

INFORME DEL PROYECTO REF.SV-24-GIJÓN-1-23

Simulación y Análisis de Estructuras Solares Flotantes (SAFES)

Fechas inicial y final del proyecto:

01 / 05 / 2024 al 31 / 12 / 2024

Investigador/a Principal:

Mario López Gallego

Otros investigadores:

- Manuel Aenlle López
- Antonio Navarro Manso
- Rubén Claus Gómez
- Alejandro Cebada Relea
- Carlos Rodríguez Casado
- Paulo Rosa-Santos
- Iván López Moreira

Personal contratado:

Marta Ordóñez García

Fechas inicial y final de contratación:

01 / 09 / 2024 al 31 / 12 / 2024

Empresas o instituciones colaboradoras:

Ingeniacity y SAFINTAST

Redes sociales de investigadores y empresas:

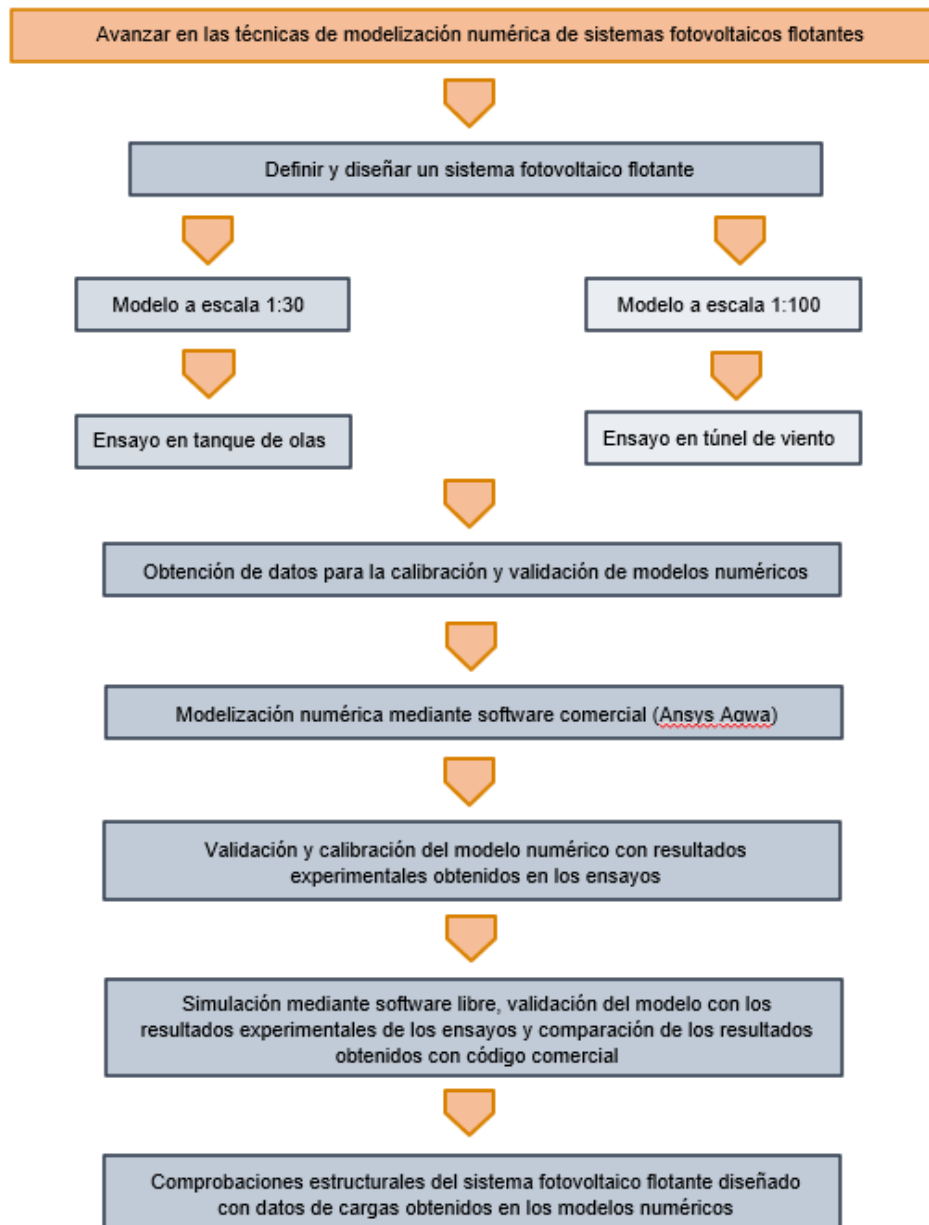
Investigadores:

