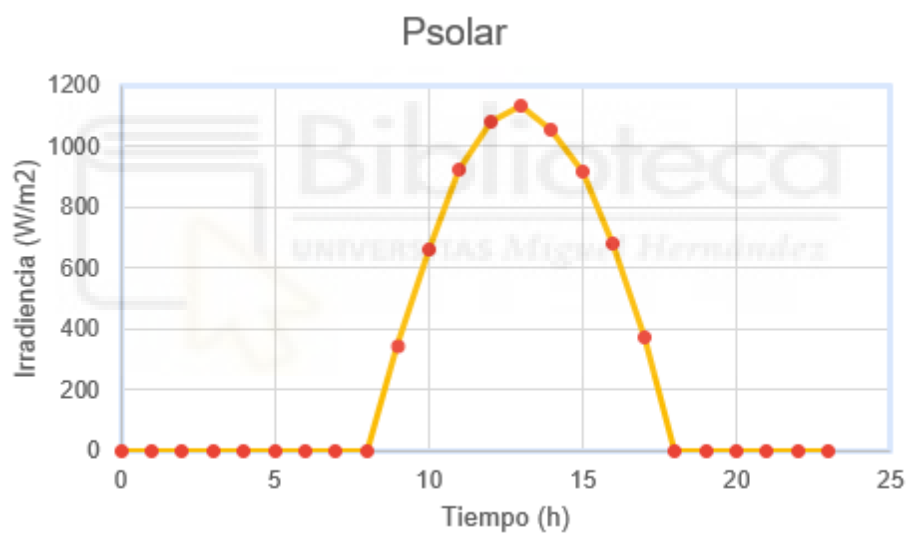


Figura 43. Curva de irradiancias por m2 en Alicante.

Estudiaremos cómo se comportan los sistemas para saber si es viable una curva de consumo constante en todo momento.

Recordemos que esto en los países de latitud media a pesar de ser invierno hay una gran cantidad de irradiancia en comparación a países de latitud alta, donde realizaremos pruebas más adelante.

Sistema eléctrico de baterías.

Utilizaremos la batería escogida anteriormente para realizar las pruebas.

Obtenemos una autonomía de 9 días y 13,71 h.

Con estas características de irradiancia hemos disminuido la autonomía un 9% con respecto a las irradiancias de Canarias. Veremos si es un descenso muy notorio cuando lo comparemos con los diferentes sistemas.

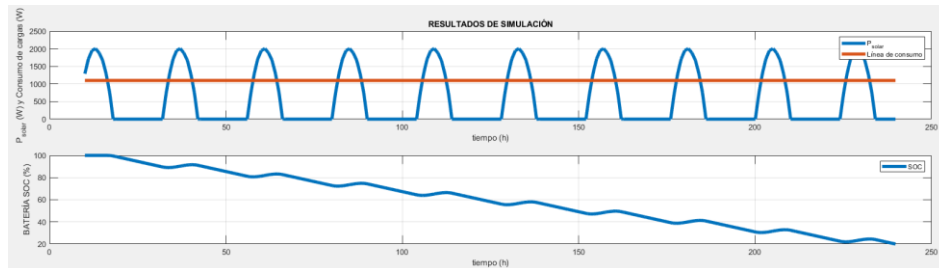


Figura 44. Resultados de la autonomía para el sistema eléctrico en la simulación 2.

Sistema híbrido de pila de combustible de hidrógeno sin generación a bordo.

La capacidad de la batería permanecerá constante, incluso si en este caso no alcanza el mismo nivel de carga que en la estación de verano. Esto se debe a que en la práctica no se espera cambiar la batería para cada periodo del año. Por lo tanto, inicialmente se ha dimensionado la batería para evitar excedentes durante las fechas con mayor irradiancia solar y poder almacenar toda la energía disponible.

La autonomía lograda es de días y 15,25 h. Es un 9% menor a la obtenida con las irradiancias de Canarias.

Hemos logrado cargar la batería por completo durante los ciclos de carga. Sin embargo, la carga no es tan gradual como en la estación de verano debido a que las horas en las que la potencia generada supera la demanda son solo 8 en total. En comparación, en Canarias estas horas son aproximadamente 13.

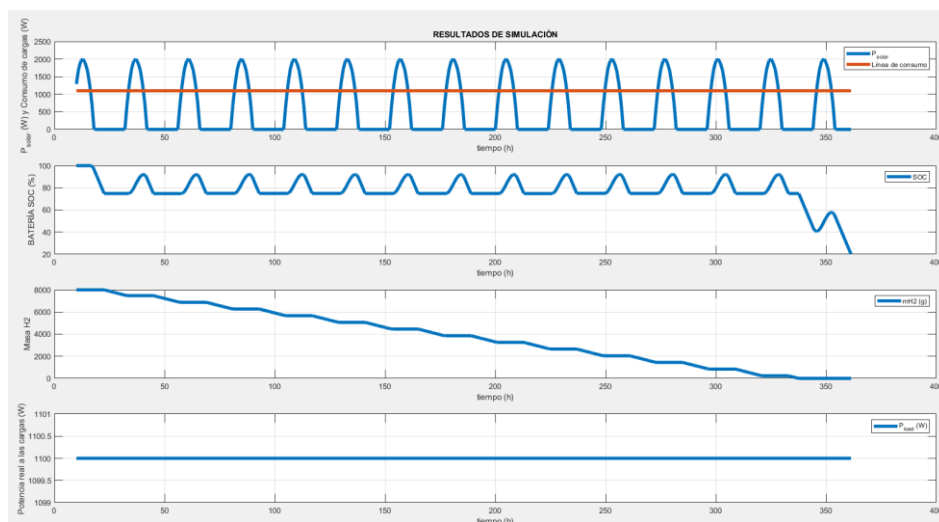


Figura 45. Resultados de la autonomía para el sistema híbrido sin generación a bordo en la simulación

2.

Sistema híbrido de pila de combustible de hidrógeno con generación a bordo.

La autonomía con este sistema es de 15 días y 10 horas.

Supone un decremento del 9% con respecto a la autonomía conseguido en la prueba 1.

