

La energía eólica marina como oportunidad de lucha contra el cambio climático en España

Offshore wind energy as an opportunity to fight against climate change in Spain

Fernando Blanco Silva¹

Resumen

El presente artículo aborda la implantación de la energía eólica marina como una oportunidad para la lucha contra el cambio climático y frenar sus catastróficos efectos sobre el medio ambiente. En primer lugar, se plantea un pequeño análisis de las políticas energéticas de lucha contra las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y, en particular, los criterios que deben cumplirse para la implantación de los parques eólicos. La segunda parte del artículo profundiza en los aspectos más significativos de la energía eólica offshore, en la planificación gubernamental (Hoja de Ruta de la Eólica Marina y de las Energías del Mar), en sus aspectos económicos (generación de puestos de trabajo y aporte al producto interior bruto) y, finalmente, tecnológicos (producción de energía eléctrica para la red y producción de hidrógeno verde mediante un procedimiento de electrólisis).

Palabras clave

Energía eólica, eólica offshore, hidrógeno verde, tramitación administrativa y Hoja de Ruta de la Eólica Marina y de las Energías del Mar.

Abstract

This paper purposes the offshore wind energy as an opportunity to combat the Climate Change and curb its catastrophic effects on the environment. In the first place, a small analysis of the energy policies to combat the emissions of greenhouse gases is proposed, and in particular the criteria that must be met for the implementation of wind farms. The second part of the paper delves into the most significant aspects of offshore wind energy, in government planning, in its economic aspects (generation of jobs and contribution to the gross domestic product) and, finally, also technological (production of electrical energy and production of green hydrogen by an electrolysis procedure).

Keywords

Wind energy, offshore wind energy, green hydrogen, administrative processing and Roadmap for Offshore Wind and Sea Energies.

Recibido / received: 08/11/2022 Aceptado / accepted: 20/05/2023

¹Ingeniero industrial en la Xunta de Galicia. E-mail: fernando.blanco.silva@edu.xunta.es



Foto: Shutterstock.

1. Introducción

El incremento de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera durante los dos últimos siglos ha provocado el aumento de la inercia térmica de la misma y un efecto no deseado conocido como el calentamiento global, causado, fundamentalmente, por las emisiones de dióxido de carbono en las combustiones de hidrocarburos y carbón. La principal línea de actuación contra este fenómeno es el fomento de las fuentes renovables. Desde la Primera Revolución Industrial (finales del siglo XVIII) se ha registrado un incremento en la temperatura media del planeta de 1,1 °C. Pese a las políticas de reducción de GEI de las últimas décadas, la concentración de estos en la atmósfera sigue aumentando de forma alarmante, empujando al planeta “a un territorio desconocido en el que se incrementan la frecuencia y la intensidad de fenómenos meteorológicos extremos” (Torroba, 2022).

Las políticas de fomento de las fuentes renovables surgidas en todo el mundo durante el último

cuarto de siglo han tenido un cierto éxito en la implantación de estas tecnologías, pero, en términos generales, la dependencia de los combustibles fósiles sigue siendo un serio problema en todo el mundo; además, en la medida en la que la mayor parte del consumo de energía se produce en países en desarrollo, es necesario un compromiso global que los incluya y garantice su derecho al desarrollo económico, todo ello en aras de la neutralidad climática (Botas Ramiro, Vázquez Teijeira, 2022).

La Unión Europea ha sido líder mundial en cuanto a la implantación de potencia eólica, solar fotovoltaica, solar térmica y de calderas de biomasa a lo largo de los últimos años, pero tiene como asignatura pendiente que la única tecnología retirada del mercado es el carbón, ya que los derivados petrolíferos, gas natural y combustible nuclear siguen manteniendo su presencia sin grandes alteraciones a lo largo de estas últimas décadas.

Los motivos para el fomento de las energías renovables son obvios. Por un lado, la lucha contra el

cambio climático y, por el otro, la dependencia energética de España como país importador de combustibles, y sin recursos en las fuentes convencionales. A estas dos debilidades tradicionales de la economía española se le debe añadir la inestabilidad geopolítica propiciada por la invasión de Ucrania. La guerra de Putin está provocando una nueva crisis energética cuyas consecuencias son incalculables si se prolonga más allá del invierno, y con dramáticas consecuencias para las economías más dependientes de los fósiles como es el caso de la española. A estos problemas ya consolidados hay que añadir la subida de los precios de la electricidad; la subida del gas ruso origina una subida en el precio del kWh motivada por una estructura de precios marginalista, que hasta 2020 funcionaba de forma razonable, pero que se descubre incorrecto, ya que cualquier subida en el precio del gas causa un efecto arrastre sobre toda la facturación eléctrica española (Sánchez Rodríguez, 2022).

En este contexto de desarrollo de las renovables hay que añadir

una nueva modalidad, que es la producción de hidrógeno verde a partir de la producción eléctrica renovable. El almacenamiento de energía sigue siendo uno de los desafíos tecnológicos más importantes en todo el mundo, y la apuesta más clara es la producción de hidrógeno mediante la electrólisis como vector de almacenamiento. Para esto es preciso disponer de grandes cantidades de energía eléctrica que podrían provenir de las energías renovables (Sánchez Delgado, 2020; Masoliver Pereira, 2020).

2. Métodos

2.1. Metodología para la redacción del presente artículo

El objetivo de este artículo es realizar un análisis exhaustivo de las posibilidades que tiene la implantación de energía eólica offshore en España, para lo que nos hemos fijado en aspectos de generación de energía (electricidad o hidrógeno), económicos (inversión y movilización de recursos) y ambientales. Para la redacción se ha realizado una revisión bibliográfica de los artículos científicos y de la normativa de aplicación, en el ámbito de la planificación energética, energía eólica offshore y, finalmente, en legislación eléctrica. Es importante también citar que se han abordado los incentivos para la generación de hidrógeno verde apoyados en los mecanismos de recuperación y resiliencia (MRR). Estos incentivos son muy recientes, por lo que no hay apenas literatura científica al respecto. En consecuencia, se ha recurrido a noticias periodísticas recientes, con la lógica precaución a la hora de contrastar estas fuentes no científicas.

