

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA ENERGÉTICA SOSTENIBLE**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***VALORACIÓN DEL IMPACTO DE LAS
INNOVACIONES EN ENERGÍA EÓLICA
FLOTANTE DESARROLLADAS EN EL
PROYECTO MATHEO***

Estudiante
Director
Departamento
Curso académico

Escalona Corral, Ana
Blanco Ilzarbe, Jesús María
Ingeniería Energética
2020/2021

BILBAO, 24 DE JUNIO DE 2021

CONTENIDO

RESUMEN	4
LISTA DE ACRÓNIMOS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	8
1 INTRODUCCIÓN A LA EVOLUCIÓN DE LA EÓLICA FLOTANTE Y SU CONTEXTO	9
1.1 Evolución de la energía eólica flotante	9
1.2 Papel de las innovaciones	10
2 OBJETIVOS, ALCANCE Y BENEFICIOS	11
3 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DEL PROYECTO Y METODOLOGÍA	13
4 ESTADO DEL ARTE RELATIVO A LAS INNOVACIONES EN EÓLICA OFFSHORE	18
4.1 Estudios realizados sobre innovaciones	18
4.2 Áreas de innovación en energía eólica flotante	18
5 IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DEL LCOE	22
5.1 Estudio general de los costes en un parque eólico flotante	22
5.2 Identificación de variables críticas	24
5.2.1 Fabricación	24
5.2.2 Transporte e instalación	25
5.2.3 Mantenimiento	27
5.2.4 Producción de energía	29
5.2.5 Variables temporales, financieras y generales	30
5.3 Recomendaciones para la definición de futuras áreas de investigación	32
6 EVALUACIÓN DE LAS INNOVACIONES DESARROLLADAS EN MATHEO	34
6.1 Proyecto MATHEO	34
6.1.1 Objetivos del proyecto	35
6.1.2 Innovaciones desarrolladas	35
6.2 Resumen del procedimiento de evaluación de las innovaciones	36
6.3 Innovación I1: Enfoques Híbridos Avanzados para la interacción fluido estructura	36
6.3.1 Objetivo inicial de la innovación	36
6.3.2 Desarrollo de la innovación	36
6.3.3 Evaluación del impacto de la innovación	37
6.4 Innovación I2: Deep Learning para monitorización inteligente	43

6.4.1	Objetivo inicial de la innovación	43
6.4.2	Desarrollo de la innovación	43
6.4.3	Evaluación del impacto de la innovación	44
6.5	Innovación I3: SPH para la interacción fondo estructura	49
6.5.1	Objetivo inicial de la innovación	49
6.5.2	Desarrollo de la innovación	49
6.5.3	Evaluación del impacto de la innovación	50
6.6	Comparación de los impactos de las tres innovaciones	59
7	METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO	61
7.1	Descripción de tareas	61
7.2	Diagrama de Gantt	62
7.3	Presupuesto	63
8	CONCLUSIONES	64
9	REFERENCIAS	65
	ANEXO I – GUION DE LAS ENTREVISTAS PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE INNOVACIONES	68
	ANEXO II – EJEMPLOS DE LA UTILIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA	70

RESUMEN

ES: En el proyecto MATHEO, financiado por el Gobierno Vasco a través del programa de ayudas a la investigación colaborativa Elkartek, se han perseguido tres líneas de investigación con el objetivo de desarrollar modelos matemáticos en la frontera del conocimiento que faciliten la caracterización de la interacción de grandes estructuras con el medio, con aplicación particular en la energía eólica flotante. En este proyecto se estudian las innovaciones desarrolladas en MATHEO cuantificando su impacto sobre el LCOE utilizando una herramienta y un protocolo de evaluación de innovaciones desarrollados ambos con el objetivo de ser utilizados en este proyecto. Como estudio paralelo se trata, además, de identificar las variables críticas que serán las susceptibles a variaciones que pueden causar cambios significativos en los costes, la producción de energía y sobre el LCOE, con el propósito de poder definir áreas de innovación significativas para futuros proyectos.

EUS: Elkartek elkarlaneko ikerketarako laguntza-programaren bidez Eusko Jaurlaritzak finantzaturako MATHEO proiektuan, hiru ikerketa-ildo lortu nahi izan dira, ezagutzaren muga eredu matematikoak garatzeko, egitura handiek ingurunearekin duten interakzioaren karakterizazioa errazteko, energia eoliko flotagarrian bereziki aplikatuta. Proiektu honetan MATHEO garatutako berrikuntzak aztertzen dira, eta LCOE n dute eragina kuantifikatzen da. Horretarako, berrikuntza horiek ebaluatzeko garaturiko tresna eta protokolo bat erabili dira. Azterlan paralelo gisa, gainera, kostuetan, energiaren ekoizpenean eta LCOE n aldaketa esanguratsuak eragin ditzaketen aldagaiak identifikatu nahi dira, etorkizuneko proiektuetarako berrikuntza-arlo esanguratsuak definitu ahal izateko.

EN: In the MATHEO project, funded by the Basque Government through the Elkartek collaborative research aid program, three lines of research have been pursued with the aim of developing mathematical models in the knowledge barrier that enable the characterization of the interaction between large structures and the environment, applied to floating offshore wind. In this project, the innovations developed in MATHEO are studied, quantifying their impact on the LCOE using a tool and an innovation evaluation protocol, both custom developed to be used in this project. As a parallel study, critical variables that will be susceptible to variations that can cause significant changes in costs, energy production and the LCOE are identified, in order to be able to define significant areas of innovation for future projects.

PALABRAS CLAVE

Offshore, eólica flotante, impacto de innovaciones, LCOE

LISTA DE ACRÓNIMOS

AEP	Annual Energy Production - producción anual de energía
AHTS	Anchor handling and tug supply – buque de manejo de anclas
CAPEX	Capital expenses – costes totales de construcción / de capital
CFD	Computational Fluid Dynamics – mecánica de fluidos computacional
CRI	Commercial Readiness Index
D&D	Diseño y desarrollo
DECEX	Decommissioning expenses – costes de desmantelamiento
FCB	Factor de carga bruto
LCOE	Levelized Cost of Energy – coste nivelado de la energía
M€	Millones de euros
O&M	Operación y Mantenimiento
OPEX	Operational expenses – costes de operación
ROV	Remotely Operated Vehicle – vehículo operado remotamente
RNA	Rotor nacelle assembly – conjunto rotor góndola
T&I	Transporte e Instalación
TLP	Tension Leg Platform – plataforma de líneas tensionadas
TRL	Technology Readiness Level - nivel de madurez tecnológica
WACC	Weighted Average Cost of Capital

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: TRL de subestructuras para eólica flotante [1]	9
Figura 2: Evolución histórica del LCOE en eólica ([7] [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15])	10
Figura 3: Fórmula y parámetros para el cálculo del LCOE.....	13
Figura 4: Descripción gráfica del LCOE [4].....	14
Figura 5: Diagrama de proceso simplificado de la fase 2 de la entrevista [4].....	15
Figura 6: Estructura de la herramienta de cálculo de costes y evaluación de innovaciones.....	16
Figura 7: Formulario de un nuevo análisis de sensibilidad	16
Figura 8: Estructura de la ventana Evaluación de innovaciones.....	17
Figura 9: Diagrama explicativo de la incorporación el modelo tecno económico de la evaluación del impacto de una innovación	17
Figura 10: Diagrama de un parque eólico flotante y sus componentes (adaptado de BOEM [31])	18
Figura 11: Desglose de costes de construcción.....	22
Figura 12: Desglose de costes de operación y mantenimiento	23
Figura 13: Desglose de costes de desmantelamiento	23
Figura 14: Distribución de los costes de fabricación	24
Figura 15: Sensibilidad del LCOE ante las variables relacionadas con la fabricación.....	25
Figura 16: Distribución de los costes de transporte e instalación	26
Figura 17: Sensibilidad del LCOE ante las variables relacionadas con el transporte e instalación	26
Figura 18: Sensibilidad del LCOE ante las variaciones en los costes de las embarcaciones utilizadas en el transporte e instalación	27
Figura 19: Sensibilidad del LCOE ante las variables relacionadas con el mantenimiento	28
Figura 20: Sensibilidad de la AEP ante factores que afectan a la disponibilidad del parque.....	29
Figura 21: Estudio de sensibilidad de la producción anual de energía	30
Figura 22: Sensibilidad del LCOE ante la producción anual de energía	30
Figura 23: Sensibilidad del LCOE ante el número de aerogeneradores del parque.....	31
Figura 24: Sensibilidad del LCOE ante la vida útil del parque	31
Figura 25: Sensibilidad del LCOE ante la tasa de descuento	32
Figura 26: Participantes y empresas y entidades interesadas en el proyecto MATHEO	34
Figura 27: Definiciones de los distintos TRLs según la Comisión Europea [34]	35
Figura 28: Simulación por medio de CFD estudiada en la innovación [35].....	37

Figura 29: Valoración del impacto de la innovación I1 por diferentes informantes.....	38
Figura 30: Variación del LCOE en función de variaciones en los costes de elementos auxiliares de las subestructuras	41
Figura 31: Variación del LCOE en función de variaciones en el coste de transporte e instalación de los conjuntos aerogenerador-subestructura	42
Figura 32: Impacto de la innovación I1 sobre el LCOE	42
Figura 33: Proceso de diagnóstico de fallo mediante una red neuronal [36].....	43
Figura 34: Valoración del impacto de la innovación I2 por diferentes informantes.....	45
Figura 35: Impacto de la innovación I2 sobre el OPEX, AEP y LCOE.....	48
Figura 36: Resultados de la modelización SPH de un ancla de arrastre [37]	49
Figura 37: Valoración del impacto de la innovación I3 por diferentes informantes.....	51
Figura 38: Análisis de sensibilidad de los impactos de la innovación I3 sobre los costes del sistema de fondeo	55
Figura 39: Análisis de sensibilidad de los impactos de la innovación I3 sobre los costes del sistema de conexión a la red	56
Figura 40: Sensibilidad del LCOE ante diferentes valores de la tasa de descuento	56
Figura 41: Análisis de sensibilidad sobre el LCOE de los impactos propuestos en la innovación I3	57
Figura 42: Impacto de la innovación I3 sobre el LCOE	59
Figura 43: Impacto de las innovaciones desarrolladas en MATHEO sobre el LCOE, CAPEX, OPEX, DECEX y AEP	60
Figura 44: Diagrama de Gantt del proyecto	62
Figura 45: Uso horario de los recursos.....	62
Figura 46: Costo horario de los recursos.....	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Innovaciones relevantes en el sector eólico flotante según [20], [29] y [30] (1/3)	19
Tabla 2: Innovaciones relevantes en el sector eólico flotante según [20], [29] y [30] (2/3)	20
Tabla 3: Innovaciones relevantes en el sector eólico flotante según [20], [29] y [30] (3/3)	21
Tabla 4: Panel de expertos para la innovación I1.....	37
Tabla 5: Aceptación o rechazo de los impactos potenciales de la innovación I1	40
Tabla 6: Impactos aceptados de la innovación de la innovación I1 y su cuantificación	41
Tabla 7: Panel de expertos para la innovación I2.....	44
Tabla 8: Aceptación o rechazo de los impactos potenciales de la innovación I2	46
Tabla 9: Impactos aceptados de la innovación de la innovación I2 y su cuantificación	48
Tabla 10: Panel de expertos para la innovación I3.....	50
Tabla 11: Aceptación o rechazo de los impactos potenciales de la innovación I3	52
Tabla 12: Impactos aceptados de la innovación de la innovación I3 y su cuantificación	54
Tabla 13: Costo de los recursos.....	63
Tabla 14: Presupuesto del proyecto	63
Tabla 15: Ejemplo de análisis de sensibilidad realizado en la herramienta utilizada	70
Tabla 16: Ejemplo evaluación del impacto de una innovación realizado en la herramienta utilizada	70

1 INTRODUCCIÓN A LA EVOLUCIÓN DE LA EÓLICA FLOTANTE Y SU CONTEXTO

En esta sección se va a presentar la evolución experimentada por el sector eólico flotante y el papel que juegan las innovaciones en su desarrollo.

1.1 EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA EÓLICA FLOTANTE

La energía eólica está experimentando una transición hacia la eólica offshore, fija al fondo y flotante, en busca de velocidades de viento mayores y más constantes. En Europa se está desarrollando la eólica offshore fija al fondo aprovechando la gran plataforma continental del Mar del Norte y el Báltico, pero el 80% del recurso eólico marino se encuentra a más de 60 metros de profundidad [1], y en particular en la península Ibérica es necesaria la implantación de subestructuras flotantes para aprovechar este recurso. En 2017 se consideró que tanto las tecnologías semisumergibles como las tipo spar contaban con prototipos probados y que por lo tanto su Technology Readiness Level (TRL) era superior a 8, mientras que para las subestructuras tipo barge y TLP aún no se había alcanzado este nivel de TRL [1]. Como se puede ver en la figura, las barge ya están también en ese nivel de TRL, gracias al despliegue del prototipo de IDEOL en Francia y en Japón. El Commercial Readiness Index (CRI) es un parámetro desarrollado por la Agencia Australiana de Energías Renovables que evalúa la madurez comercial de tecnologías de generación de energía [2], y se considera que en la actualidad para el sector eólico flotante se cuenta con un CRI2 [3], lo que supone que la tecnología está lista para llevar a cabo ensayos a escala comercial.

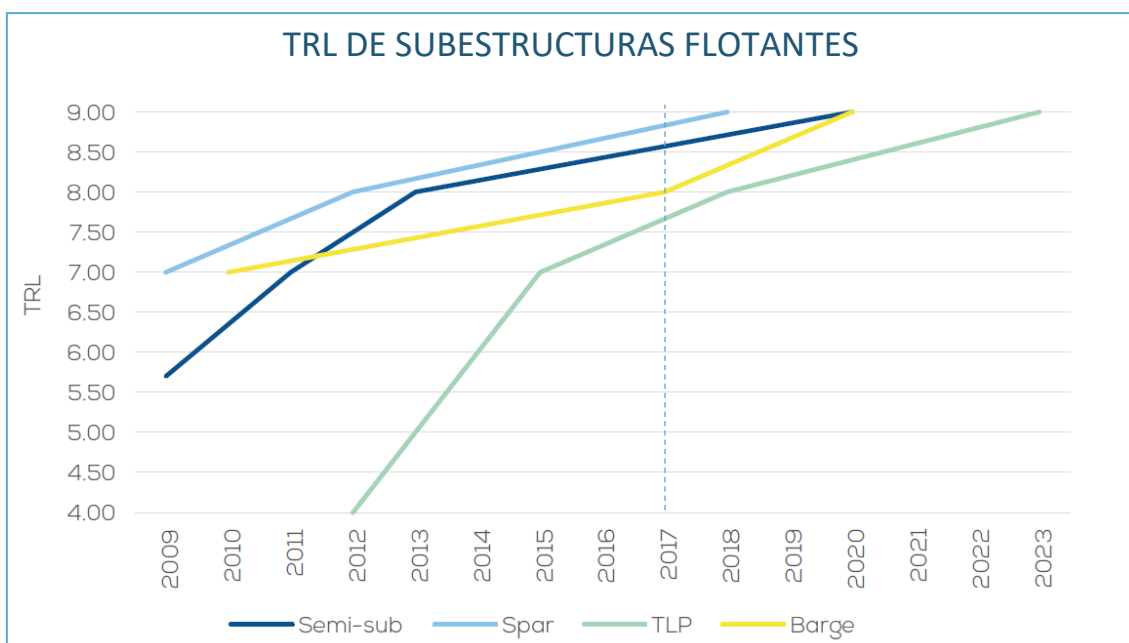


Figura 1: TRL de subestructuras para eólica flotante [1]

Pero para que esta tecnología sea competitiva frente al resto de tecnologías de generación de energía renovable ha de reducir sus costes. El LCOE (Levelized Cost Of Energy) representa el

cociente del valor actual neto de todos los costes del proyecto y el valor actual neto de la energía producida, y su valor es el precio que la electricidad ha de tener para que en un proyecto concreto los beneficios igualen a los costes. El LCOE permite calcular el coste promedio por unidad de producción de energía en €/kWh teniendo en cuenta la variación del valor del dinero durante la vida útil del sistema [4]. IRENA prevé una gran aceleración en el crecimiento del mercado en los próximos años, siendo una de las principales razones de ello la reducción en los costes, permitiendo a la energía eólica offshore ser competitiva frente al resto de energías renovables ya establecidas. Se estima que para 2030 el LCOE caiga a valores entre 44 y 79 €/MWh, y para el 2050 entre 26 y 61 €/MWh [5]. A pesar de que la eólica flotante ha reducido sus costes significativamente en los últimos años, su LCOE sigue siendo mayor que para la eólica offshore de base fija, y triplica el de la eólica onshore (ver Figura 2). Pero las previsiones de reducción del LCOE en los próximos años son alentadoras, ya que se espera una reducción del LCOE del 19% para 2030, y del 32% para 2050 [6].

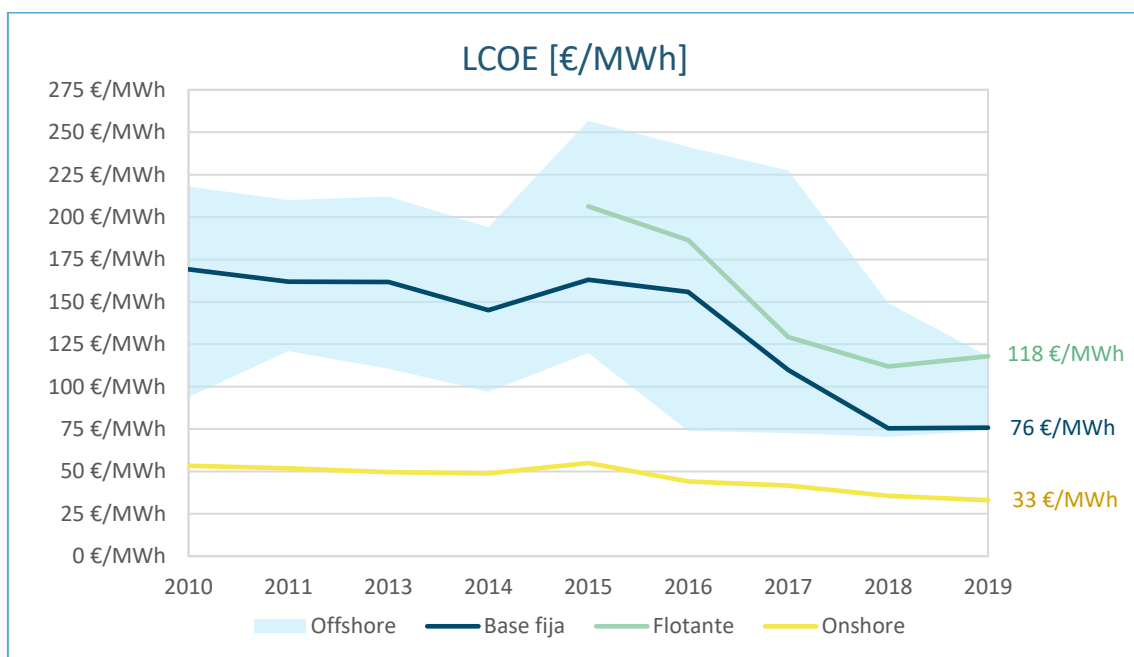


Figura 2: Evolución histórica del LCOE en eólica ([7] [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15])

1.2 PAPEL DE LAS INNOVACIONES

La innovación es el motor que impulsa la transformación energética global [16]. Aprovechando las nuevas tendencias legislativas, como el Real Decreto-ley 23/2020 publicado el pasado año 2020 que favorece el impulso tecnológico del sector eólico “tanto por la posibilidad de realizar proyectos experimentales para la puesta a punto de máquinas y parques, como por la demostración de las capacidades de contribuir a la operación segura y confiable del sistema” [17], es imperante potenciar el desarrollo de innovaciones en eólica flotante desde todos los frentes. Según Wind Europe [18] los esfuerzos en I+D deben centrarse en la mejora del diseño de subestructuras para su producción en masa, y en cerrar la brecha entre cadenas de suministro para el desarrollo de soluciones específicas para eólica flotante, ya que la cadena de producción para elementos comunes con energía offshore de base fija está optimizada, pero no es así para elementos como por ejemplo el sistema de fondeo y el cableado dinámico.

2 OBJETIVOS, ALCANCE Y BENEFICIOS

Este trabajo se encuentra enmarcado dentro del paquete de trabajo *PT5* del proyecto MATHEO. Es un proyecto en el que participan TECNALIA Research & Innovation, el BCAM – Basque Center for Applied Mathematics, el Dpto. De Ingeniería Energética de la UPV/EHU, el Dpto. de Geodinámica de la UPV/EHU, y el Dpto. de Matemáticas también de la UPV/EHU.

El objetivo principal del proyecto MATHEO es *“desarrollar modelos matemáticos en la frontera del conocimiento que faciliten la caracterización de la interacción de grandes estructuras con el medio [y que] se basan en nuevos enfoques para resolver problemas multi-físicos complejos que aparecen por el aumento de tamaño tanto de los aerogeneradores como de las estructuras soporte en eólica offshore fija y flotante”*. En el paquete de trabajo *PT5 – Plan de difusión y explotación de resultados* se analiza el impacto de las innovaciones desarrolladas en el proyecto para desarrollar un plan de explotación de los resultados.

El objetivo de este trabajo es la evaluación de las innovaciones desarrolladas en el proyecto MATHEO, utilizando para ello la herramienta acompañada de un protocolo para la evaluación de innovaciones en eólica flotante desarrollada en [4]. El alcance de este trabajo se limita a la valoración de las innovaciones siguiendo las pautas marcadas en [4], ya que el diseño de la metodología y los medios para evaluar el impacto de innovaciones en eólica flotante ya han sido definidos.

Para alcanzar el objetivo se van a llevar a cabo las siguientes tareas:

1. Realizar una revisión bibliográfica relativa a la innovación en energía eólica offshore, haciendo hincapié en la energía eólica flotante
2. Identificar y analizar las variables que juegan un papel en la definición del LCOE con el objetivo de poder definir áreas de innovación significativas para futuros proyectos
3. Llevar a cabo las entrevistas de recogida de información relativa a las innovaciones desarrolladas en el proyecto MATHEO
4. Procesar la información recogida para determinar el impacto de las innovaciones sobre el LCOE y otros parámetros

Existen dos partes interesadas en la realización de este proyecto, que son por una parte las entidades participantes en el proyecto MATHEO, y por otra parte las empresas y entidades vascas relacionadas con el sector de la energía eólica offshore o que buscan introducirse en el sector. Entre las empresas y entidades que han confirmado interés por el proyecto se encuentran el Cluster de Energía y el foro Marítimo Vasco, BiMEP, DITREL Industrial, Erreka, Euskampus Fundazioa, Iberdrola, IDOM, Nautilus Floating Solutions, Navacel, SENER, Siemens-Gamesa y Vicinay Marine.

Para TECNALIA, el BCAM, y los departamentos de Ingeniería Energética, Geodinámica y Matemáticas de la UPV/EHU, el desarrollo de este proyecto abre la posibilidad de evaluar el impacto del trabajo realizado durante el proyecto MATHEO, y además permite orientar la dirección de futuros trabajos de investigación e innovación.

Por otra parte, el poder determinar el impacto de innovaciones en eólica flotante permite identificar las posibilidades de desarrollo para empresas relacionadas con el sector. La herramienta desarrollada acompañada del protocolo de evaluación del impacto de innovaciones, una vez aplicada a al trabajo realizado en el proyecto MATHEO, permite garantizar que los resultados desarrollados en el proyecto tengan un impacto real en la cadena de suministro empresarial. De este modo, se da sentido a la transferencia de conocimientos a empresas del tejido industrial del País Vasco, con el objetivo de que estas los integren para mejorar los productos y servicios que ofrecen.

3 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DEL PROYECTO Y METODOLOGÍA

Para la realización de este trabajo se ha partido de lo presentado en [4], dónde se desarrolla una herramienta para la valoración del impacto de innovaciones en eólica flotante acompañada de un protocolo para la evaluación de las innovaciones. No se consideran más alternativas ya que éstas ya han sido estudiadas en [4] y volver a hacerlo sería redundante.

En [4], para llevar a cabo la evaluación de innovaciones se escoge el LCOE como indicador principal, sobre el que se puede evaluar el impacto económico de una innovación. El LCOE es un parámetro de uso común a la hora de evaluar el desarrollo de tecnologías de generación de energía, y tiene en cuenta tanto los costes totales de construcción como los costes de operación, de mantenimiento y de desmantelamiento, además de la producción anual de energía. Este enfoque requiere de la modelización tecno económica de parques eólicos flotantes, acompañada de una herramienta de manera que la evaluación de innovaciones pueda ser acoplada a este modelo.

$$LCOE = \frac{\sum_{i=-m}^0 \frac{CAPEXi}{(1+r)^i} + \sum_{i=1}^n \frac{OPEXi}{(1+r)^i} + \frac{DECEX_n}{(1+r)^n}}{\sum_{i=1}^n \frac{Ei}{(1+r)^i}}$$

CAPEXi: coste total de construcción anual

OPEXi: coste de operación y mantenimiento anual

DECEXn: coste de desmantelamiento al final del último año de vida útil

Ei: producción anual de energía

r: tasa de descuento

m: años desde que se comienza la fase de D&D hasta que se pone en funcionamiento

n: vida útil del parque (años de funcionamiento)

Figura 3: Fórmula y parámetros para el cálculo del LCOE

Los costes de un parque eólico flotante incluyen los costes totales de construcción (CAPEX), costes de operación y mantenimiento (OPEX) y costes relativos al desmantelamiento (DECEX). En [4] estos se modelizan en función de la naturaleza del elemento de coste (p. ej. los costes de fabricación y de mantenimiento no pueden modelizarse de la misma manera). Se identifican las variables significativas de cada elemento de coste y se relacionan mediante ecuaciones simples para resultar en un modelo que tendrá que ser validado para un parque eólico base. En el CAPEX se dividen los elementos de costes por niveles, del 1 al 4, de modo que los costes del nivel 1 estarán conformados por la suma de costes del nivel 2, y esto se cumple para los sucesivos niveles. Al avanzar en los niveles, se profundiza en el detalle del desglose. El OPEX se modeliza calculando los costes incurridos por las actividades de operación y las intervenciones de mantenimiento por año, y multiplicándolos por los años de funcionamiento del parque. Las intervenciones se modelizan definiendo las actividades principales de mantenimiento para cada elemento del parque teniendo en cuenta el tipo de mantenimiento (preventivo o correctivo), la frecuencia, el personal y embarcaciones necesarias, la duración de las intervenciones y el coste material de las intervenciones. En cuanto al DECEX, se modeliza como un porcentaje de los

costes de instalación para cada componente. En cuanto a la producción de energía, esta se modeliza en función del factor de carga bruto que depende del recurso del viento de la localización del parque, las pérdidas y la disponibilidad del parque. La disponibilidad es función del downtime incurrido por cada intervención o fallo, y se modeliza como el % de tiempo anual que se encuentra el parque en inactividad.



Figura 4: Descripción gráfica del LCOE [4]

Para poder evaluar el impacto de una innovación hay que marcar un punto de referencia, por lo que la definición de un parque eólico base es esencial. El parque eólico base se ha definido en [4] de acuerdo con las referencias más relevantes en el sector.

