Herramientas de diseño para energías renovables offshore

Design tools for offshore renewable energy

José-Luis Villate[1], Pablo Ruiz-Minguela[1], Germán Pérez-Morán[1], Vincenzo Nava[1] y Eider Robles[1,2]

[1] TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA) (España)
[2] UPV/EHU. Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9848

1. INTRODUCCIÓN

La eólica marina está creciendo muy rápido con una potencia acumulada de 22 GW y más de 5.000 turbinas instaladas en Europa a finales de 2019 [1] mientras que otras tecnologías renovables en alta mar como la energía mareomotriz o la energía de las olas todavía están en su infancia con una serie de proyectos en el rango de MW [2]. El despliegue eólico offshore se concentra principalmente en áreas con plataforma continental, como el Mar del Norte en Europa, donde se pueden encontrar aguas poco profundas a cientos de kilómetros de la costa. Sin embargo, están surgiendo nuevas soluciones para aguas más profundas (principalmente basadas en plataformas flotantes) que permiten el despliegue eólico marino en muchos lugares del mundo [3].

Las fuentes de energía renovable desempeñan un papel fundamental en la lucha contra el cambio climático. La crisis causada por la covid-19 puede hacer que el mundo olvide esta lucha adoptando medidas económicas perjudiciales para la salud de nuestro planeta. Y esto es lo que trece ministros de la UE en materia de Medio Ambiente y Clima solicitaron a Bruselas. En la misma línea, surge la Alianza Europea para una Recuperación Verde, apoyada por un número cada vez mayor de representantes del mundo político, económico y social. En su manifiesto exigen que el Pacto Verde Europeo [4], aprobado en enero de 2020 con el ambicioso plan de hacer de Europa el primer continente neutral en materia de clima para 2050, sea la salida de la crisis.

De hecho, las fuentes de energías renovables offshore podrían desempeñar un papel crucial en el cumplimiento de los escenarios de energía baja en carbono, que es uno de los seis principios clave de la Recuperación Verde, contribuyendo al mismo tiempo al crecimiento económico y a la creación de empleo. Sin embargo, se necesita una reducción continua de costes para lograr tecnologías más eficientes y rentables. Las herramientas de diseño pueden ayudar a acelerar la reducción de costes en las primeras etapas de desarrollo tecnológico o la planificación de proyectos. El objetivo de este artículo es introducir algunos ejemplos de herramientas de diseño desarrolladas en cuatro proyectos europeos de I+D con el fin de presentar sus principales funcionalidades y proporcionar referencias para su uso y documentación más precisa. Estas herramientas de diseño incluyen modelado numérico multifísico; herramientas para la toma de decisiones durante la fase de planificación y herramientas de innovación estructurada y de evaluación por fases. La Sección 2 describe una metodología de enfoque multifísica para el modelado numérico desde el diseño inicial, hasta la validación experimental del modelo y las pruebas de Hardware In the Loop (HIL), incluida la documentación descargable y los modelos públicos. La Sección 3 describe herramientas de diseño de código abierto para la toma de decisiones a la hora de establecer diferentes alternativas en el despliegue de parques offshore de energía de olas y mareas. Por último, la sección 4 explica nuevas herramientas de diseño centradas en fomentar el pensamiento innovador y evaluar el desarrollo e implementación de conceptos de dispositivos a través de la evaluación de diferentes métricas.