- Mario López Gallego: mario.lopez@uniovi.es
- Manuel Aenlle López: aenlle@uniovi.es
- Antonio Navarro Manso: navarroantonio@uniovi.es
- Rubén Claus Gómez: clausruben@uniovi.es
- Alejandro Cebada Relea: cebadaalejandro@uniovi.es
- Carlos Rodríguez Casado: uo239917@uniovi.es
- Paulo Rosa-Santos: pjrsantos@fe.up.pt
- Iván López Moreira: Ivan.lopez@usc.es

Empresas:

- Ingeniacity: <https://ingeniacity.com>
- SAFINTAST: <https://si-engineer.com/>

Resumen Gráfico



Memoria descriptiva del proyecto

1. Resumen ejecutivo

SAFES surge en un contexto de creciente importancia de las energías renovables y la recién aparición de la energía solar flotante como una alternativa a las fuentes de energía convencionales y, en particular, la solar terrestre. Los sistemas fotovoltaicos flotantes (FPV) se utilizan habitualmente en aguas continentales de todo el mundo. No obstante, es destacable su presencia en el sudeste asiático, donde la potencia instalada ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años.

Actualmente hay varios consorcios empresariales y tecnológicos que están desarrollando la tecnología necesaria para dar el salto a los aprovechamientos solares marinos, donde las acciones climáticas son mucho más adversas y condicionan la fiabilidad y rentabilidad de los proyectos. En el contexto de este desarrollo, es fundamental contar con técnicas de simulación precisas y fiables, así como experiencia en el empleo y aplicación de las mismas al campo.

Con este preciso objetivo de avanzar en las técnicas de modelización numérica de sistemas fotovoltaicos flotantes se desarrolló SAFES. En este se exploró la aplicación de software comercial, con la alternativa de aplicar y adaptar software libre para el mismo fin. Para calibrar y validar los modelos numéricos se realizaron ensayos experimentales en túnel de viento (en marcha) y tanque de olas (finalizado).

El interés del proyecto radica en la novedad de la tecnología FPV flotante y su potencial impacto en sectores estratégicos como el transporte y la energía, como así lo atestigua el interés de las empresas asturianas Ingeniacity y Safintast.

A la participación de investigadores y personal contratado de la rama de la ingeniería y las energías renovables de la Universidad de Oviedo, hay que añadir la participación de investigadores externos de gran trayectoria y experiencia en campos afines. Por último, destacar que el proyecto puede tener un impacto positivo en las instituciones financiadoras gracias al desarrollo tecnológico de Gijón en un ámbito estratégico fundamental para la ciudad como es la Economía Azul.

Para desarrollar el proyecto y alcanzar sus objetivos, se ha dividido en dos fases y las correspondientes tareas en que se divide cada una. La primera fase, relacionada con la modelización física, y la segunda, relacionada con la modelización numérica.

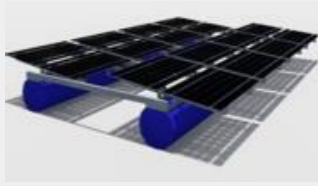
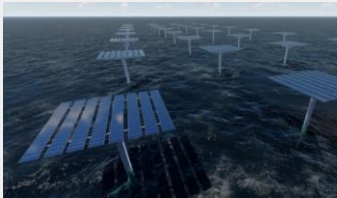
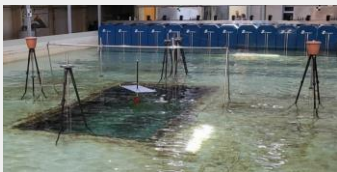
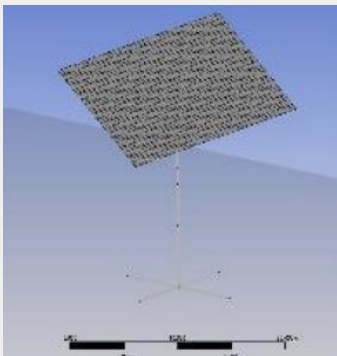
En la primera fase se concretó y definió un sistema fotovoltaico flotante de referencia. A partir de éste se desarrollaron los modelos a escala reducida para ensayar en tanque de olas y en túnel de viento. Con los ensayos se obtendrán los datos experimentales con los que validar los modelos numéricos desarrollados en la siguiente fase.