Para definir la estrategia a seguir a la hora de acotar las características del método de evaluación del impacto de innovaciones se parte del *Manual de Oslo: guía para la recogida e interpretación de datos sobre innovación* (3ª edición) preparado por la OCDE y el Eurostat [19]. En él se especifican las “directrices para la recogida de datos sobre el proceso general de innovación, la aplicación de cambios significativos en la empresa, los actores que influyen en las actividades innovadoras, y los resultados de la innovación”. Se diseña un protocolo en el que se define cómo seleccionar las fuentes de información y la forma en la que se ha de recabar la información. La información se recoge a través de entrevistas a un panel de expertos/as, de modo que éstos aporten los datos necesarios para poder realizar a posteriori un análisis más profundo de cada caso. La entrevista de recogida de información sobre una innovación se divide en dos fases: la primera tiene como objetivo aportar contexto a la innovación concreta y aporta información general sobre ella, que proporcionará la fuente de información según su propio criterio; y la segunda tiene como objetivo determinar sobre qué variables del LCOE tiene impacto la innovación y cuantificar dicho impacto. En esta segunda fase las preguntas realizadas dependen de las respuestas a preguntas anteriores, y están diseñadas de forma iterativa de modo que no quede ningún campo sin considerar (ver Figura 5). En el ANEXO I – *guion de las entrevistas para la evaluación del impacto de innovaciones* se incluye el guion utilizado para recoger la información de las entrevistas.

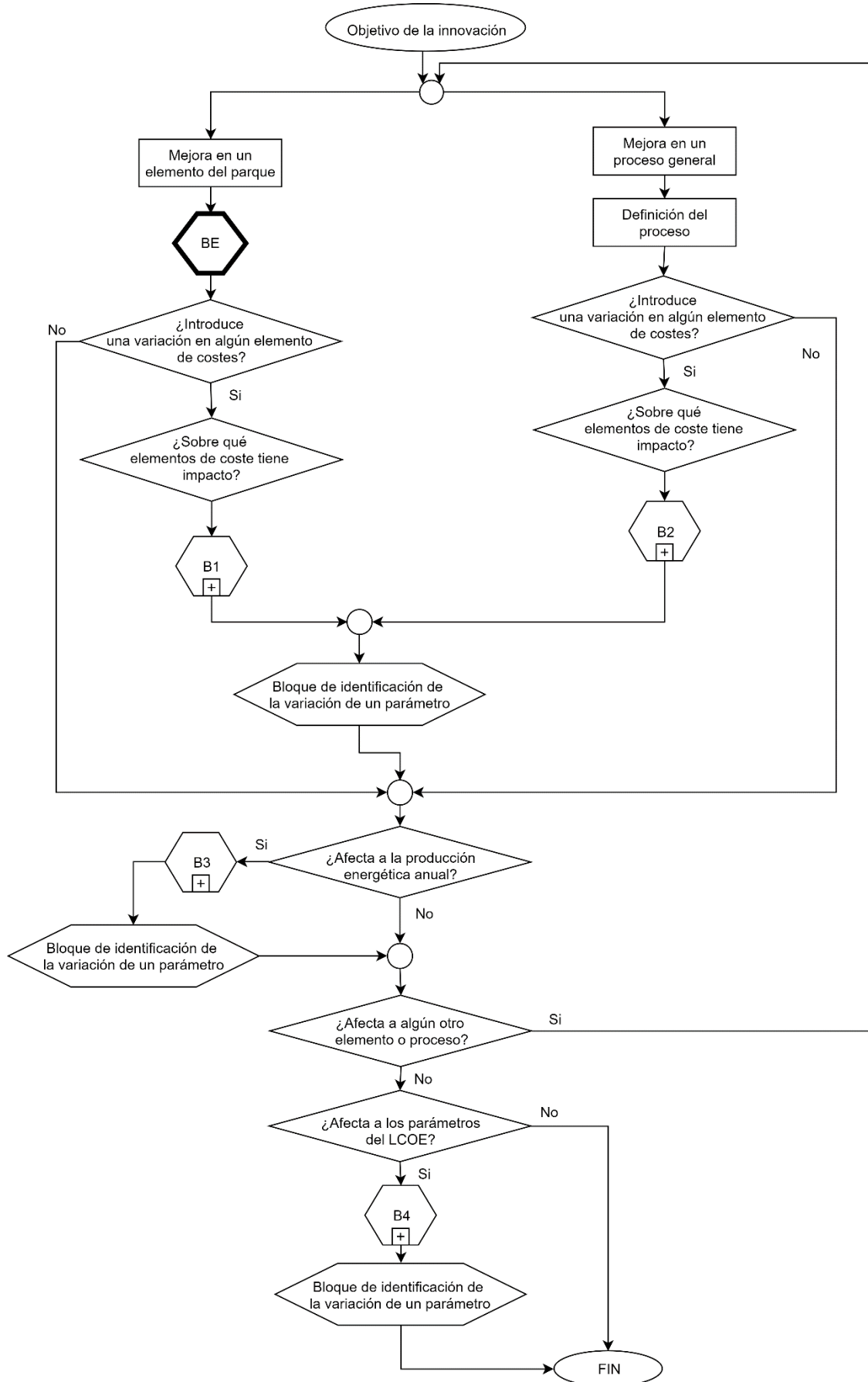


Figura 5: Diagrama de proceso simplificado de la fase 2 de la entrevista [4]

Finalmente, la herramienta desarrollada en Microsoft Excel y Visual Basic implementa la metodología de modelización de costes, producción de energía y LCOE, y permite acoplar la metodología de modelización del impacto de innovaciones y llevar a cabo análisis de sensibilidad.



Figura 6: Estructura de la herramienta de cálculo de costes y evaluación de innovaciones

La herramienta es una hoja Excel en la que se navega por diferentes ventanas. En este trabajo se utilizan principalmente las ventanas de análisis de sensibilidad y de evaluación de las innovaciones. La ventana de análisis de sensibilidad permite estudiar la sensibilidad el LCOE o de costes locales de los elementos ante posibles variaciones inducidas por las innovaciones. Esta ventana utiliza la ayuda de un formulario para determinar qué variable se desea variar y cómo se quieren mostrar los resultados.

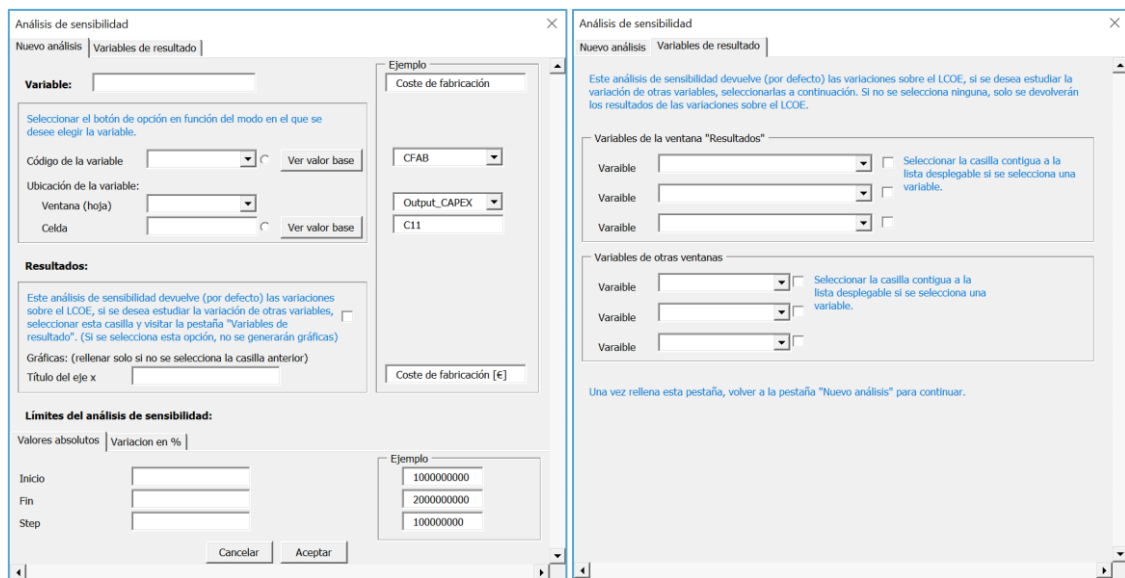


Figura 7: Formulario de un nuevo análisis de sensibilidad

En cuanto a la ventana de evaluación del impacto de innovaciones, el objetivo de ésta es que la evaluación del impacto sobre el LCOE y otras variables indicadas por el usuario sea automática y no comprometa la integridad de la herramienta manteniendo los valores base intactos para poder evaluar diferentes innovaciones en la misma herramienta. La zona de evaluación está

compuesta por dos tablas: una en la que se especifican los parámetros sobre los que tiene impacto la innovación de forma directa y cuantificable (información obtenida siguiendo el protocolo descrito en [4]), y otra en la que se indican las variables sobre las que se quieren obtener los resultados del impacto.

Innovación: (título de la innovación)

Descripción:

Evaluación

Parámetros sobre los que tiene impacto

Hoja	Celda o código	Descripción	Impacto	Valor o variación
IN				
IN				
IN				

Impacto de la innovación sobre los resultados

Hoja	Celda o código	Descripción	Valor sin innovación	Variación	Nuevo valor
OUT					
OUT					
OUT					

*seleccionar esta celda y después clicar en "Calcular impacto"

Calcular el impacto

Figura 8: Estructura de la ventana Evaluación de innovaciones

En el ANEXO II – *ejemplos de la utilización de la herramienta* se recoge un ejemplo de los resultados devueltos por la herramienta en un análisis de sensibilidad, y un ejemplo de la utilización de la ventana de evaluación de innovaciones.

Para calcular el impacto de una innovación sobre el LCOE se incorpora la información obtenida durante la evaluación descrita en el protocolo a través de las entrevistas realizadas al panel de expertos al modelo tecno económico a través de la ventana de Evaluación de innovaciones de la herramienta.

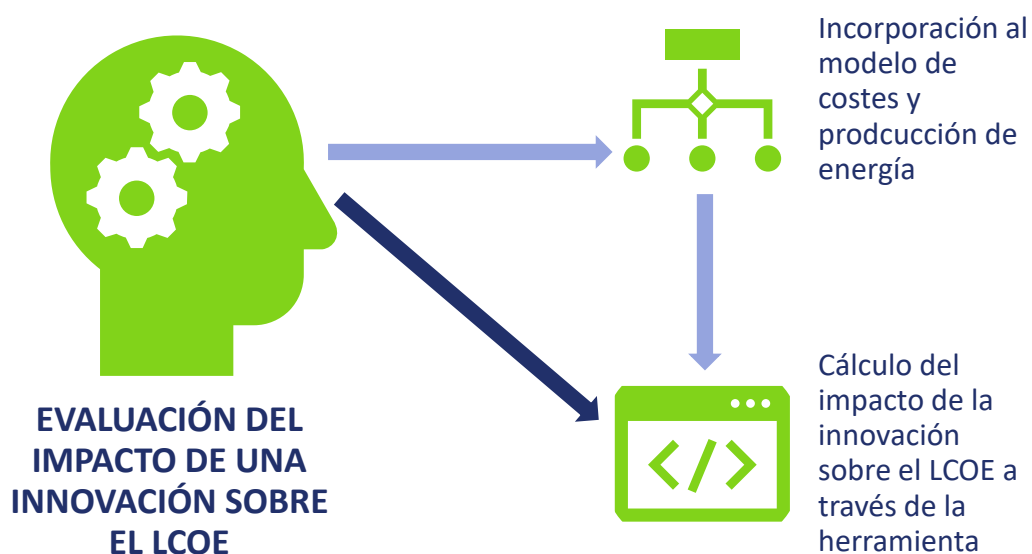


Figura 9: Diagrama explicativo de la incorporación al modelo tecno económico de la evaluación del impacto de una innovación

4 ESTADO DEL ARTE RELATIVO A LAS INNOVACIONES EN EÓLICA OFFSHORE

En este capítulo se incluyen los tres principales estudios sobre innovaciones relacionadas con la eólica offshore y en concreto con la eólica flotante, y se señalan las áreas de innovación destacadas en esos estudios.

4.1 ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE INNOVACIONES

La referencia principal en relación con la valoración de innovaciones en eólica flotante es EIT InnoEnergy en [20], donde recoge y analiza innovaciones en este sector en particular cuantificando su impacto sobre el LCOE. Esta entidad, además de preparar el informe [20] relativo a energía eólica flotante, ha preparado informes de la misma índole para la energía eólica offshore de base fija [21], la energía eólica onshore [22], y las energías solares térmica [23] y fotovoltaica [24], utilizando en todos los casos el LCOE como indicador para evaluar el impacto de innovaciones.

IRENA (International Renewable Energy Agency) publica *Innovation Outlooks* relacionados con la generación de energía renovable (ver [25], [26], [27] y [28]), y en concreto en [29] recoge un detallado análisis del impacto de innovaciones clave en eólica offshore sobre el LCOE.

En tercer lugar, en [30] se encuentra una base de datos generada por ORE Catapult en colaboración con la industria y la academia que registra los desafíos a los que se enfrenta la energía eólica offshore y las formas de resolverlos. Incluye además el impacto sobre el LCOE y proyectos concretos que apoyan las áreas de investigación.

4.2 ÁREAS DE INNOVACIÓN EN ENERGÍA EÓLICA FLOTANTE

En este apartado se recogen los resultados de la búsqueda bibliográfica sobre innovaciones en eólica flotante. Las referencias consultadas son [20], [29] y [30], y en la Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3 se recogen las innovaciones relevantes que, o bien se están explorando, o bien su investigación impactará de forma positiva al desarrollo de la eólica flotante de acuerdo con estas tres referencias.

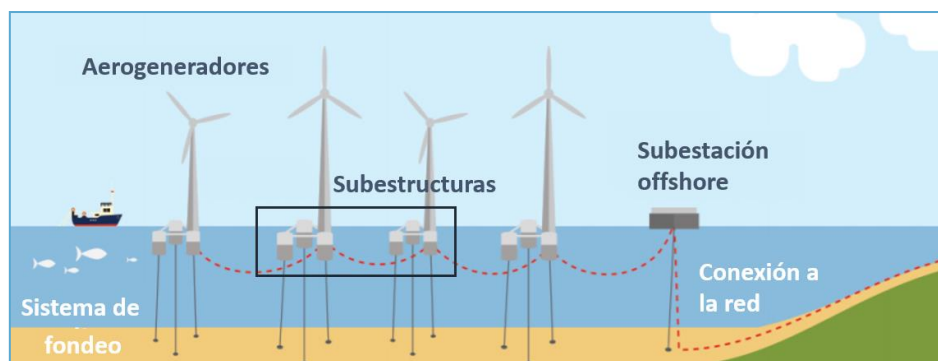


Figura 10: Diagrama de un parque eólico flotante y sus componentes (adaptado de BOEM [31])

Para todas las innovaciones se ha estudiado si tienen impacto sobre el diseño y desarrollo del parque (D&D), sobre la fabricación, transporte e instalación de los componentes (FAB y T&I), sobre la operación y mantenimiento (O&M), o sobre el desmantelamiento (DESMANT). En caso de que el impacto sea directo sobre uno o varios de los elementos del parque también se señala, de modo que la columna AERO hace referencia a los aerogeneradores del parque, SUBESTR a las subestructuras, SISTFON a los sistemas de fondeo, y RED a los diferentes elementos del sistema de conexión a la red que incluyen el cableado inter-array y de exportación y la subestación.

Tabla 1: Innovaciones relevantes en el sector eólico flotante según [20], [29] y [30] (1/3)

INNOVACIÓN	D&D	FAB y T&I	O&M	DESMANT	AERO	SUBESTR	SISTFON	RED	referencias		
									KIC [20]	IRENA [29]	ORE C. [30]
Mejoras en la monitorización oceánica											
Plataforma unificada de información del ciclo de vida											
Utilización de inteligencia artificial, Deep Learning, Big Data e IoT a lo largo de todo el ciclo de vida del parque											
Desarrollo de materiales alternativos											
Diseño más específico del cableado en función de las necesidades del cliente y del emplazamiento											
Enfoque holístico del diseño de las torres y subestructuras flotantes											
Mejoras en el conocimiento de la interacción fondo-estructura y el comportamiento de la corrosión											
Optimización del diseño las subestructuras flotantes alejándose de las tendencias de la industria de O&G											
Mejoras en las prospecciones geofísicas y geotécnicas para la caracterización del fondo marino											
Mejoras en el diseño de sistemas de fondeo											
Mejoras en el diseño de cables dinámicos											
Mejoras en el diseño de subestaciones flotantes											
Optimización multivariable del layout del parque											
Caracterización avanzada del recurso eólico											
Mayor optimización durante la fase de D&D											
Mejoras en estaciones meteorológicas flotantes (LiDAR)											
Reducción en duración de los estudios de impacto ambiental para parques eólicos flotantes											
Diseño orientado a la integración de la acuicultura											
Desarrollo de plataformas híbridas											
Consolidación del gran número de diseños resultando en los diseños más prometedores											

Tabla 2: Innovaciones relevantes en el sector eólico flotante según [20], [29] y [30] (2/3)

INNOVACIÓN	D&D	FAB y T&I	O&M	DESMANT	AERO	SUBESTR	SISTFON	RED	referencias		
									KIC [20]	IRENA [29]	ORE C. [30]
Mejoras en la logística portuaria y adaptación a puertos genéricos											
Reducción de los tiempos de (des)conexión de cables y líneas de fondeo a la plataforma mediante mejoras en los diseños											
Avances en el izado de componentes pesados											
Recubrimientos avanzados para subestructuras											
Mejoras en la calidad de la instalación de cables submarinos											
Reducción del tiempo de instalación de los cables submarinos											
Optimización del ensamblaje offshore											
Mejoras en embarcaciones flotantes de izado de cargas pesadas para la optimización de la instalación y de las intervenciones de mantenimiento											
Mejoras en las condiciones bajo las que se puede llevar a cabo la instalación de los aerogeneradores											
Avances en el transporte e instalación de subestructuras											
Mejoras en la fabricación de subestructuras flotantes (tanto existentes como rupturistas)											
Mejoras en la instalación de subestaciones offshore											
Diseño de estrategias de instalación rupturistas											
Mejoras en la organización de la construcción del parque											
Aumento de la proporción de la puesta en marcha realizada en tierra											
Optimización de la inspección y reparación de palas											
Mejoras en la integración a la red											
Mejoras en la previsión meteorológica											
Optimización del mantenimiento basado en la salud de los componentes en lugar de basado en tasas de fallo temporales											
Mejoras en la organización del mantenimiento de parques muy lejanos a tierra en relación con el transporte y alojamiento del personal											
Mejoras en el transporte del personal al emplazamiento y su acceso a las estructuras											
Introducción del mantenimiento remoto y automatizado											

Tabla 3: Innovaciones relevantes en el sector eólico flotante según [20], [29] y [30] (3/3)

INNOVACIÓN	D&D	FAB y T&I	O&M	DESMANT	AERO	SUBESTR	SISTFON	RED	referencias		
									KIC [20]	IRENA [29]	ORE C. [30]
Introducción del control del parque desde una estrategia holística											
Mejoras en el mantenimiento correctivo de grandes componentes											
Mejoras en el control de la salud estructural de todos los componentes del parque											
Mejoras en la gestión del inventario en relación con las intervenciones de mantenimiento											
Herramientas de planificación de intervenciones de mantenimiento rupturistas, incluyendo el personal y embarcaciones necesarias											
Reducción en los costes de acceso mediante helicópteros											
Desarrollo de embarcaciones de trabajo de nueva generación											
Mejoras en la comunicación y transmisión de información											
Utilización de soluciones robóticas y sistemas autónomos para optimizar el mantenimiento y operación del parque											
Diseño de herramientas dirigidas a la reducción de riesgos laborales											
Eliminación de inspecciones directas por parte de operarios que constituyan alto riesgo como inspecciones submarinas y a grandes alturas											
Control remoto por satélite											
Orientación del desmantelamiento hacia la recuperación y reciclaje de materiales											
Planificación del parque eólico de acuerdo con un posible repowering											
Optimización en el diseño de componentes clave del aerogenerador adaptándolos a aplicaciones flotantes											
Facilitación de la extracción del cableado submarino y sistemas de fondeo											
Optimización de los requerimientos de sepultura de cables											
Uso de HVAC tanto en el cableado inter-array como en el cable de evacuación con el objetivo de reducir pérdidas											
Producción de hidrógeno verde											
Almacenamiento de energía en los propios aerogeneradores											

5 IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS DEL LCOE

El objetivo de este capítulo es el estudio de las variables que juegan un papel en la definición del LCOE con el propósito de poder definir áreas de innovación significativas para futuros proyectos.

5.1 ESTUDIO GENERAL DE LOS COSTES EN UN PARQUE EÓLICO FLOTANTE

En este apartado se presenta un estudio general de los costes en un parque eólico flotante para aportar contexto y orientar la selección de variables en el apartado 5.2. Los costes incurridos durante la vida de un parque eólico general son los de construcción desde la fase de diseño y desarrollo del parque hasta la puerta en marcha, los de operación y mantenimiento durante el funcionamiento del parque, y los de desmantelamiento al finalizar su vida útil.

Los costes de construcción, conforme al modelo tecno económico desarrollado en [4], se pueden desglosar según la Figura 11. Los costes de fabricación son los más significativos, siendo los aerogeneradores y las subestructuras los elementos más costosos del parque. En cuanto al transporte e instalación, este supone casi un 13% del CAPEX siendo de nuevo los aerogeneradores y subestructuras los elementos que suponen un mayor coste en esta fase de construcción, aunque para el sistema de conexión a la red estos costes también son significativos por la complejidad de la instalación del cableado submarino principalmente. Los sistemas de fondeo son los elementos principales del parque que menor coste suponen, en comparación con el resto, tanto para su fabricación como para su transporte e instalación.

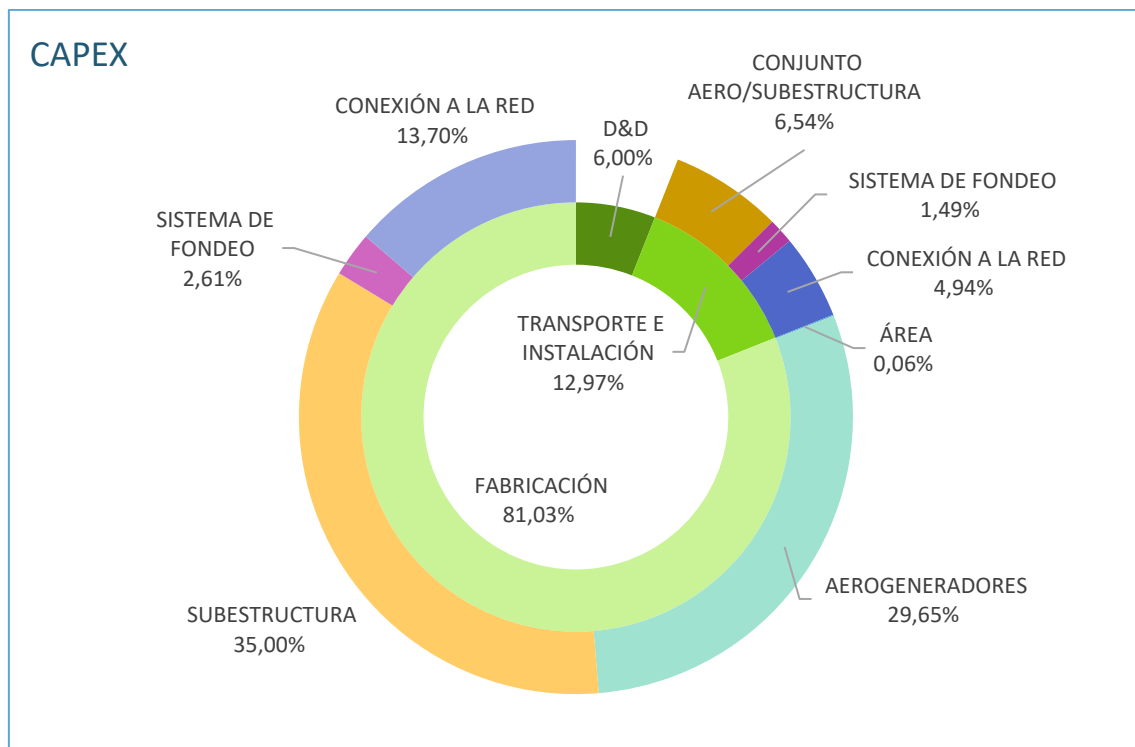


Figura 11: Desglose de costes de construcción

En cuanto a los costes de operación y mantenimiento incurridos durante el funcionamiento del parque eólico flotante, y también conforme con [4], se pueden desglosar según lo presentado en la Figura 12. Los aerogeneradores acaparan la mayor parte del presupuesto de mantenimiento con más de un 70%, seguidos de las subestructuras y de los sistemas de fondeo. Por lo general, las operaciones de mantenimiento del sistema de conexión a la red son las más costosas de forma individual, pero dado que para el resto de los elementos las intervenciones se multiplican por el número de aerogeneradores del parque su coste total es muy superior.

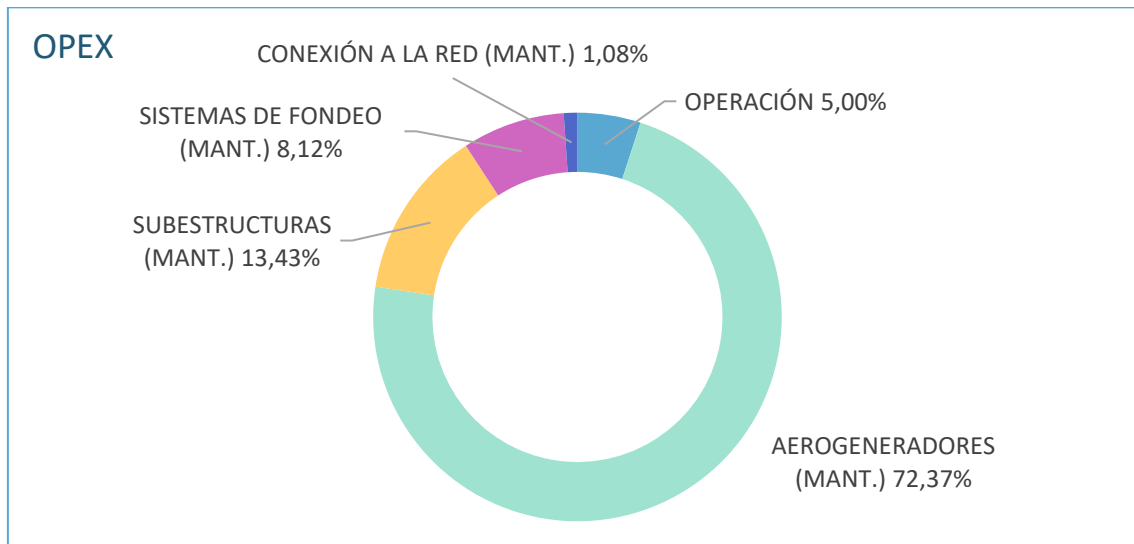


Figura 12: Desglose de costes de operación y mantenimiento

Los costes de desmantelamiento, según lo propuesto por el modelo tecno económico desarrollado en [4], están directamente relacionados a los costes de transporte e instalación para cada elemento principal del parque. Se desglosan tal y como se muestra en la Figura 13, pero como son función de los costes de instalación no se va a estudiar la identificación de sus variables críticas ya que éstas serán las mismas que para los costes de T&I.