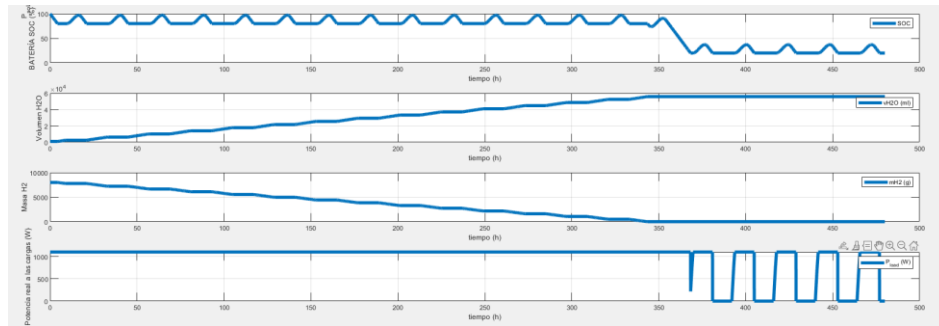


Figura 46. Resultados de la autonomía para el sistema híbrido con generación a bordo en la simulación

2.

La simulación se realiza para 20 días, pero cuando llega a las 370 horas al no quedar hidrógeno, ocurre el fenómeno mencionado en la anterior prueba, que durante ciertas horas del día navegará a la deriva, por ello la autonomía finaliza cuando se acaba el hidrógeno y se completa el ciclo de descarga de la batería.

3.2.3. PRIMERA CONCLUSIÓN

Tras realizar estas pruebas, hemos observado que el sistema que ofrece la mayor autonomía durante todo el año, independientemente de la estación, es el sistema híbrido de pila de combustible en el que generamos hidrógeno a bordo. Los resultados obtenidos cuando generamos hidrógeno a bordo son muy similares a los obtenidos cuando no lo hacemos. Sin embargo, la generación de hidrógeno a bordo resulta mucho más difícil de implementar debido a las limitaciones de espacio en los cascos del USV y la baja eficiencia en la producción de hidrógeno verde.

Para almacenar 8 kg de hidrógeno a 30 bares, necesitaríamos mucho más espacio del disponible en los cascos, además del tanque de 60 litros de agua. Además, la cantidad de hidrógeno verde que podemos generar, incluso en la mejor época del año, es mínima, lo que limita su impacto en la autonomía del vehículo.

Si comparamos el sistema de baterías con el sistema híbrido, observamos una diferencia considerable en la autonomía. De hecho, la autonomía del sistema híbrido es un 21%

superior a la generada por solo baterías, lo cual es un aspecto muy positivo para el hidrógeno, ya que no solo mejora la autonomía, sino que también es una forma de energía más limpia y con menos impacto en el peso del barco, en comparación con las baterías.

Dado que hemos investigado los dos extremos, es decir, verano e invierno, y hemos observado la fluctuación máxima de la autonomía, no es necesario realizar pruebas adicionales en otoño/primavera. En este caso, el sistema híbrido sin generación a bordo es el menos afectado por estas variaciones.

3.2.4. SIMULACIÓN 3

Una vez observado el comportamiento en un escenario donde el consumo es constante, vamos a realizar esta prueba donde durante las horas de sol hacemos un consumo constante de 1100 W/h, pero cuando desaparece el sol y no podemos generar energía el consumo será el mínimo posible, 200W que sería lo que se consume para la navegación autónoma y 675W para que navegue a una velocidad de 3 nudos para que no pueda ser arrastrado por la corriente del mar y perder su rumbo.



Figura 47. Curva de consumo Escenario 2.

Para esta simulación, cambiaremos la ubicación, ya que si es un barco que se va a dedicar a la investigación necesitará recorrer aguas de diferentes países con diferentes latitudes. Seleccionaremos la estación de verano en la costa de Kristiansand, Noruega. Esto nos permitirá estudiar cómo se comportaría el sistema en países de alta latitud, donde las irradiancias solares son considerablemente menores.

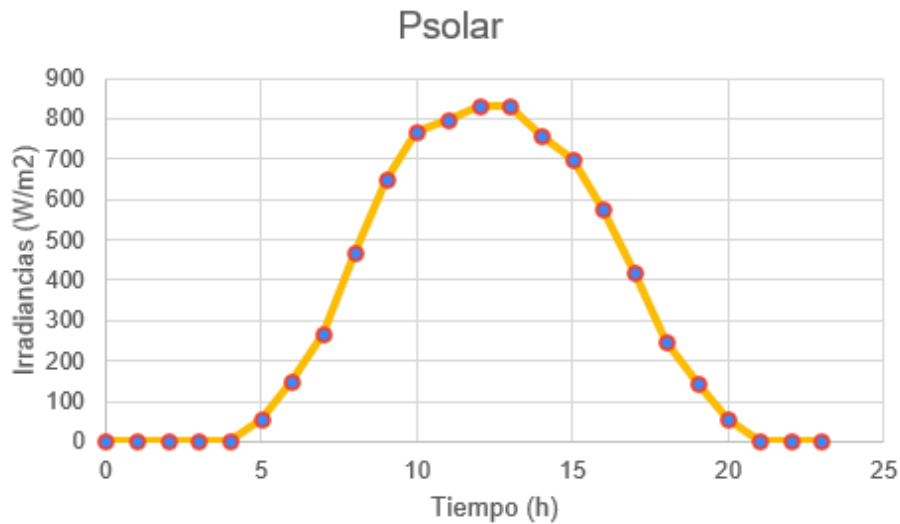


Figura 48. Curva de irradiancias por m2 en Noruega.

Sistema eléctrico de baterías.

Obtenemos una autonomía de 12 días y 15,63 h.

Al variar de esta manera la curva de consumo, hemos logrado obtener una autonomía similar a la que tendríamos con una irradiancia 300 W/m² más alta y un consumo constante de 1100 Wh. Esto sugiere que para el sistema eléctrico, hacer esta variación en la curva de consumo no afectaría significativamente la autonomía.

Además, hemos logrado cargar las baterías casi un 2%, lo que indica que el sistema está respondiendo de manera eficiente a estos cambios en la demanda de energía. En cada ciclo de 24 horas de autonomía, se consume aproximadamente un 6% de la capacidad de la batería.