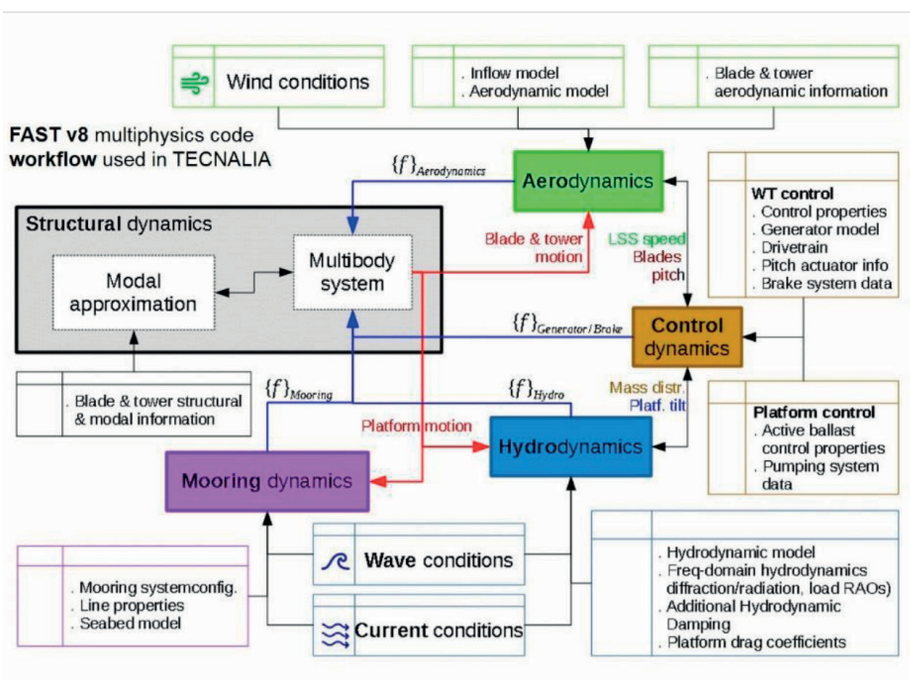


Fig. 1: Flujo de trabajo de código multifísico utilizado en TECNALIA con FAST v8

2. MODELADO NUMÉRICO MULTIFÍSICO

Los modelos numéricos se utilizan en el sector eólico para la simulación del comportamiento de sistemas, subsistemas y componentes con el fin de validar su diseño. En la eólica terrestre, el modelado numérico caracteriza la aerodinámica con el fin de simular las cargas y efectos en diferentes componentes. El objetivo es verificar el diseño estructural de esos componentes o subsistemas. En la eólica marina, se deben añadir los efectos hidrodinámicos con lo que los modelos se vuelven más complejos. Un enfoque multifísico, con modelos aero-hidro-servo-elásticos, permite incluir todos los efectos acoplados a los que se somete un aeroge-

nerador. Los efectos de acoplamiento son aún más complejos cuando se modelan los aerogeneradores flotantes, ya que la turbina se somete a efectos hidrodinámicos que afectan a las cargas aerodinámicas sobre ella: el sistema de fondeo introduce un grado de libertad adicional en comparación con los aerogeneradores offshore fijos. TECNALIA sigue este enfoque multifísico en sus proyectos con los siguientes pasos:

- Definición de la **Base de Diseño**: condiciones del emplazamiento, aerogenerador, estándares de diseño y características de la subestructura,
- Definición de los **Casos de Carga de Diseño:** Casos de carga condicionantes del diseño y conjunto completo de casos de carga de diseño (DLC, por sus siglas en inglés).
- Desarrollo de **modelos numéricos aero-hidro-servo-elásticos completos**, para la simulación de DLCs –validación de diseño-
- **Campañas de ensayo en tanques de olas a escala reducida** para la **calibración y validación del modelo numérico**: selección de los casos de carga, diseño del modelo escalado, seguimiento de ensayos y post-procesamiento de resultados.

Se pueden utilizar diferentes paquetes de software (SW) para desarrollar códigos acoplados para la eólica marina incluyendo SW comercial como ANSYS Structural -cálculo estructural- ANSYS AQWA, WAMIT y OrcaFlex -cálculo hidrodinámico- y SW libre como FAST para los cálculos aerodinámicos -desarrollado por el NREL, Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los EE.UU.

Este enfoque se ha utilizado en el proyecto H2020 LIFES50+ [5] que incluye el diseño de cuatro conceptos flotantes para un aerogenerador de referencia de 10 MW. TECNALIA llevó a cabo el diseño de uno de los conceptos: estructura semi-sumergible de acero NAUTILUS [6]. En la primera etapa, se definió la base de diseño y los casos de carga de diseño para tres emplazamientos diferentes, representativos de diferentes condiciones meteoceánicas y mercados potenciales. Se desarrollaron modelos numéricos aero-servo-elásticos totalmente acoplados para la validación del diseño conceptual [7].