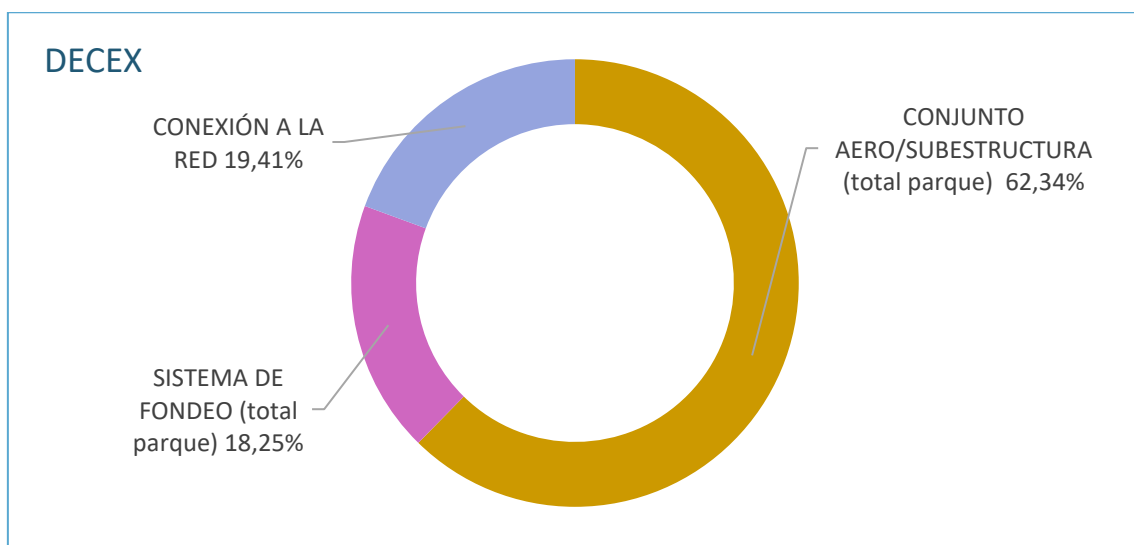


Figura 13: Desglose de costes de desmantelamiento

5.2 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES CRÍTICAS

Las variables críticas que se van a estudiar son las relativas a la fabricación, al transporte e instalación, al mantenimiento, las relacionadas con parámetros temporales y financieras. Las variables críticas serán las susceptibles a variaciones que pueden causar cambios significativos en los costes, la producción de energía y sobre el LCOE.

5.2.1 Fabricación

En esta sección se van a comparar las variables relacionadas con los costes de fabricación de cada elemento. Teniendo en cuenta el desglose de costes de la Figura 11 se puede prever que los costes de fabricación serán más sensibles a variaciones en los costes de fabricación en las subestructuras y los aerogeneradores. En la Figura 14 se desglosan los costes de fabricación por elementos.

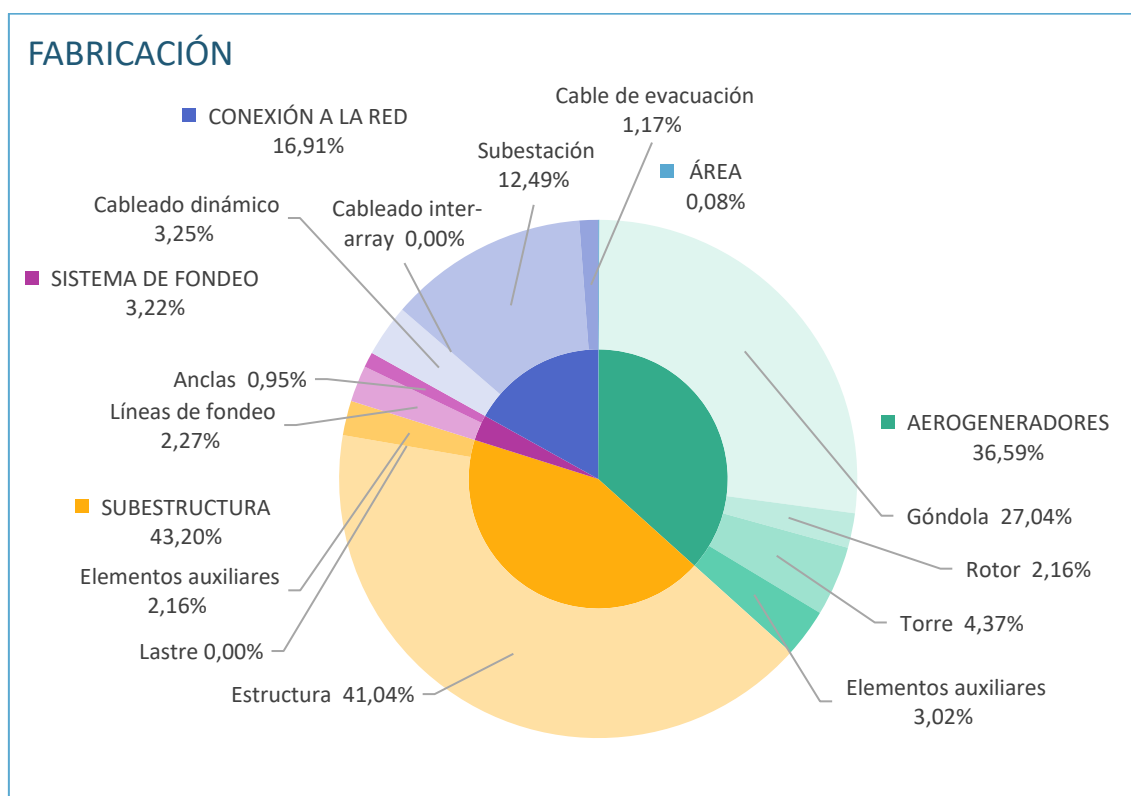


Figura 14: Distribución de los costes de fabricación

En comparación con los demás elementos del parque los aerogeneradores son los más avanzados tecnológicamente, ya que el sector dispone del know-how tanto de la eólica onshore como de la offshore de base fija. El diseño de aerogeneradores es dinámico y susceptible a mejoras, pero no se comparará con el resto de los elementos del parque por encontrarse en una situación tecnológica mucho más avanzada, de modo que sus costes son menos susceptibles a variaciones.

En la Figura 15 se recoge el estudio de la sensibilidad del LCOE ante variaciones en las diferentes variables de coste para cada elemento. Destaca el coste de la fabricación de las subestructuras

en relación con su peso como el factor más influyente sobre el LCOE, comprensible sabiendo que es el principal coste de construcción, de modo que optimizaciones porcentuales en su coste tendrán el mayor impacto sobre los costes totales de fabricación. Las innovaciones relacionadas con la fabricación de los sistemas de fondeo son las que tendrán un menor impacto sobre los costes totales, y, por tanto, sobre el LCOE.

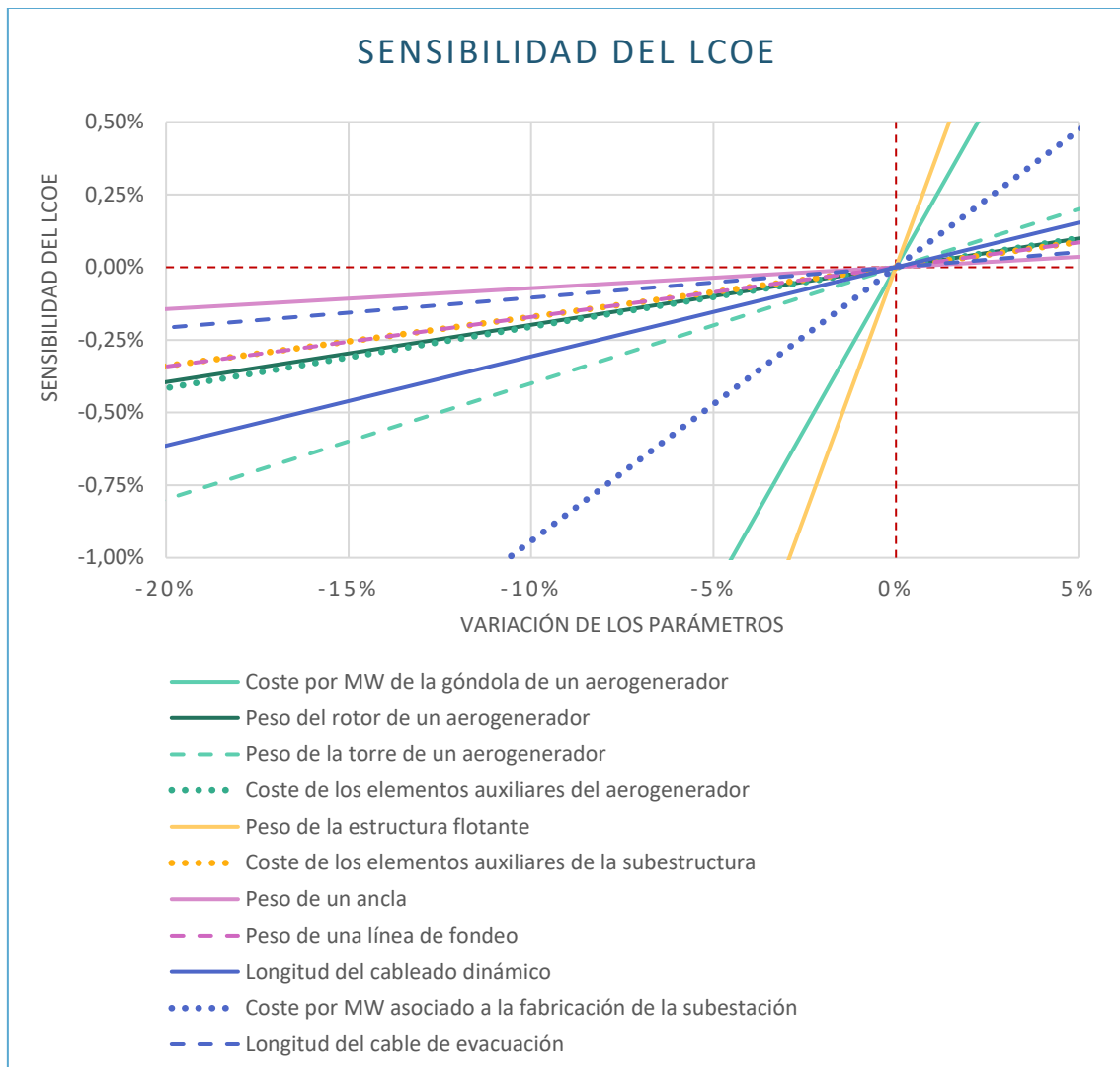
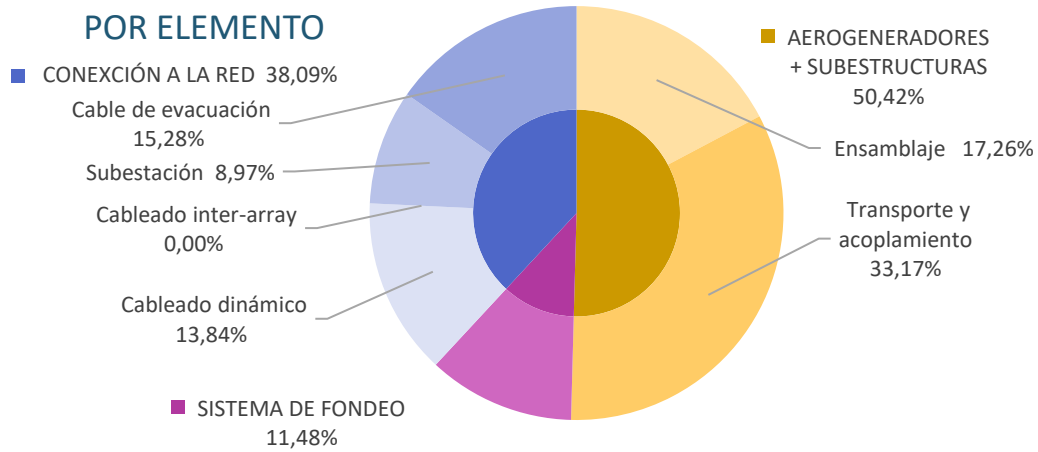


Figura 15: Sensibilidad del LCOE ante las variables relacionadas con la fabricación

5.2.2 Transporte e instalación

Para identificar las variables críticas relacionadas con el transporte e instalación se ha de estudiar qué tipo de buques son necesarios en el caso particular de cada elemento. Por una parte, se puede estudiar la distribución de los costes por elemento, y por otra la distribución de costes por tipo de barco (la cual no incluye los costes de ensamblaje de los conjuntos aerogenerador-subestructura o de instalación de la subestación). Estos desgloses se muestran en la Figura 16, donde se señala el ensamblado, transporte y acoplamiento de los aerogeneradores y sus subestructuras como los procesos más costosos. Esto está relacionado con el uso de remolcadores y AHTS que son los utilizados en este proceso.

TRANSPORTE E INSTALACIÓN POR ELEMENTO



TRANSPORTE E INSTALACIÓN POR TIPO DE BUQUE

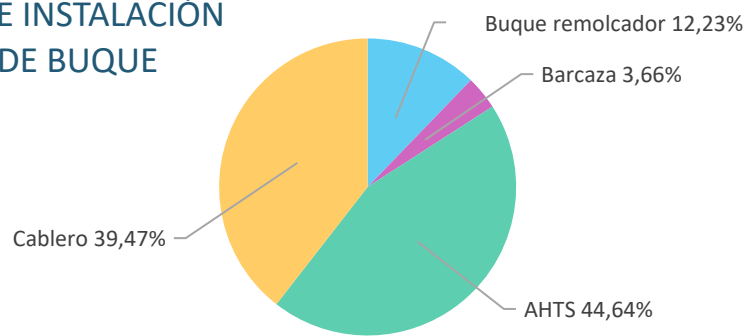


Figura 16: Distribución de los costes de transporte e instalación

El impacto sobre el LCOE de variaciones los elementos de coste relacionados con el transporte e instalación se muestra en la Figura 17, y está relacionado con el desglose de la Figura 16.

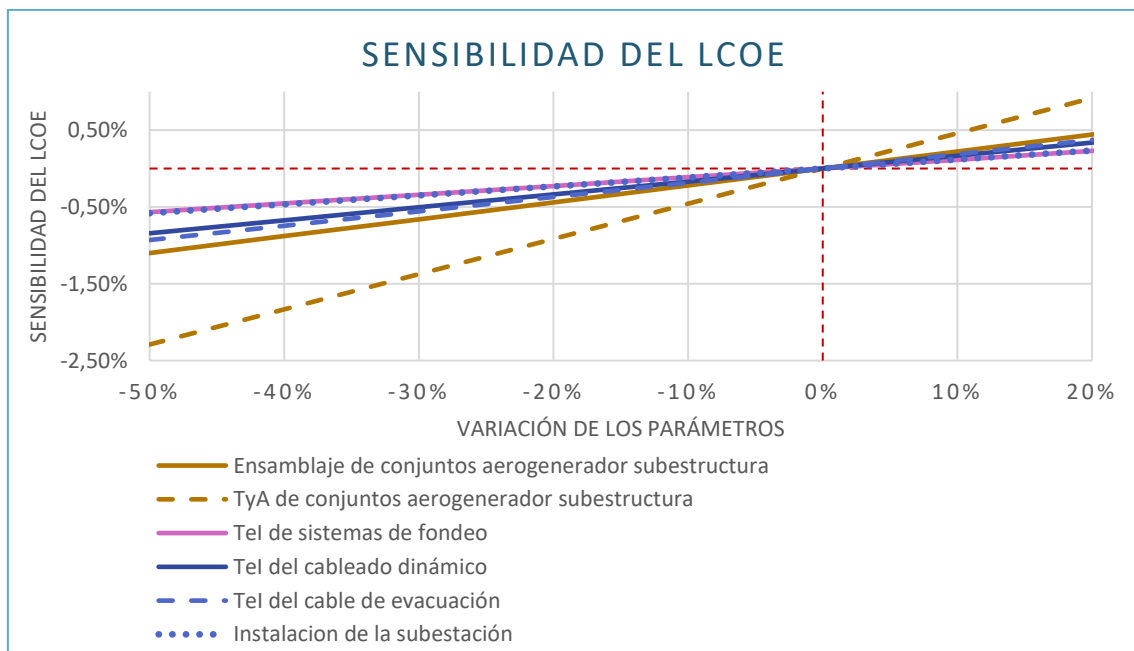


Figura 17: Sensibilidad del LCOE ante las variables relacionadas con el transporte e instalación

En cuanto a la sensibilidad del LCOE frente a variaciones en el coste diario de las embarcaciones utilizadas en el transporte, se puede conseguir hasta una reducción del 4,6% a través de una reducción del 50% en los costes de todas las embarcaciones. La mayor proporción de los costes corresponde a los buques AHTS y cableros (ver Figura 16), y estos son los que tienen un mayor impacto sobre el LCOE.

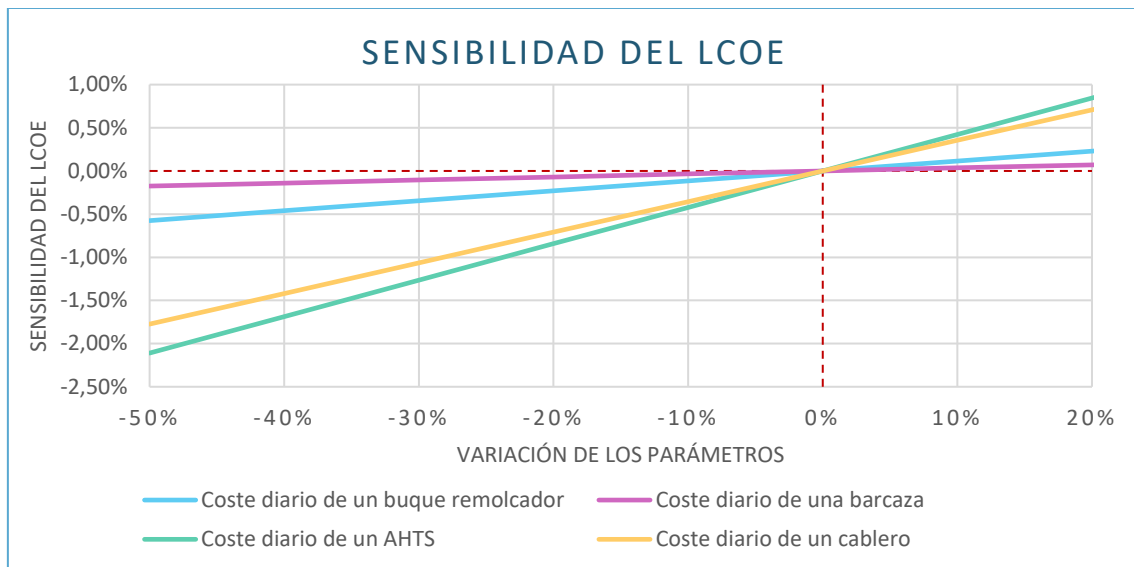


Figura 18: Sensibilidad del LCOE ante las variaciones en los costes de las embarcaciones utilizadas en el transporte e instalación

5.2.3 Mantenimiento

En este apartado se estudia la sensibilidad de los costes de mantenimiento y del LCOE frente a las variables relacionadas con las operaciones de mantenimiento. Las variables consideradas en la Figura 19 son la distancia al puerto de operación y mantenimiento, el coste material de las reparaciones, la mano de obra y la frecuencia y duración de, tanto el mantenimiento preventivo, como el correctivo.

Destaca el mantenimiento correctivo, tanto en su frecuencia como en la duración de sus intervenciones, como elemento clave a la hora de alcanzar una reducción del LCOE considerable. Estas operaciones de mantenimiento aparte de ser más costosas que las operaciones de mantenimiento preventivo, incurren en tiempos de inactividad mucho mayores afectando notablemente a la producción de energía y por ende al LCOE. La frecuencia y la duración de las intervenciones de mantenimiento preventivo tienen un impacto similar sobre los costes de mantenimiento por una parte, y sobre el LCOE por otra. Ambos impactos son menores en comparación con el impacto del mantenimiento correctivo.

El coste material de las reparaciones y el de la mano de obra son ambos relevantes a la hora de valorar la sensibilidad de los costes de mantenimiento, pero en cuanto a su impacto sobre el LCOE este pasa a un segundo plano ya que no afectan a la disponibilidad del parque y por tanto a la producción de energía. La distancia al puerto de operación y mantenimiento tiene un impacto pequeño pero que puede alcanzar mayor importancia ya que variaciones en este parámetro son muy posibles.

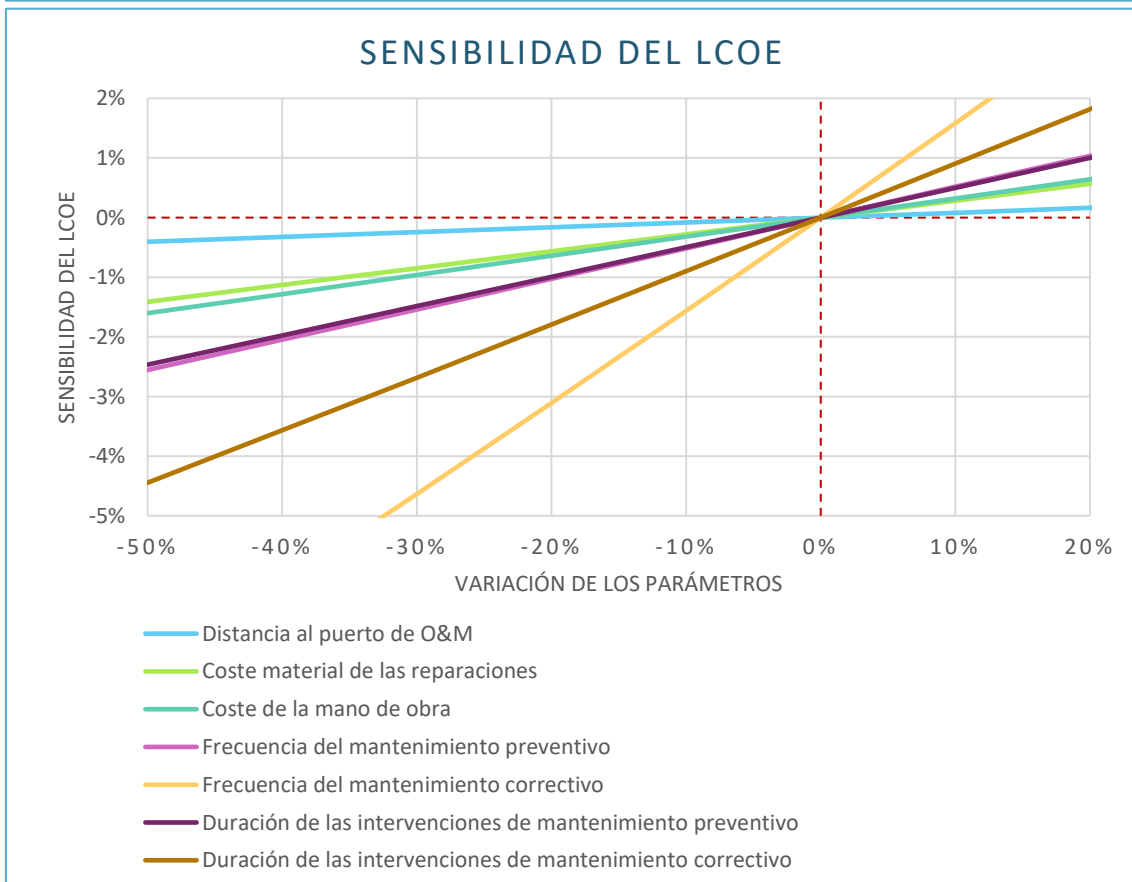
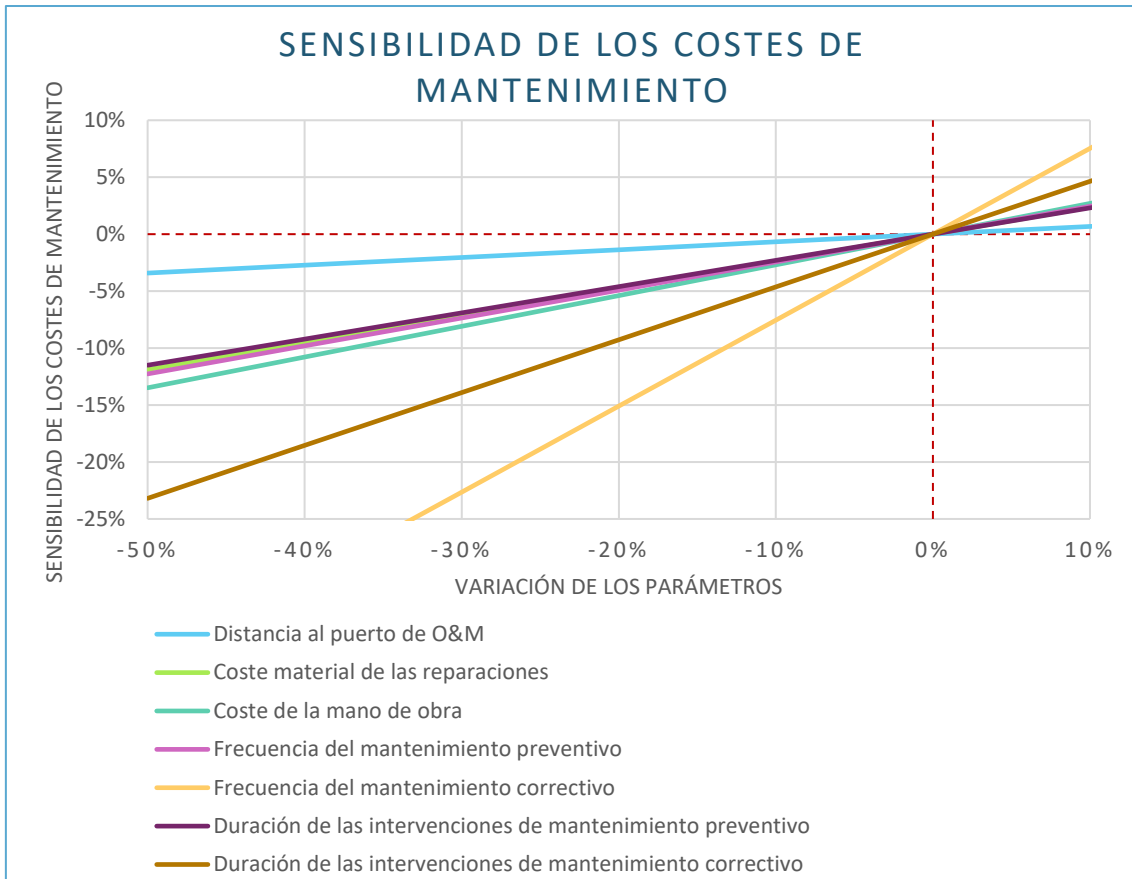


Figura 19: Sensibilidad del LCOE ante las variables relacionadas con el mantenimiento

5.2.4 Producción de energía

La producción anual de energía (AEP) depende de la disponibilidad del parque, del factor de carga bruto (FCB), y de las pérdidas.

El estudio de la disponibilidad se realiza de forma individual en relación con el apartado anterior, y se tienen en cuenta la distancia al puerto de operación y mantenimiento, el tiempo de espera a ventanas de buen tiempo, y la frecuencia y duración de tanto el mantenimiento preventivo como el correctivo (ver Figura 20). La disponibilidad y la producción anual de energía presentan la misma sensibilidad ya que la AEP es directamente proporcional a la disponibilidad. De nuevo, las operaciones de mantenimiento correctivo son las más críticas, pero también destaca el tiempo de espera a ventanas de buen tiempo, que es decisivo a la hora de organizar las diferentes intervenciones de mantenimiento.