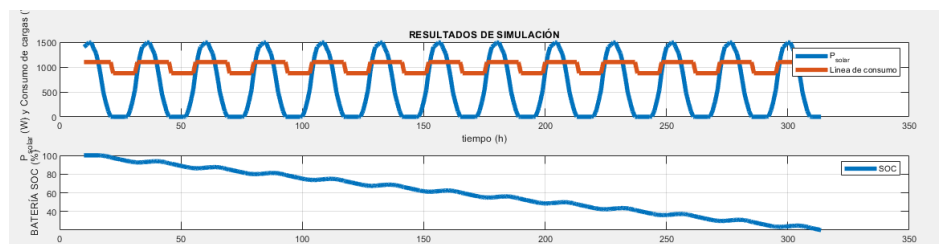


Figura 49. Resultados de la autonomía para el sistema eléctrico en la simulación 3.

Sistema híbrido de pila de combustible de hidrógeno sin generación a bordo.

Logramos una autonomía de 19 días y 14 h.

Como la irradiancia es menor no llegaremos a cargar al máximo las baterías, pero no dañará la batería ya que seguimos trabajando en rangos óptimos. Aún así se consigue cargar casi un 10%.

El consumo de hidrógeno durante un ciclo es de 500 gramos aproximadamente.

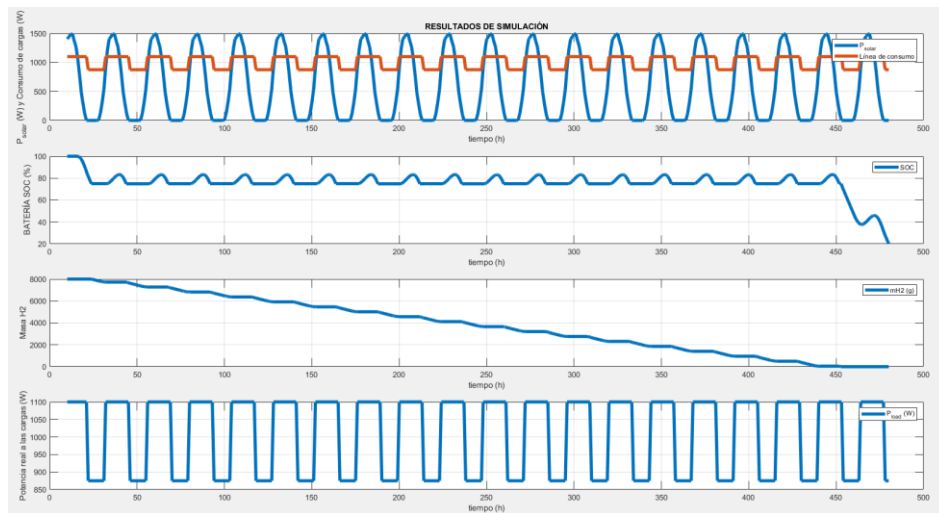


Figura 50. Resultados de la autonomía para el sistema híbrido sin generación en la simulación 3.

Sistema híbrido de pila de combustible de hidrógeno con generación a bordo.

La autonomía es de 20 días.

Conseguimos cargar un 8% las baterías y no producimos nada de hidrógeno por lo que para irradiancias tan bajas como esta no merece la pena el sistema de generación de hidrógeno a bordo.

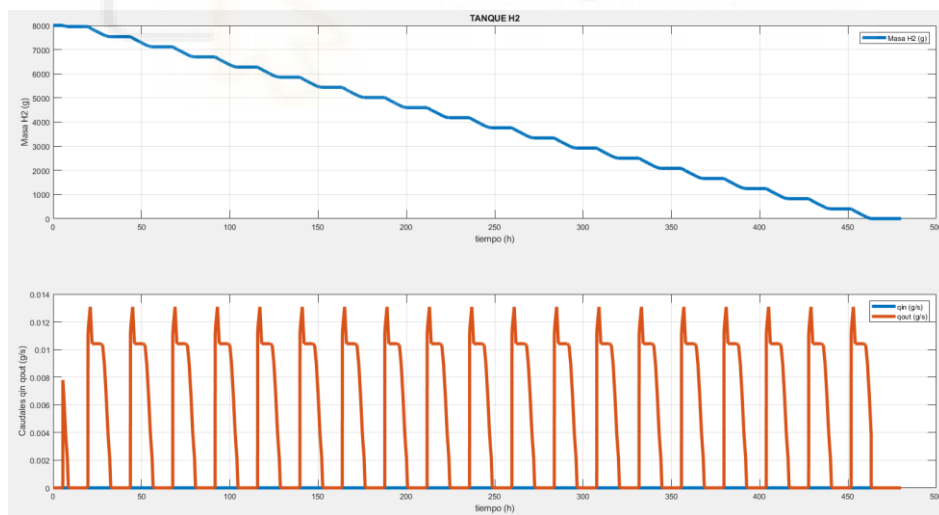


Figura 51. Resultados del consumo y generación de hidrógeno.

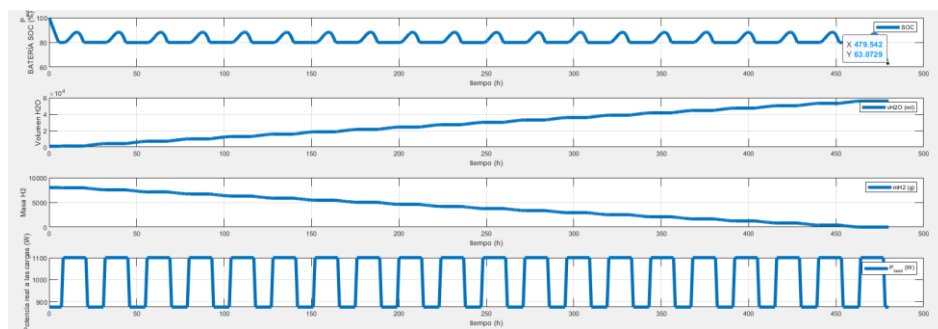


Figura 52. Resultados de la autonomía para el sistema híbrido con generación en la simulación 3.

3.2.5. SEGUNDA CONCLUSIÓN

Respecto al sistema eléctrico de baterías, observamos que para trayectos con diferentes irradiancias, aunque pueda haber sistemas con una mejor autonomía, no afecta de manera significativa siempre y cuando el consumo del USV disminuya. En comparación con el sistema de hidrógeno, el sistema eléctrico tiene una autonomía menor, además de que el almacenamiento de energía en baterías es más costoso que en hidrógeno, pero este aspecto será analizado en el apartado de viabilidad económica de este estudio.