Las cuatro tecnologías de turbinas eólicas flotantes desarrolladas fueron evaluadas sobre la base de cuatro criterios: coste (LCOE – Coste Equivalente de Energía), aspectos ambientales (LCA – Análisis del Ciclo de Vida), análisis de riesgos y rendimiento de turbinas eólicas flotantes (KPI – Indicadores Clave de Desempeño). Con más detalle, el LCOE se puede obtener utilizando (1):

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^{n} \frac{OPEX}{(1+k)^t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{AEP}{(1+k)^t}} \quad (1)$$

En el que CAPEX representa la inversión de capital, OPEX los gastos de explotación, descontado al valor actual, con *k* la tasa de descuento, dividido por la energía producida (AEP, Producción Anual de Energía) a lo largo de la vida operativa de la tecnología, y *n* siendo el número de años del proyecto [8].

La información proporcionada por los desarrolladores de conceptos se analizó utilizando herramientas hidrodinámicas como ANSYS AQWA, OrcaFlex, SIMO RIFLEX y WAMIT, junto con herramientas aerodinámicas como FAST, HWAC2 y BLADED, con el fin de evaluar el comportamiento dinámico de las tecnologías para diferentes condiciones. El trabajo incluyó un punto de referencia en las metodologías de diseño industrial eólico marino fijo en fondo, teniendo en cuenta todas las etapas de industrialización para el desarrollo de un parque eólico: ingeniería, compras, fabricación, transporte, instalación, puesta en marcha, operación y mantenimiento, y desmantelamiento. La metodología se puede encontrar en [9].

Después de la evaluación, dos de los conceptos fueron seleccionados para su posterior desarrollo durante la segunda etapa del proyecto, siendo NAUTILUS uno de ellos. TECNALIA trabajó en el desarrollo de modelado numérico avanzado para un diseño más detallado del aerogenerador flotante. Estos modelos fueron calibrados y validados con los resultados de campañas de ensayo en tanque de olas a escala reducida y túnel de viento. Ambos estudios experimentales aprovecharon los modelos numéricos para diseñar un nuevo procedimiento de prueba, Hardware In the Loop (HIL) que permite combinar la prueba real del prototipo bajo fenómenos físicos (en este caso oleaje o viento) y equipos reales, con modelos matemáticos y simulaciones de un fenómeno (viento u oleaje) y componentes que no son físicamente reproducibles en el entorno de laboratorio. De esta manera, en el tanque de olas las olas se generan físicamente mientras que el empuje del viento se simula con un modelo numérico desarrollado con FAST que reacciona a la excitación del oleaje. El empuje del viento en el aerogenerador flotante se aplica utilizando 6 actuadores -líneas físicas conectadas a la parte superior de la torre- en dos planos horizontales paralelos para simular todas las cargas generadas por el modelo numérico. La metodología y la implementación fueron llevadas a cabo por SINTEF Ocean. En el túnel de viento, el viento físico se complementa con el modelo numérico hidrodinámico desarrollado utilizando los resultados de las pruebas del tanque de olas, para controlar un hexápodo que proporciona los movimientos flotantes de los aerogeneradores [10]. En este caso,

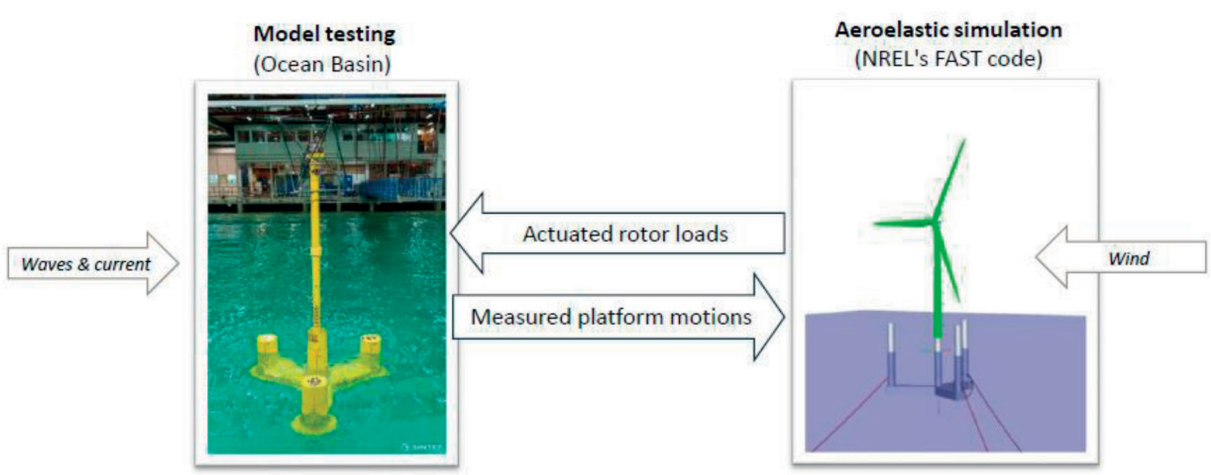


Fig. 2: Configuración HIL (Hardware In the Loop) utilizada para las pruebas de tanque de olas en el proyecto LIFES50+ [11]