2.2. La energía eólica en España

La energía eólica es la tecnología capaz de convertir la energía mecánica del aire en energía eléctrica ordenada, utilizando como aparato de conversión una turbina eólica. Esta modalidad de generación de energía eléctrica es conocida desde finales del siglo XIX, aunque la implantación en España no se produce hasta finales del siglo pasado. Du-

rante la década de 1980 se empiezan a instalar los primeros aerogeneradores conectados a la red comercial. Los primeros parques eólicos que hoy conocemos datan de principios de la década de 1990, entendiéndose como tales una infraestructura común formada por aerogeneradores, líneas eléctricas, centro de transformación y sistema de control. La característica que define un parque eólico como tal es la línea de evacuación única (Villarubia López, 2012).

La adhesión de la Unión Europea al Protocolo de Kioto supone el impulso necesario a la generación de energías renovables en España, aunque las bases para el impulso de las fuentes renovables en generación eléctrica datan de mediados de la década de 1990, con la implantación de las primas a las renovables y un régimen retributivo favorable respecto a las tecnologías convencionales, que se concreta en la Ley 54/1997 del Sector Eléctrico y se consolida durante la primera década del siglo XXI (Díaz Mendoza et al., 2015; Arana García, 2015).

La evolución de las tecnologías renovables en España a partir de la década de 1990 ha sido espectacular. Únicamente entre 2012 y 2018 hay un cierto estancamiento por el cambio del régimen retributivo que se aprueba con el Real Decreto Ley 1/2012 que cierra el registro de

preasignación de las energías renovables e iguala los precios de generación con las tecnologías fósiles.

Como resultado de la nueva Ley 24/2013, de 26 de diciembre, y del Real Decreto 413/2014 que regula la retribución de la electricidad de origen renovable, en el año 2016 se implanta una nueva modalidad de retribución en la que desaparecen las primas para las nuevas centrales eólicas, cuya única posibilidad de mejora respecto a la retribución de las renovables es mediante la subasta eólica, que garantizaría un precio mínimo de venta de cada MWh vertido a la red a las instalaciones que resultasen adjudicatarias en dicha subasta. La posibilidad de obtener un precio mínimo y la mejora tecnológica producida entre 2012 y 2016 generan un nuevo crecimiento de las tecnologías renovables a partir de 2017. Actualmente, la energía eólica compite de forma directa en el mercado eléctrico con las convencionales, supera los 30.000 MW implantados en España, y con una tendencia de recuperación a partir de 2018, como se puede ver en la figura 1.

En 2021 la energía eólica generaba unos 60.000 MWh cada año, y era el origen del 23 % de la energía eléctrica que se producía en España, como se puede ver a continuación (Tabla 1 y Fig. 2).

En el año 2020 el Ministerio de

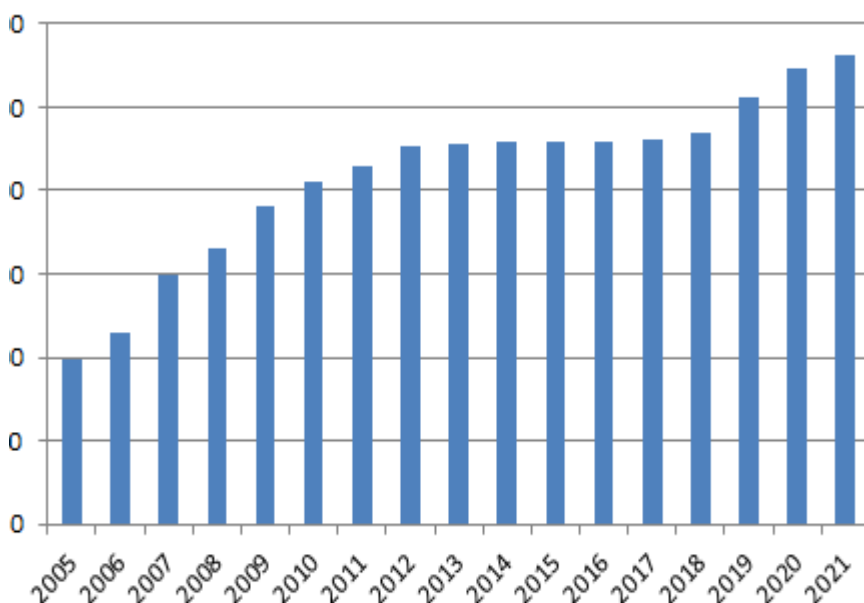


Figura 1: Evolución de la potencia eólica instalada en el sistema peninsular en España.

Fuente: Red Eléctrica de España y Foro Nuclear.

Transición Ecológica y Reto Demográfico hizo público el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC), que propone la planificación energética durante la presente década. entre los objetivos del PNIEC en 2030 está que el 42% de la energía primaria en España tenga origen renovable, que se elevaría hasta el 74% en el caso de la energía eléctrica.

El PNIEC plantea dos escenarios, uno objetivo (que sería el que se ha de cumplir) y otro tendencial (considerando que la evolución de las políticas energéticas sigue la tendencia de los últimos años). En ambos casos la energía eólica tiene una evolución alcista, como se puede ver en la tabla 2.

El crecimiento que prevé el PNIEC vendría vinculado a la implantación de nuevos parques eólicos, tanto terrestres como marítimos, así como a la sustitución de aerogeneradores ya deteriorados y de pequeño tamaño por otros nuevos y de gran tamaño (repotenciación). Mediante el escenario tendencial, pasaría a unos 38.000 MW terrestres, pero en uno disruptivo la potencia instalada en 2030 llegaría a los 50.000 MW, en el que una parte significativa de los 12.000 MW diferenciales serían marinos.

En el resto del mundo la situación es muy similar. La energía eólica es, de por sí, competitiva en todos los países con recursos eólicos suficientes, pero su implantación depende de los tratamientos normativos (p. ej., garantizar que toda la energía eólica se vierte al sistema, asegurar un precio mínimo por cada MWh vertido, etc.). La explotación del viento para la producción de electricidad está en constante crecimiento en todo el mundo, y la potencia instalada en la actualidad está en el orden de unos 800.000 MW.

España es el quinto país del mundo con más potencia eólica instalada con alrededor del 4% de la potencia implantada de todo el mundo, y el segundo de Europa, solo superado por Alemania. Se puede ver en la tabla 3 la implantación de potencia eólica total (terrestre y offshore) a final de 2022 en diferentes países.