Un inconveniente adicional del sistema de hidrógeno de generación a bordo es que en situaciones de baja irradiancia no se generará hidrógeno, por lo que crear esta estructura con su respectivo coste para no generar hidrógeno sería innecesario. Además, hemos observado que obtenemos prácticamente la misma autonomía sin generar hidrógeno a bordo.

Con estas simulaciones, hemos buscado determinar cuál es el mejor sistema para un barco que necesitaría navegar en diferentes países. En conclusión, el mejor sistema para este propósito es el híbrido con pila de combustible de hidrógeno sin generación a bordo.

3.2.6. SIMULACIÓN 4

El objetivo de esta prueba será comprobar cómo afecta, con respecto a la prueba anterior, si la curva de consumo es la siguiente:

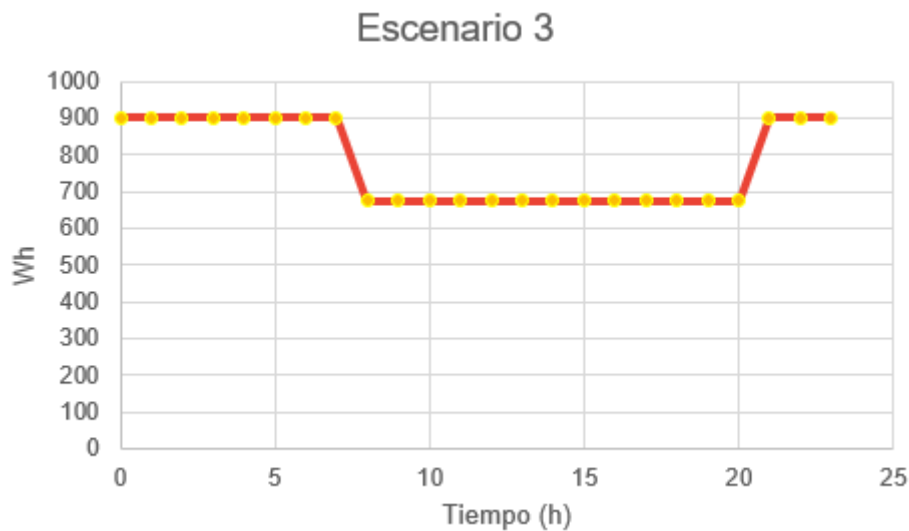


Figura 53. Curva de consumo para la simulación 4

Sistema eléctrico de baterías.

La autonomía es de 13 días y 17,58 h.

Hemos logrado mejorar la autonomía en 1 día, lo cual, aunque no es una mejora significativa, puede ser beneficioso en términos generales. Además, hemos conseguido cargar las baterías en un 2%. La diferencia radica en que durante un día se consume aproximadamente un 5,5% de la capacidad de la batería. Es importante mencionar que permitir que la batería llegue al 0% podría proporcionar una mayor autonomía, pero esto afectaría su vida útil, por lo que es algo que queremos evitar.

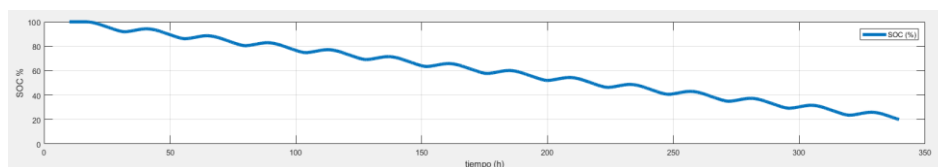


Figura 54. Análisis del SOC para la simulación 4.

Sistema híbrido de pila de combustible de hidrógeno sin generación a bordo.

Logramos una autonomía de 21 días 13.96 h.

Se obtiene 1 día y 14 horas más de autonomía, sin que el barco llegue a navegar a la deriva. El consumo de hidrógeno en un ciclo es de 450 gramos.

3.2.7. TERCERA CONCLUSIÓN

Analizando los resultados, si el USV se destina a la investigación y necesita navegar entre países, sería conveniente ajustar el consumo del barco a una curva donde la velocidad de

4 nudos se alcance durante la noche, mientras que durante las horas de sol se navegue a la velocidad suficiente para mantener el rumbo sin desviarse debido al mar. Esta estrategia nos permitiría obtener una mayor autonomía y recorrer distancias más largas, especialmente en lugares donde las irradiancias son menores debido a diferentes latitudes, a pesar de ser la misma época del año.

No ha sido necesario realizar pruebas en el sistema de generación de hidrógeno a bordo, ya que con estas irradiancias no se generaría hidrógeno. Por lo tanto, esta opción se descarta si el objetivo del barco es la investigación científica.

3.2.8. SIMULACIÓN 5

La finalidad de esta prueba es determinar la viabilidad de utilizar alguno de estos sistemas para barcos dedicados a la vigilancia y seguridad marítima. En este tipo de situaciones, es crucial que el USV sea capaz de soportar aceleraciones y frenadas muy drásticas que pueden ocurrir durante situaciones de persecución o rescate.



Figura 55. Curva de consumo para la simulación 5.

Estas curvas de consumo variarán según las acciones que tengan que realizar a cabo durante el día, esta es una curva de consumo aproximada y como ejemplo.

Para las irradiancias cogeremos la media obtenida en Canarias durante todo el año:

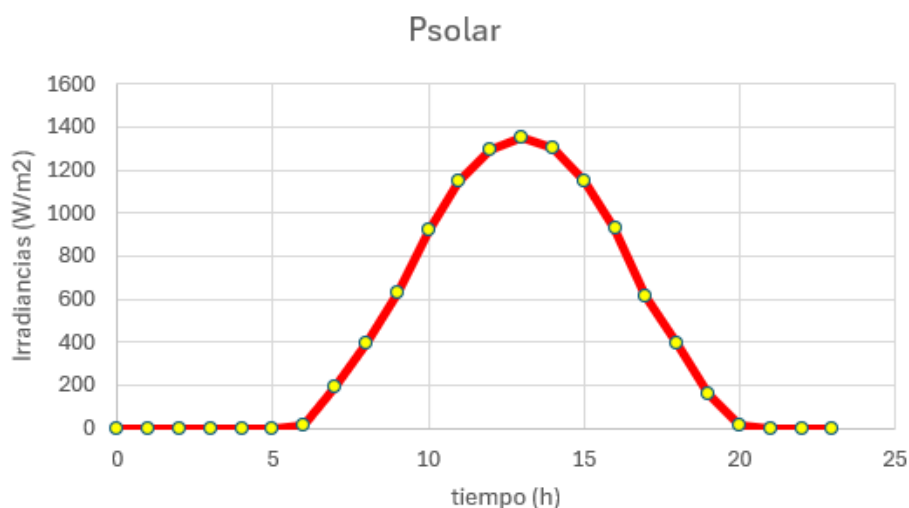


Figura 56. Curva de irradiancias por m2 en Canarias.