las pruebas experimentales y el hexápodo para simular la hidrodinámica fueron desarrollados por la Universidad Politécnica de Milán. Estos nuevos procedimientos de ensayo juegan un papel importante para el desarrollo de modelos numéricos precisos y factibles [11].

Como parte de los resultados públicos de LIFES50+, se pueden descargar varios resultados relacionados con modelos numéricos desde la sección de resultados del sitio web del proyecto [5]. Los documentos D4.2 a D4.8 son informes públicos que tratan diferentes temas de modelado numérico eólico marino flotante. Se puede destacar el documento *D4.2 Definición pública de los dos conceptos de flotador LIFES50+ 10MW*, que proporciona la descripción de los modelos numéricos públicos disponibles para los dos conceptos utilizados en la campaña experimental: NAUTILUS semi-sumergible de acero y Olav Olsen semi-sumergible de hormigón. Los modelos numéricos se desarrollaron utilizando software libre FAST. Tanto los modelos como los informes se pueden descargar en [12].

3. HERRAMIENTAS DE TOMA DE DECISIONES DURANTE LA FASE DE PLANIFICACIÓN

Uno de los factores más críticos que determina la viabilidad de un proyecto renovable offshore es tomar las decisiones técnicas adecuadas durante la etapa de diseño. En la eólica marina, la experiencia ha demostrado que las decisiones tomadas en las primeras etapas de diseño pueden conducir a importantes ahorros en la inversión total del proyecto. Para lograr estos ahorros, los promotores necesitan tener herramientas de decisión adecuadas para evaluar el impacto de las diferentes

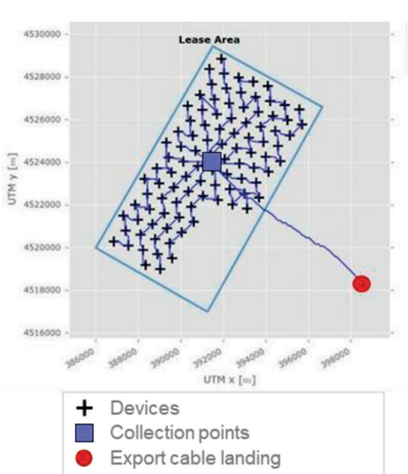


Fig. 3: Diseño optimizado de parque, obtenido con herramientas DTOcean v2.0 (reproducción de Data Only Greater – https://www.dataonlygreater.com con permiso de M. B. R. Topper)

alternativas técnicas a través de indicadores globales, tales como rendimiento energético, costes a lo largo de la vida útil, fiabilidad, mantenimiento o aceptación ambiental/social.

A lo largo de los años, TECNALIA ha desarrollado una amplia gama de herramientas para apoyar el análisis de costes, riesgos técnicos y riesgos financieros asociados a diferentes alternativas de diseño para el despliegue de parques renovables marinos:

- Los resultados se presentan en un idioma **fácil de entender** por las principales partes interesadas que participan en la decisión final de inversión (ya sean promotores públicos o privados).
- Un **diseño intuitivo** que proporciona control al usuario.
- **Arquitectura modular** que facilita la **integración** con otras herramientas de ingeniería comerciales o realizadas a medida.
- Uso de bases de datos **de componentes y sistemas de la planta y para la logística** (buques, puertos, equipos, ...).
- **Análisis de sensibilidad** y optimización del diseño.

El proyecto DTOcean, financiado con fondos del FP7 [13], produjo una primera generación de herramientas de diseño de código abierto y de libre disposición para arrays de energía de olas y mareas.