Nuclear	54.040	20,80%
Hidráulica	29.582	11,38%
Eólica	60.485	23,28%
Solar fotovoltaica	20.915	8,05%
Solar térmica	4.705	1,81%
Hidroeléctrica	23	0,01%
Otras renovables (*)	4.717	1,82%
Residuos renovables	878	0,34%
Turbinación de bombeo	2.649	1,02%
Ciclo combinado	44.494	17,12%
Carbón	4.987	1,92%
Motores diesel	2.517	0,97%
Turbina de gas	424	0,16%
Turbina de vapor	1.108	0,43%
Cogeneración	26.090	10,04%
Residuos no renovables	2.235	0,86%
TOTAL GENERACIÓN	259.849	100%

Tabla 1: Producción de energía eléctrica en España en 2021 (GWh). Fuente: Foro Nuclear y Red Eléctrica de España.

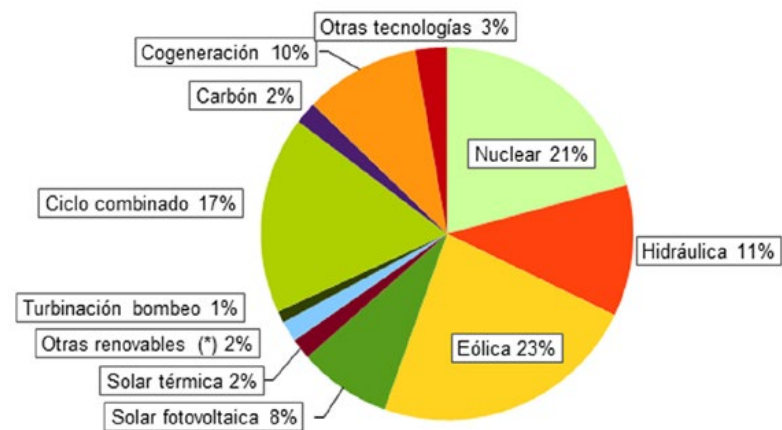


Figura 2: Porcentaje de producción de energía eléctrica en España en 2021. Fuente: Foro Nuclear.

	2020	2025	2030
Escenario tendencial	28.033	33.033	38.033
Escenario objetivo	28.033	40.033	50.033

Tabla 2: Previsión de potencia implantada en tecnología eólica marina y terrestre . Fuente: Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC).

	Total Eólica 2022 (GW)
China	312
EEUU	132
Alemania	66
India	40
España	31
Reino Unido	29
Brasil	21
Resto del mundo	151
Total	780

Tabla 3: Potencia eólica implantada en diversos países del mundo en 2022. Fuente: Asociación Empresarial Eólica.

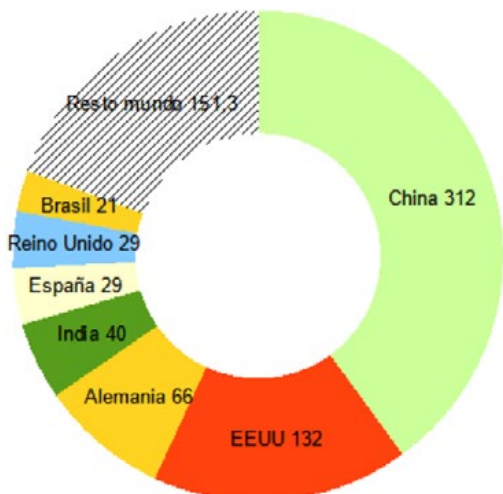


Figura 3: Potencia eólica implantada en diversos países del mundo en 2022 (GW). Fuente: Asociación Empresarial Eólica.

2.3. El proceso de implantación de un parque eólico

En la implantación de la energía eólica, el punto crítico es, evidentemente, asegurar un buen retorno económico de la inversión, para lo que aparecen como puntos decisivos:

- Garantizar el recurso eólico suficiente.
- Garantizar la viabilidad técnica.
- Tramitación administrativa.

2.3.1. Garantizar el recurso eólico suficiente

El primer paso a la hora de implantar el parque eólico es garantizar una velocidad del viento razonable, ya que sin este sería inviable un parque eólico como inversión económica. A nivel general, hay múltiples mapas disponibles que aportan un valor aproximado de la velocidad del viento, como el que presenta la figura 4 (Villarubia López, 2012), en el que se puede ver que las regiones con mayor recurso eólico son el noroeste de Galicia, el nordeste de Cataluña y el Estrecho de Gibraltar.

Originalmente, el recurso eólico era un cuello de botella y los primeros parques eólicos que se instalaron en España se implantaban en las zonas con más cantidad de viento, aunque el avance de la técnica hace que sean económicamente viables parques con un recurso eólico menor. De este modo, el rango de velocidades disponibles en las palas eólicas es mucho más amplio. De hecho, las comunidades con mayor potencia eólica implantada actualmente son Castilla y León (6.403 MW), Aragón (4.921 MW) y Castilla-La Mancha (3.949 MW), y no son las que tienen el recurso eólico más elevado. En la figura 5 se puede ver la potencia implantada por comunidades autónomas.

De los primeros mapas de viento se concluye que en muchas comunidades autónomas

hay zonas con recurso eólico suficiente, pero es necesario confirmarlo con datos propios. Además del mapa de Villarubia, hay otros disponibles en los que se puede



Figura 4: Mapa con velocidades medias del viento en la península Ibérica y Baleares, medidas a 1 m de altura (m/s). Fuente: Miguel Villarubia.

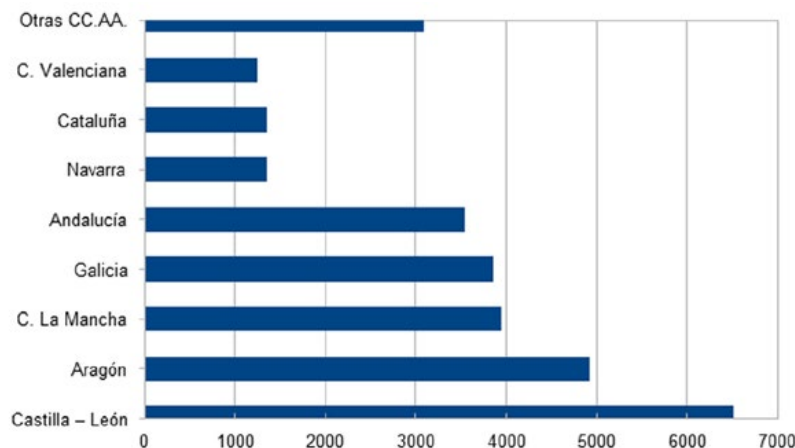


Figura 5: Potencia eólica instalada acumulada por comunidades autónomas en 2022 (MW).