En la segunda fase se llevó a cabo la modelización numérica mediante un software comercial (Ansys Aqwa) capaz de reproducir la interacción fluido-estructura para el caso complejo de un sistema fotovoltaico flotante. El código está siendo validado y calibrado con los resultados experimentales obtenidos en la fase previa.

A futuro se pretenden explorar alternativas de software libre para reproducir el comportamiento del sistema fotovoltaico flotante, se validarán los modelos con los resultados experimentales y se realizará una comparación con los resultados obtenidos mediante el código comercial.

2. Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

Tipo	Objetivo	Imagen	Grado de consecución
------	----------	--------	----------------------

Principal	Avanzar en las técnicas de modelización numérica de sistemas fotovoltaicos flotantes		85%
Secundario/ Específico	Diseñar y definir un sistema fotovoltaico flotante		100%
Secundario/ Específico	Realizar ensayos de un sistema fotovoltaico flotante en tanque de olas para obtener datos con los que calibrar y validar modelos numéricos		100%
Secundario/ Específico	Realizar ensayos de un sistema fotovoltaico flotante en túnel de viento para obtener datos con los que calibrar y validar modelos numéricos		20%
Secundario/ Específico	Modelización numérica mediante software comercial convencional capaz de reproducir la interacción fluido-estructura para el caso complejo de un sistema fotovoltaico flotante		100%
Secundario/ Específico	Validación y calibración del modelo con los resultados experimentales obtenidos en tanque de olas y túnel de viento		10%
Secundario/ Específico	Explorar alternativas de software libre para reproducir el comportamiento del sistema fotovoltaico flotante, validarlo con los resultados experimentales y comparar los resultados con el código comercial		10%

Secundario/ Específico	Realizar las comprobaciones estructurales del sistema fotovoltaico flotante diseñado a partir de los datos de cargas obtenidos con los modelos numéricos		20%
---------------------------	--	--	-----

3. Tareas realizadas:

Las tareas se realizaron a lo largo de un total de 8 meses (mayo a diciembre de 2024), tiempo que duró el proyecto de acuerdo con el cronograma de la **Error! Reference source not found..**

Fase 1: Modelización Física

- Diseño y definición de la estructura. Se incluyó la definición tipológica, geométrica y de los materiales del sistema fotovoltaico flotante (FPV), que se ha considerado para su estudio. La tecnología se correspondió con un seguidor solar de dos ejes con una plataforma flotante de tipo TLP (del inglés *tension leg platform*) al cual se le denominó HelioSea.
- Ensayos en tanque de oleaje. Se realizaron en colaboración con el Laboratorio de Recursos Hídricos y Ambiente de la Universidad de Oporto, a cargo del profesor Paulo Rosa y con la colaboración de los miembros del equipo de la Universidad de Oviedo. Se ensayó un modelo a escala reducida de HelioSea, con detalle en el sistema de flotación y fondeo. Para la caracterización hidrodinámica no se tuvo en cuenta en detalle la superestructura definida por el seguidor solar, ya que esta no interactúa con las acciones climáticas de marea y oleaje.
- Ensayos en túnel de viento. Esta tarea se ejecutó parcialmente por los miembros del Departamento de Energía en el túnel aerodinámico ubicado en la Escuela Politécnica de Mieres de la Universidad de Oviedo. Se realizaron los diseños del primer modelo a escala reducida de la superestructura de HelioSea (seguidor solar de dos ejes), pero por cuestiones de calendario y utilización de la infraestructura no se han podido concluir los ensayos, replanificados para inicio de 2025. El resultado de interés será la caracterización aerodinámica de los paneles según su disposición en el FPV, teniendo en cuenta diferentes inclinaciones de los paneles, así como velocidades y direcciones de incidencia del viento.