Estas herramientas se han utilizado en los principales proyectos de energía de mareas y olas, incluyendo el proyecto mareomotriz MeyGen que consta de cuatro turbinas que totalizan 6MW recientemente instaladas en el Reino Unido, y una aplicación de energía de las olas por parte de Sandia National Laboratories en los EE.UU. (véase por ejemplo [14]). Las herramientas de software permiten al usuario llevar a cabo un diseño óptimo de los subsistemas (es decir, disposición de los captadores, infraestructura eléctrica, fondeos y cimentaciones, procedimientos de instalación y planes de operaciones y mantenimiento) necesarios para poner en funcionamiento una serie de convertidores de energía oceánica (herramientas de despliegue), teniendo en cuenta la viabilidad económica del proyecto, pero también evaluando su impacto ambiental y su fiabilidad (herramientas de evaluación).

El principal indicador económico clave de rendimiento (KPI) evaluado en el conjunto de herramientas DTOcean es el coste equivalente de la energía LCOE, tal como se define en (1). Dicha métrica ofrece una visión holística del rendimiento de los sistemas y se puede optimizar para tomar una decisión sobre el diseño final del parque. Sin embargo, la modularidad del software y la capacidad de realizar análisis de sensibilidad, permite al usuario lograr una mejor comprensión de la relevancia de un subsistema en el equilibrio de la planta. Por ejemplo, en términos de modelado hidrodinámico de interacciones entre convertidores de energía oceánica (OEC), esto se ha resuelto a través de un método algebraico exacto (para oleaje) y modelado paramétrico (para mareas), mientras que el diseño óptimo del parque en términos de energía capturada se obtiene utilizando diferentes algoritmos de optimización evolutiva (ver [15]). Como conclusión general de este estudio de sensibilidad, basado en la hidrodinámica de los dispositivos, resulta que los dispositivos colocados a distancias superiores a 8-10 veces el diámetro del dispositivo (en caso de absorbentes puntuales) no aparecen interacciones hidrodinámicas significativas.

Como se ha dicho anteriormente, en el marco de las herramientas DTOcean, se proporcionó un conjunto de herramientas para la evaluación del impacto ambiental y la fiabilidad del sistema.

Sin embargo, durante el proyecto OPERA [16] se elaboró un enfoque más integrado y global: el modelo desarrollado en este proyecto es un *Modelo Económico Global*, proporcionando una evaluación económica basada en LCOE, realiza una evaluación del ciclo de vida (LCA) y calcula el coste socioeconómico de la energía (SCOE) [17].

Si bien para la LCOE la definición de Eq. (1) sigue siendo aplicable, en el caso de LCA y SCOE son métricas relacionadas respectivamente con los posibles impactos ambientales de las actividades del proyecto en términos de Potencial de Calentamiento Global (GWP) y otros impactos socioeconómicos del sector energético. El *Modelo Económico Global* ha sido desarrollado para aprovechar las fortalezas de los modelos preexistentes ya que integra los tres modelos descritos anteriormente y un modelo de operación y mantenimiento (O&M) a medida, basado en el mantenimiento preventivo y correctivo.

El proyecto H2020 DTOceanPlus [18] está ampliando la funcionalidad del conjunto integrado DTOcean de herramientas de diseño para tecnologías de energía oceánica, incluidos subsistemas, dispositivos completos de captura de energía y grupos de dispositivos. Las herramientas de software permiten mejorar el diseño global del proyecto junto con el proceso

de evaluación teniendo en cuenta el rendimiento energético, el coste a lo largo de la vida útil, la fiabilidad y los impactos socioeconómicos.

4. HERRAMIENTAS PARA LA INNOVACIÓN ESTRUCTURADA Y LA EVALUACIÓN POR FASES

Las tecnologías renovables marinas, en particular olas y mareas, requieren innovaciones destinadas a aumentar la eficiencia, la fiabilidad y la supervivencia con el fin de lograr soluciones rentables. Estas innovaciones deben poder evaluarse en las primeras etapas de desarrollo, ya que el proceso para validarlas en condiciones reales en el mar es muy costoso.