Fuente: Asociación Empresarial Eólica.

ver el recurso eólico en mayor detalle o hay datos de viento disponibles; estos mapas no permitirán caracterizar del todo el recurso eólico, pero sí pueden dar una aproximación inicial, que se deberá completar con una torre de medición que confirme si este es suficiente. Antes de realizar la promoción, es recomendable disponer de los datos de viento de, al menos, un año para poder asegurarse un recurso eólico suficiente.

Otro punto importante es la viabilidad de la evacuación. Es imprescindible que haya una línea eléctrica con suficiente capacidad en las proximidades y que la construcción de una nueva línea no encarezca en exceso la infraestructura. Para esto es preciso pedir el correspondiente punto de acceso a Red Eléctrica de España, como compañía gestora de la red de transporte, donde se puede realizar el vertido .

2.3.2. Garantizar la viabilidad técnica

Partiendo de una ubicación que téc-

nicamente es posible y con un recurso eólico suficiente, el siguiente paso será garantizar que sería posible ejecutar el parque eólico y que el coste económico es razonable. En esta línea, el primer paso es asegurarse de que las comunicaciones son razonables; hoy los aerogeneradores en tierra superan los 3 MW, con palas mayores que los 50 m de longitud, y góndolas de grandes dimensiones; es imprescindible que las comunicaciones entre el punto de fabricación y el de destino sean válidas para realizar el traslado de todos los componentes por tierra y, en el caso que no lo sean, acometer las mejoras necesarias en las carreteras a un coste viable.

Hoy el coste de cada MW eólico en tierra es del orden de un millón de euros, más impuestos, para un parque eólico completo, que se puede llegar a cuatriplicar en el offshore. El coste del parque eólico es, evidentemente, fundamental, ya que el objetivo del mismo será obtener una rentabilidad económica interesante. Cuando la orografía es muy desfavorable, la necesidad de adaptación de las vías de comunicación para mejorar la accesibilidad o el coste de la línea de evacuación son muy elevados y puede suponer que el coste final sea excesivo y periodos de retorno inasumibles.

2.3.3 La tramitación administrativa

Para la puesta en marcha de un parque eólico es imprescindible superar una compleja tramitación administrativa a cargo del organismo competente, que consta de:

- Los parques eólicos en el mar de potencia superior a 50 MW y parques compartidos en terrenos de varias comunidades autónomas serán autorizados por el Gobierno de España (Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico).
- El resto de parques eólicos son competencia de las comunidades autónomas.

La normativa actual establece que el parque eólico tiene tres autorizaciones, que se pueden ver en el siguiente cronograma (Fig. 6).

La autorización previa es el documento que autoriza la implantación a partir de un proyecto básico. Para emitir la autorización de construcción, este debe ser completado con un proyecto de ejecución, por lo que suelen unificarse en un único acto y ser emitida la autorización previa y de construcción de forma simultánea.

Para emitir la autorización previa y de ejecución, es necesario que sean emitidos todos los permisos previos, tales como son la Declaración de Incidencia Ambiental, informe favorable del titular de la línea de evacuación (Red Eléctrica de España) y de los organismos titulares de bienes de servicio público afectados (patrimonio cultural, carreteras afectadas, Agencia Estatal de Seguridad Aérea, etc.) y, en el caso de los parques eólicos offshore, el departamento autonómico con competencias en mar (pesca y acuicultura, entre otros). El impacto ambiental suele ser un punto crítico a la hora de implementar los parques eólicos. Aunque los beneficios ambientales superan los impactos negativos sobre el medio ambiente, no se puede concebir como un valor absoluto, y cada vez hay más rechazo a la implantación de parques eólicos. Es muy interesante el artículo Elección de criterios y valoración de impactos ambientales para la implantación de energía eólica (Molina Ruiz, Tudela Serrano; 2008) que clasifica el impacto de los parques eólicos terrestres en las siguientes líneas fundamentales:

- Suelo.
- Pendiente.
- Vegetación.
- Fauna.
- Patrimonio cultural.
- Paisaje.

Una vez obtenidas las autorizaciones previas y de construcción, se debe proceder a la ejecución del parque, y finalizarlo. Es preciso obtener la autorización de explotación, después que la Administración competente compruebe que se cumplen los requisitos en materia de seguridad industrial (re-

glamentos electrotécnicos de alta tensión) y que el parque se ha ejecutado en cumplimiento de la autorización de construcción antes obtenida sin variaciones importantes.

La tramitación administrativa es un punto crítico a la hora de decidirse por una ubicación; es imprescindible una tramitación administrativa ágil y rápida una vez que el promotor ha decidido promover un parque eólico. Históricamente los promotores apuestan por parques eólicos de competencia autonómica (menos de 50 MW, situados en una única comunidad autónoma). Las comunidades autónomas tienen velocidades y ritmos de tramitación muy distintos, por lo que los promotores suelen preferir aquellos con una tramitación más ágil. Según datos de la Asociación Empresarial Eólica, en el año 2021 en España se instalaron 842 MW, y las comunidades autónomas con más potencia implantada fueron Aragón (275 MW), Castilla y León (155 MW) y Asturias (126 MW). Evidentemente, no son las que tienen un mayor recurso, sino las más ágiles a la hora de autorizar nuevas centrales.

3. Resultados: La energía eólica "Offshore"

Una vez descrita la energía eólica en España, se debe analizar la energía eólica offshore, identificando como tal aquellos parques eólicos que se encuentran sobre la plataforma marítima, y que, como se ha citado, son de competencia estatal.

En España hasta 2017 la energía eólica se desarrollaba de manera exclusiva en España en tierra, y la única actividad relacionada con su versión offshore era la fabricación de componentes para la exportación. No obstante, durante los últimos años se han presentado solicitudes de autorización de parques eólicos marinos en toda la Península, aunque en ningún caso se han autorizado parques completos. Las principales diferencias técnicas respecto a los parques eólicos en tierra son los siguientes:



Figura 6: Esquema de autorizaciones administrativas del parque eólico. Fuente: Elaboración propia.