Fase 2: Modelización numérica

- Simulación con código Ansys Aqwa. Se realizó por parte de los miembros del equipo experimentados en el uso de Aqwa y tomando como referencia el diseño de HelioSea resultante en la Tarea 1.1. Además, ya se han incluido los resultados parciales de los experimentos en tanque de olas y se prevé la calibración de los parámetros aerodinámicos obtenidos de los ensayos de túnel de viento.
- Simulación con software libre. Se realizaron las tareas de revisión bibliográfica del software libre disponible, sus ventajas e inconvenientes como alternativa a Ansys Aqwa y otros códigos para la simulación de sistemas FPV marinos. No se ha detectado ningún código capaz de competir en prestaciones con Ansys Aqwa, por lo que se optó por profundizar en las tareas de modelización de mediante este último. Se ha dejado para el futuro la utilización de algún código alternativo.

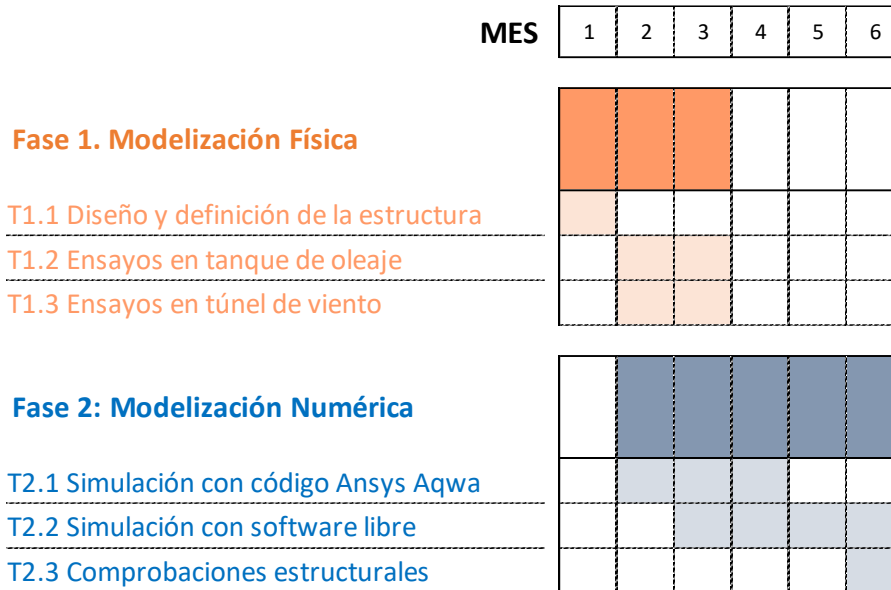


Figura 1. Cronograma de las fases y tareas del proyecto

4. Resultados obtenidos:

Sistema fotovoltaico flotante propuesto

HelioSea, un sistema fotovoltaico flotante para aprovechar la energía solar en alta mar, combina dos características clave: un seguidor solar de doble eje soportado por una (TLP) (Tension-leg platform) anclada al lecho marino con cables (Figura 2). El primero es una tecnología que se ha aplicado comúnmente en instalaciones fotovoltaicas montadas en tierra, sin embargo, el TLP nunca se había propuesto en el diseño de sistemas FPV. Este diseño persigue un doble objetivo: maximizar la generación de electricidad y proporcionar una estructura fiable capaz de sobrevivir al exigente entorno marino.