La segunda generación de herramientas de diseño DTOceanPlus apoyará todo el proceso de innovación tecnológica desde el concepto hasta el desarrollo y la implementación. La selección del concepto tecnológico está habilitada por la herramienta de diseño para la *Innovación Estructurada*, el desarrollo de tecnología está respaldado por la herramienta de diseño para la *Evaluación por Fases*, mientras que la implementación de tecnología se guía por las herramientas de diseño para la *Implementación*. Estas herramientas se combinarán con herramientas de *Evaluación* para medir la mejora de la fiabilidad, el rendimiento y la supervivencia de los sistemas de energía oceánica y analizar el impacto del diseño en el rendimiento energético, los costes de O&M y el medio ambiente. Si bien las herramientas de *Innovación Estructurada* y de *Evaluación por Fases* representan una novedad, el alcance de las herramientas de diseño para la *Implementación* y las herramientas de *Evaluación* se ampliará con respecto al conjunto de herramientas de la plataforma DTOcean con el fin de proporcionar nuevas funcionalidades, como la Caracterización del Emplazamiento o la Transformación de Energía, que cubren áreas en las que DTOcean era particularmente débil.

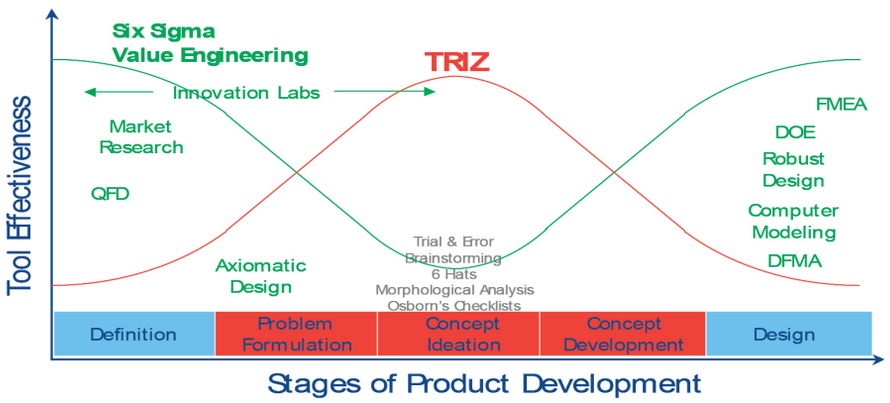


Fig. 4: Efectividad de las herramientas según la fase de desarrollo del producto [20]

- **Herramienta de diseño de Innovación Estructurada para la selección de conceptos tecnológicos.** Para lograr una verdadera comercialización, el sector de la energía oceánica debe alcanzar primero un nivel mucho mayor de consenso en el diseño. Un gran número de conceptos tecnológicos compiten por entrar y avanzar en el proceso de desarrollo, particularmente en el sector de la energía de las olas. Dada la limitada cantidad de recursos disponibles para el sector, esta falta de consenso en el diseño presenta un desafío significativo para los desarrolladores de tecnología (que necesitan seleccionar un número único o pequeño de conceptos para continuar el desarrollo) y los financiadores (que necesitan seleccionar un número único o pequeño de conceptos para invertir). A modo de comparación, el sector de la energía eólica más maduro y significativamente comercializado se ha centrado en gran medida en el concepto de turbina de eje horizontal, lo que permite centrar los recursos de desarrollo en aumentar la eficiencia del proceso de innovación global. La Innovación Estructurada tiene una sólida trayectoria en sectores maduros y comercializados como el aeroespacial y automoción. La metodología de Innovación Estructurada representa, por tanto, una técnica para estimular el rigor, el pensamiento innovador organizado y coherente, la selección de tecnología y la evaluación de impacto. Esta técnica combina funciones como la comprensión de la misión, la visión futura, el mercado (incluyendo el potencial de explotación comercial, la competencia, la diferenciación, el valor social, etc.) y el desarrollo de posibles soluciones. Esto se describe ampliamente en la norma británica BS7000-1, "Design Management Systems, Part 1 – Guide to Managing Innovation" entre otros [19]. Esta metodología está siendo desarrollada en DTOceanPlus de acuerdo con el concepto mostrado en *la Figura 4*.
- **Herramienta de diseño para la Evaluación por Fases para el desarrollo tecnológico.** Dentro del proceso de desarrollo tecnológico, es necesario adoptar un método estructurado para evaluar y medir el proceso de desarrollo de nuevos conceptos. Esto garantiza que el proceso de desarrollo tecnológico proporcione un método estructurado basado en pruebas para reevaluar la idoneidad continua de un concepto que va a ser financiado. Un proceso de desarrollo por etapas define métricas de evaluación