1. En Galicia la red de estaciones meteorológicas Meteogalicia de la Consellería de Medio Ambiente facilita unos valores medidos para decenas de puntos en la comunidad autónoma, con medidas de viento de frecuencia diezminutal.

- El recurso eólico disponible es mucho mayor. El PNIIEC estima que mientras que el funcionamiento equivalente en tierra está entre las 2.100 horas y 2.500 horas el recurso eólico es del orden del 35% mayor, y se dispara hasta unas 3.100 horas al año, e incluso podría mejorarse tecnológicamente, ya que no es una tecnología tan madura como la tecnología terrestre. Además, el régimen de viento es favorecedor a la eólica offshore (tiene menos rugosidad), ya que en el mar no hay obstáculos, de forma que para alcanzar velocidades mayores no es preciso elevar tanto el buje como en la costa. El coste de implantar un parque eólico marino es mucho mayor que en tierra. Se trata de un precio muy variable, pero siempre superior a los precios de la costa. La Asociación Eólica Europea estima un coste en torno a 1,2 €/MW para la eólica en tierra y de unos 3,5 M€/MW en la offshore, aunque los parques eólicos flotantes (mucho más caros) pueden llegar a los 5 M€/MW instalados (Flores Baena, 2022). En la figura 7 se puede ver la evolución del precio medio de un parque eólico en tierra y marino en M€/MW.

En esta línea, se debe citar el desglose que propone Herrero Herranz en su trabajo Análisis medioambiental y económico de la implantación de un parque eólico offshore en la costa de Noruega, para un parque eólico de potencia de 57 MW, formado por seis aerogeneradores de 9,5 MW y utilizando como tecnología la flotante semisumergible. En la tabla 4 se puede ver dicho desglose, en el que las turbinas suponen la partida más elevada.

- Se permite el uso de potencias mayores, que pueden llegar hasta los 12 MW, mientras que en tierra tienen un límite en torno a 5,5 MW. El motivo es que por encima de 5,5 MW los desplazamientos terrestres dificultan mucho la implantación de los aerogeneradores, límite que desaparece en el mar.
- En el caso de tener como fin el vertido a la red eléctrica, debe localizarse un punto de evacuación en la costa, como una subestación eléctrica de gran potencia. Por ejemplo, en España los parques eólicos en tierra tienen una potencia limitada a unos 50 MW en tierra suelen ser cientos

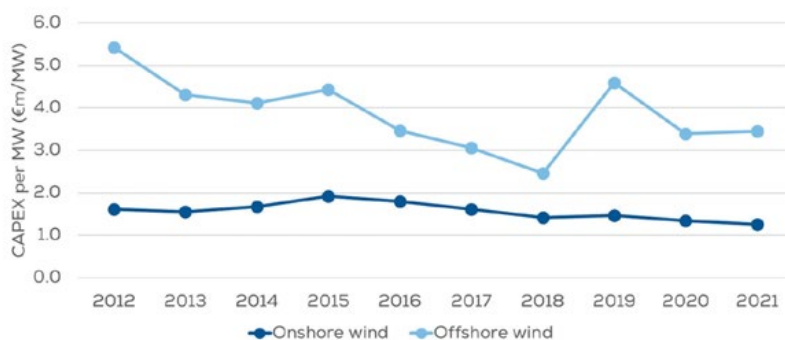


Figura 7: Precio estimado del MW implantado. Fuente: www.windeurope.org

	Millones de €	Porcentaje de presupuesto
Turbinas	43,89	42,0%
Plataformas flotantes	24,04	23,0%
Anclajes	10,97	10,05%
Instalación	10,45	10,0%
Sistema de balanceo	12,54	12,0%
Desmantelamiento	2,61	2,5%
Total	104,5	100%

Tabla 4: Estimación de costes parque eólico de 57 MW semiflotante en Noruega. Fuente: Herrero Herranz, 2022.

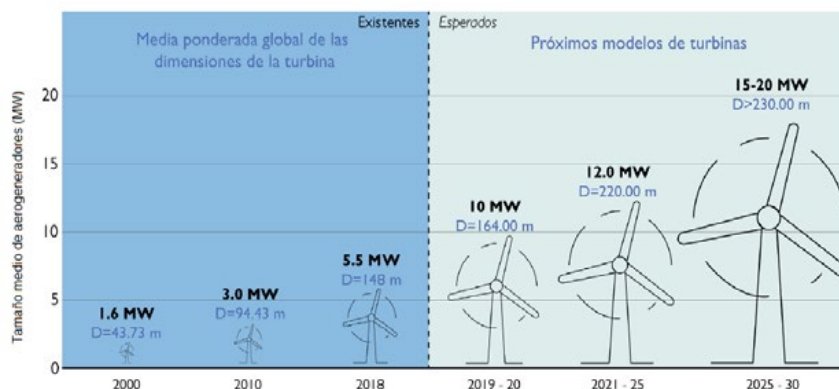


Figura 8: Evolución de los tamaños de turbinas eólicas (MW). Fuente: Hoja de Ruta para el desarrollo de la Eólica Marina y de las Energías del Mar

de MW, por lo que la evacuación eléctrica puede ser un cuello de botella. Incluso cuando el fin de la generación eléctrica sea la producción de hidrógeno verde (que no precisa de subestación) es preciso realizar una evacuación a la red mediante cables de varios kilómetros de longitud, que pueden suponer un problema técnico si no hay espacio donde conducirlo en tierra.

- Es preciso disponer de sistemas con mayor fiabilidad y garantizar que el mantenimiento de los aerogeneradores es mucho menor que en tierra, debido a que la corrosión marina es muy superior. No obstante, el PNIIEC iguala en 25 años la vida útil de los aerogeneradores terrestres y

marinos. En el mar el mantenimiento es más caro y complejo, porque en casos de temporal será difícil acceder a los aerogeneradores y las condiciones climatológicas pueden impedir las reparaciones. Por eso, se necesita garantizar una gran disponibilidad a lo largo del año y que las intervenciones in situ sean mínimas. Para facilitar el acceso algunos aerogeneradores llevan incluido un helipuerto en el techo de la góndola, con el fin de poder acercarse al mismo en un breve espacio de tiempo.