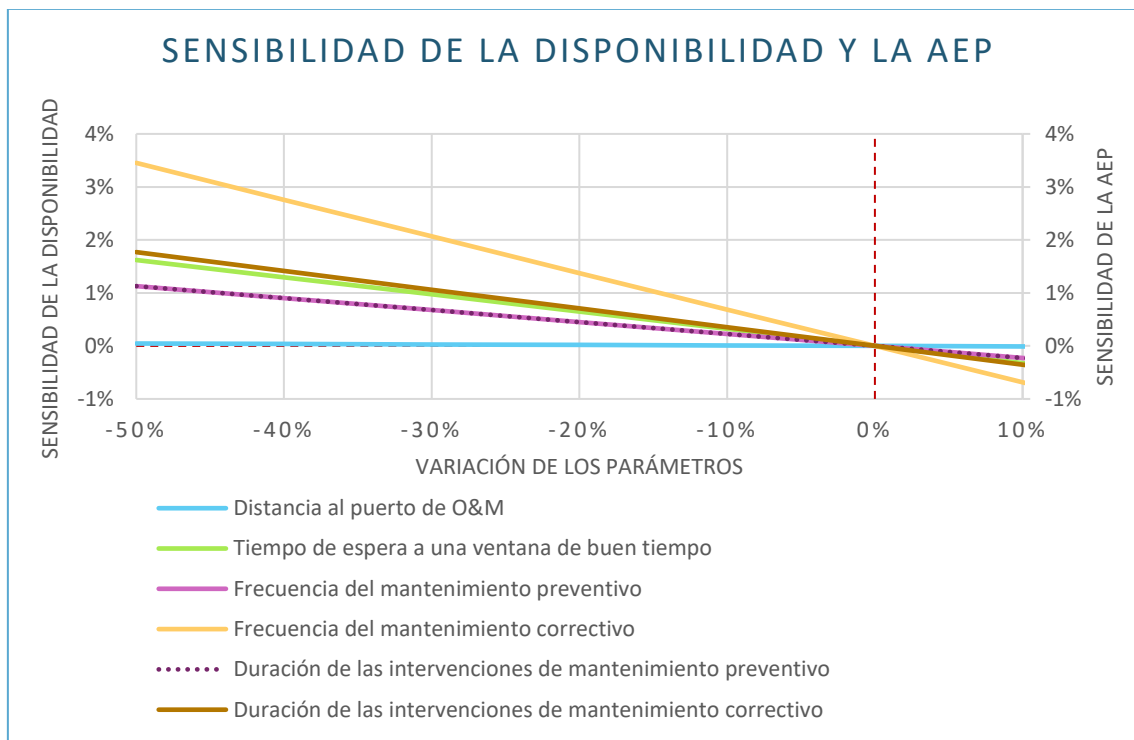


Figura 20: Sensibilidad de la AEP ante factores que afectan a la disponibilidad del parque

Como ya se ha mencionado, la producción anual de energía, aparte de ser proporcional a la disponibilidad del parque, depende del factor de carga bruto (FCB) y de las pérdidas (ver Figura 21). Si se evalúa la sensibilidad de la AEP los dos aspectos más relevantes son la disponibilidad y el factor de carga bruto, sobre los cuales pequeñas variaciones supondrán un gran impacto sobre la producción anual de energía. EL FCB es un parámetro que depende de la elección del emplazamiento y su asociado recurso eólico, y de la curva de potencia de los aerogeneradores implantados.

Se considera que una optimización de la disponibilidad del parque es clave para un aumento significativo de la producción anual de energía, y por lo tanto, una reducción del LCOE.

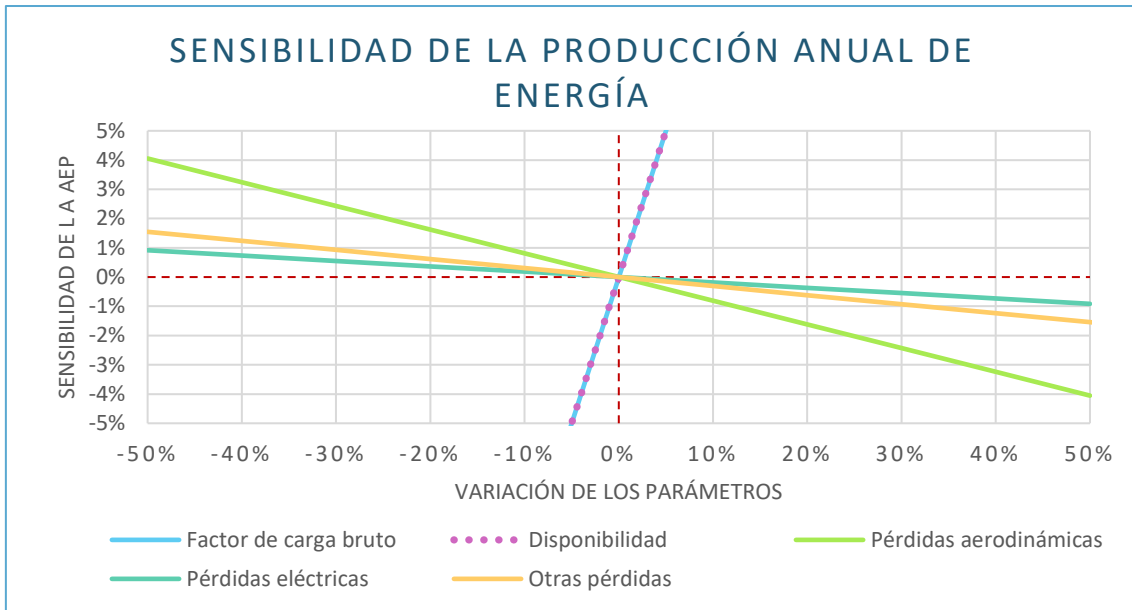


Figura 21: Estudio de sensibilidad de la producción anual de energía

La relación entre el LCOE y la AEP no es lineal, y aumentos en la producción de energía causan reducciones en el LCOE menores en magnitud que los incrementos en el coste de la energía que se producen por reducciones en la producción (ver Figura 22). Por ello, reducciones tanto en el FCB como en la disponibilidad serán críticos, ya que supondrían aumentos desmesurados del LCOE.

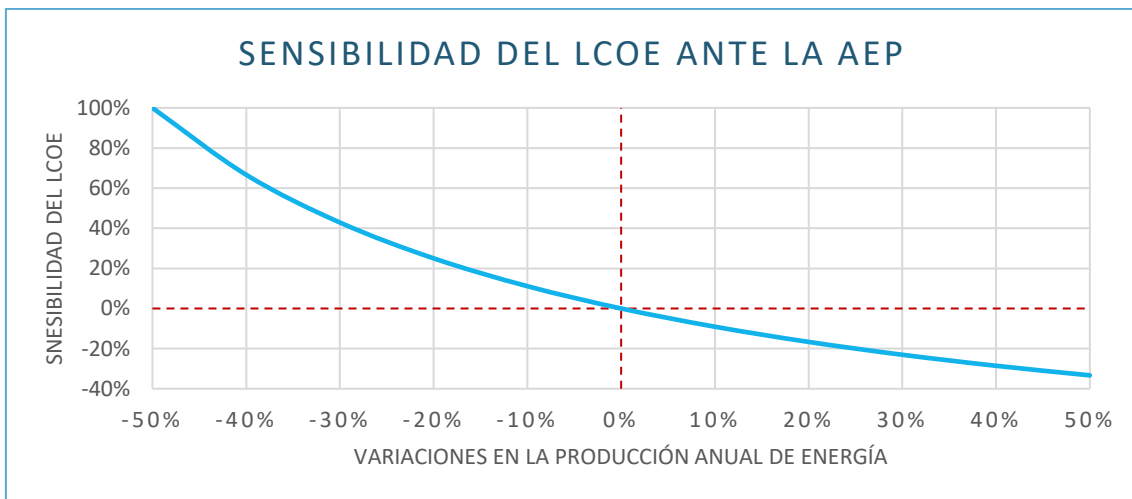


Figura 22: Sensibilidad del LCOE ante la producción anual de energía

5.2.5 Variables temporales, financieras y generales

En este apartado se estudia la sensibilidad del LCOE frente a la vida útil del parque eólico offshore, el tamaño del parque eólico, y las variables financieras relacionadas con la estimación de la tasa de descuento.

5.2.5.1 Tamaño del parque eólico

El efecto del tamaño del parque eólico sobre el LCOE se puede estudiar a través del número de aerogeneradores del parque. El número de aerogeneradores de un parque es crucial a la hora de calcular el LCOE, ya que los costes por unidad de energía producida se optimizan al aumentar la cantidad de aerogeneradores. Por ello, la sensibilidad del LCOE frente al tamaño del parque no sigue un patrón lineal, sino que una reducción en el tamaño supondrá un aumento del LCOE más significativo que la reducción en el LCOE que se produce al optar por parques más grandes (ver Figura 23). Parques con pocos aerogeneradores, o lo que es lo mismo, más pequeños, tendrán un LCOE significativamente mayor.

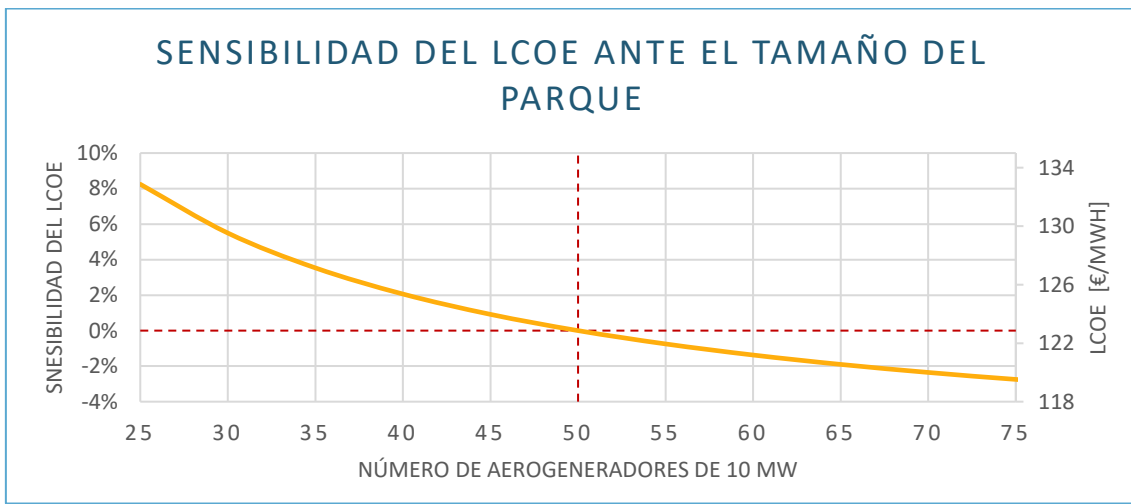


Figura 23: Sensibilidad del LCOE ante el número de aerogeneradores del parque

5.2.5.2 Vida útil del parque eólico

El LCOE tampoco sigue un patrón lineal en ante variaciones en la vida útil del parque, siendo de nuevo mayor el impacto sobre el LCOE por una reducción de la vida útil que por un aumento (ver Figura 24). A pesar de ello, la reducción en el LCOE debido a un aumento de 5 años en el funcionamiento de un parque eólico offshore es significativa.

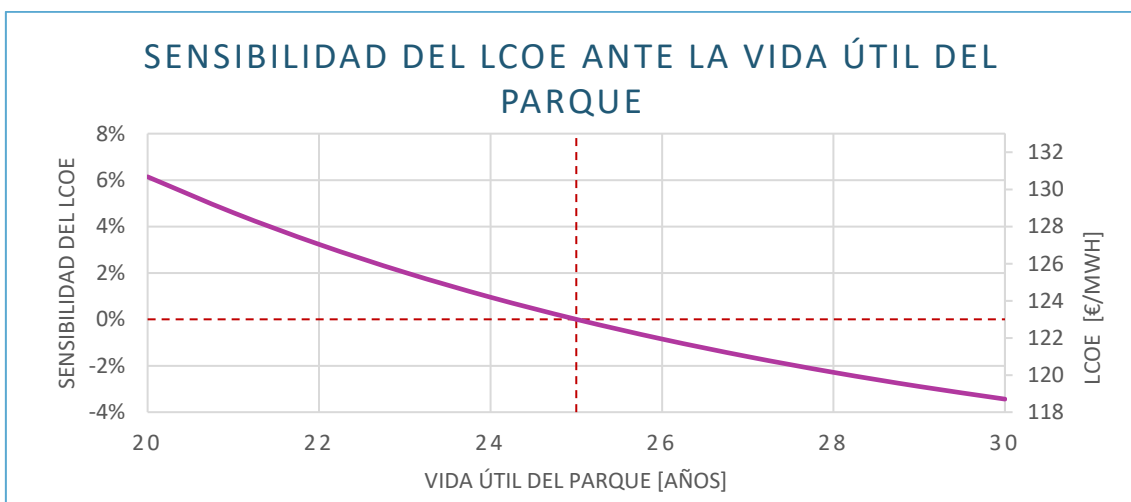


Figura 24: Sensibilidad del LCOE ante la vida útil del parque

5.2.5.3 Tasa de descuento

En cuanto a la tasa de descuento, este es el factor que sin lugar a duda mayor impacto tiene sobre el LCOE. Una variación de dos puntos porcentuales en la tasa de descuento llega a tener un impacto sobre el LCOE de prácticamente un 15% (ver Figura 25). La tasa de descuento se utiliza para descontar flujos de caja futuros a su valor actual y representa en cierta medida la percepción del riesgo. Para la energía eólica offshore se encuentra entre el 10% y el 14% [32], aunque también se consideran valores menores, entorno al 6% [33] [15].

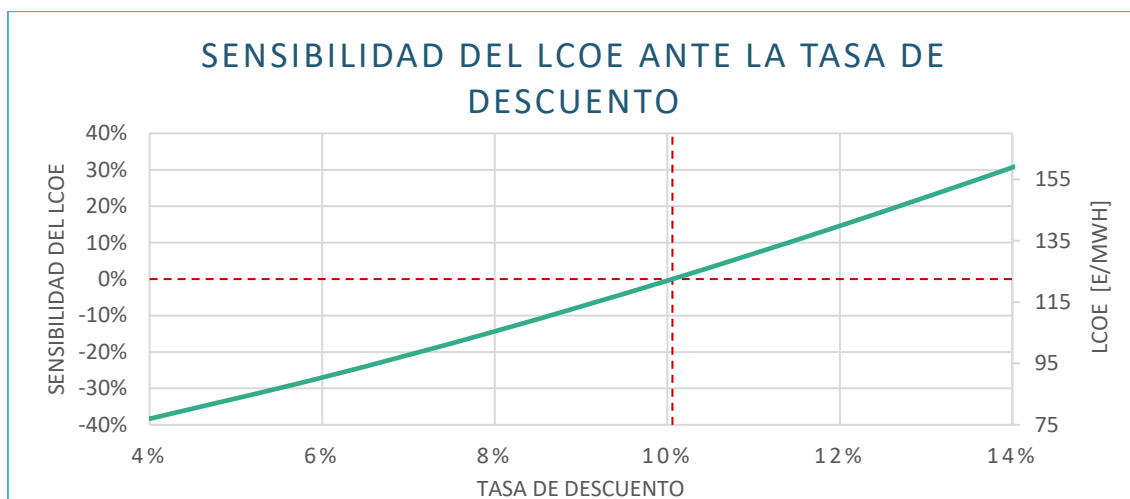


Figura 25: Sensibilidad del LCOE ante la tasa de descuento

La tasa de descuento se suele relacionar con el Weighted Average Cost of Capital (WACC). El cálculo del WACC es función del coste de la deuda y de la inversión estimados, y de la proporción de los costes financiados con deuda y con inversión.

5.3 RECOMENDACIONES PARA LA DEFINICIÓN DE FUTURAS ÁREAS DE INVESTIGACIÓN

Como conclusión, en este apartado se señalan las variables que se han considerado más significativas:

1. Fabricación:
 - Una reducción del peso de la subestructura flotante del 10% puede suponer una reducción del LCOE de entorno al 3,5%, por lo que se recomienda encarecidamente destinar recursos a la optimización de su diseño.
 - El cableado dinámico es muy extenso por lo que un buen diseño del array puede suponer una reducción en los costes significativa. Optimizaciones en la distribución del cableado dinámico han de realizarse en concordancia con el riesgo asumible por la desconexión de filas de aerogeneradores en caso de fallos en este cableado.
2. Transporte e instalación:
 - El transporte y acoplamiento de los conjuntos aerogenerador-subestructura es el proceso más costoso en esta fase de la construcción del parque, pero su optimización

- dependerá de factores como la distancia entre el puerto y el emplazamiento o la técnica de izado y transporte utilizada.
- Los buques AHTS y los cableros son los que suponen un mayor gasto, por su tiempo de utilización y coste mayor, por lo que reducciones en los tiempos de uso de estos dos buques serán relevantes.
3. Mantenimiento y disponibilidad:
- La variable más significativa es la frecuencia de las intervenciones de mantenimiento correctivo, que afecta tanto a los costes de mantenimiento como a la disponibilidad y por ende a la producción de energía. La reducción en la frecuencia del mantenimiento correctivo es absolutamente clave para alcanzar un LCOE menor, ya que se reducirían los costes y se aumentaría la producción de energía.
4. Producción de energía:
- El factor de carga bruto juega un papel tan importante como el de la disponibilidad en la producción anual de energía, por lo que la adecuada caracterización del recurso eólico puede contribuir a una reducción en el LCOE a través de una mayor producción energética.
5. Parámetros temporales y financieros:
- La extensión de la vida útil de un parque eólico offshore es clave para reducir el LCOE ya que se aumenta considerablemente la producción energética total para una misma inversión inicial, a pesar de que se incurran costes de operación y mantenimiento durante esos últimos años.
 - Los parámetros financieros, como la tasa de descuento y todas las variables que juegan un papel en su estimación, son determinantes a la hora de calcular el LCOE, por lo que los esfuerzos no relacionados con la ingeniería de la tecnología son esenciales para garantizar el éxito del sector.

6 EVALUACIÓN DE LAS INNOVACIONES DESARROLLADAS EN MATHEO

En este apartado se va a presentar el proyecto MATHEO, dentro del cual está enmarcado este trabajo y en el cual se han desarrollado las innovaciones que se van a evaluar en este capítulo.

6.1 PROYECTO MATHEO

MATHEO es un proyecto financiado por el Gobierno Vasco a través del programa de ayudas a la investigación colaborativa Elkartek en la convocatoria de 2019. Elkartek promueve proyectos de investigación fundamental, es decir, en tecnologías de TRLs bajos. El proyecto lleva como título “Matemáticas inteligentes para eólica offshore”, y los participantes son TECNALIA Research & Innovation desde el área de energías renovables offshore y el área de infraestructuras, el BCAM – Basque Center for Applied Mathematics, el Dpto. De Ingeniería Energética de la UPV/EHU, el Dpto. de Geodinámica de la UPV/EHU, y el Dpto. de Matemáticas también de la UPV/EHU. La planificación inicial del proyecto establecía el inicio en marzo de 2019 y final en diciembre de 2020, con un presupuesto total de 700.000 €.



Figura 26: Participantes y empresas y entidades interesadas en el proyecto MATHEO

El TRL (Technology Readiness Level) es un indicador de la madurez de una tecnología, y sigue una escala del 1 al 9 donde el 9 corresponde al nivel máximo de madurez (ver Figura 27). MATHEO se encuentra entre TRLs 1 y 3. Una vez finalizado el proyecto, el objetivo es transferir los conocimientos a la industria dentro de proyectos con TRLs de 4 a 6 para poder validar los resultados en entornos relevantes, y en un futuro alcanzar TRLs más altos con demostraciones precomerciales y comerciales.

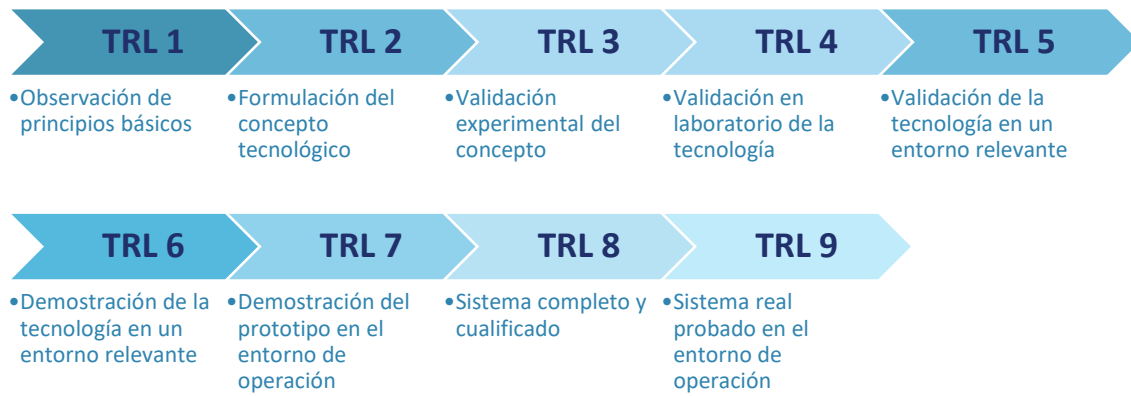


Figura 27: Definiciones de los distintos TRLs según la Comisión Europea [34]

6.1.1 Objetivos del proyecto

El objetivo del proyecto MATHEO según lo expuesto en la memoria técnica es “*desarrollar modelos matemáticos en la frontera del conocimiento que faciliten la caracterización de la interacción de grandes estructuras con el medio [y que] se basan en nuevos enfoques para resolver problemas multi-físicos complejos que aparecen por el aumento de tamaño tanto de los aerogeneradores como de las estructuras soporte en eólica offshore fija y flotante*”. En concreto se centra en las interacciones de las estructuras, por una parte, con el sedimento del fondo marino, centrandolo en anclas de arrastre y la inserción de pilotes y, por otra parte, con las olas, poniendo el foco en procesos dinámicos y en concreto sobre el rebosamiento. Los modelos matemáticos desarrollados incorporan técnicas de Deep Learning focalizadas en la recogida de información relativa a la operación con el objetivo de aplicarlas en la fase de O&M de los dispositivos. A pesar de que el desarrollo de los modelos se encuentra en TRLs muy bajos, se busca integrarlos con herramientas comerciales utilizadas en el diseño de estructuras offshore.

6.1.2 Innovaciones desarrolladas

En el proyecto se han seguido tres líneas de investigación, relacionadas con los siguientes temas:

- Caracterización geomecánica de los tipos de fondo marino y modelización de la dinámica, transporte y precipitación de los sedimentos
- Modelización acoplada de la interacción fluido/estructura/fondo, particularizada para un ancla de arrastre
- Caracterización de los fenómenos del overtopping y crecimiento marino
- Modelización mediante análisis de elementos finitos de estructuras offshore de materiales no convencionales
- Aplicación de algoritmos Deep Learning al mantenimiento de parques eólicos offshore

Las tres innovaciones desarrolladas son las siguientes:

ENFOQUES HÍBRIDOS AVANZADOS PARA LA INTERACCIÓN FLUIDO ESTRUCTURA	DEEP LEARNING PARA MONITORIZACIÓN INTELIGENTE	SPH PARA LA INTERACCIÓN FONDO ESTRUCTURA
--	--	---

6.2 RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN DE LAS INNOVACIONES

La evaluación del impacto de las innovaciones del proyecto MATHEO se presenta en los apartados 6.3, 6.4 y 6.5, siguiendo en los tres casos el mismo esquema. Primero se introduce el objetivo inicial de la innovación, y después se explica brevemente el desarrollo de la innovación y los resultados obtenidos, con el objetivo de poner la innovación en contexto. En el tercer y último punto se presenta la evaluación de la innovación propiamente dicha: en esta sección se va a presentar en primer lugar al panel de expertos que ha participado en la evaluación del impacto de la innovación; en segundo lugar, la información obtenida de las entrevistas al panel de expertos; y, por último, se realizará un análisis de los resultados obtenidos.

6.3 INNOVACIÓN I1: ENFOQUES HÍBRIDOS AVANZADOS PARA LA INTERACCIÓN FLUIDO ESTRUCTURA

6.3.1 Objetivo inicial de la innovación

El objetivo inicial del desarrollo de esta innovación, tal y como se recogía en la memoria técnica del proyecto, era la modelización del “fenómeno de rebosamiento sobre estructuras para eólica offshore y sus efectos en las cargas de diseño mediante enfoques semi-analíticos [y del] fenómeno del crecimiento marino reduciendo las incertidumbres mediante modelos de elementos finitos, [...] para la construcción de una base de datos adimensionales implementada en código abierto, acoplable con herramientas para el diseño de estructuras eólicas offshore”, además de la evaluación del “comportamiento de materiales no convencionales mediante modelos de elementos finitos”.

6.3.2 Desarrollo de la innovación

De los tres objetivos iniciales de la innovación, solamente se ha estudiado el fenómeno del rebosamiento. La interacción entre las olas y las estructuras en el mar es muy compleja y no es muy conocida para estructuras tanto flotantes como fijas en mar abierto. El rebosamiento de una ola sobre una estructura puede ser de tres tipos: green water, white water y spray. En este caso, se ha estudiado el caudal de rebosamiento en función de las características de la ola y de la estructura. Las herramientas utilizadas han sido un tanque de olas de 12m de largo equipado con un generador de olas, sondas de ultrasonidos y resistivas, y una playa parabólica, y herramientas computacionales de CFD. El modelo estudiado ha sido un cilindro vertical fijo, que en futuras investigaciones pasaría a ser flotante.

El desarrollo de la innovación se dividió en dos partes complementarias, una experimental y una computacional. En ambas se definió una relación que permite determinar o predecir el caudal de rebosamiento sobre un cilindro vertical, teniendo en cuenta el efecto de la pendiente de la ola incidente. Los resultados del análisis experimental y computacional se compararon concluyendo que el modelo computacional tendía a predecir más rebosamiento del que se daba a nivel experimental, debido a las propias diferencias de diseño de los dos experimentos. A pesar de ello, los dos resultados presentan la misma tendencia. Quedó validado, por tanto, el modelo de regresión obtenido que permite estudiar el caudal de rebosamiento sobre un cilindro vertical

en función del francobordo relativo y la pendiente de ola para diferentes rangos de francobordos relativos.

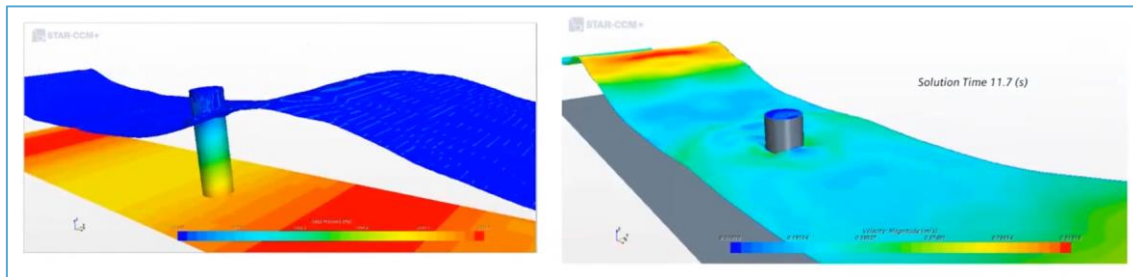


Figura 28: Simulación por medio de CFD estudiada en la innovación [35]

6.3.3 Evaluación del impacto de la innovación

6.3.3.1 Panel de expertos

El panel de expertos entrevistado para recabar información sobre la innovación I1 está compuesto por las personas de la Tabla 4. Las entrevistas a estas personas se realizaron durante el mes de febrero de 2021.