Herramienta	Usuario- TRL	Descripción	Referencias de proyectos
Herramienta de diseño de Innovación Estructurada	Desarrolladores tecnológicos TRL bajos (1-3)	Selección de conceptos tecnológicos. Técnicas para estimular el rigor, el pensamiento innovador organizado y consistente, la selección de conceptos tecnológicos y la evaluación de impacto	Proyecto DTOceanPlus [18]
Herramienta de diseño para la Evaluación por Fases	Financiadores públicos y desarrolladores de tecnología Todos los TRL (1-9)	Proceso de desarrollo tecnológico. Evaluación de las métricas para evaluar el desarrollo de tecnologías de energía oceánica desde el concepto hasta el despliegue	Proyecto DTOceanPlus [18]
Herramientas de diseño de Implementación y Evaluación	Desarrolladores e inversores de proyectos TRL medio-alto (5-9)	Diseñar herramientas para apoyar el análisis de costes, riesgos técnicos y riesgos financieros asociados con diferentes alternativas de diseño para el despliegue de parques renovables offshore en la etapa de diseño	LIFE50+ [5] Proyecto DTOcean [13] Proyecto OPERA [16], [17] Proyecto DTOceanPlus [18]

Tabla 1: Herramientas de diseño para energías renovables offshore en diferentes etapas de desarrollo

de diseño adecuadas que deben supervisarse a lo largo del desarrollo de la tecnología y umbrales para estas métricas que deben cumplirse para demostrar un progreso exitoso. DTOceanPlus está desarrollando y avanzando procesos para la evaluación por fases conjuntamente con esfuerzos internacionales actuales (liderados por WES, OCEANERA-NET y el Departamento de Energía de los Estados Unidos) con el fin de definir métricas adecuadas para las tecnologías de energía oceánica.

El marco para la Evaluación por Fases que se está desarrollando en DTOceanPlus es una estructura que define la configuración para la evaluación por fases, incluyendo qué áreas se han de evaluar, en qué nivel de detalle y con qué puntos de referencia para el éxito. Los marcos de Evaluación por Fases necesitan hacer uso de las herramientas de diseño de Implementación y Evaluación para la evaluación de métricas que son las medidas de éxito que definen el rendimiento de una tecnología. Las herramientas de Implementación proporcionan información de diseño detallada de todos los componentes de un parque, incluida una variedad de alternativas para cada uno de los subsistemas (es decir, tipo de captador de energía, diferentes sistemas de extracción de potencia, opciones mecánicas y eléctricas) para una mejor evaluación.

Al guiar al usuario hacia la evaluación de estas métricas, las herramientas de diseño para la Evaluación por Fases permitirán evaluar el desarrollo de tecnologías de energía oceánica desde el concepto hasta el despliegue. Los desarrolladores de tecnología podrán utilizar estas herramientas para asegurarse de que están en el camino hacia una implementación exitosa y reevaluar las decisiones de diseño a medida que avanzan. Los financiadores de tecnología podrán utilizar estas herramientas para identificar las tecnologías más adecuadas, tanto para la decisión inicial de inversión como para su continuación.

Para la integración de estas herramientas será esencial un conjunto de modelos digitales para los sistemas de energía oceánica. Estos modelos proporcionarán un marco estándar para la descripción de subsistemas, dispositivos y grupos de captadores. Estos modelos no sólo proporcionarán un método de comunicación entre las diversas herramientas DTOceanPlus, sino que también proporcionarán un lenguaje común para todo el sector de la energía oceánica. Este lenguaje común mejorará significativamente la capacidad de las partes interesadas para trabajar en colaboración, acelerando así el desarrollo del sector, al tiempo que apoyará aún más a realizar comparaciones objetivas entre diversas tecnologías.

5. CONCLUSIONES

Las energías renovables offshore van a desempeñar un papel crucial en un futuro sistema energético descarbonizado, al tiempo que contribuyen al crecimiento económico sostenible y a la creación de empleo estable, siempre que se disponga de tecnologías rentables y competitivas. La investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación son sin duda parte de la solución para una reducción continua de costes de las tecnologías renovables offshore. Las herramientas de diseño se pueden utilizar en diferentes etapas de desarrollo tecnológico o planificación del despliegue para facilitar la toma de decisiones y acelerar la aceptación del mercado.

Este artículo ha presentado resultados públicos (herramientas de código abierto y documentos públicos) que describen una metodología para el enfoque multifísico cuando se aborda un nuevo proyecto, incluidos documentos y modelos descargables, y un conjunto de diferentes herramientas de diseño producidas por cuatro proyectos financiados con fondos europeos sobre energía eólica marina, oleaje y mareas, como se muestra en la Tabla 1.