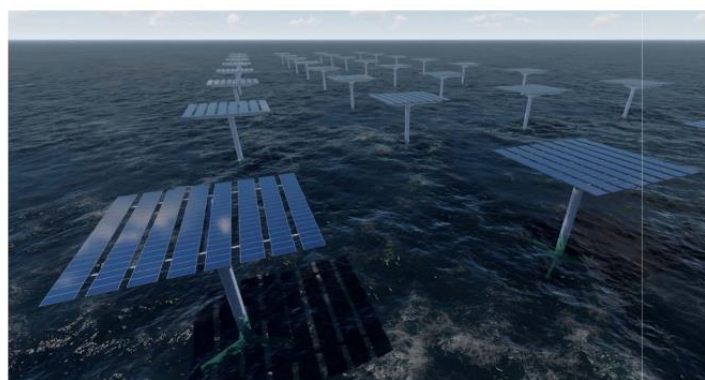
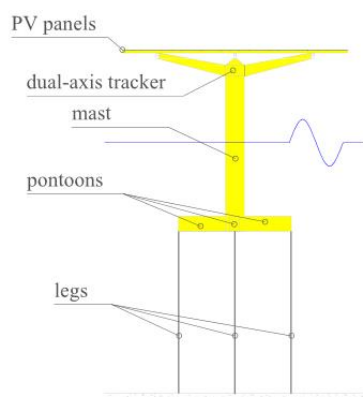


Figura 2. FPV propuesto

Se realizó un primer análisis de generación de energía y de evaluación económica en términos de LCOE (del término en inglés *levelized cost of energy*). La evaluación del LCOE, teniendo en cuenta las incertidumbres y asumiendo costes de referencia de varias tecnologías, sitúa a HelioSea en el rango de 160 a 270 euros/MWh. Aunque estos valores divergen significativamente de los de los sistemas solares montados en tierra, se ajustan a un orden de magnitud a los sistemas eólicos flotantes marinos

y son notablemente más bajos que los de otras energías renovables marinas, como la undimotriz y la mareomotriz.

Con ello, se vio que el seguidor de doble eje maximiza la cantidad de irradiación normal directa que incide en la parte frontal del conjunto durante todo el año, pero también, que este diseño permite aumentar la altura de los módulos solares por encima de la superficie del agua para evitar el embate de las olas y las salpicaduras. En términos de producción, esta característica no sólo puede dar lugar a un aumento del efecto de refrigeración, sino también de los niveles de radiación solar reflejada que llegan a los módulos solares bifaciales.

Por el contrario, la mayor exposición al viento puede comprometer la superestructura, razón por la cual HelioSea incorpora una configuración de supervivencia en la que los paneles se colocan horizontalmente para minimizar la carga del viento.

Además, el TLP proporciona estabilidad a toda la estructura y, en conjunción con el esbelto diseño del mástil, minimiza la carga de las olas. El sistema de amarre garantiza variaciones mínimas en los ángulos de acimut e inclinación de los paneles fotovoltaicos, fundamentales para una conversión eficiente de la energía solar.

Modelización numérica

Se realizó mediante el uso de Ansys Aqwa la modelización numérica hidrodinámica, obteniéndose los siguientes resultados. En condiciones operativas (altura de las olas, 1 m, y velocidad del viento, 5 m/s), el movimiento de cabeceo fue insignificante en términos de generación, con amplitudes de $0,1^\circ$. Incluso en condiciones de supervivencia (5 m y 30 m/s) el movimiento de cabeceo siguió siendo mínimo, con amplitudes de $0,6^\circ$.

Si bien se controlaron las rotaciones, se observó una gran amplitud de oleaje de 5 m en condiciones de supervivencia. Aunque las traslaciones no afectan a la eficiencia de la conversión de la energía solar, sí afectan a la distancia de seguridad necesaria entre unidades. Una planta solar en alta mar con unidades HelioSea de 75 kW de potencia nominal y una disposición hexagonal de las unidades presentaría una densidad de capacidad de 64 MW/km^2 .

La evaluación estructural reveló buenos factores de seguridad para la mayor parte de los elementos de la subestructura. No obstante, los tirantes y los pontones mostraron factores de seguridad inferiores, de 2,3 y 4, respectivamente. Estos resultados, derivados de un diseño inicial que carece de optimización confirman el orden de magnitud global de las dimensiones de la subestructura. Además, se prevé que algunos elementos estructurales puedan someterse a una reducción de sección en futuros desarrollos.