Tabla 4: Panel de expertos para la innovación I1

Ander Aristondo de Miguel	Investigador en Energías Renovables Offshore en Tecnalia Research & Innovation, y participante en el desarrollo de la innovación
Germán Pérez Morán	Responsable de proyectos de eólica marina en Tecnalia Research & Innovation y coordinador del proyecto MATHEO
Gustavo Adolfo Esteban Alcalá	Profesor e investigador en el Departamento de Ingeniería Energética en la Escuela de Ingeniería de Bilbao, y participante en el desarrollo de la innovación
Joseba López Mendiá	Investigador en Energías Renovables Offshore en Tecnalia Research & Innovation, y experto en modelización tecno económica para la optimización de parques de generación de energía marina
Miren Josune Sánchez Lara	Ingeniera e investigadora en Energías Renovables Offshore en Tecnalia Research & Innovation, y experta en diseño estructural de subestructuras fijas y flotantes para eólica offshore
Raúl Rodríguez Arias	Director técnico (CTO) en NAUTILUS Floating Solutions y responsable de ingeniería marina en Tecnalia Research & Innovation

6.3.3.2 Resumen de la información recabada

Los impactos potenciales de esta innovación propuestos por las personas entrevistadas son los siguientes:

- Variaciones en el diseño de la subestructura
- Modificación de la norma
- Variaciones en el diseño de los elementos auxiliares
- Extensión de la vida útil del parque
- Variación del área en puerto necesaria para la fabricación
- Variación en el coste del ensamblaje del conjunto aerogenerador-subestructura
- Variación en el coste del transporte de las subestructuras
- Variación en el diseño del sistema de fondeo
- Variaciones generales en el mantenimiento

No todos los informantes han coincidido sobre los impactos de la innovación, y en este caso incluso se han dado contradicciones. En la Figura 29 se recoge el apoyo o rechazo de diferentes informantes a los distintos impactos propuestos. Destacan los impactos sobre el diseño de la subestructura y los elementos auxiliares de la misma, y sobre la normativa.

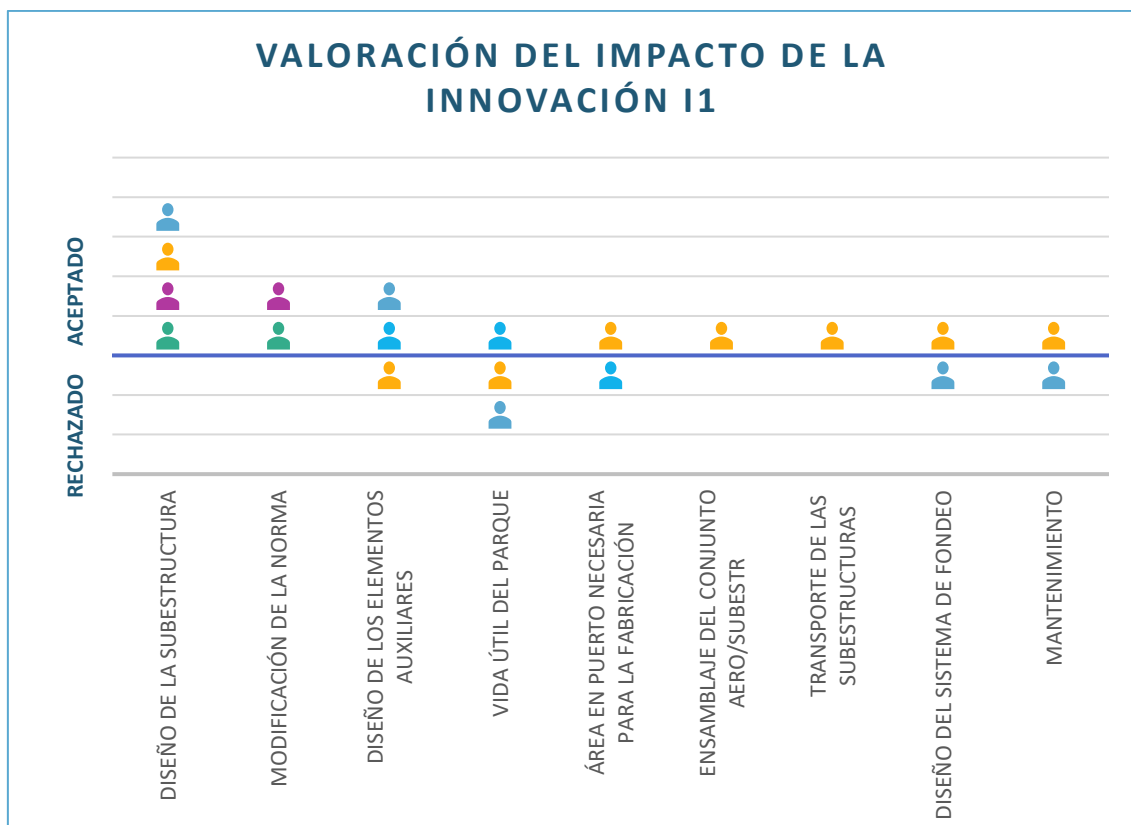


Figura 29: Valoración del impacto de la innovación I1 por diferentes informantes

Además de la proposición de estos impactos, se han señalado algunas valoraciones relativas a esta innovación, en cuanto a su aplicabilidad u otros aspectos relacionados con ella:

Se señala que las variaciones en el diseño de subestructuras flotantes, en cuanto a optimización del tamaño o peso, están limitadas por la normativa impuesta por las sociedades de clasificación, además de otros factores como por ejemplo la altura del buje o la resonancia natural del conjunto. La normativa para plataformas eólicas offshore ha sido heredada del sector de Oil&Gas, en el cual la seguridad de las plataformas ha de ser garantizada en términos mucho mayores en comparación con las plataformas eólicas. En las plataformas de Oil&Gas, por ejemplo, se ha de garantizar la seguridad de las personas que se encuentran permanentemente en la plataforma, y en caso de que ocurra un fallo las consecuencias son gravísimas en términos medioambientales, y ninguno de estos dos casos aplica a la eólica offshore. Por ello, los coeficientes de seguridad fijados para ese sector maduro son muy conservadores. La transferencia del conocimiento al sector eólico offshore ha conllevado la transferencia también de la normativa, pero ésta se encuentra en constante evolución para adaptarse a las características de las plataformas eólicas offshore. Teniendo esto en cuenta, se considera que el aporte de conocimiento a las sociedades de clasificación contribuirá a la reevaluación de los márgenes de seguridad.

A pesar de los posibles impactos de la innovación, se cuestiona su impacto real sobre estructuras comerciales ya que las cargas derivadas del overtopping se dan solamente en eventos extremos y puntuales con muy poca frecuencia, además de que otras cargas como las de slamming tienen mucho mayor impacto sobre el diseño de la estructura. Pero también se considera que puede abrir la puerta a otros estudios que tengan en cuenta la posibilidad de permitir el overtopping, en relación con una bajada del centro de gravedad, dando lugar a innovaciones rupturistas.

Por otra parte, se relaciona el estudio de la caracterización del overtopping con el estudio de la caracterización del air gap, que también es un fenómeno de interacción ola estructura muy poco conocido. El air gap es un evento que se da cuando una ola pasa por debajo de una estructura y aumenta su altura por la interacción con los diferentes elementos de la estructura. Esta ola aumentada puede chocar con la parte inferior de la estructura dando lugar a fuerzas verticales muy considerables. En la actualidad no se conoce muy bien el fenómeno ni las fuerzas que puede causar, por lo que las estructuras se diseñan directamente para evitarlo a toda costa. Se propone que, si aumentase el conocimiento sobre el air gap, se podrían diseñar estructuras más bajas que soportasen las fuerzas provocadas por esas olas aumentadas, teniendo un impacto potencial, dependiendo de la estructura particular, de hasta una reducción del 10% del tamaño.

6.3.3.3 *Valoración del impacto*

La información aportada por los expertos se trata de forma crítica, y al haber discrepancias respecto al posible impacto de esta innovación, algunas de las propuestas no se han aceptado. Los resultados de esta evaluación se recogen en la Tabla 5. Las razones para no aceptar cuatro de los impactos son las siguientes:

- En el caso de la extensión de la vida útil del parque se rechaza esta posibilidad porque se considera que el overtopping no es un fenómeno crítico para la integridad de la estructura por lo que no será determinante en la definición de su vida útil.

- En cuanto a la variación del área en puerto necesaria para la fabricación, a pesar de que se pueda reducir el tamaño de las subestructuras, se rechaza que esto conlleve un área de fabricación menor.
- También se rechaza que afecte al diseño de otros elementos del parque, como los sistemas de fondeo, ya que se considera que el impacto será íntegramente sobre las estructuras primaria y secundarias de la plataforma flotante.
- En el caso del mantenimiento, se rechaza que afecte significativamente. Por una parte, en referencia a la accesibilidad, las condiciones de acceso son muy estrictas y en ningún caso se planificaría una intervención de mantenimiento cuando hubiera posibilidad de rebosamiento. Y, por otra parte, los elementos críticos de mantenimiento son el punto de conexión con la cadena, los fondeos, las esquinas, los tanques de lastre llenados con agua de mar cuyas rejillas de aducción se pueden bloquear por fouling, y la unión de la subestructura con la torre, y ninguno de ellos se ve afectado por el rebosamiento.

Tabla 5: Aceptación o rechazo de los impactos potenciales de la innovación I1

	Aceptado
Variaciones en el diseño de la subestructura	Si
Modificación de la normativa	Si
Variaciones en el diseño de los elementos auxiliares	Si
Extensión de la vida útil del parque	No
Variación del área en puerto necesaria para la fabricación	No
Variación en el coste del ensamblaje del conjunto aerogenerador-subestructura	Si
Variación en el coste del transporte de las subestructuras	Si
Variación en el diseño del sistema de fondeo	No
Variaciones generales en el mantenimiento	No

Los impactos aceptados se evaluarán a continuación en los cinco puntos siguientes.

1. **Variaciones en el diseño de la subestructura:** Una mejora en el diseño estructural se puede traducir en una reducción de su tamaño o del acero utilizado en la fabricación de la subestructura. Este es un impacto tangible y, a priori, relevante. De acuerdo con la información facilitada, esta variación se cuantifica como una reducción de entre el 5% y el 10% del peso de la subestructura. Este impacto se puede observar a corto plazo. Su aplicabilidad depende de cada diseño particular, y también es importante mencionar que los diseños de las subestructuras están restringidos por otros factores que limitan este impacto.
2. **Modificación de la normativa:** Un mejor conocimiento de los fenómenos hidrodinámicos, como el overtopping, puede desencadenar una reevaluación de la normativa impuesta por las sociedades de clasificación. Este impacto se considera tangible y a medio plazo (5+ años). Se cuantifica como una reducción del 10% en el CAPEX.
3. **Variaciones en el diseño de los elementos auxiliares:** Esta innovación afecta al diseño o elección de las estructuras secundarias como boat landings, plataformas de acceso y barandillas, y el posible uso de escotillas no estancas. Los costes que suponen las estructuras auxiliares de la subestructura flotante son muy reducidos, por lo que este impacto se estudia mediante un análisis de sensibilidad.

4. **Variación en el coste del ensamblaje del conjunto aerogenerador-subestructura:** El coste del ensamblaje del conjunto aerogenerador-subestructura es directamente proporcional al peso de la subestructura, y si éste se reduce bien sea a través de una reducción del tamaño o bien a través de una reducción en el uso de acero, el coste del ensamblaje se verá afectado. Por lo tanto, este impacto no se cuantificará directamente ya que está incluido en el punto 1. *Variaciones en el diseño de la subestructura.*
5. **Variación en el coste del transporte de las subestructuras:** El hecho de que las subestructuras sean más ligeras o más pequeñas puede facilitar su transporte, pero este impacto depende mucho de las embarcaciones disponibles por lo que su aplicabilidad no está garantizada. El impacto potencial se estudia mediante un análisis de sensibilidad.

En la tabla siguiente se recoge un resumen de lo anterior:

Tabla 6: Impactos aceptados de la innovación de la innovación I1 y su cuantificación

Impacto	Diseño de la subestructura	Modificación de la normativa	Diseño de los elementos auxiliares	Transporte de las subestructuras
Tangibilidad	SI	SI	SI	SI
Cuantificación del impacto	Reducción del 5%-10% en peso	Reducción del 10% del CAPEX	Mediante análisis de sensibilidad	
Plazo	Corto	Medio (+5 años)	Corto	Corto
Aplicabilidad	Dependiente de la tecnología			Depende de los recursos disp.

Una reducción del 5% en el peso de la subestructura supone una reducción del CAPEX del 1,95% y del LCOE del 1,71%, mientras que una reducción del 10% supone una reducción del CAPEX del 3,90% y del LCOE del 3,42 %. En cuanto a una reducción del 10% en el CAPEX, supone una reducción en el LCOE del 8,76%.

Variaciones en el coste de los elementos auxiliares tienen un efecto bastante pequeño sobre el LCOE a no ser que su reducción sea de más del 30 o del 50% (ver Figura 30). Con reducciones del 30% en su coste se alcanzan reducciones del LCOE de casi 0,5%, y a partir de reducciones del 65% de alcanzan reducciones del LCOE superiores al 1%.

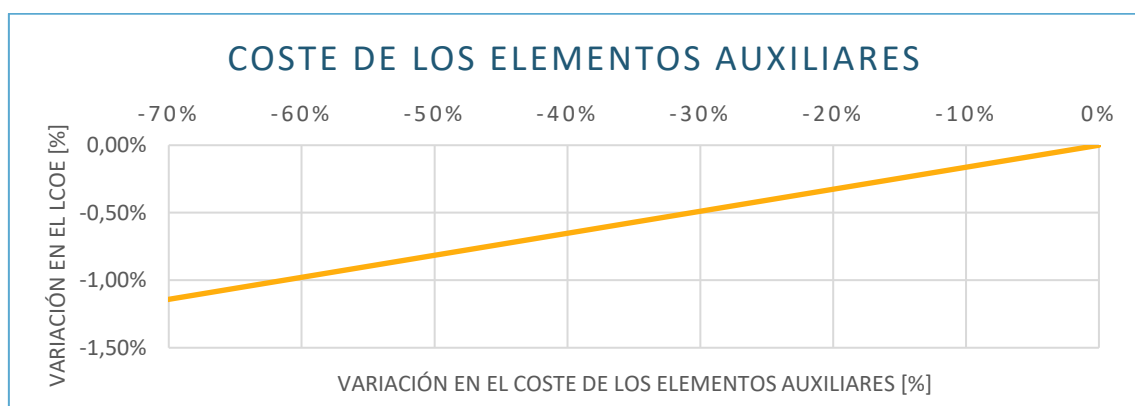


Figura 30: Variación del LCOE en función de variaciones en los costes de elementos auxiliares de las subestructuras

Variaciones en el coste de instalación y transporte de más del 20% se consideran excesivas dada la naturaleza de estas operaciones, pero incluso reducciones de este orden se consideran significativas (ver Figura 31).

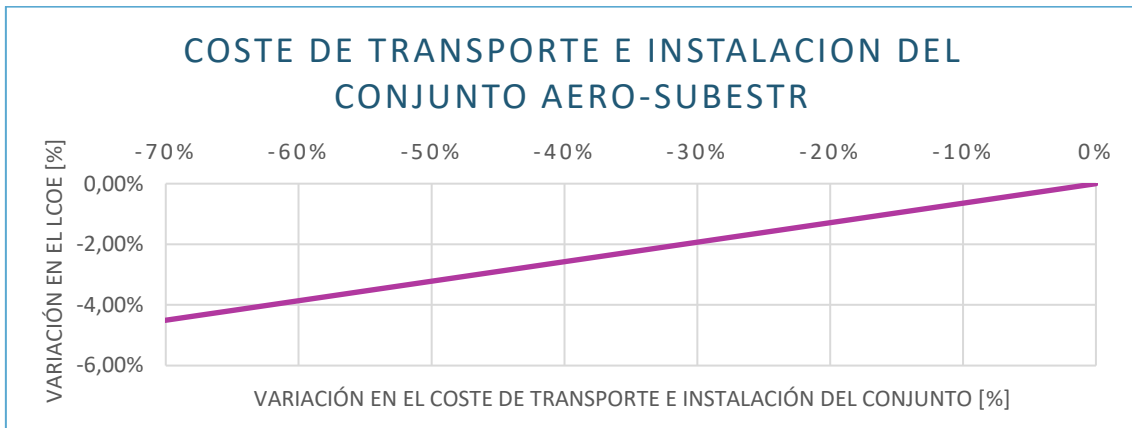


Figura 31: Variación del LCOE en función de variaciones en el coste de transporte e instalación de los conjuntos aerogenerador-subestructura

Se va a suponer una reducción en los costes de transporte e instalación proporcional a la reducción en el tamaño de la subestructura, por lo que en un escenario favorable sería del 10% y en uno conservador del 5%. Una reducción del 5% en el coste de transporte e instalación del conjunto aerogenerador-subestructura supone una reducción del CAPEX del 0,35% y del LCOE del 0,32%, mientras que una reducción del 10% supone una reducción del CAPEX del 0,70% y del LCOE del 0,64%.

Por lo tanto, para la innovación de *Enfoques híbridos avanzados para la interacción fluido estructura* tenemos un impacto potencial a corto plazo de una reducción del LCOE de entre el 2,34% y el 4,78%, que a medio plazo se transforma en una reducción del 8,76%.

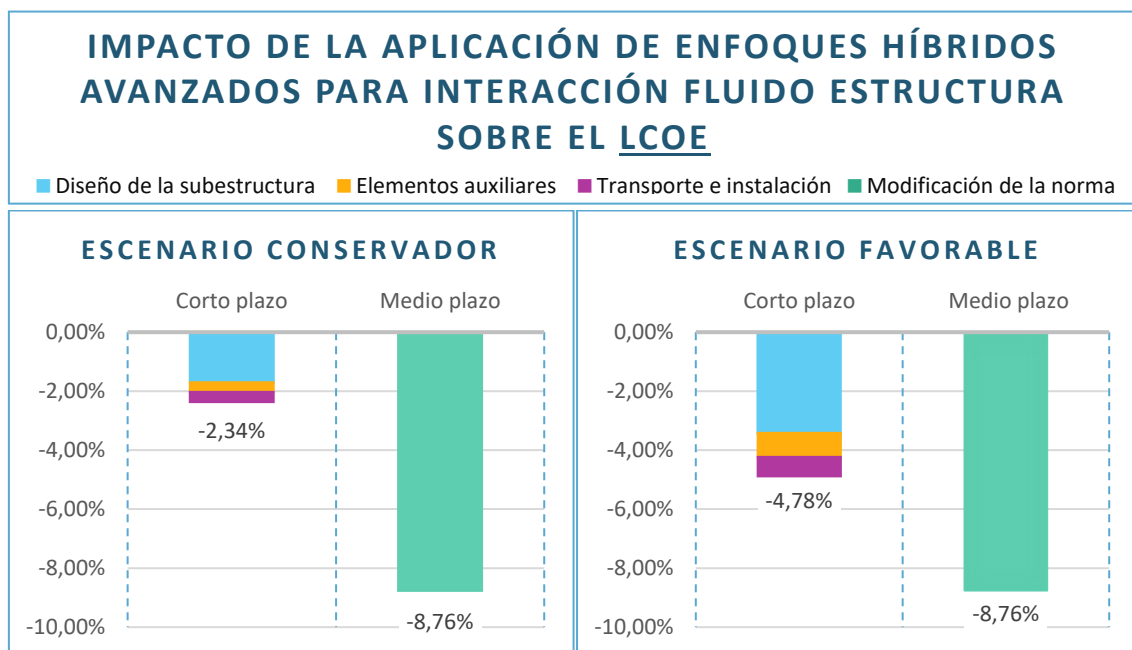


Figura 32: Impacto de la innovación I1 sobre el LCOE

6.4 INNOVACIÓN I2: DEEP LEARNING PARA MONITORIZACIÓN INTELIGENTE

6.4.1 Objetivo inicial de la innovación

El objetivo inicial del desarrollo de esta innovación, tal y como se recogía en la memoria técnica del proyecto, era “[el diseño de] un sistema eficiente de mantenimiento de la salud estructural de plataformas eólicas offshore, superando la limitación de los métodos tradicionales basados en la física, [desarrollando] [...] algoritmos de Deep Learning que permitan establecer el tipo de sistemas de medida su localización óptima y el número necesario de los mismos, de tal forma que se pueda monitorizar con garantías de éxito la detección temprana de posibles problemas estructurales a lo largo de la vida de una plataforma offshore”.

6.4.2 Desarrollo de la innovación

En esta innovación se ha desarrollado la aplicación de algoritmos Deep Learning para la monitorización de la salud estructural de grandes estructuras en eólica offshore y otras aplicaciones focalizadas en operación y mantenimiento. El uso conjunto de redes neuronales y un sistema de sensores permite controlar el estado estructural de las plataformas eólicas offshore abordando el mantenimiento de los parques de una forma más adecuada en cuanto a costes y seguridad.

A la hora de usar redes neuronales tenemos que resolver dos problemas: el directo y el inverso. El problema directo parte de una estructura sobre la que se colocan unos sensores, y a partir de esa estructura y los sensores obtenemos unas mediciones resolviendo una serie de ecuaciones de derivadas parciales. El problema inverso parte de mediciones con el objetivo de determinar el estado estructural de la plataforma eólica offshore. Son necesarias dos redes neuronales: una diseñada para reproducir el problema directo, y otra que, una vez que tenemos el problema directo almacenado en una tarjeta gráfica, permite resolver el problema inverso. En la Figura 33 se representa el proceso de cómo partiendo de unas mediciones (input) y usando una red neuronal se determina si la estructura está dañada.

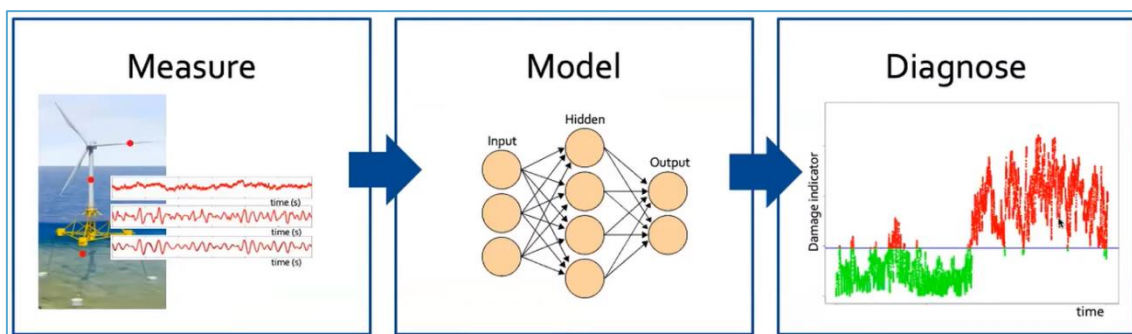


Figura 33: Proceso de diagnóstico de fallo mediante una red neuronal [36]

Las redes neuronales se pueden entrenar con datos sintéticos y con datos reales, siendo más fiables los resultados obtenidos cuando la red neuronal está alimentada de datos reales. En el caso de esta innovación solo se utilizaron datos sintéticos, lo que era de esperar ya que no se han implantado el número suficiente de parques eólicos offshore para poder disponer de los

datos suficientes. Además, si la red neuronal es entrenada con datos de fallo, ésta permitiría identificar el fallo real concreto en cada caso, pero si sólo se alimenta de datos de funcionamiento normal, como se ha desarrollado hasta el momento en esta innovación, solamente se puede determinar que existe un fallo mediante el estudio del error de reconstrucción de la red.

La innovación se ha centrado en simular un solo modo de fallo (la rotura de una línea de fondeo), pero el método es extrapolable a otros modos de fallo y elementos del aerogenerador flotante y del parque eólico offshore.

6.4.3 Evaluación del impacto de la innovación

6.4.3.1 Panel de expertos

El panel de expertos entrevistado para recabar información sobre la innovación I2 está compuesto por las personas de la Tabla 7. Las entrevistas a estas personas se realizaron durante el mes de febrero de 2021.

Tabla 7: Panel de expertos para la innovación I2

Ana Fdez-Navamuel Del Olmo	Estudiante de doctorado en el Área de Infraestructuras en Tecnalia Research & Innovation y la Universidad del País Vasco UPV/EHU, y participante en el desarrollo de la innovación
David Pardo Zubiaur	Profesor investigador en Ikerbasque, el Departamento de Matemáticas de la Universidad del País Vasco UPV/EHU, y el Basque Center for Applied Mathematics (BCAM), y participante en el desarrollo de la innovación
Germán Pérez Morán	Responsable de proyectos de eólica marina en Tecnalia Research & Innovation y coordinador del proyecto MATHEO
Joseba López Mendia	Investigador en Energías Renovables Offshore en Tecnalia Research & Innovation, y experto en modelización tecno económica para la optimización de parques de generación de energía marina
Raúl Rodríguez Arias	Director técnico (CTO) en NAUTILUS Floating Solutions y responsable de ingeniería marina en Tecnalia Research & Innovation
Vincenzo Nava	Investigador en el Basque Center for Applied Mathematics (BCAM) y en Energías Renovables Offshore en Tecnalia Research & Innovation, y participante en el desarrollo de la innovación

6.4.3.2 Resumen de la información recabada

Los impactos potenciales de esta innovación propuestos por las personas entrevistadas son los siguientes:

- Optimización de la organización logística del mantenimiento
- Optimización de los recursos utilizados en el mantenimiento
- Mejoras en el sistema de sensorización
- Variación del tiempo de inactividad
- Extensión de la vida útil del parque
- Variación de la duración de las intervenciones de mantenimiento

Al igual que en la innovación I1, no todos los informantes han coincidido sobre el impacto de la innovación, aunque en este caso solo se ha dado una discrepancia. En la Figura 34 se recoge el apoyo o rechazo de diferentes informantes a los distintos impactos propuestos. Destacan los impactos sobre la organización logística del mantenimiento, sobre el sistema de sensorización y sobre el downtime y la vida útil del parque.