Sistema eléctrico de baterías.

Autonomía de 2 días y 21,33 h.

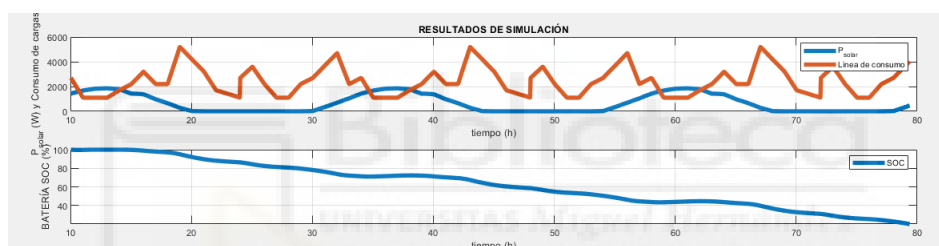


Figura 57. Resultados de la autonomía en el sistema eléctrico.

Debido a los altos consumos no conseguimos aumentar el SOC de la batería, no hay ningún momento donde la energía que producimos sea suficiente para hacerlo. Sin embargo, sí que hay tramos donde conseguimos que el SOC de la batería se estabilice, es decir que ni aumente ni disminuya mientras el barco navega.



Figura 58. Resultados de la potencia suministrada en el sistema eléctrico.

En todo momento suministramos la potencia necesaria para que adquiriera esas velocidades.

Sistema híbrido de pila de combustible de hidrógeno sin generación a bordo.

Autonomía de 4 días y 12,42 h. Conseguimos casi el doble de autonomía que el sistema eléctrico de baterías



Figura 59. Resultados de la autonomía para el sistema híbrido sin generación.

Cuando la batería desciende del valor de consigna comenzamos a utilizar hidrógeno y por eso podemos aprovechar el único momento del día donde producimos más energía de la consumida y cargar un 9% las baterías.

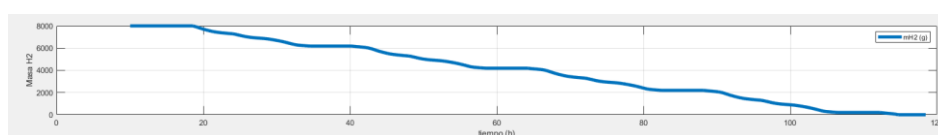


Figura 60. Resultados de la masa de hidrógeno para el sistema híbrido sin generación.

En los tramos donde el SOC supera el valor de consigna no consumimos hidrógeno y eso provoca que durante esas horas se vea como valor lineal la masa de hidrógeno.

El consumo de hidrógeno diario es de 2 kg para esta curva de consumo.

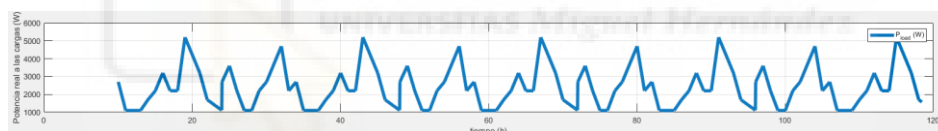


Figura 61. Resultados de la potencia suministrada para el sistema híbrido sin generación.

A pesar de haber muchas aceleraciones, nuestro sistema de hidrógeno es capaz de suministrar la energía necesaria.

Para estos casos donde hay cambios tan bruscos en la demanda de energía es importante que mantengamos el voltaje de la batería lo más próximo a su máximo valor, porque si el hidrógeno no fuese capaz de llegar a cubrir esos picos de demanda se encargaría la batería.

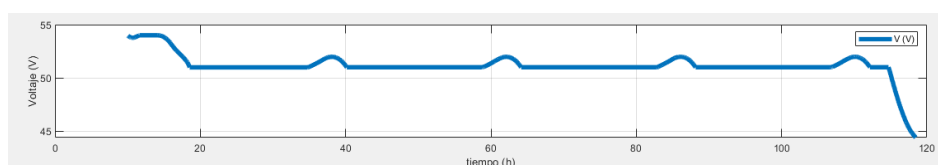


Figura 62. Resultados del voltaje para el sistema híbrido sin generación.

El único momento donde el voltaje que podemos ofrecer desciende drásticamente es cuando ya no queda hidrógeno en los tanques, por ende, solo se consume de la batería y esto provoca una descarga de la misma rápida.

No es necesario que hagamos la simulación para el sistema donde se genera hidrógeno a bordo, debido a que solo se podrá generar cuando carguemos la batería al 100% y con estas curvas de consumo eso no va a ocurrir nunca.

3.2.9. SIMULACIÓN 6

Según los resultados obtenidos, el sistema híbrido de pila de combustible de hidrógeno parece ser más adecuado si la finalidad del vehículo es soportar cambios drásticos de aceleración y alcanzar velocidades punta durante más tiempo. Además de la autonomía que proporciona, hay otro aspecto muy positivo en el hidrógeno: el tiempo de carga es significativamente menor que el de las baterías. Esto puede ser beneficioso en situaciones en las que se necesita usar el barco durante un día completo, ya que las paradas de recarga con hidrógeno durarán minutos ya que se suministra a alta presión, en comparación con las 8 horas que se requerirían para cargar completamente las baterías del sistema eléctrico.

Es importante tener en cuenta que la velocidad máxima que puede alcanzar el barco también dependerá de su sistema de propulsión, pero en este análisis solo hemos considerado los parámetros de energía.