- Existe la posibilidad de implantar aerogeneradores marinos en gran cantidad de la costa española, utilizando las plataformas flotantes. Hasta hace unos años

la implantación de aerogeneradores offshore tenía un límite en una profundidad en torno a 50 metros porque era necesario que fuesen fijados a la plataforma marítima. Sin embargo, ahora los parques eólicos flotantes pueden tener una profundidad hasta los 1.000 metros para anclarlos al fondo. En España el 12% de la superficie marina está protegida y la Hoja de Ruta del Desarrollo de la energía eólica marina y de las energías del mar estima que el 30% de la costa española podría ser válida para colocar instalaciones offshore. Carreno-Madinabeitia identifica las zonas con mayor potencial en el Golfo de León (mar Mediterráneo), Galicia y cabo de Gata; Odriozola Iríbar incluye otras dos zonas más como son los entornos de Cádiz/estrecho de Gibraltar y las Islas Canarias.

- Las zonas costeras son las más habitadas y, por tanto, las que más electricidad consumen, de forma que las pérdidas en transporte y distribución serían menores y el consumo, local.
- El impacto ambiental sigue siendo un punto crítico a la hora de

implantar aerogeneradores en el mar. El impacto visual es menor que en la energía eólica terrestre. A medida que se alejan unas decenas de kilómetros de tierra, los aerogeneradores pasan mucho más desapercibidos, aunque aparece la necesidad de compatibilizar con los usos pesqueros, que podría ser el sector más perjudicado. Odriozola Iríbar identifica los cinco parámetros a la hora de considerar esta compatibilidad:

- La eólica offshore garantiza la integridad de los caladeros.
- La eólica offshore preserva el medio ambiente, la actividad socioeconómica y cultural y no debe repercutir en el sector pesquero.
- Los pescadores deberán evitar los parques eólicos marinos, por el riesgo de accidentes y la pérdida de artes de pesca.
- Los parques eólicos estarán alejados de caladeros.
- La seguridad de los buques de pesca está garantizada respecto a las infraestructuras marinas (p. ej., las líneas de evacuación).

En esta línea de análisis del im-

pacto ambiental, se debe citar que se deberán evitar espacios ambientales protegidos como los parques nacionales marítimos, zonas de especial protección para las aves (ZEPA), lugares de importancia comunitaria (LIC) y zonas protegidas por el Proyecto Intermare (norte de Barcelona o Gibraltar).

- Hay dos tecnologías, como son los parques eólicos fijados a la plataforma marítima y los parques eólicos flotantes. Los parques eólicos fijados a la plataforma marítima tienen tres modalidades, que son los monopilotes (de hasta 15 m de profundidad), los apoyos por gravedad (entre 15 m y 60 m) y, los jackets (entre 30 y 60 m), mientras que los parques flotantes deben ir anclados al fondo marítimo, aunque se permite una profundidad hasta unos 1.000 m; en la figura 9 se ve un croquis de cada uno de los tres tipos de parques fijados a la plataforma.

Entre los parques flotantes hay como modalidades barcazas, aerogeneradores semisumergibles, supar y Tensiones Leg Platform (TLP) (Odriozola Iríbar, 2022).

La energía eólica mundial tie-

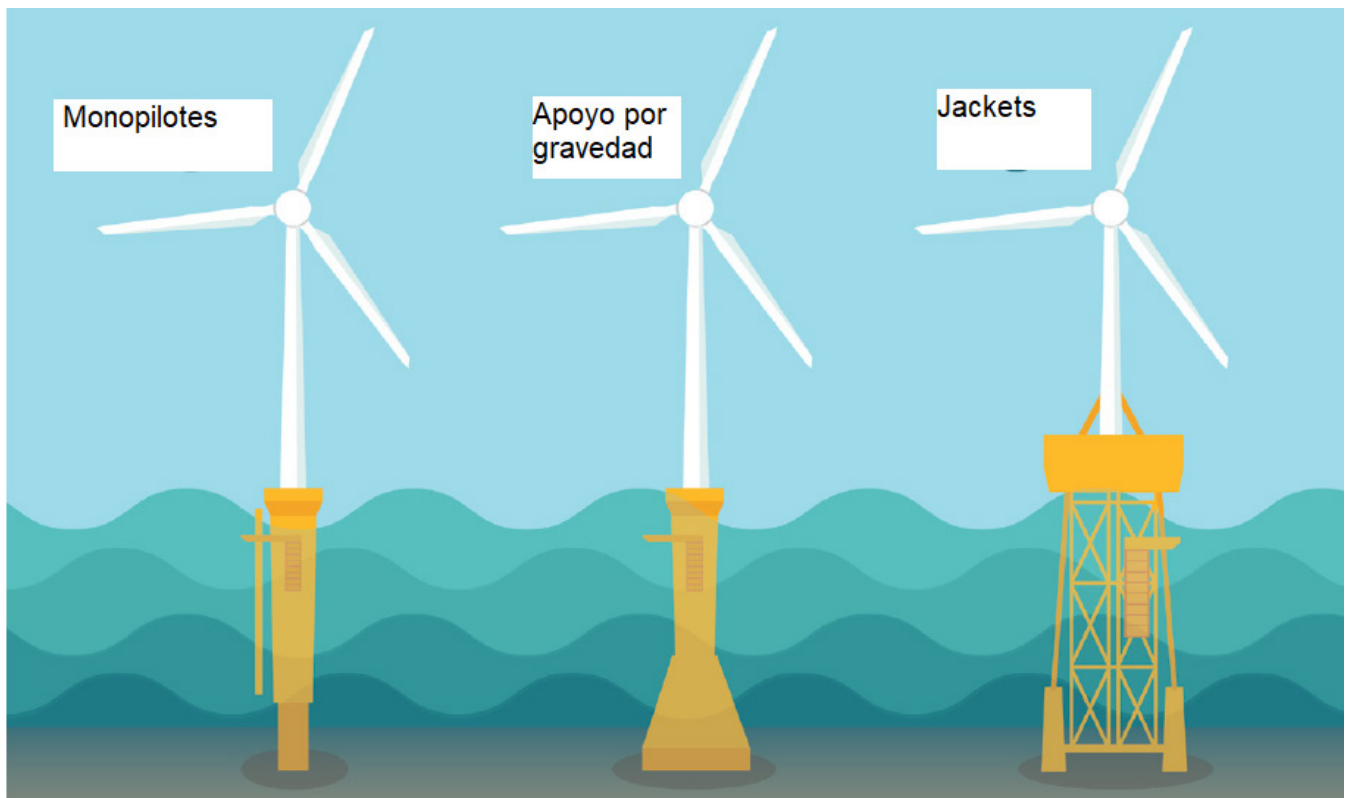


Figura 9: Esquema de distintas tecnologías de cimentación fija. Fuente: Hoja de ruta para el desarrollo de la energía eólica marina y de las energías renovables del mar.