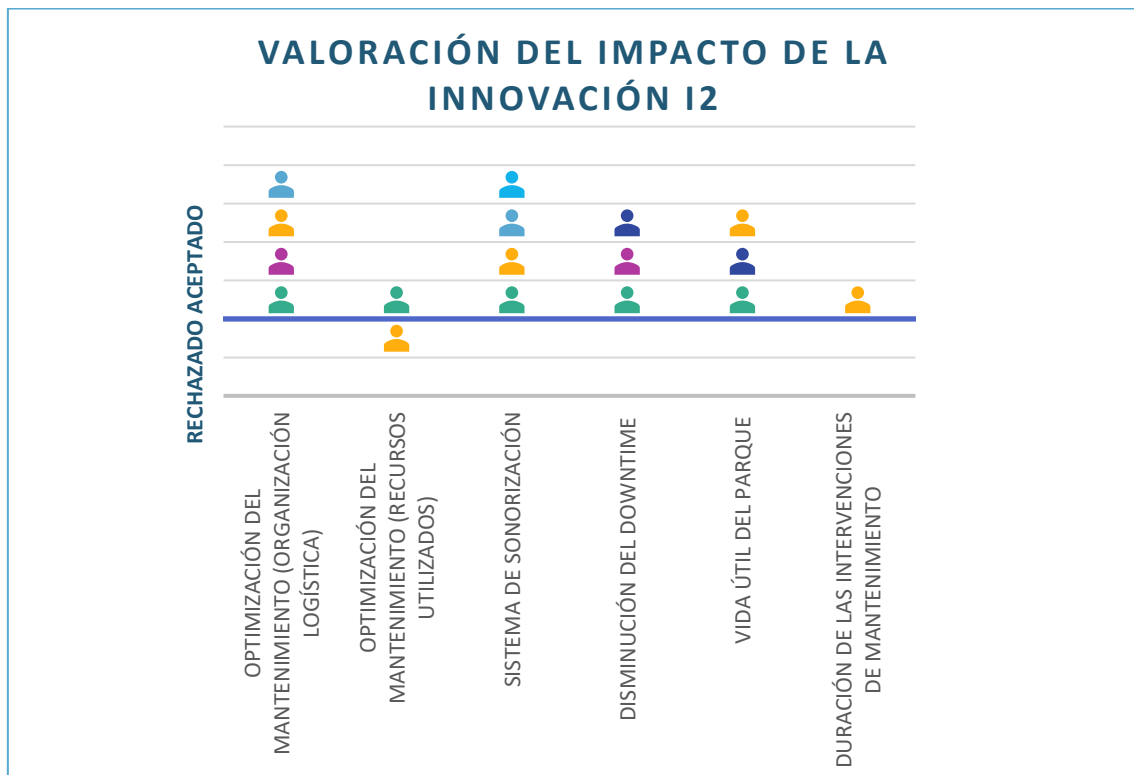


Figura 34: Valoración del impacto de la innovación I2 por diferentes informantes

Además de la proposición de estos impactos, se han señalado algunas valoraciones relativas a esta innovación, en cuanto a su aplicabilidad u otros aspectos relacionados con ella:

Se considera que esta innovación puede ser la más prometedora del proyecto MATHEO, ya que esta práctica es habitual en otras estructuras, como por ejemplo en puentes, por lo que se puede aprovechar el know-how y adaptarlo a los parques eólicos offshore. Además, los resultados de la innovación se han considerado muy satisfactorios. Pero también se señala que el impacto de

esta innovación será visible en un plazo de 5 o 10 años porque las tasas de fallo y los datos de situaciones de fallo aún no están lo suficientemente actualizados para las condiciones particulares de la eólica offshore, por ser un sector que se encuentra en sus primeros años de comercialización.

Se consideran dos mejoras aplicables a esta innovación: el considerar más de un modo de fallo para su clasificación, y el utilizar datos reales que son afectados por fenómenos externos, ruidos, o errores de medida. Además, existe la barrera de la falta de datos sobre estructuras dañadas, que es un problema que se da en todas las áreas en las que se aplica esta metodología, ya que prácticamente nunca se dispone de estos datos. Se señala que disponer de estos datos es necesario para poder validar los modelos, ya que no es suficiente con hacerlos funcionar correctamente con datos sintéticos.

6.4.3.3 Valoración del impacto

La información aportada se considera más que válida, pero existen discrepancias sobre la cuantificación de uno de los impactos, por lo que éste se rechazará. Los resultados de esta evaluación se recogen en la Tabla 8. Las razones para no aceptar el impacto sobre los recursos utilizados en las intervenciones de mantenimiento son que, a pesar de que el coste de las embarcaciones necesarias y del personal de mantenimiento puede que dependa de los requerimientos de la intervención, no es algo garantizado, y además se considera que la variación en el tiempo de operación es mucho más relevante.

Tabla 8: Aceptación o rechazo de los impactos potenciales de la innovación I2

	Aceptado
Optimización de la organización logística del mantenimiento	Si
Optimización de los recursos utilizados para el mantenimiento	No
Mejoras en el sistema de sensorización	Si
Disminución del downtime	Si
Extensión de la vida útil del parque	Si
Variación en la duración de las intervenciones de mantenimiento	Si

Los impactos aceptados se evaluarán a continuación en los cinco puntos siguientes.

1. **Optimización de la organización logística del mantenimiento:** La red neuronal permite mejorar la logística de las intervenciones de mantenimiento pudiendo planificarlas de forma más acorde a las necesidades reales del parque. Las operaciones de mantenimiento correctivo con una buena monitorización se trasladan al ámbito preventivo, pudiendo agrupar diferentes intervenciones en una sola salida de mantenimiento con objetivos fijos. Este impacto es tangible y a medio plazo, y se cuantificará como una reducción del 25% en la frecuencia de las operaciones de mantenimiento correctivo.
2. **Mejoras en el sistema de sensorización:** La colocación de sensores es un problema clásico, y esta innovación permite identificar los sensores más relevantes, que puedan aportar información útil y con el menor ruido posible. Algunos sensores se colocan de forma redundante, sobran, y esta tecnología ayuda a descartarlos. Además, se señala el cambio en el tipo de sensores, a sensores menos costosos que permitan obtener la misma información

gracias a las redes neuronales. También es importante mencionar que se ha de tener en cuenta que hay que formar a los profesionales del sector para poder utilizar esta tecnología. Este impacto es intangible, a corto plazo, y no se cuantificará, aunque se considera muy importante.

3. **Variación del tiempo de inactividad:** La detección temprana de fallos y una buena gestión del mantenimiento de los elementos críticos tiene un impacto directo sobre la disponibilidad, sobre todo cuando se trata de *major repairs*. Este impacto no se cuantificará de forma independiente, ya que será proporcional a la variación de las frecuencias de las intervenciones de mantenimiento. Es importante observar el impacto sobre la producción energética anual.
4. **Extensión de la vida útil del parque:** La monitorización de la fatiga y el estado de salud de los elementos del parque lleva a un mantenimiento más efectivo y a poder determinar con más precisión la vida remanente de los elementos, de modo que al llegar al final de la vida útil programada permite decidir si el parque puede ampliar su funcionamiento. Este impacto es tangible y observable a medio plazo. Se cuantificará como un aumento del 20% de la vida útil del parque.
5. **Variación de la duración de las intervenciones de mantenimiento:** La detección temprana de los fallos permite que el tiempo total de la intervención se acorte porque el tiempo de retardo se reduce. Este impacto es tangible, a medio plazo, y se propone cuantificarlo como una reducción del 25% de la duración de la intervención.

En cuanto a la aplicabilidad (***) de la tecnología desarrollada en la innovación a los diferentes componentes del parque, suponiendo que ya se aplica al RNA, se realizan las siguientes consideraciones:

- **Torre y palas:** Para estos elementos estructurales, esta tecnología es de muy fácil aplicación, teniendo en cuenta que solo se trata de interacción torre/pala aire, ya que el estado del arte en puentes y otras estructuras pueden apoyar la aplicación para torres y palas.
- **Subestructura:** En este caso, al contrario que con las palas, como la interacción fluido estructura es mucho más complicada son necesarios más modelos para poder caracterizar bien el problema. Pero los beneficios de la aplicación de esta tecnología son claros.
- **Líneas de fondeo y anclajes:** En estos elementos también se puede monitorizar la salud estructural permitiendo una organización del mantenimiento más efectiva de lo habitual, porque la observación en este caso es muy complicada son sistemas tradicionales. En este caso, es muy beneficioso en tanto en cuanto la duración de las intervenciones de los buzos se vería drásticamente reducida.
- **Cableado:** A parte de mantener y controlar las propiedades eléctricas del cableado, es importante que se mantenga la integridad estructural de los elementos de conexión a la red porque fallos mecánicos también pueden derivar en desconexiones del sistema. Esta tecnología apoya el control estructural y mecánico del cableado, aunque quizás sea de más difícil aplicación por falta de know-how.

En la tabla siguiente se recoge un resumen de lo anterior:

Tabla 9: Impactos aceptados de la innovación de la innovación I2 y su cuantificación

Impacto	Organización logística del mant.	Sistema de sensorización	Extensión de la vida útil	Duración de las intervenciones de mant.
Tangibilidad	SI	NO	SI	SI
Cuantificación del impacto	Reducción del 25% de la frecuencia de las interv. de mant. correctivo		Aumento entre el 20%	Reducción del 25% en la duración
Plazo	Medio	Corto	Medio	Medio
Aplicabilidad	***	***		***

La mejora en la logística de mantenimiento supone un aumento de la producción anual de energía (AEP) del 1,70% y también tiene como consecuencia un ahorro del 18,87% en el OPEX, lo que en conjunto se traduce en un impacto sobre el LCOE del 3,87%. Por otra parte, la extensión de la vida útil como impacto individual supone una reducción del LCOE del 3,44%. Y finalmente, la reducción en la duración de las intervenciones de mantenimiento supone un aumento de la AEP del 1,45% y una reducción del OPEX del 17,35%, que tiene como resultado una reducción del LCOE del 3,46%. Es importante mencionar que la suma los impactos individuales no equivale al impacto total.

Por lo tanto, para la innovación de *Deep Learning para monitorización inteligente* tenemos un impacto potencial a medio plazo de una reducción del LCOE del 10,03%, con un aumento en la producción anual de energía del 2,93% y un descenso en el OPEX del 19,98%.

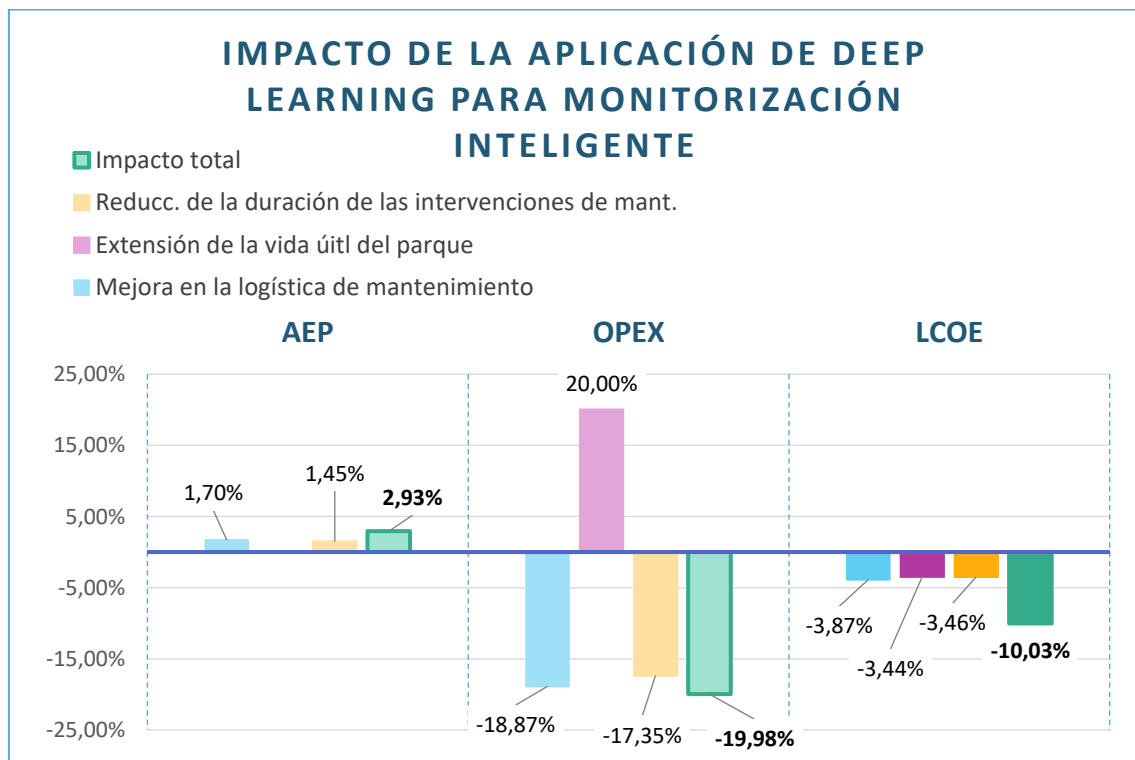


Figura 35: Impacto de la innovación I2 sobre el OPEX, AEP y LCOE

6.5 INNOVACIÓN I3: SPH PARA LA INTERACCIÓN FONDO ESTRUCTURA

6.5.1 Objetivo inicial de la innovación

El objetivo inicial del desarrollo de esta innovación, tal y como se recogía en la memoria técnica del proyecto, era la modelización del “fondo marino como como un fluido no Newtoniano mediante métodos Lagrangianos de partículas SPH, utilizando enfoques mesoscópicos y macroscópicos”, la validación de “las características reológicas y viscométricas de varios tipos de fondos, identificando cuales son las características que más afectan al diseño de componentes en el subsistema de anclaje y cimentación”, la verificación experimental de “los modelos SPH y la interacciones con varios tipos de anclajes y cimentaciones” y la extrapolación de “los modelos desarrollados (diagnos) de anclas y otras estructuras a escalas más grandes”.

6.5.2 Desarrollo de la innovación

En eólica offshore el estudio de los sedimentos no consolidados, que son los más difíciles de caracterizar, se realiza mediante estudios geotécnicos mediante el estudio de la geofísica del terreno y de perforaciones submarinas que permitan obtener información de las capas profundas del fondo marino. Estos estudios geotécnicos se basan en propiedades ingenieriles y mecánicas, pero son aproximaciones simplificadas ligadas a grandes incertidumbres sobre el comportamiento real del terreno. En el caso de esta innovación, se buscaba estudiar la reología de los sedimentos para comprender cómo se comportan en su interacción con las anclas. Los modelos reológicos buscan el poder estudiar, entre otros fenómenos, la presión de poros interna y el efecto de la columna de agua sobre el terreno, que no se evalúan con las técnicas tradicionales.

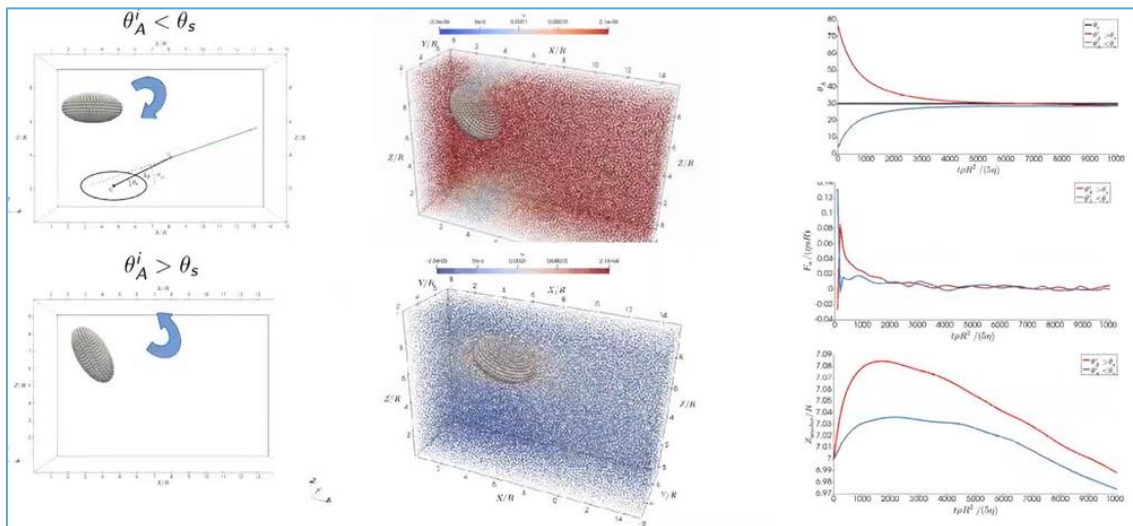


Figura 36: Resultados de la modelización SPH de un ancla de arrastre [37]

Los fluidos de los sedimentos no consolidados son altamente no newtonianos, y tienen un comportamiento entre sólido y líquido, por lo que su dinámica es muy compleja. Se puede afrontar el problema de la modelización desde el punto de vista microscópico o macroscópico. En eólica offshore interesa solucionar problemas a escala macroscópica, para la interacción de

grandes elementos con el fondo marino, por lo que el uso de las metodologías microscópicas ya desarrolladas supone un problema computacional. Por lo tanto, esta innovación propone el uso del método SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) para la discretización del modelo macroscópico continuo basado en derivadas parciales de velocidad, presión y concentración de tensiones. Este modelo SPH viscoplástico es Lagrangiano y *meshless*, lo que presenta la ventaja del acceso a la memoria del flujo y sus cambios históricos y evita problemas de distorsión del mallado. En el desarrollo de la innovación se ha simulado el modelo de un ancla de arrastre mediante un disco plano que se mueve dentro del fluido, estudiando la orientación del disco, la fuerza de tensión en la dirección de la línea de fondeo y la penetración del ancla.

Esta innovación daba paso a la consideración de modelos no puramente viscosos, teniendo además en cuenta la heterogeneidad del sedimento, y a la validación de los modelos en laboratorios.

6.5.3 Evaluación del impacto de la innovación

6.5.3.1 Panel de expertos

El panel de expertos entrevistado para recabar información sobre la innovación I3 está compuesto por las personas de la Tabla 10. Las entrevistas a estas personas se realizaron durante el mes de febrero de 2021.

Tabla 10: Panel de expertos para la innovación I3

Francesco Boscolo	Investigador en Energías Renovables Offshore en Tecnalia Research & Innovation especializado en el diseño de sistemas de fondeo y cableado dinámico
Germán Pérez Morán	Responsable de proyectos de eólica marina en Tecnalia Research & Innovation y coordinador del proyecto MATHEO
Iñigo Mendikoa	Investigador en Energías Renovables Offshore en Tecnalia Research & Innovation experto en el diseño de sistemas de fondeo
Joseba López Mendia	Investigador en Energías Renovables Offshore en Tecnalia Research & Innovation, y experto en modelización tecno económica para la optimización de parques de generación de energía marina
Néstor Vegas	Investigador en el Departamento de Geología en la Escuela de Ingeniería de Bilbao, y participante en el desarrollo de la innovación
Raúl Rodríguez Arias	Director técnico (CTO) en NAUTILUS Floating Solutions y responsable de ingeniería marina en Tecnalia Research & Innovation

6.5.3.2 Resumen de la información recabada

Los impactos potenciales de esta innovación propuestos por las personas entrevistadas son los siguientes:

- Mejoras en el diseño del sistema de fondeo
- Variación en las embarcaciones utilizadas durante la instalación de los sistemas de fondeo
- Variación en el tiempo de instalación de los sistemas de fondeo
- Variaciones en el mantenimiento de los sistemas de fondeo
- Variaciones en el proceso de instalación del cable de evacuación
- Variaciones en el mantenimiento del cable de evacuación
- Variación en la percepción del riesgo de la inversión
- Mejoras en otros aspectos logísticos de la instalación
- Variaciones en el proceso de desmantelamiento de las anclas
- Reducción en la incertidumbre sobre la elección de las anclas y el tiempo de decisión
- Extensión de la vida útil del parque

Al igual que en las innovaciones I1 e I2, no todos los informantes han coincidido sobre el impacto de la innovación, pero en este caso no se han dado contradicciones. En la Figura 37 se recoge el apoyo o rechazo de diferentes informantes a los distintos impactos propuestos. Destacan los impactos sobre el diseño del sistema de fondeo y su instalación.

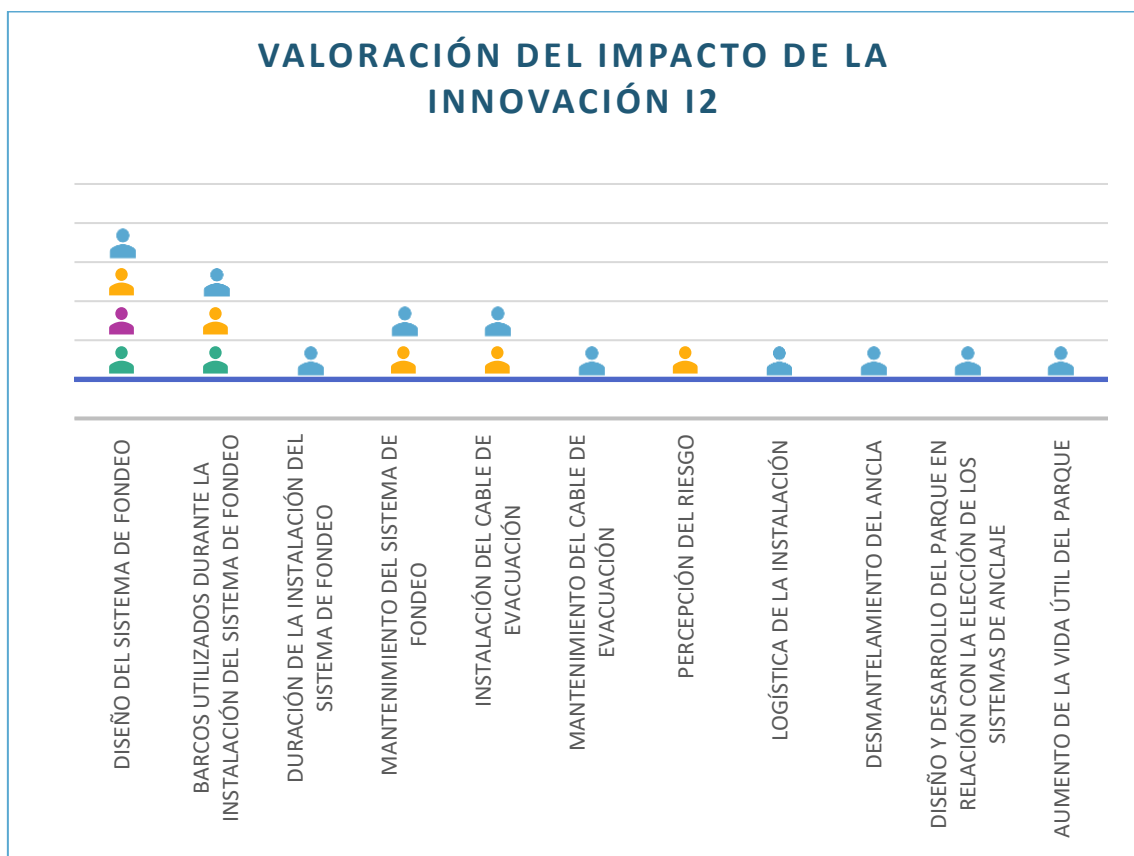


Figura 37: Valoración del impacto de la innovación I3 por diferentes informantes

Además de la proposición de estos impactos, se han señalado algunas valoraciones relativas a esta innovación, en cuanto a su aplicabilidad u otros aspectos relacionados con ella:

Se señala la importancia de conocer la fricción existente entre las líneas de fondeo y el fondo marino, ya que influye sobre la carga que soporta el ancla. Esto se debe a que las tensiones transmitidas por la línea de fondeo provenientes de la estructura no son soportadas en su totalidad por las anclas, sino que el terreno por fricción absorbe parte de esas tensiones. En condiciones extremas, si no existe suficiente rozamiento entre el fondo marino y las cadenas, la plataforma puede derivar resultando en esfuerzos transversales sobre las anclas e incluso roturas en los cables dinámicos. Conocer esta fricción se considera esencial ya que actualmente en las simulaciones se utilizan valores por defecto asociados a gran incertidumbre lo que se traduce en una tendencia hacia el sobredimensionamiento.

También se presentan los beneficios sobre la instalación de las anclas de arrastre, sobre las que se hace hincapié al ser las más utilizadas. La instalación se lleva a cabo posando el ancla en el fondo marino y tirando de ella de tal forma que ésta se hincque en el terreno hasta que se detecta en la línea de fondeo la tensión necesaria, habiendo calculado la profundidad del ancla a priori. Como se desconoce el comportamiento de los tipos de suelo, se considera que se suele adoptar una postura conservadora y se tiende a sobredimensionar el ancla.

Por otra parte, se señala que esta innovación es más crítica en los casos de eólica de base fija, a pesar de que tanto en fija como en flotante las campañas de estudio del fondo marino pueden alcanzar las decenas de millones de euros. También se sugiere que la relevancia puede ser pequeña, ya que los costes derivados del sistema de fondeo no son muy significativos.

6.5.3.3 Valoración del impacto

Todos los impactos sugeridos excepto uno son aceptados, pero hay dos que no se van a valorar. Los resultados de esta evaluación se recogen en la Tabla 11.

Tabla 11: Aceptación o rechazo de los impactos potenciales de la innovación I3

	Aceptado
Mejoras en el diseño del sistema de fondeo	Si
Variación en las embarcaciones utilizadas durante la instalación de los sistemas de fondeo	Si
Variación en la duración del tiempo de instalación de los sistemas de fondeo	Si
Variaciones en el mantenimiento de los sistemas de fondeo	Si
Variaciones en el proceso de instalación del cable de evacuación	Si
Variaciones en el mantenimiento del cable de evacuación	Si
Variación en la percepción del riesgo de la inversión	Si
Mejoras en otros aspectos logísticos de la instalación	No se valora
Variaciones en el proceso de desmantelamiento de las anclas	Si
Reducción en la incertidumbre sobre la elección de las anclas y el tiempo de decisión	No se valora
Extensión de la vida útil del parque	No

No se valorarán dos de los impactos por las siguientes razones:

- Las mejoras en aspectos logísticos, que no están directamente relacionadas con las embarcaciones utilizadas o con la duración de la instalación, relacionan la utilización de barcos más pequeños con la posibilidad de apoyo en puertos más pequeños, con gente menos especializada para poder realizar las actividades de instalación, y con la posibilidad de un mayor apoyo en la industria local. Estos aspectos son muy difíciles de cuantificar y dependerán mucho de la localización concreta de los puertos y el emplazamiento. Por lo tanto, se acepta la posibilidad de que se den estas mejoras, pero no se van a valorar cuantitativamente.
- En cuanto a la reducción de incertidumbre sobre la elección de las anclas y el tiempo de decisión sobre el sistema de fondeo, se acepta este impacto porque una mejora en la caracterización del fondo conlleva una reducción en la incertidumbre y facilita el proceso de decisión de elección de anclas, pero es algo muy difícil de cuantificar de forma rigurosa y por ello no se valorará.

En cuanto a la extensión de la vida útil del parque, no se acepta el impacto en este caso porque, según lo indicado en [38], la vida útil de diseño de las anclas ya supera la de la subestructura flotante. Por lo tanto, como la vida útil del parque no está limitada por las anclas, una mejor elección o diseño de estas tampoco podrá extenderla.

Los impactos aceptados que se van a valorar se comentan a continuación en los ocho puntos siguientes.

1. **Mejoras en el diseño del sistema de fondeo:** Una mejor caracterización del fondo marino puede ayudar a definir mejor los requerimientos del ancla y del sistema de fondeo, a través por ejemplo de una mejor definición de las curvas de penetración que den lugar a diseños menos conservadores. Este impacto es tangible y a corto plazo. La reducción del tamaño del ancla que se considera viable es del 5 al 10%.
2. **Variación en las embarcaciones utilizadas durante la instalación de los sistemas de fondeo:** La elección del barco para la instalación de cadenas y anclas depende de su tamaño, peso, y de la fuerza de arrastre del ancla en el terreno necesaria para realizar la instalación y garantizar un nivel de penetración adecuado. Este impacto es tangible y a corto plazo, y se cuantifica como una reducción entre el 5 y el 10% del coste de las embarcaciones AHTS.
3. **Variación en el tiempo de instalación de los sistemas de fondeo:** Si el tiempo de instalación está mejor caracterizado porque se sabe cómo se va a comportar un ancla en concreto en el terreno, se pueden ajustar mejor a las ventanas de buen tiempo a la hora de organizar la instalación. Este impacto es tangible, pero no se ha podido cuantificar por lo que se estudia mediante análisis de sensibilidad para valorar su impacto potencial.
4. **Variaciones en el mantenimiento de los sistemas de fondeo:** Sabiendo cómo se comporta el ancla en el suelo, se puede caracterizar mejor las cargas a las que está sometida, como por ejemplo en situaciones de tormenta en las que el terreno puede licuar y si hay picos de fuerza el ancla se puede mover. De este modo se puede determinar mejor cuando se llegará a una situación crítica. Este efecto se cuantifica mediante análisis de sensibilidad
5. **Variaciones en el proceso de instalación del cable de evacuación:** Es posible una reducción en los costes de instalación del cable de evacuación, por una buena elección de los barcos,

o incluso sustitución del uso de barcos por ROVs para cavar las zanjas en las que se va a sepultar el cable. Este impacto también se estudia mediante análisis de sensibilidad.