Worst conditions:

	Speed (kn)	Froude No. LWL	Froude No. Vol.	Slender body Resist. (N)	Slender body Power (W)
1	0,000	0,000	0,000	--	--
2	0,500	0,037	0,076	2,94	1,51
3	1,000	0,074	0,151	20,30	20,88
4	1,500	0,111	0,227	96,20	148,47
5	2,000	0,148	0,302	191,28	393,62
6	2,500	0,184	0,378	289,22	743,93
7	3,000	0,221	0,453	354,79	1095,13
8	3,500	0,258	0,529	420,90	1515,70
9	4,000	0,295	0,605	664,19	2733,51
10	4,500	0,332	0,680	636,63	2947,60
11	5,000	0,369	0,756	643,58	3310,86
12	5,500	0,406	0,831	938,83	5312,72
13	6,000	0,443	0,907	1276,44	7879,88
14	6,500	0,480	0,982	1517,85	10151,03
15	7,000	0,517	1,058	1670,56	12031,77
16	7,500	0,553	1,134	1744,37	13460,72
17	8,000	0,590	1,209	1788,29	14719,58
18	8,500	0,627	1,285	1823,96	15951,58
19	9,000	0,664	1,360	1854,98	17177,09
20	9,500	0,701	1,436	1903,49	18605,54
21	10,000	0,738	1,511	1943,31	19994,55
22	10,500	0,775	1,587	2005,44	21665,43
23	11,000	0,812	1,662	2088,10	23632,71
24	11,500	0,849	1,738	2163,61	25600,32
25	12,000	0,885	1,814	2247,40	27747,93
26	12,500	0,922	1,889	2341,63	30115,93
27	13,000	0,959	1,965	2427,00	32462,52
28	13,500	0,996	2,040	2527,78	35110,88
29	14,000	1,033	2,116	2628,14	37856,85
30	14,500	1,070	2,191	2760,66	41185,91
31	15,000	1,107	2,267	2859,97	44138,88
32	15,500	1,144	2,343	2977,97	47492,06
33	16,000	1,181	2,418	3111,21	51217,41
34	16,500	1,218	2,494	3220,10	54666,56
35	17,000	1,254	2,569	3367,82	58906,99
36	17,500	1,291	2,645	3479,28	62646,32
37	18,000	1,328	2,720	3622,45	67087,71
38	18,500	1,365	2,796	3767,88	71719,46
39	19,000	1,402	2,872	3921,28	76656,66
40	19,500	1,439	2,947	4046,71	81190,42
41	20,000	1,476	3,023	4211,10	86655,05

Figura 63. Tabla de velocidades y consumo para las peores condiciones

	Speed (kn)	Froude No. LWL	Froude No. Vol.	Slender body Resist. (N)	Slender body Power (W)
1	0,000	0,000	0,000	--	--
2	0,500	0,037	0,076	2,94	0,84
3	1,000	0,074	0,151	20,30	11,60
4	1,500	0,111	0,227	96,20	82,48
5	2,000	0,148	0,302	191,28	218,68
6	2,500	0,184	0,378	289,22	413,29
7	3,000	0,221	0,453	354,79	608,41
8	3,500	0,258	0,529	420,90	842,06
9	4,000	0,295	0,605	664,19	1518,62
10	4,500	0,332	0,680	636,63	1637,56
11	5,000	0,369	0,756	643,58	1839,37
12	5,500	0,406	0,831	938,83	2951,51
13	6,000	0,443	0,907	1276,44	4377,71
14	6,500	0,480	0,982	1517,85	5639,46
15	7,000	0,517	1,058	1670,56	6684,32
16	7,500	0,553	1,134	1744,37	7478,18
17	8,000	0,590	1,209	1788,29	8177,54
18	8,500	0,627	1,285	1823,96	8861,99
19	9,000	0,664	1,360	1854,98	9542,83
20	9,500	0,701	1,436	1903,49	10336,41
21	10,000	0,738	1,511	1943,31	11108,08
22	10,500	0,775	1,587	2005,44	12036,35
23	11,000	0,812	1,662	2088,10	13129,28
24	11,500	0,849	1,738	2163,61	14222,40
25	12,000	0,885	1,814	2247,40	15415,52
26	12,500	0,922	1,889	2341,63	16731,07
27	13,000	0,959	1,965	2427,00	18034,73
28	13,500	0,996	2,040	2527,78	19506,04
29	14,000	1,033	2,116	2628,14	21031,58
30	14,500	1,070	2,191	2760,66	22881,06
31	15,000	1,107	2,267	2859,97	24521,60
32	15,500	1,144	2,343	2977,97	26384,48
33	16,000	1,181	2,418	3111,21	28454,11
34	16,500	1,218	2,494	3220,10	30370,31
35	17,000	1,254	2,569	3367,82	32726,11
36	17,500	1,291	2,645	3479,28	34803,51
37	18,000	1,328	2,720	3622,45	37270,95
38	18,500	1,365	2,796	3767,88	39844,14
39	19,000	1,402	2,872	3921,28	42587,03
40	19,500	1,439	2,947	4046,71	45105,79
41	20,000	1,476	3,023	4211,10	48141,69

Figura 64. Tabla de velocidades y consumo para las mejores condiciones.

Sistema eléctrico de baterías.

Comenzaremos con las peores condiciones para ver si llega a la velocidad de 20 nudos con un consumo de 86655.05W:

Obtendremos una autonomía en esas condiciones de 1,46 h.

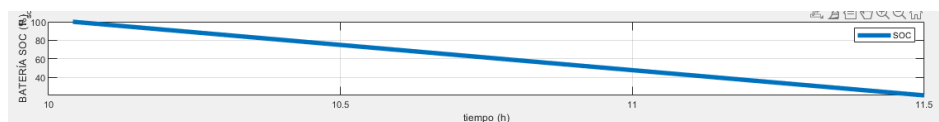


Figura 65. Resultados de la autonomía en el sistema eléctrico para las peores condiciones.

Mejores condiciones:

Consumo de 48141.69 W para una velocidad de 20 nudos.

La autonomía es de 2,67 h.

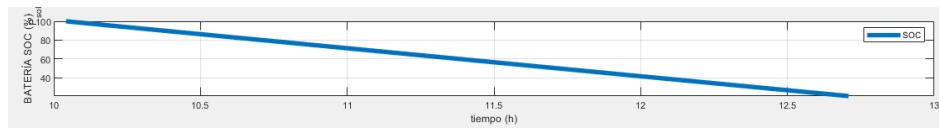


Figura 66. Resultados de la autonomía en el sistema eléctrico para las mejores condiciones.

Sistema híbrido de pila de combustible de hidrógeno sin generación a bordo.

Los consumos serán los mismos para cada sistema en las peores y mejores condiciones.

Para mejores condiciones:

La autonomía es de 2,25 h.