Modelización física en tanque de olas

Las pruebas con olas realizadas en la Universidad de Oporto (Figura 3) con un modelo a escala 1:30 arrojaron los resultados presentados a continuación (Figura 4). Para obtener estos resultados se utilizó un generador de olas de tipo pistón capaz de generar olas regulares e irregulares, tanto de cresta larga como corta. Las oscilaciones de la superficie libre del agua se registraron con sondas de olas de tipo resistivo, y los movimientos del dispositivo se registraron con un sistema de captura de movimiento por infrarrojos.

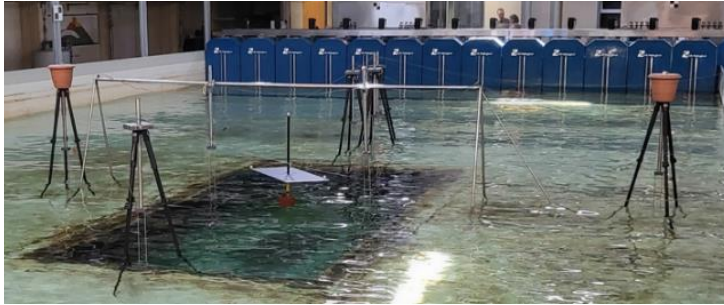


Figura 3. Tanque de olas de la Universidad de Oporto

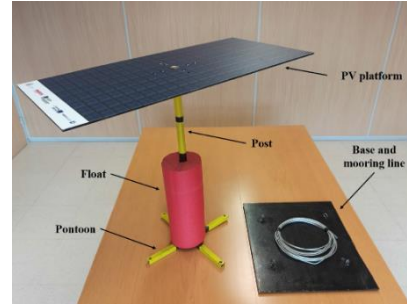


Figura 4. Modelo a escala 1:30

Se reprodujeron un total de 27 casos de oleaje para caracterizar la respuesta de movimiento de la estructura de HelioSea a las olas. Con ello se determinó que, para un TLP, los movimientos en horizontal (oleaje, balanceo y guiñada) predominaron sobre los movimientos en el plano vertical (balanceo, cabeceo y oscilación), muy limitados por la rigidez del sistema de fondeo.

La respuesta general del dispositivo para los casos de prueba con menos de 20 s de periodo fue bastante limitada, lo que demuestra la estabilidad de la estructura en condiciones típicas de funcionamiento. El periodo natural de oscilación resultó cercano a 24 s (en escala prototipo o 1:1), quedando este valor fuera del rango frecuencias del oleaje habituales en el mar.

Las amplitudes máximas de movimiento registradas durante las pruebas subrayan la excepcional estabilidad del dispositivo en condiciones operativas. Este aspecto de HelioSea es crucial, tanto desde el punto de vista estructural como de la productividad, ya que los reducidos movimientos de rotación evitan pérdidas por desalineación de los paneles y garantizan el funcionamiento eficaz del sistema de seguimiento solar.

Modelización física en túnel de viento

Finalmente, se construyó el modelo a escala 1:100 con el que se realizarán los ensayos en el túnel de viento. Se realizó un diseño aproximado de HelioSea, ideando un dispositivo que permite inclinar los paneles solares desde los 0 a los 40 grados, con el objetivo de ver el comportamiento de la estructura para diferentes inclinaciones de los paneles, y frente a direcciones y velocidades de viento distintas.

Por lo tanto, el modelo a escala (Figura 7) se divide en una parte superior móvil con la que se puede cambiar de inclinación los paneles solares (Figura 5) y otra parte fija que nunca se mueve, formada por el mástil y las patas que se unen a una placa rectangular para dar estabilidad al modelo dentro de la cámara de ensayo (Figura 7).

Dicho modelo se diseñó con Inventor, el software de CAD 3D y se imprimió posteriormente en una impresora 3D de la Universidad de Oviedo empleando material PLA con hilo de dos colores, negro y blanco.



Figura 5. Parte móvil del modelo a escala 1:100



Figura 6. Modelo a escala 1:100

Figura 7. Parte fija del modelo a escala 1:100

5. Trabajos o necesidades futuras

HelioSea introduce características distintivas que facilitan la transición de la tecnología FPV a entornos marinos. Aunque se reconocen áreas de mejora, los prometedores resultados justifican una mayor exploración adicional mediante técnicas numéricas y experimentales. Es por ello, por lo que los esfuerzos posteriores deberán centrarse en la optimización de la geometría, los materiales y los costes energéticos del sistema PVF propuesto, abarcando una gama más amplia de condiciones ambientales, utilizando herramientas numéricas avanzadas y adhiriéndose a la evaluación estructural estandarizada.