6. **Variaciones en el mantenimiento del cable de evacuación:** Se acepta que se pueda producir una reducción en la frecuencia de los fallos del cableado al poder caracterizar mejor si el cable queda protegido dependiendo de las características reológicas del terreno. De nuevo, este impacto se estudia mediante análisis de sensibilidad.
7. **Variación en la percepción del riesgo de la inversión:** Al reducirse la incertidumbre el riesgo de la inversión se reduce la tasa de descuento, pero como este es un parámetro económico su variación no está garantizada solamente por avances tecnológicos. Su impacto se estudiará mediante análisis de sensibilidad.
8. **Variaciones en el proceso de desmantelamiento de las anclas:** En general el proceso de desmantelamiento será más sencillo al disponer de mayor conocimiento sobre fenómenos como la succión. La cuantificación de este fenómeno se relaciona con los costes de instalación por lo que se estudiará de ese modo.

En la tabla siguiente se recoge un resumen de lo anterior:

Tabla 12: Impactos aceptados de la innovación de la innovación I3 y su cuantificación

Impacto	Diseño del sistema de fondeo	Embarcaciones utilizadas en la inst. del sistema de fondeo	Tiempo de instalación del sistema de fondeo	Mantenimiento del sistema de fondeo
Tangibilidad	SI	SI	SI	SI
Cuantificación del impacto	Reducción del 5-10% en el peso del ancla	Reducción del coste de un AHTS en el 5-10%	Mediante análisis de sensibilidad	Mediante análisis de sensibilidad
Plazo	Corto	Corto	Corto	Corto
Aplicabilidad				
Impacto	Instalación del cable de evacuación	Mantenimiento del cable de evacuación	Percepción de riesgo de la inversión	Desmantelamiento de anclas
Tangibilidad	SI	SI	SI	SI
Cuantificación del impacto	Mediante análisis de sensibilidad	Mediante análisis de sensibilidad	Mediante análisis de sensibilidad	En relación con los costes de instalación
Plazo	Corto	Corto	Medio	Largo
Aplicabilidad			No depende únicamente de la tecnología	

Una variación de entre el 5% y el 10% en el tamaño del ancla supone una reducción del LCOE de entre el 0,04% y el 0,07%. Y una variación entre el 5% y el 10% del coste de un buque AHTS supone una reducción del LCOE de entre el 0,21% y el 0,42%. Estas reducciones del LCOE son pequeñas, por lo que se realizan análisis de sensibilidad para poder comparar estos dos impactos con los otros cinco con el objetivo de sacar conclusiones relevantes.

Anticipando impactos de magnitud variable sobre el LCOE, se estudian los diferentes impactos locales sobre los costes fabricación, transporte e instalación (ligados a los costes de desmantelamiento), y mantenimiento, tanto para los sistemas de fondeo como para el sistema de conexión a la red.

En cuanto al impacto local de la innovación sobre los costes del sistema de fondeo, variaciones en variables relacionadas con el transporte e instalación suponen el mayor impacto porcentual sobre esos costes concretos (ver Figura 38). Pero este impacto a priori mayor se puede ver limitado ya que tanto los costes de fabricación como de mantenimiento suponen en ambos casos más del doble de los costes de transporte e instalación.

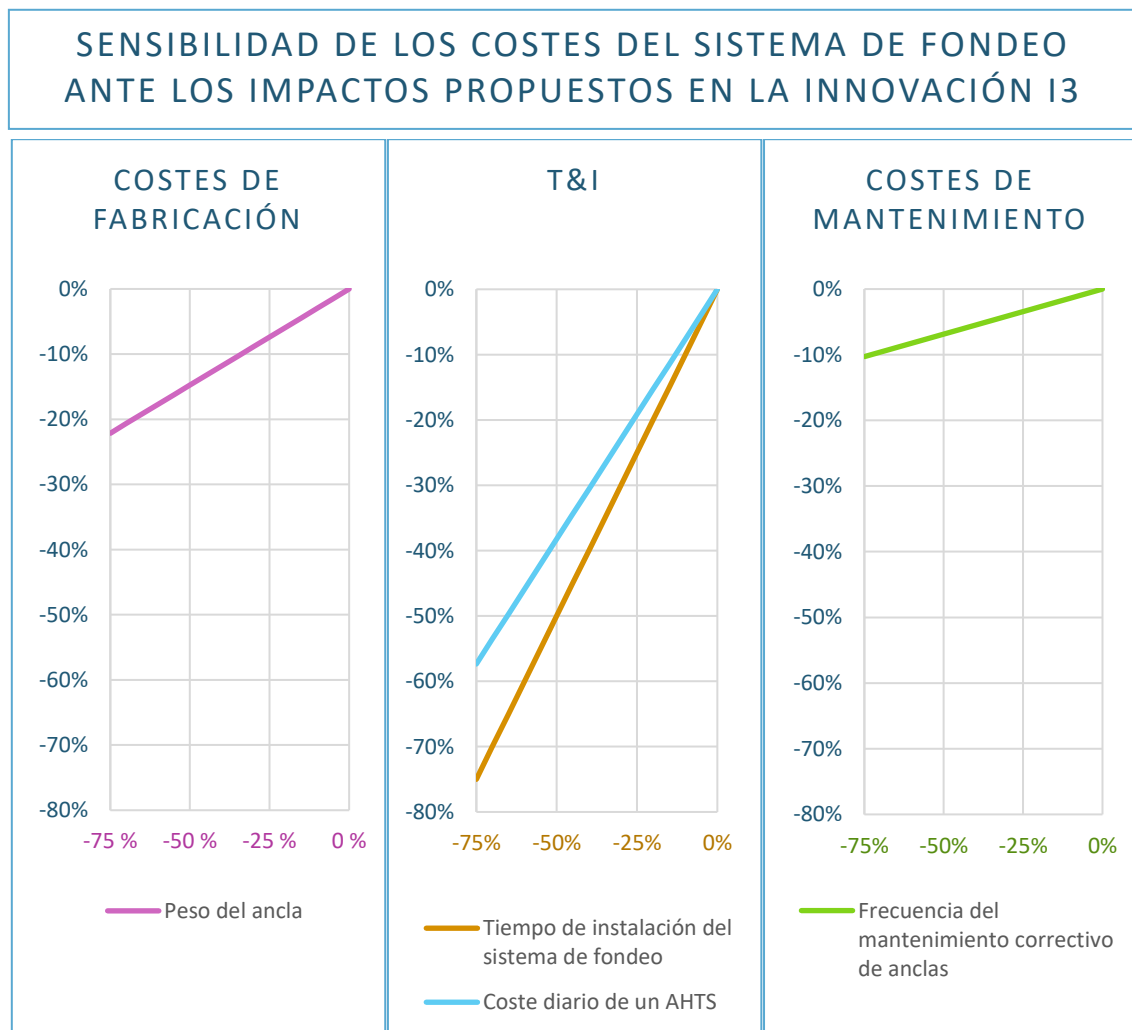


Figura 38: Análisis de sensibilidad de los impactos de la innovación I3 sobre los costes del sistema de fondeo

El impacto local de la innovación sobre los costes del sistema de conexión a la red tiene como origen mejoras relacionadas con la instalación y el mantenimiento del cable de evacuación. Destaca impacto de reducciones en el coste de instalación del cable de evacuación sobre el coste total de instalación del sistema de conexión a la red, que es mayor que el impacto de la reducción del mantenimiento correctivo del cable de evacuación sobre los costes totales de mantenimiento para el sistema de conexión a la red (ver Figura 39).

SENSIBILIDAD DE LOS COSTES DEL SISTEMA DE CONEXIÓN A LA RED ANTE LOS IMPACTOS PROPUESTOS EN LA INNOVACIÓN I3

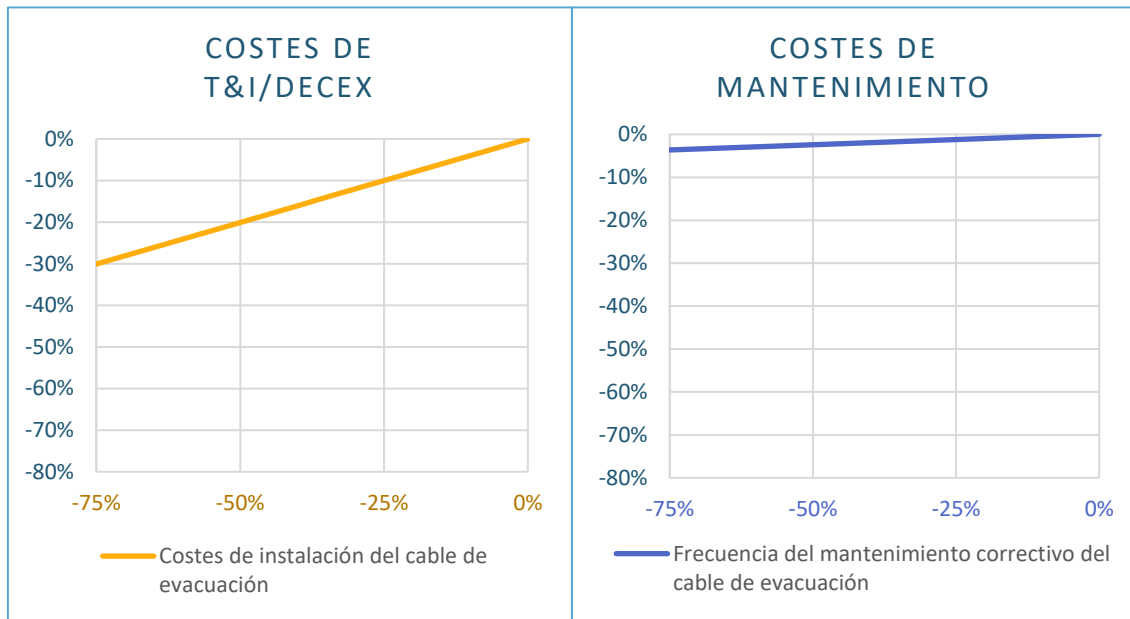


Figura 39: Análisis de sensibilidad de los impactos de la innovación I3 sobre los costes del sistema de conexión a la red

La sensibilidad del LCOE ante los 6 impactos anteriores propuestos depende de las dimensiones de los costes individuales, ya que una reducción del 20% sobre un coste de 100 M€ es más significativa que una reducción del 70% sobre un coste de 20 M€.

Por otra parte, las variaciones en la tasa de descuento, que representa la percepción de riesgo, tienen un impacto directo sobre el LCOE, que es muy considerable ya que una tasa de descuento un 1% mayor o menor supone una variación del 7% en el LCOE (ver Figura 40).

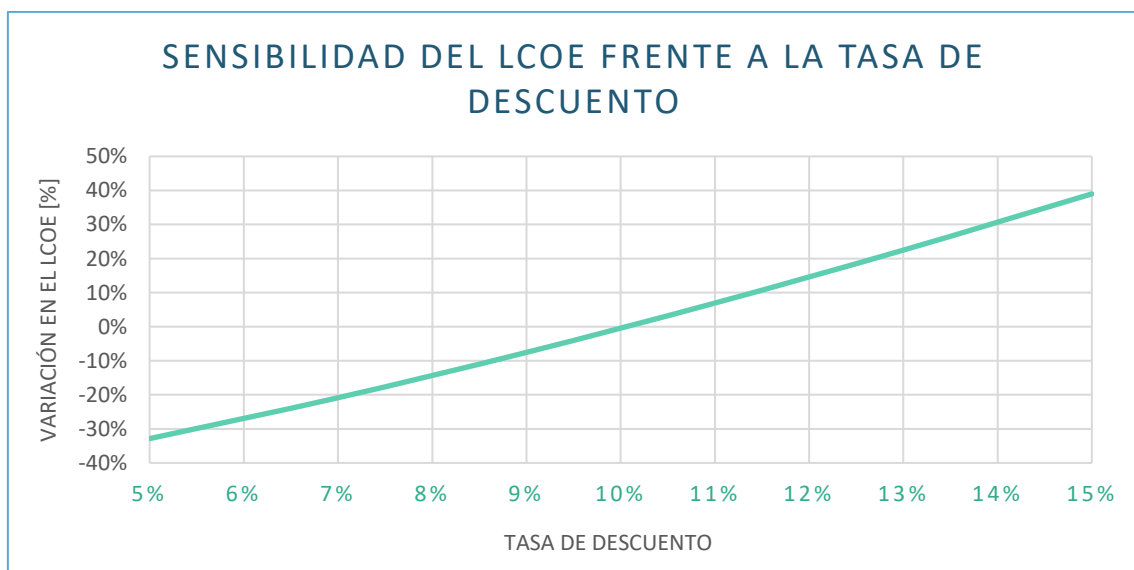


Figura 40: Sensibilidad del LCOE ante diferentes valores de la tasa de descuento

En la Figura 41 se muestran los resultados del análisis de sensibilidad realizado para los 7 impactos propuestos sobre el LCOE. El efecto de la tasa de descuento sobre el LCOE es con diferencia el más significativo. Como ya se ha mencionado, las variaciones sobre la percepción de riesgo sí que se apoyan en avances tecnológicos, pero no están garantizadas, y además el impacto de una innovación aunque reduzca la incertidumbre puede tener el efecto contrario aumentando el riesgo de la inversión al utilizar tecnologías más novedosas.

Si se estudian en detalle el resto de los impactos, se pueden definir las variables respecto a las cuales el LCOE es más sensible. Se trata de estudiar si, a pesar de que los impactos individuales serán pequeños, el impacto conjunto será significativo identificando las variables más críticas.

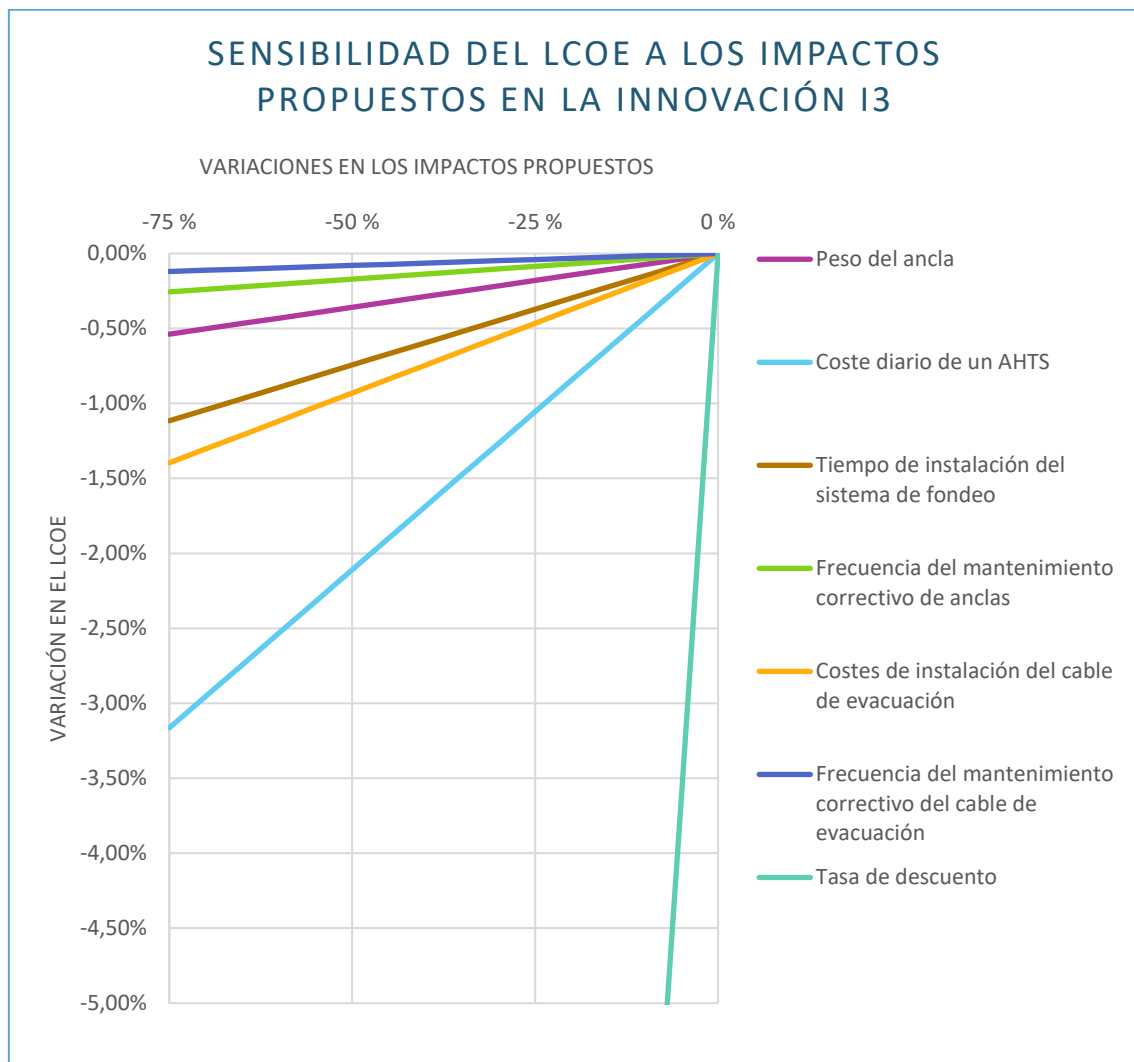


Figura 41: Análisis de sensibilidad sobre el LCOE de los impactos propuestos en la innovación I3

Variaciones en el tamaño del ancla, que se traducen en variaciones en su peso, son las segundas más significativas. A pesar de que se han propuesto variaciones de entre el 5% y el 10%, en función del tipo de sedimentos del fondo marino el peso de un ancla puede variar hasta en un 50%. Variaciones de esta magnitud suponen una reducción de casi el 0,4% en el LCOE. Estas variaciones también se consideran probables y significativas.

Las reducciones en el coste diario de un AHTS tienen un gran impacto sobre el LCOE, pero esto no se debe solamente a que se producen ahorros en los costes de T&I de los sistemas de fondeo, sino que estos barcos se han considerado necesarios para la transporte e instalación de los conjuntos aerogenerador-subestructura en el parque eólico base. Por esta razón, aunque sea un impacto propuesto y cuantificado por el panel de expertos no se va a cuantificar de forma directa porque incurriría en un falso ahorro en los costes de transporte e instalación de los aerogeneradores. Reducciones del 10% en el coste de los buques AHTS tiene un impacto sobre el coste de T&I para los sistemas de fondeo del 7,65%. Pero este coste también está relacionado con la duración de la instalación del sistema de fondeo, por lo que ambos impactos se deben tener en cuenta de forma sinérgica. Una reducción del 10% en la duración de la maniobra de transporte e instalación supone un ahorro del 10% en su coste. En conclusión, el impacto de la innovación I3 sobre la duración de la instalación de los sistemas de fondeo y el coste de los buques AHTS utilizados en ella, se cuantificará como una reducción del 16,88% de los costes de T&I de los sistemas de fondeo.

Variaciones sobre el proceso de instalación del cable de evacuación son destacables respecto a impacto sobre el LCOE. Estas variaciones se consideran probables y, teniendo en cuenta este análisis, significativas.

No se van a considerar los impactos sobre la frecuencia del mantenimiento correctivo de las anclas ni sobre la frecuencia del mantenimiento correctivo del cable de evacuación, por considerarse ambos impactos los menos significativos sobre el LCOE.

Ya que todos los impactos, salvo el impacto de la tasa de descuento, suponen pequeñas variaciones sobre el LCOE, se va a considerar una situación favorable en la que los impactos potenciales sean los máximos. Por lo tanto, se va a considerar una reducción del 50% en el tamaño del ancla, una reducción del 16,88% en el coste de transporte e instalación de los sistemas de fondeo, y una reducción del 30% en el coste de instalación del cable de evacuación. Esto supone una reducción de 1,17% en el LCOE a corto plazo. En cuanto al impacto sobre el LCOE a medio plazo que tendrá la posible variación de la tasa de descuento, considerando realista una posible una nueva tasa de descuento de 9,5% tras la reducción de la incertidumbre, se observa una reducción del LCOE del 4,02%.

Como se ha comentado, también existe un impacto sobre el coste de desmantelamiento del parque. Este se cuantifica como derivado del impacto sobre los costes de instalación al estar relacionados. A largo plazo se observará, bajo el escenario favorable descrito, una reducción del DECEX del 3,89%.

Por lo tanto, para la innovación de *SPH para la interacción fondo estructura* tenemos un impacto potencial bajo un escenario favorable de una reducción del LCOE del 1,17% a corto plazo y del 4,02% a medio plazo.

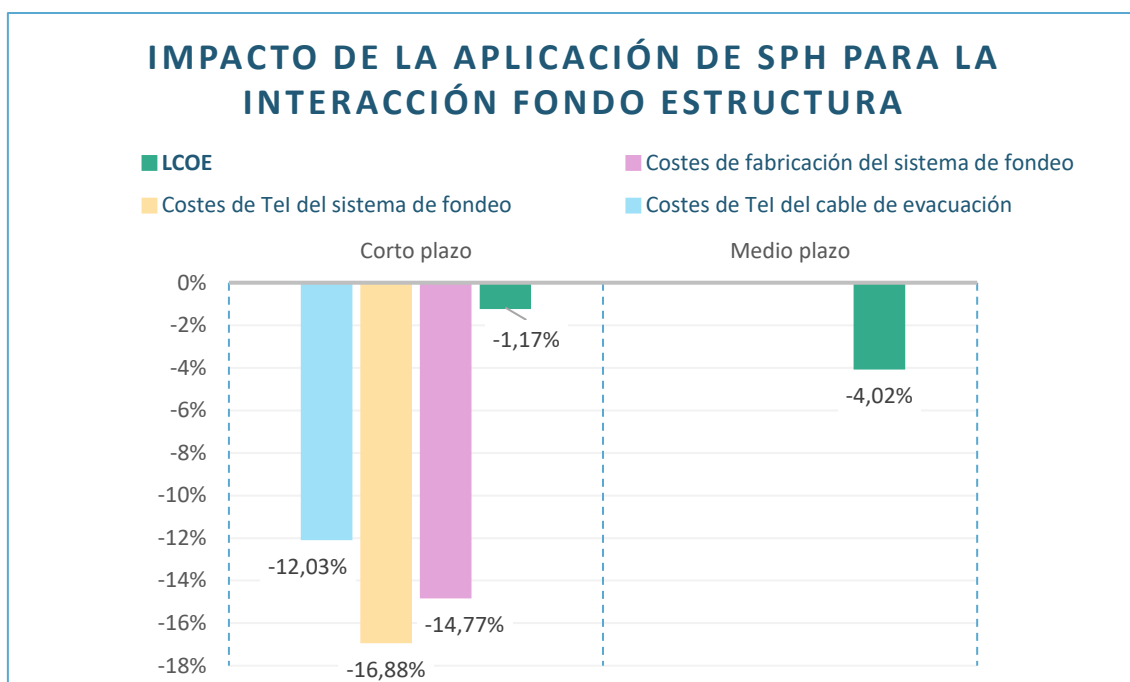


Figura 42: Impacto de la innovación I3 sobre el LCOE

6.6 COMPARACIÓN DE LOS IMPACTOS DE LAS TRES INNOVACIONES

A la hora de comparar el impacto de las innovaciones desarrolladas en el proyecto MATHEO (ver Figura 43), a corto plazo la aplicación de enfoques híbridos avanzados para la interacción fluido estructura es la que mayor impacto tiene sobre el LCOE, pero a medio plazo la innovación que destaca es la aplicación de Deep Learning para la monitorización inteligente. A medio plazo la aplicación de SPH para la interacción fondo estructura aumenta considerablemente su impacto sobre el LCOE por el efecto de la reducción de la tasa de descuento por la variación en la percepción del riesgo.

La aplicación de redes neuronales para la optimización del mantenimiento (I2) es la innovación de mayor impacto ya que es aplicable a la mayoría de los elementos del parque, mientras que las otras dos innovaciones tienen una aplicación más localizada. A pesar de que la caracterización del comportamiento del fondo marino (I3) sea clave para reducir la incertidumbre sobre el rendimiento de los sistemas de fundeo, el coste de estos elementos es muy pequeño en comparación con otros elementos del parque. Y en cuanto al estudio del rebosamiento (I1), su aplicabilidad es tan limitada a dispositivos concretos que su impacto estará igual de limitado.

En cuanto a los impactos parciales sobre el coste total de construcción, el coste de operación y mantenimiento, el coste de desmantelamiento y la producción anual de energía, es claro que la innovación I1 destaca por su impacto en el CAPEX a medio plazo, y la innovación I2 por su impacto en el OPEX y en la AEP también medio plazo.

IMPACTO DE LAS INNOVACIONES DESARROLLADAS EN MATHEO A CORTO Y MEDIO PLAZO

I1: Enfoques híbridos avanzados para interacción fluido estructura
 I2: Deep Learning para monitorización inteligente
 I3: SPH para la interacción fondo estructura

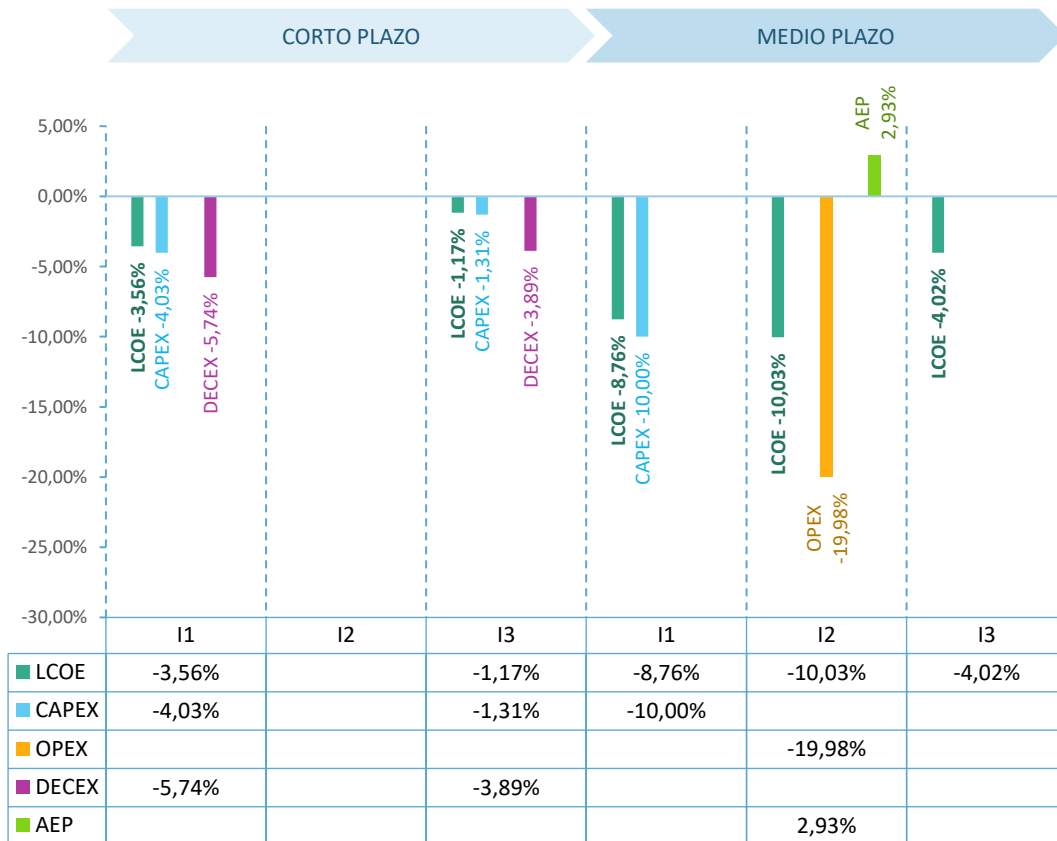


Figura 43: Impacto de las innovaciones desarrolladas en MATHEO sobre el LCOE, CAPEX, OPEX, DECEX y AEP

7 METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO

En este capítulo se presentan las tareas necesarias para llevar a cabo el proyecto, así como su planificación acompañada del diagrama de Gantt, y el presupuesto de este proyecto.