Figura 10: Fotografía de parque eólico cimentado en Alemania. Fuente: Archivo propio.

ne un recorrido prometedor porque en muchos países los terrenos con más recurso eólico han sido ya ocupados y cada vez es más difícil encontrar zonas con velocidades de viento elevadas sin explotar, y sin rechazo social. Como solución a esta falta de disponibilidad de terreno aparecen los parques eólicos offshore.

El Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico publicó la Hoja de Ruta para el desarrollo de la Eólica Marina y de las Energías del Mar en diciembre de 2021, con cuatro objetivos sobre esta tecnología:

- España ha de ser un polo de referencia europeo para el desarrollo tecnológico y la innovación ambiental asociado a las energías renovables en el medio marino.
 - España ha de ser un referente internacional en capacidades industriales y en el conjunto de la cadena de valor del sector.
 - Impulsar un desarrollo de las renovables marinas compatible y sostenible desde un punto de vista ambiental y social.
 - Establecer un marco estatal adecuado para el despliegue ordenado de las renovables marinas.
- La hoja de ruta establece que de

cumplirse los objetivos del Escenario Objetivo del PNIEC, la energía eólica podría tener una contribución anual al PIB español de entre 4.831 M€ y 7.752 M€, con una creación entre 43.000 y 78.000 puestos de trabajo. Esta planificación es compatible con el Mecanismo de Recuperación y Resiliencia que se incluye dentro de los Fondos Next Generation. Se estima que la eólica offshore podría captar unos 200 millones de euros en el trienio 2021-2023 para potenciar la I+D. La hoja de ruta estima entre 1.000 MW y 3.000 MW los que estarán funcionando en 2030.

En este contexto de desarrollo de los Fondos Next Generation es muy importante citar que la energía eólica offshore avanzaría en paralelo con la generación de hidrógeno verde, y la producción ya no se limita a la generación de energía eléctrica convencional en corriente alterna para vertido a la red. Los fondos Next Generation apuestan por el hidrógeno como vector energético, y es necesaria una fuente de energía renovable que lo origine, y aquí aparece la oportunidad de la eólica offshore (Cerezo Araujo, 2022).

Durante los últimos años se han visto multitud de iniciativas que al

abrigo del mecanismo de recuperación proponen inversiones multimillonarias en hidrogeneradoras alimentadas por energía eólica offshore, entre las que destacamos el acuerdo entre Gobierno de España y la naviera Maersk para producir millones de toneladas de metanol a partir de energías renovables (eólica y fotovoltaicas), con una inversión en Galicia y Andalucía de unos 10.000 millones de euros y una creación de empleo de unos 85.000 puestos de trabajo. En el caso de Galicia, se precisaría implantar unos 4.000 GW de potencia eólica offshore, lo que supone una potencia tan elevada como la que ya está implantada, y presenta un importantísimo cuello de botella en la autorización administrativa para implantar estos aerogeneradores.

La tecnología eólica marina tiene una presencia muy escasa en España. Simplemente hay un aerogenerador experimental en Las Palmas de Gran Canaria de la plataforma PloCan.

Históricamente ha dado unos excelentes resultados en otros países como Dinamarca, debido a que a una distancia de varios kilómetros hay profundidades menores de 10 m, y la plataforma marina es

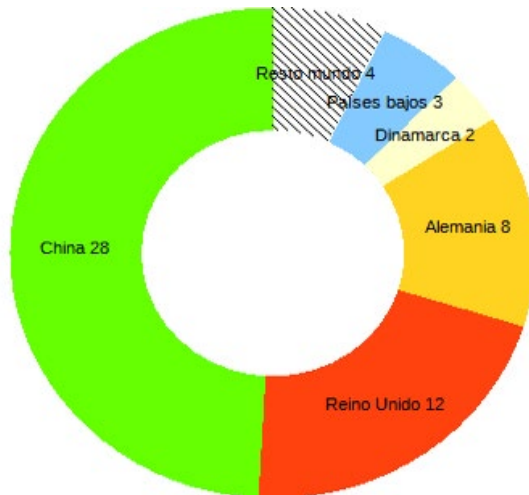


Figura 11: Potencia eólica offshore implantada en el mundo en 2022 (MW). Fuente: Asociación Empresarial Eólica (AEE).

apta para aerogeneradores cimentados con visibilidad reducida desde la costa; en este tipo de orografía sería idónea para países en los que la plataforma marina no adquiera grandes profundidades de forma repentina. En Portugal hay un aerogenerador flotante en Viana do Castelo de potencia 8,4 MW (en 2017, al entrar en funcionamiento, era el más grande del mundo).

En todo el mundo, a finales de 2022 la potencia eólica offshore era de unos 57 GW, y los países con más aerogeneradores marinos implantados eran China (28 MW), Reino Unido (12 GW), Alemania (8 GW), Países Bajos (3 GW) y Dinamarca (2 GW), como se puede ver en la figura 11.

En España no se ha desarrollado la tecnología eólica offshore cimentada porque aparecía como factor limitante la profundidad; en la península ibérica y Canarias la plataforma marina tiene una gran pendiente, y al alejarse unos cientos de metros la profundidad supera los 50 m, de forma que esta tecnología no era apta para las costas españolas, porque estos aerogeneradores tendrían que estar muy próximos a la costa.

Las nuevas tecnologías de aerogeneradores flotantes permiten superar este límite, aunque a un coste más elevado, por lo que ya hay propuestas para implantar en España miles de MW de potencia eólica offshore a la espera de que se implante un procedimiento completo

de autorización de la energía eólica marina. El primer paso se produce con la publicación del Real Decreto 150/2023, de 28 de febrero, por el que se aprueban los planes de ordenación del espacio marítimo de las cinco demarcaciones marinas españolas (POEM). Este real decreto divide el litoral en cinco áreas en las que se ubicarían aerogeneradores marinos, que serían la noratlántica, sudatlántica, estrecho de Gibraltar y Alborán, levantino-balear y canaria.