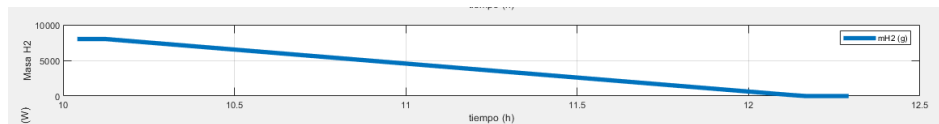


Figura 67. Resultados de la autonomía en el sistema híbrido para las mejores condiciones.

Mejores condiciones:

La autonomía es de 4,13 h.

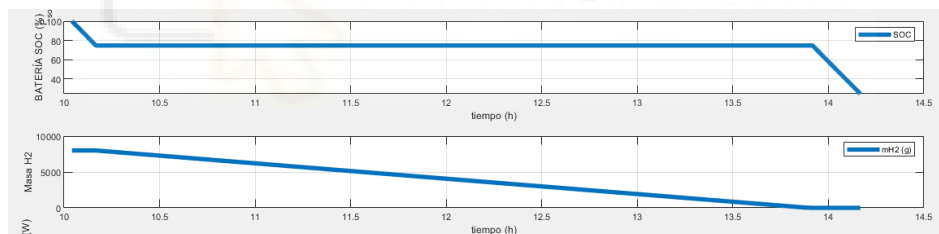


Figura 68. Resultados de la autonomía en el sistema híbrido para las mejores condiciones.

3.3. ESTUDIO DE COSTES PARA CADA SISTEMA

Una vez obtenida las conclusiones de la parte técnica vamos a estudiar el posible CAPEX que podría tener cada sistema, para ayudarnos a establecer una conclusión mucho más lograda y amplia.

Sistema eléctrico de baterías.

Como ya hemos explicado previamente necesitamos para conseguir la máxima autonomía colocar en cada casco 2 baterías en serie y 5 en paralelo, la marca de baterías que hemos escogido es MG ENERGY SYSTEMS, el precio de cada batería es el ofrecido por el

proveedor, concretamente, Enervolt. Este proveedor también nos ha dicho los elementos que nos harían falta además de las baterías.

Los elementos dedicados al almacenamiento de energía, excluyendo a las baterías, son los siguientes:

Controlador BMS

Panel de Control Wifi

Interface USB-CanBus

Cargadores de batería

Además de esto para hacer que el USV pueda desplazarse necesitamos un motor de propulsión que sea capaz de llegar a 20 nudos, la marca escogida para ello ha sido HamiltonJet, sus proveedores en España (Clamp) nos han recomendado el modelo HJ215.

Para cargar las baterías durante las horas en las que el barco no está activo necesitaremos cargadores del tipo 24/100 y 48/100 de la marca Victron Energy con el mismo proveedor que las baterías.

Todos los elementos con sus respectivos costes se establecen en la siguiente tabla:

Componente	Número	Precio Unidad (€)	Proveedor	Precio final (€)	Marca
Batería	14	3456,1	Enervolt	36289,05	MGLFP242304
Motor de propulsión	2	Por determinar	Clamp	Por determinar	hamiltonjet hj212/hj213
Controlador BMS	2	1434,3	Enervolt	2868,6	MGMLV482600
Panel de control con Wifi	2	441	Enervolt	882	MGEMD010001
Interface USB-CanBus	2	282,1	Enervolt	564,2	MGUSBCAN001
Cargadores 24/100	4	1743	Enervolt	6972	Victron Energy
Cargadores 48/100	2	1673	Enervolt	3346	Victron Energy

Tabla 8. Costes de los productos para el sistema eléctrico.

Lo que nos quedaría por averiguar es el precio de la propulsión, también el precio de los paneles solares para la generación de energía. Sin embargo al comparar el precio de los diferentes sistemas no va a afectar el precio de los paneles solares ni de la propulsión porque para todos es el mismo.

El coste total del sistema de baterías sería de: 51000€.

Gracias a este sistema somos capaces de almacenar un total de 154560 Wh.

Por lo tanto si el barco tiene un peso total de 800 kg sin las baterías y con las baterías serían 1560 kg, la energía almacenada por unidad de peso es 0,1kW/kg.

Sistema híbrido de pila de combustible de hidrógeno sin generación a bordo.

En este sistema se necesitan dos fuentes de almacenamiento de energía, por una parte los tanques de hidrógeno y por otra las dos baterías que nos ayudarán a suministrar los picos de energía demandados.

Si queremos generar energía con hidrógeno necesitamos ciertos componentes como la pila de combustible y el equipo electrónico. Hemos localizado un proveedor en China que nos ofrece la pila de combustible y el equipo adecuado que necesitamos para satisfacer las necesidades de demanda en todos los tipos de curva de consumo. El proveedor es SEEEX y tiene un precio total de 6500.

Para las baterías tendremos 2 en serie y nuestro proveedor será el mismo que para el sistema eléctrico, además de todos los componentes de control para la batería.

En el caso de los cargadores sólo sería necesario uno de 48/100.

El tanque de hidrógeno es el mismo proveedor que todo el equipo electrónico y la pila.

Características del tanque:

Volumen	180L
Capacidad	4.27kg
Peso del tanque	91 kg
Dimensiones	410x1900 mm

Tabla 9. Características del tanque de hidrógeno.

Todos los elementos con sus respectivos costes se establecen en la siguiente tabla:

Componente	Número	Precio Unidad	Proveedor	Precio final	Marca
Batería	2	2422,1	Enervolt	3633,15	MGLFP240230
Tanque de hidrógeno y válvula	2	12500	SEEX	25000	SEEX
Motor de Propulsión	2	Por determinar	Clamp	Por determinar	hamiltonjet hj212/hj213
Controlador BMS	2	1434,3	Enervolt	2868,6	MGMLV482600
Panel de control con Wifi	2	441	Enervolt	882	MGEMD010001
Interface USB-CanBus	2	282,1	Enervolt	564,2	MGUSBCAN001
Equipo electrónico H2	1	6500	SEEX	6500	SEEX
Cargador 48/100	1	1673	Enervolt	1673	Victron Energy

Tabla 10. Costes de los productos para el sistema de hidrógeno sin generación.

El coste total es de 41200 €.

Mediante este modelo somos capaces de almacenar un total de 280576 Wh.

El peso del barco con todos los componentes de batería, hidrógeno y la electrónica correspondiente sería un total de 1122 kg, es decir, almacenamos 0,25 kW/kg.