Los resultados de las pruebas experimentales tanto en tanque de olas como túnel de viento servirán de guía para el desarrollo futuro de HelioSea, lo que incluye, entre otras cosas, la adaptación del diseño a condiciones menos profundas y un mayor control de las rotaciones de guiñada mediante ajustes en el exceso de flotabilidad, la configuración de la línea de amarre y el rediseño de la sección transversal de los pontones.

Además, se intentará estimar el impacto de las cargas de viento y de las corrientes en el dispositivo, realizando ensayos en el túnel de viento. Será entonces necesario construir el panel solar que se situará encima del modelo a escala impreso en la impresora 3D, en el que se colocarán las tomas de presión con las que obtener los datos buscados.

Con todo ello, la investigación futura se centrará en calibrar un modelo numérico utilizando los datos obtenidos de estas pruebas experimentales, tanto en el tanque de olas como en el túnel de viento, lo que permitirá realizar un análisis completo de la respuesta del dispositivo en condiciones ambientales marinas operativas y extremas.

6. Divulgación de los resultados

Se está trabajando en la publicación de los resultados parciales del proyecto, incluyendo la simulación numérica de HelioSea con un modelo calibrado con los resultados experimentales de tanque de olas. Se prevé además una segunda publicación en forma de artículo que incluya la calibración con los resultados de túnel de viento,

Para ambos se considera una revista indexada en el JCR, incluyendo títulos indexados en las categorías de Civil Engineering o Mechanics, como pueden ser:

- Ocean Engineering
- Marine Structures
- Engineering Structures.

También se consideran títulos de la categoría Energy & Fuels como pueden ser:

- Applied Energy
- Energy
- Renewable Energy

En todos estos títulos los miembros del equipo han publicado ya algún trabajo.

Además, se prevé la comunicación de ellos resultados en algún congreso nacional o internacional. Se está valorando el envío de comunicaciones a:

- 12th INTERNATIONAL WORKSHOP ON MARINE TECHNOLOGY – MARTECH 2025.
<https://sarti.webs.upc.edu/martech/>
- IX CONGRESO INTERNACIONAL DE ESTRUCTURAS. Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). <https://congresoache.com/>

Memoria económica:

1. Gastos:

Añade los gastos finales que has tenido a lo largo del proyecto.

Concepto	Gasto
Personal (IUTA)	6.000 €
Fungibles	0.000 €
Amortización	0.000 €
Otros (Desplazamientos, Inscripciones a Congresos, etc)	0.000 €
TOTAL GASTOS	6.000 €

2. Ingresos:

Añade los ingresos finales que has tenido a lo largo del proyecto. Indica las empresas y las referencias de los proyectos/contratos.

Entidad/Empresa financiadora Ref. Proyecto/Contrato	Concepto	Ingreso
IUTA	Ayuda IUTA: Contratación de personal	3800.00 €
Otras entidades / empresas financiadoras		0.00 €
Financiación propia		0.00 €
TOTAL INGRESOS		3800.00 €

Bibliografía:

- Claus, R., & López, M. (2022). Key issues in the design of floating photovoltaic structures for the marine environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 164, 112502.
- Claus, R., & López, M. (2023). A methodology to assess the dynamic response and the structural performance of floating photovoltaic systems. *Solar Energy*, 262, 111826.
- Claus, R., Soto, F., Cebada, A., López, M., Clemente, D., Giannini, G., & Rosa-Santos, P. (2024). Experimental proof-of-concept of HelioSea: A novel marine floating photovoltaic device. *Ocean Engineering*, 299, 117184.
- DNV GL AS (2021). Design, development and operation of floating solar photovoltaic systems. DNVGL-RP-0584.



Instituto Universitario de Tecnología Industrial de Asturias (IUTA)

Institutu Universitariu de Teunoloxía Industrial d'Asturies
University Institute of Industrial Technology of Asturias