- El modelado numérico multifísico permite incluir todos los efectos acoplados a los que se somete un aerogenerador offshore, durante diferentes etapas de diseño: conceptual, básico y detallado.
- Las simulaciones dinámicas complementadas y calibradas con experimentos a escala reducida, se utilizan para la validación del diseño en las diferentes etapas del desarrollo tecnológico.

REFERENCIAS

[1] WindEurope, "Offshore wind in Europe. Key trends and statistics 2019," February 2020.

[2] Ocean Energy Systems Annual Report: An overview of Ocean Energy activities in 2018.

[3] GLOBAL OFFSHORE WIND REPORT 2020, GWEC, 5 August 2020.

[4] European Commission, European Green Deal

[5] www.lifes50plus.eu

[6] http://www.nautilusfs.com/en/nuestra-oferta/producto/

[7] Galván J, Sánchez-Lara MJ, Mendikoa I, et al. "NAUTILUS-DTU10 MW Floating Offshore Wind Turbine at Gulf of Maine: Public numerical models of an actively ballasted semisubmersible". IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 2018. Vol. 1102. doi :10.1088/1742-6596/1102/1/012015.

[8] Lerch, M., De-Prada-Gil, M., Molins, C. & Benveniste, G. (2018). Sensitivity analysis on the levelized cost of energy for floating offshore wind farms. Sustainable Energy Technologies and Assessments 2018.

[9] Matha D, Perez-Moran G., Müeller K, et al. "Comparative analysis of industrial design methodologies for fixed-bottom and floating wind turbines". Proceedings of the ASME 35th international conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, June 2016. Vol 6. doi:10.1115/OMAE2016-54920.

[10] Belloli M, Bayati I, Facchinetti A, et al. "A hybrid methodology for wind tunnel testing of floating offshore wind turbines" Ocean Engineering, August 2020, vol. 210, https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107592

[11] Maxime Thys, Lene Eliassen, Petter A. Berthelsen, Valentin Chabaud, Thomas Sauder, "Documentation verification and validation of real-time hybrid model tests with the 10MW OO-Star wind floater" Presentation at DeepWind 2018 Conference.

[12] https://rwt.windenergy.dtu.dk/dtu10mw/dtu-10mw-rwt/tree/master/aeroelastic_models/fast.

[13] https://www.dtoceanplus.eu/About-DTOceanPlus/History.

[14] Topper MBR, Nava V, Collin AJ, et al. "Reducing Variability in the Cost of Ocean Energy Array". Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2019, in press.

[15] Mercadé-Ruiz P, Nava V, Topper MBR, et al. "Layout optimisation of wave energy converter arrays". Energies, August 2017. Vol 10 -9,1262. doi:10.3390/en10091262.

[16] http://opera-h2020.eu/

[17] OPERA Deliverable D7.2. "Operating data input for models of levelised and society cost and life cycle assessment for wave energy". 2017.

[18] https://www.dtoceanplus.eu/.

[19] Dale M, Best C. "Quality techniques in action". Automotive Engineer. 1988. Vol. 13-4, p. 44-7.

[20] Roberts H. "TRIZ Overview Design: Theory of Inventive Problem Solving". Powerpoint slides. GE, 2011. [Online].

AGRADECIMIENTOS

Este artículo se basa en los resultados obtenidos en 4 proyectos financiados por fondos europeos:

- DTOcean, LIFES50+, OPERA y DTOceanPlus
- DTOcean fue financiado por la UE 7th Programa Marco, en virtud del Acuerdo de Subvención no 608597.
- LIFES50+ ha recibido financiación del Programa Horizon2020 de la UE en virtud del Acuerdo de subvención no 640741.
- OPERA ha recibido financiación del Programa Horizon2020 de la UE en virtud del acuerdo de subvención no 654444.
- DTOceanPlus ha recibido financiación del Programa Horizon2020 de la UE en virtud del acuerdo de subvención no 785921.

El contenido de este artículo refleja únicamente la opinión de los autores y la Agencia Ejecutiva de Innovación y Redes (Innovation and Network Executive Agency) no es responsable de ningún uso que pueda hacerse de la información que contiene.