Para cada una de las zonas identificadas, el POEM va a excluir grandes superficies en función de la protección ambiental, la pesca y la acuicultura, zonas estratégicas (defensa y usos militares, tráfico marítimo), usos portuarios, servidumbre aeronáutica, etc., y serían aptas para la implantación de los aerogeneradores marinos aquellas que no tienen otros usos ya recogidos. Estas zonas inicialmente aptas para la implantación de aerogeneradores marinos se distribuyen en polígonos ER1, ER2 y ER3. Los que se desarrollarían en una primera fase serían los ER1, seguidos por ER2 y, finalmente, los ER3.

4. Conclusiones

El cambio climático es un hecho comprobado. Después de un verano en el que se han batido récords de temperatura media y una sequía desconocida hasta ahora, se puede

hablar de la necesidad de mitigar el cambio climático como una urgencia. Durante los últimos años se ha podido ver que, aunque las tecnologías renovables han tenido una implantación muy importante, no consiguen la sustitución de las tecnologías convencionales (carbón, gasóleo, gas natural, etc.) por tecnologías más limpias, en las que la energía eólica offshore es la que, probablemente, tiene mayor recorrido a medio plazo en España.

En el presente artículo se ha descrito de manera pormenorizada la energía eólica offshore; se trata de una tecnología que dispone de sus ventajas e inconvenientes. Entre las ventajas más importantes están el recurso eólico, la disponibilidad de espacio (hay millones de kilómetros cuadrados donde se podrían implantar parques eólicos marinos) y un impacto ambiental más reducido que en tierra, mientras que entre los inconvenientes se citan la complejidad de la tramitación y la afeción con los usos pesqueros y el medioambiente (zonas protegidas).

Hasta hace unos años la energía eólica offshore tenía un límite en la profundidad de la plataforma oceánica en unos 50 metros, por lo que no era apta para España; el desarrollo de tecnologías de plataformas offshore flotantes dotadas de aerogeneradores permite elevar esta profundidad hasta unos 1.000 metros, por lo que podrían instalarse miles de aerogeneradores en la costa española que producirían miles de GWh de energía eléctrica, bien para su vertido a la red o para la fabricación de hidrógeno como vector de almacenamiento energético.

Después de analizar todos estos factores de la energía eólica offshore, se puede concluir que es una excelente oportunidad, ya que las políticas actuales solo han podido mitigar las emisiones de GEI, pero no han conseguido reducir los consumos de gas natural ni derivados petrolíferos. Una apuesta seria y a largo plazo por la eólica offshore podría disminuir el consumo de los combustibles tradicionales.

2. <https://infopuertos.com/raquel-sanchez-firma-un-protocolo-con-la-naviera-maersk-para-impulsar-el-desarrollo-de-combustibles-marinos-verdes/>

5. Bibliografía

- Arana García, E. (2015). La nueva ley del sector eléctrico: Entre el riesgo regulatorio y la seguridad jurídica en el apoyo a las energías renovables. La nueva ley del sector eléctrico: entre el riesgo regulatorio y la seguridad jurídica en el apoyo a las energías renovables: 51-68.
- Botas Ramiro, G.J.; Vázquez Teijeira, D. (2022): Presente y futuro de las energías renovables. *Economistas* n.º 176: 115-126. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8250426>
- Carreno-Madinabeitia, S., Sáenz, J., Ibarra Berastegi, G., & Ulazia, A. (2022). Evolución de la densidad de potencia eólica offshore en costas de la Península Ibérica estimada por reanálisis. Disponible en <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/14055>
- Cerezo-Araujo, F. J. (2022). Producción de hidrógeno verde: comparativa de la viabilidad técnica y económica de energía eólica onshore y offshore. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Navarra. <https://dadun.unav.edu/handle/10171/64403>
- Díaz Mendoza, A. C., Larrea Basterra, M., Álvarez Pelegrí, E., & Mosácula Atienza, C. (2015). De la liberalización (Ley 54/1997) a la reforma (Ley 24/2013) del sector eléctrico español. *Cuadernos Orkestra*, n.º 10: 1-103.
- Flores Baena, P. (2022). Estudio sobre la construcción de una planta eólica offshore flotante en el litoral español. Trabajo Fin de Grado. Universidad Pontificia de Comillas. Disponible en <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/66254>
- Masoliver Pereira, J. R. (2022). Estudio y diseño de un modelo de negocio para el sector de energías renovables utilizando el hidrógeno verde en España (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya). Trabajo Fin de Master. Universitat Politècnica de Catalunya. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/374587>
- Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (2021): Hoja de Ruta para el desarrollo de la Eólica Marina y de las Energías del Mar icono barra herramientas. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/desarrollo-eolica-marina-energias/default.aspx>
- Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (2020): Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.aspx>
- Ministerio de Transición Ecológica (2023): Real Decreto 150/2023, de 28 de febrero, por el que se aprueban los planes de ordenación del espacio marítimo de las cinco demarcaciones marinas españolas (POEM). *Boletín Oficial del Estado* número 54, 4 de marzo de 2023. Disponible en: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2023-5704
- Molina Ruiz, J. & Tudela Serrano, M. L. (2008). Elección de criterios y valoración de impactos ambientales para la implantación de energía eólica. *Papeles de Geografía*, n.º 47-48: 171-183. Disponible en: <https://revistas.um.es/geografia/article/view/41331>
- Odriozola Iríbar, U. (2022). Diseño de un parque eólico offshore. Trabajo Fin de Master. Universidad Politècnica de Cartagena. Disponible en: <https://repositorio.upct.es/handle/10317/11569>
- Sánchez Delgado, M. (2020). Desarrollo y validación de un modelo de sistemas de electrolisis alcalina para la producción de hidrógeno a partir de energías renovables. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Disponible en: <https://oa.upm.es/62567/>
- Sánchez Rodríguez, R. (2022). ¿ Por qué sube el recibo de la luz? Un análisis del mercado eléctrico en España. Trabajo Fin de Grado. Universidad de Valladolid. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/54328>
- Torroba A. (2022). COP 27: El rol de las energías renovables en la descarbonización. Blog IICA. Disponible en: <https://repositorio.iica.int/handle/11324/21237>
- Villarubia López (2012):Ingeniería de la energía eólica (Volumen 5). Marcombo.