7.1 DESCRIPCIÓN DE TAREAS

Las tareas son las siguientes:

- **T1: Definición de los objetivos y el alcance del proyecto**
Descripción: en esta tarea se define y acota el proyecto, para sentar las bases del mismo y orientar el trabajo en la dirección adecuada.
- **T2: Recopilación de información general sobre el estado del sector eólico flotante**
Descripción: en esta tarea se realiza una revisión bibliográfica relativa a la energía eólica offshore, haciendo hincapié en la energía eólica flotante, su contexto y situación actual de la tecnología.
- **T3: Búsqueda bibliográfica sobre innovaciones en eólica flotante**
Descripción: se lleva a cabo una revisión bibliográfica relativa la innovación en energía eólica offshore, haciendo hincapié en la energía eólica flotante.
- **T4: Estudio de las alternativas y de la herramienta a utilizar**
Descripción: en esta tarea se estudian las posibles alternativas para la realización del proyecto y en concreto la herramienta utilizada para llevarlo a cabo.
- **T5: Análisis de sensibilidad e identificación de las variables críticas**
Descripción: se identifican mediante análisis de sensibilidad variables críticas que serán las susceptibles a variaciones que pueden causar cambios significativos en los costes, la producción de energía y sobre el LCOE, con el propósito de poder definir áreas de innovación significativas para futuros proyectos.
- **T6: Entrevista al panel de expertos en relación con las innovaciones desarrolladas en el proyecto MATHEO**
Descripción: se entrevista a un panel de expertos/as, con el objetivo de que éstos aporten los datos necesarios sobre las innovaciones desarrolladas en MATHEO para poder realizar a posteriori un análisis más profundo de cada caso.
- **T7: Procesado de la información recogida en las entrevistas**
Descripción: se valora la calidad de la información recogida, se identifican posibles lagunas, y se trazan posibles hipótesis sobre el impacto de la innovación en áreas que no haya mencionado el/la informante.
- **T8: Identificación del impacto de las innovaciones desarrolladas en el proyecto MATHEO sobre el LCOE y otros parámetros relevantes**
Descripción: se trazan las conclusiones a partir del análisis anterior y se identifican los impactos concretos de las innovaciones sobre el LCOE y otros parámetros relevantes como el CAPEX, OPEX, DECEX o AEP.

Además de estas tareas, a lo largo del proyecto han tenido lugar diferentes reuniones y se han ido superando hitos indicados en el apartado siguiente.

7.2 DIAGRAMA DE GANTT

En la Figura 44 se muestra el diagrama de Gantt del proyecto, indicando la duración en días de cada tarea. Además de las tareas definidas en el apartado anterior, se incluyen hitos y reuniones. No se incluyen en el diagrama por motivos de claridad, pero cada semana tiene lugar una reunión con los coordinadores del proyecto en TECNALIA de una duración aproximada de 1,25 horas semanales. El director del proyecto se considera presente a un 5% durante la duración del proyecto salvo en la tarea R en la que está presente al 100%.

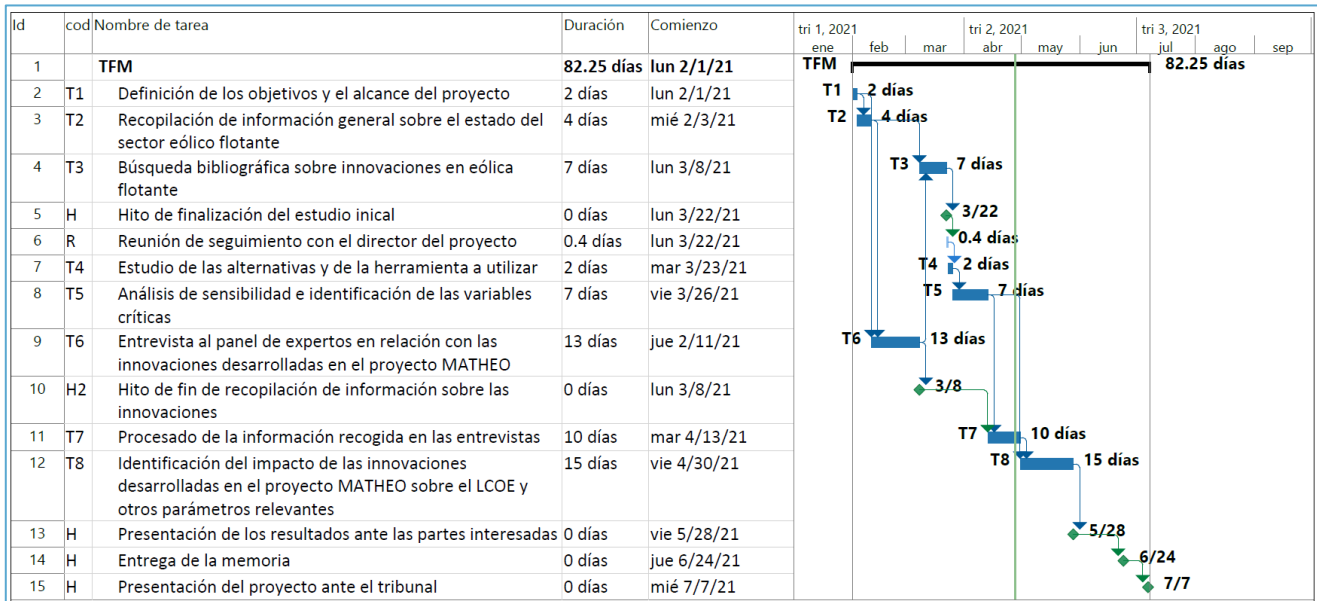


Figura 44: Diagrama de Gantt del proyecto

Los recursos utilizados en el proyecto se dividen en humanos, ofimáticos, y materiales. Los recursos humanos con la ingeniera en prácticas autora del proyecto, el director del proyecto y los dos ingenieros senior coordinadores del proyecto en TECNALIA. En la gráfica a continuación se representa el trabajo semanal que representa cada uno de los recursos humanos.

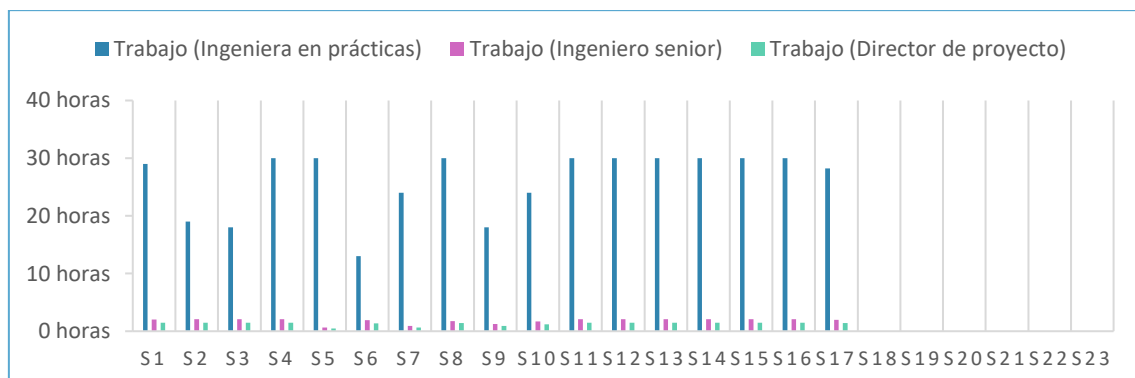


Figura 45: Uso horario de los recursos

Los recursos ofimáticos son únicamente la licencia de Microsoft Office que se prorratea en función del uso en el proyecto. Los recursos materiales se simplifican en un coste fijo de la estación de teletrabajo necesaria para llevar a cabo el proyecto.

7.3 PRESUPUESTO

El presupuesto del proyecto se lleva a cabo en función del uso horario de los recursos humanos, del prorrateo de la licencia de Microsoft Office y el coste de la estación de teletrabajo. Los costes de los recursos son los siguientes:

Tabla 13: Costo de los recursos

	RECURSO	COSTO
Material	Ingeniera en prácticas	400 €/mes
	Ingeniero sénior x2	50 €/hora
	Director de proyecto	50 €/hora
Ofimático/material	Licencia de Microsoft Office	0,56 €/h
	Estación de teletrabajo	1.500 €
Otros	Imprevistos	1%

Teniendo en cuenta el uso horario de los recursos humanos, el coste semanal de cada uno se recoge en la Figura 46. Teniendo en cuenta estos costes y el resto de costes, el presupuesto del proyecto se recoge en la Tabla 14.

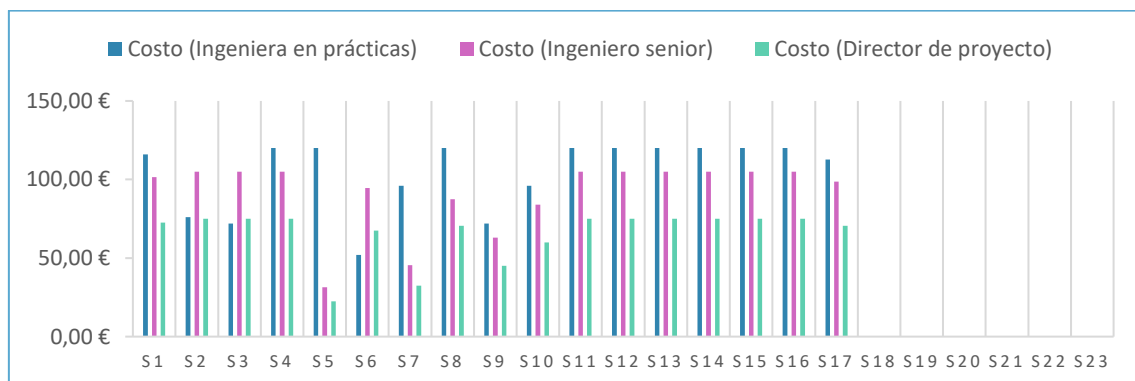


Figura 46: Costo horario de los recursos

Tabla 14: Presupuesto del proyecto

Nombre	Trabajo	Costo
Ingeniera en prácticas	443 horas	1.770 €
Ingeniero senior	31 horas	1.550 €
Director de proyecto	22 horas	1.115 €
Licencia de Microsoft Office		250 €
Estación de teletrabajo		1.500 €
Improvisos		75 €
COSTE TOTAL DEL PROYECTO		6.260 €

8 CONCLUSIONES

El objetivo principal de este proyecto era evaluación de las innovaciones desarrolladas en el proyecto MATHEO, utilizando para ello la herramienta acompañada de un protocolo para la evaluación de innovaciones en eólica flotante desarrollada en [4]. Se ha comprobado que la herramienta utilizada es más que adecuada para estudiar y cuantificar el impacto de innovaciones o modificaciones, tanto en el diseño del parque en general como en sus componentes y procesos, sobre el LCOE y otros parámetros relevantes como el CAPEX u OPEX o la disponibilidad y la producción de energía. Además se ha verificado su utilidad a la hora de estudiar la sensibilidad de diferentes parámetros a través del formulario incrustado en la propia herramienta.

Al examinar los estudios y el repositorio relativos a innovaciones en eólica offshore se han podido identificar diferentes áreas de innovación relevantes. Estos estudios permiten adquirir una perspectiva global de dónde se encuentra el sector eólico flotante en este momento y cuáles son las carencias que ha de abordar. Las innovaciones propuestas como importantes coinciden con los resultados y las conclusiones extraídas de los análisis de sensibilidad del estudio de las variables críticas.

En la tarea de identificación de variables críticas queda en evidencia que en el propio desglose de costes se pueden identificar áreas relevantes en el CAPEX del parque eólico, pero que en el caso del OPEX para poder identificar las actividades o aspectos críticos los análisis de sensibilidad son esenciales. Uno de los resultados más importantes de este estudio es la cuantificación numérica del impacto del mantenimiento correctivo sobre el LCOE, siendo su frecuencia el parámetro más significativo.

En cuanto a la valoración del impacto de las innovaciones desarrolladas en el proyecto MATHEO, se señala la importancia de llevar a cabo entrevistas a varias personas sobre una misma innovación siendo unas de ellas participantes en el desarrollo de la innovación y otras expertas en su área de aplicación concreta. Los resultados obtenidos en este estudio se consideran satisfactorios y con un adecuado grado de detalle de acuerdo con los requerimientos del proyecto. A modo de resumen, el impacto en el LCOE a medio plazo se puede cuantificar en un 4% para la interacción fondo-estructura, un 8,75% para los modelos para la caracterización del rebosamiento, y un 10% para los algoritmos Deep Learning aplicados a la O&M.

9 REFERENCIAS

- [1] Wind Europe, «Floating Offshore Wind Vision Statement,» 2017.
- [2] D. de-Jager, «Commercial Readiness Index Assessment, Using the method as a tool in renewable energy policy design,» de *NEDO / IEA-RETD Workshop: Insights into Renewable Energy Technology Deployment*, Tokyo, 2017.
- [3] CATAPULT Offshore Renewable Energy, «Floating wind: technology assesment, interim findings,» 2015.
- [4] A. Escalona-Corral, «Desarrollo de una herramienta para la valoración del impacto de innovaciones en eólica flotante,» Universidad del País Vasco , Bilbao , 2021.
- [5] IRENA, «Fostering a blue economy: Offshore renewable energy,» International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020.
- [6] R. Wiser, K. Jenni, J. Seel, E. Baker, M. Hand, E. Lantz y A. Smith, «Forecasting Wind Energy Costs and Cost Drivers: The Views of the World’s Leading Experts,» IEA, 2016.
- [7] S. Tegen, M. Hand, B. Maples, E. Lantz, P. Schwabe y A. Smith, «2010 Cost of Wind Energy Review,» NREL, EEUU, 2010.
- [8] S. Tegen, E. Lantz, M. Hand, B. Maples, A. Smith y P. Schwabe, «2011 Cost of Wind Energy Review,» NREL, EEUU, 2011.
- [9] C. Moné, A. Smith, B. Maples y M. Hand, «2013 Cost of Wind Energy Review,» NREL, EEUU, 2013.
- [10] C. Moné, T. Stehly, B. Maples y E. Settle, «2014 Cost of Wind Energy Review,» NREL, EEUU, 2014.
- [11] C. Moné y M. Hand, «2015 Cost of Wind Energy Review,» NREL, EEUU, 2015.
- [12] T. Stehly, D. Heimiller y G. Scott, «2016 Cost of Wind Energy Review,» NREL, EEUU, 2016.
- [13] T. Stehly, P. Beiter, D. Heimiller y G. Scott, «2017 Cost of Wind Energy Review,» NREL, EEUU, 2017.
- [14] T. Stehly y P. Beiter, «2018 Cost of Wind Energy Review,» NREL, EEUU, 2018.
- [15] T. Stehly, P. Beiter y P. Duffy, «2019 Cost of Wind Energy Review,» NREL, EEUU, 2020.
- [16] IRENA, «Panorama de la innovación para un futuro impulsado por las energías renovables: soluciones para integrar las energías renovables variables,» Agencia Internacional de Energías Renovables, Abu Dhabi, 2019.
- [17] REOLTEC, «El RDL 23/2020 desde la perspectiva de la innovación,» 26 junio 2020. [En línea]. Available: <https://reoltec.net/el-rdl-23-2020-desde-la-perspectiva-de-la-innovacion/>. [Último acceso: 8 enero 2021].
- [18] Wind Europe , «The EU Offshore Renewable Energy Strategy,» 2020.
- [19] OCDE y Eurostat, «Manual de Oslo: guía para la recogida e interpretación de datos sobre innovación, 3ª edición,» OECD/European Communities, traducción española: Grupo Tragsa, 2005.

- [20] G. Hundleby, K. Freeman, A. Logan y C. Frost, «Floating Offshore, 55 technology innovations that will have greater impact on reducing the cost of electricity from European floating offshore wind farms,» BVG Associates & EIT InnoEnergy, 2018.
- [21] b. Valpy y P. English, «Future renewable energy costs: offshore wind, 57 technology innovations that will have greater impact on reducing the cost of energy from European offshore wind farms,» BVG Associates & EIT InnoEnergy, 2017.
- [22] B. Valpy y P. English, «Future renewable energy costs: onshore wind, how technology innovation is anticipated to reduce the cost of energy from European onshore wind farms,» BVG Associates & EIT InnoEnergy, 2014.
- [23] E. Zarza, E. Simonot, A. Martínez y T. Winkler, «Future renewable energy costs: solar-thermal electricity, How technology innovation is anticipated to reduce the cost of energy from European solar-thermal electricity plants,» BVG Associates & EIT InnoEnergy, 2015.
- [24] P. V. Chiantore, I. Gordon, W. Hoffmann, E. Perezagua, S. Philipps, E. Roman, E. Sandre y W. Sinke, «Future renewable energy costs: solar photovoltaics, How technology innovation is anticipated to reduce the cost of energy from European photovoltaic installations,» BVG Associates & EIT InnoEnergy, 2015.
- [25] IRENA, «Innovation Outlook: Ocean Energy Technologies,» International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020.
- [26] IRENA, «Innovation Outlook: Smart charging for electric vehicles,» International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2019.
- [27] IRENA, «Innovation Outlook: Advanced Liquid Biofuels,» International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2016.
- [28] IRENA, «Innovation Outlook: Renewable mini-grids,» International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2016.
- [29] IRENA, «Innovation Outlook: Offshore Wind,» International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2016.
- [30] Offshore Renewable Energy (ORE) Catapult y Knowledge Transfer Network (KTN), «Innovation Roadmaps,» Offshore Wind Innovation Hub, 2020. [En línea]. Available: <https://offshorewindinnovationhub.com/>. [Último acceso: 22 12 2020].
- [31] Bureau Ocean Energy Management, «Outreach Summary Report: California Offshore Wind Energy Planning,» Septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.boem.gov/sites/default/files/renewable-energy-program/State-Activities/CA/Outreach-Summary-Report-September-2018.pdf>.
- [32] M. Vanegas-Cantarero, «Reducing uncertainty in techno-economic analysis of ocean energy [webinar],» de *MaRINET2*, UEDIN and WavEC, 17-19 noviembre 2020.
- [33] CATAPULT: Offshore renewable Energy, «Guide to an offshore wind farm: wind farm costs,» BVG associates, [En línea]. Available: <https://guidetoanoffshorewindfarm.com/wind-farm-costs>. [Último acceso: 16 agosto 2020].
- [34] European Commission, «General Annexes: G. Technology readiness levels (TRL),» de *HORIZON 2020 – WORK PROGRAMME 2016-2017*, 2017, p. 29.

- [35] G. A. Esteban y A. Asitondo, «Computational and experimental analysis of the overtopping on structures for offshore renewables,» de *MATHEO's Online Webinars*, 2 de octubre del 2020.
- [36] A. Fernández-Navamuel, D. Pardo y V. Nava, «Challenges of applying Deep Neural Networks to the offshore wind energy sector,» de *MATHEO's Online Webinars*, 30 de octubre del 2020.
- [37] N. Vegas, M. Ellero y I. Bidaguren, «Modelling and simulation of sediment material for offshore wind energy applications,» de *MATHEO's Online Webinars*, 16 de octubre del 2020.
- [38] R. James y M. Costa-Ros, «Floating Offshore Wind: Market and Technology Review,» Carbon trust , Reino Unido, 2015.
- [39] P. Beiter, W. Musial, A. Smith y e. al., «A Spatial-Economic Cost-Reduction Pathway Analysis for U.S. Offshore Wind Energy Development from 2015–2030,» National Renewable Energy Laboratory, Golden, 2016.
- [40] G. Hundleby, K. Freeman, A. Logan y C. Frost, «Floating Offshore, 55 technology innovations that will have greater impact on reducing the cost of electricity from European floating offshore wind farms,» BVG Associates & KIC InnoEnergy, 2018.

ANEXO I – GUION DE LAS ENTREVISTAS PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE INNOVACIONES

ENTREVISTA PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE INNOVACIONES

Entrevista		Fecha	
Fuente de información	Nombre		
	Puesto/Relevancia		
	Contacto		

Descripción de la innovación y otras consideraciones iniciales:

MEJORAS EN ELEMENTOS DEL PARQUE

Elemento del parque:

ROTOR	ESTRUCTURA (SUB)	LÍNEAS DE FONDEO	CAB. DINÁMICO
GÓNDOLA	LASTRE	ANCLAS	CAB. INTER ARRAY
TORRE	ELEM. AUX (SUBESTR)		CAB. EVACUACIÓN
ELEM. AUX (AERO)	CONJUNTO AERO+SUB		SUBESTACIÓN

¿Variación en elementos de costes? SI NO

- Diseño
- Fabricación
- Instalación y transporte
- Mantenimiento
- Desmantelamiento

MEJORAS EN PROCESOS GENERALES

Definición del proceso:

¿Variación en elementos de costes? SI NO

- Parámetros generales
- Proceso de diseño y desarrollo
- Operación del parque
- Mantenimiento

PRODUCCIÓN ENERGÉTICA ANUAL

¿Variación en la AEP? SI NO

PARÁMETROS TEMPORALES Y FINANCIEROS

¿Variación en parámetros temporales o financieros? TEMP FIN NO

ELEMENTO/ PROCESO	ELEMENTO DE COSTE	ORIGEN VARIACIÓN	CUANTIFICACIÓN VARIACIÓN	COMENTARIOS
VARIACIÓN AEP				
PARÁMETROS TEMPORALES				
PARÁMETROS FINANCIEROS				

Otras notas:

ANEXO II – EJEMPLOS DE LA UTILIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA

Tabla 15: Ejemplo de análisis de sensibilidad realizado en la herramienta utilizada

Variable		Frecuencia del mantenimiento correctivo del cable de evacuación					
Valor base		0,04					
Celda	F41						
Lim. sup. [%]		0					
Lim. inf. [%]		75					
Step [%]		5					

i	Valor	Variación [%]	LCOE [€/MWh]	Variación en LCOE [%]	CMred	Variación en CMred [%]
0	0,01	-75,00%	122,71	-0,12%	267.170,9 €	-3,64%
1	0,012	-70,00%	122,72	-0,11%	267.844,1 €	-3,40%
2	0,014	-65,00%	122,73	-0,10%	268.517,2 €	-3,16%
3	0,016	-60,00%	122,74	-0,10%	269.190,4 €	-2,91%
4	0,018	-55,00%	122,75	-0,09%	269.863,6 €	-2,67%
5	0,02	-50,00%	122,76	-0,08%	270.536,7 €	-2,43%
6	0,022	-45,00%	122,77	-0,07%	271.209,9 €	-2,19%
7	0,024	-40,00%	122,78	-0,06%	271.883,0 €	-1,94%
8	0,026	-35,00%	122,79	-0,06%	272.556,2 €	-1,70%
9	0,028	-30,00%	122,80	-0,05%	273.229,4 €	-1,46%
10	0,03	-25,00%	122,81	-0,04%	273.902,5 €	-1,21%
11	0,032	-20,00%	122,82	-0,03%	274.575,7 €	-0,97%
12	0,034	-15,00%	122,83	-0,02%	275.248,9 €	-0,73%
13	0,036	-10,00%	122,84	-0,02%	275.922,0 €	-0,49%
14	0,038	-5,00%	122,85	-0,01%	276.595,2 €	-0,24%
15	0,04	0,00%	122,86	0,00%	277.268,3 €	0,00%
16	0,042	5,00%	122,87	0,01%	277.941,5 €	0,24%
Valor base:			122,86	Valor base:	277.268,3 €	

Tabla 16: Ejemplo evaluación del impacto de una innovación realizado en la herramienta utilizada

Innovación:	ENFOQUES HÍBRIDOS AVANZADOS PARA LA INTERACCIÓN FLUIDO ESTRUCTURA
Descripción:	La interacción entre las olas y las estructuras en el mar es muy compleja y no es muy conocida para estructuras tanto flotantes como fijas en mar abierto. En este caso, se ha estudiado el caudal de rebosamiento en función de las características de la ola y de la estructura. Las herramientas utilizadas han sido el tanque de olas de 12m de largo equipado con un generador de olas, sondas de ultrasonidos y resistivas, y una playa parabólica, y herramientas computacionales de CFD.

Evaluación

Parámetros sobre los que tiene impacto

Hoja	Celda o código	Descripción	Impacto	Valor o variación
IN	Código	westructura	Peso de la estructura flotante	Variación -0,1
IN	Código	Csubaux	Costes de los elementos auxiliares de la subestructura	Variación -0,5
IN	Código	CITaero	Costes asociados a la transporte e instalación del conjunto aerogenerador + subestructura	Variación -0,1

Impacto de la innovación sobre los resultados

Hoja	Celda o código	Descripción	Valor sin innovación	Variación	Nuevo valor
OUT	Código	LCOE	Levelized cost of energy	122,858 €/MWh -4,7825%	116,982 €/MWh
OUT	Código	CAPEX	Costes totales de construcción	1.597.574.751,0 € -5,4134%	1.511.090.868,6 €
OUT	Código	OPEX	Costes totales de mantenimiento	644.745.448,4 € 0,0000%	644.745.448,4 €
OUT	Código	DECEX	Costes totales asociados al desmantelamiento	117.356.573,96 € -7,6298%	108.402.481,96 €
OUT	Código	AEP	Producción anual de energía	1767128 0,0000%	1767128

Evaluación

Parámetros sobre los que tiene impacto

Hoja	Celda o código	Descripción	Impacto	Valor o variación
IN	Código	CAPEX	Costes totales de construcción	Variación -0,1

Impacto de la innovación sobre los resultados

Hoja	Celda o código	Descripción	Valor sin innovación	Variación	Nuevo valor
OUT	Código	LCOE	Levelized cost of energy	122,858 €/MWh -8,7576%	112,098 €/MWh
OUT	Código	CAPEX	Costes totales de construcción	1.597.574.751,0 € -10,0000%	1.437.817.275,9 €
OUT	Código	OPEX	Costes totales de mantenimiento	644.745.448,4 € 0,0000%	644.745.448,4 €
OUT	Código	DECEX	Costes totales asociados al desmantelamiento	117.356.573,96 € 0,0000%	117.356.573,96 €
OUT	Código	AEP	Producción anual de energía	1767128 0,0000%	1767128