Sistema híbrido de pila de combustible de hidrógeno con generación a bordo.

Para este sistema, hemos llegado a la conclusión de que no es necesario realizar el cálculo de costes. Esto se debe a que para que sea viable en un barco, las dimensiones necesarias serían mucho mayores de las que tenemos actualmente. Sería necesario aumentar considerablemente el tamaño para poder producir una cantidad significativa de energía solar y, por ende, generar más hidrógeno.

Hemos observado que la producción de hidrógeno es prácticamente nula, y que solo se generaría en situaciones ideales. Por lo tanto, el costo sería similar, pero ligeramente más elevado que el sistema donde no se genera hidrógeno a bordo. Esto se debería a la inclusión del electrolizador, los tanques de agua y la electrónica correspondiente.

Sin embargo, elevar el precio de manera considerable no sería conveniente, especialmente cuando hemos comprobado que la autonomía del sistema donde no se genera hidrógeno a bordo es similar a este.

En conclusión, el sistema de generación a bordo no es una opción viable, basándonos en todos los argumentos expuestos durante la memoria.

3.3.1. CONCLUSIÓN ECONÓMICA

Basándome en los datos proporcionados, puedo concluir que el sistema híbrido de pila de combustible de hidrógeno sin generación a bordo parece ser la opción más viable y eficiente para la aplicación en cuestión.

En primer lugar, el sistema de baterías ofrece una capacidad de almacenamiento de energía con una relación de 0,1 kW/kg de energía almacenada por unidad de peso.

Por otro lado, aunque el sistema híbrido de pila de combustible de hidrógeno sin generación a bordo ofrece una mayor capacidad de almacenamiento de energía por unidad de peso (0,25 kW/kg), el costo total del sistema híbrido es relativamente similar al de baterías.

En cuanto al sistema híbrido de pila de combustible de hidrógeno con generación a bordo, los datos indican que no es una opción viable para esta aplicación. A pesar de que teóricamente podría ofrecer una mayor autonomía, los desafíos prácticos asociados con la generación de hidrógeno a bordo, como el aumento del tamaño del barco y la escasa eficiencia de producción de hidrógeno, hacen que esta opción sea menos atractiva en términos de costo y viabilidad técnica.

En conclusión, el sistema híbrido ofrece una mayor autonomía al almacenar 1,5 kW más por kg de peso en comparación con las baterías. Además, su tiempo de carga es considerablemente menor, lo que permite un uso prolongado del vehículo sin largos tiempos de espera. Esta combinación de mayor capacidad de almacenamiento y tiempos de carga más rápidos lo convierte en una opción más eficiente y práctica para aplicaciones marítimas.

4. CONCLUSIONES

4.1. CONCLUSIONES TÉCNICAS Y ECONÓMICAS

La generación de hidrógeno a bordo solo presenta viabilidad técnica en dispositivos con un consumo muy reducido y una gran superficie disponible para los paneles fotovoltaicos, condición que se traduce en relaciones potencia fotovoltaica/consumo (PF/CC) del orden de 4,5 en el escenario más favorable de verano y cercanas a 10 en invierno. Para el USV de 1,6 m, las restricciones de espacio y peso —agravadas por la necesidad de un tanque de oxígeno al tratarse de un vehículo totalmente estanco— hacen inviable este modelo.

En consecuencia, para el USV de 1,6 m el sistema más adecuado es el eléctrico basado únicamente en baterías, complementado con una estación de carga autónoma patentada cuya funcionalidad se comprobó mediante una prueba piloto (MVP) en el Puerto de Algeciras, en colaboración con la Universidad de Cádiz.

Para el USV de 5 m, la comparación de los tres sistemas muestra que el sistema híbrido de pila de combustible sin generación de hidrógeno a bordo es la opción más equilibrada: ofrece una autonomía aproximadamente un 21 % superior a la del sistema de solo baterías y almacena 0,25 kW·h/kg frente a los 0,1 kW·h/kg del sistema de baterías, con un coste total similar (en torno a 41.200 € frente a 51.000 €) y tiempos de recarga mucho menores. El sistema híbrido con generación de hidrógeno a bordo no resulta viable, ya que la producción de hidrógeno verde es prácticamente nula y exigiría un mayor tamaño de la embarcación sin una mejora apreciable de la autonomía.

Finalmente, el ajuste del perfil de consumo —navegando a mayor velocidad durante la noche y a la velocidad mínima necesaria para mantener el rumbo durante las horas de sol— permite aumentar la autonomía, especialmente en latitudes con menor irradiancia.

4.2. LÍNEAS FUTURAS

Para embarcaciones que deban operar en territorios con baja radiación solar o que no dispongan de superficie suficiente para los paneles fotovoltaicos, resulta más conveniente generar el hidrógeno fuera de la embarcación y, en su caso, recurrir a otras fuentes de energía renovable (eólica, undimotriz, etc.).

El desarrollo y la industrialización de la estación de carga autónoma para embarcaciones eléctricas, validada a escala de prototipo, constituye una línea de trabajo directa derivada de este estudio.

La incorporación de sistemas de generación o desalinización de agua pura a bordo permitiría prolongar la autonomía del sistema con producción de hidrógeno, al eliminar la limitación impuesta por la cantidad de agua de partida.



BIBLIOGRAFÍA

- [1]: Stolten, D. (Ed.), Hydrogen and Fuel Cells: Fundamentals, Technologies and Applications. Wiley-VCH, Weinheim, Alemania, 2010.
- [2]: Fossen, T. I., Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. John Wiley & Sons, Chichester, Reino Unido, 2011.
- [3]: Luque, A.; Hegedus, S., Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 2ª ed. John Wiley & Sons, Chichester, Reino Unido, 2011.
- [4]: Godula-Jopek, A. (Ed.), Hydrogen Production by Electrolysis. Wiley-VCH, Weinheim, Alemania, 2015.
- [5]: Moore, H., MATLAB for Engineers, 5ª ed. Pearson Education, Harlow, Reino Unido, 2018.
- [6]: Masters, G. M., Renewable and Efficient Electric Power Systems, 2ª ed. Wiley-IEEE Press, Hoboken, NJ, EE. UU., 2013.
- [7]: Mohan, N.; Undeland, T. M.; Robbins, W. P., Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3ª ed. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, EE. UU., 2003.