

Proyecto Fin de Máster Ingeniería Aeronáutica

Análisis del Estado del Arte de aerogeneradores offshore. Estado de la tecnología, ventajas competitivas, limitaciones y principales fabricantes.

Autor: Alejandro Arce Canga-Argüelles

Tutor: Alfredo Iranzo Paricio

**Dpto. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2021



Proyecto Fin de Máster
Ingeniería Aeronáutica

**Análisis del Estado del Arte de aerogeneradores
offshore. Estado de la tecnología, ventajas
competitivas, limitaciones y principales fabricantes.**

Autor:

Alejandro Arce Canga-Argüelles

Tutor:

Alfredo Iranzo Paricio

Dpto. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2021

Proyecto Fin de Carrera: Análisis del Estado del Arte de aerogeneradores offshore. Estado de la tecnología, ventajas competitivas, limitaciones y principales fabricantes.

Autor: Alejandro Arce Canga-Argüelles

Tutor: Alfredo Iranzo Paricio

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2013

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Resumen

La sociedad actual se encuentra ante un panorama de crisis climática, el uso excesivo de fuentes de energía no renovables sucia, hay una gran emisión de gases contaminante a la atmósfera, lo que ha provocado el famoso cambio climático, el cual está provocando diferentes problemas en la tierra. Además, este uso excesivo ha provocado una previsión de escasez de estas fuentes de energía.

Ante esta situación tan negativa, han empezado apostar con bastante fuerza por el uso de las energías renovables, para hacer frente a estos problemas. Los distintos gobiernos cada vez son más conscientes de este auge y la necesidad de financiar por estos para su mejora y desarrollo.

En este proyecto se acomete, de un modo divulgativo, la concienciación de la urgencia de un cambio a una energía renovable en un futuro, exponiendo así los beneficios y perspectivas del mercado eólico offshore como una de las principales soluciones ante el cambio climático.

Se hará un resumen de la evolución del uso de la energía eólica. Continuando con una descripción del panorama actual de las energías renovables. También se detallarán las principales partes que componen un parque eólico marino, cuales son las principales empresas que intervienen en este negocio y cuál es el futuro a nivel político y tecnológico de esta energía.

Abstract

Today's society is facing a climate crisis scenario, the excessive use of dirty non-renewable energy sources, a large emission of polluting gases into the atmosphere, which has caused the famous climate change, which is causing different problems in the Earth. In addition, this overuse has led to an anticipated shortage of these energy sources.

Faced with such a negative situation, they have begun to bet quite strongly on the use of renewable energies, to face these problems. The different governments are increasingly aware of this boom and the need to finance them for its improvement and development.

This project undertakes, in an informative way, the awareness of the urgency of a change to renewable energy in the future, thus exposing the benefits and perspectives of the offshore wind market as one of the main solutions to climate change.

There will be a summary of the evolution of the use of wind energy. Continuing with a description of the current panorama of renewable energies. The main parts that make up an offshore wind farm will also be detailed, which are the main companies involved in this business and what is the political and technological future of this energy.

Resumen	9
Abstract	11
Índice	13
Índice de Figuras	15
1 Introducción	1
1.1. <i>Historia del aprovechamiento del viento</i>	1
2 Energía eólica	7
2.1. <i>Energía eólica mundial</i>	7
2.2. <i>Energía eólica en España</i>	9
2.3. <i>Energía eólica offshore</i>	11
2.3.1 Ventajas e inconvenientes	11
2.3.2 Situación actual de la energía eólica marina	12
3 Estado del arte	11
3.1 <i>Aerogenerador</i>	11
3.1.1 Rotor	12
3.1.2 Multiplicador	13
3.1.3 Eje	13
3.1.4 Generador	13
3.1.5 Sistema de orientación	14
3.1.6 Sistema de regulación y control	14
3.1.7 Torre	14
3.2 <i>Cimentaciones</i>	14
3.2.1 Cimentaciones poco profundas	15
3.2.2 Estructuras flotantes	20
3.3 <i>Infraestructura de red</i>	22
3.3.1 Subestación offshore	22
4 Productores de aerogeneradores y futuro energía eólica offshore	27
4.1 <i>Principales productores aerogeneradores</i>	27
4.1.1 Productores de aerogeneradores en 2020	28
4.1.2 Productores de aerogeneradores en el futuro	29
4.2 <i>Evolución de la tecnología</i>	30
4.2.1 Aumento del tamaño de los aerogeneradores	30
4.2.2 Aparición de nuevas tecnologías	32
4.3 <i>Futuro de la energía eólica marina</i>	38
4.3.1 Futuro de la energía eólica marina en España	42
5 Conclusiones	43
Referencias	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 – Barco Egipcio [3]	2
Figura 1-2 – Molino de Herón	2
Figura 1-3 – Molinos antiguos	2
Figura 1-4 – Molino Europeo	3
Figura 1-5 – Molino Americano	3
Figura 1-6 – Aerogenerador Charles Francis	4
Figura 1-7 – Turbina Degser	4
Figura 2-1 – Evolución de la nueva potencia instalada [8]	7
Figura 2-2 – Potencia por región y mercado [8]	8
Figura 2-3 – Potencia total instalada [8]	8
Figura 2-4 – Potencia instalada en Europa	9
Figura 2-5 – Cuota de mercado de energía eléctrica en España [10]	10
Figura 2-6 – Potencia eólica por comunidad autónoma	10
Figura 2-7 – Potencia eólica instalada en España [10]	11
Figura 2-8 – Nueva potencia instalada en 2020 [11]	13
Figura 2-9 – Evolución de la nueva potencia instalada anual [11]	13
Figura 2-10 – Potencia eólica marina acumulada	14
Figura 3-1 – Esquema de un aerogenerador	12
Figura 3-2 – Tipos de Buje	13
Figura 3-3 – Distribución de uso de cimentaciones en Europa	15
Figura 3-4 – Cimentaciones poco profundas	16
Figura 3-5 – Cimentación monopilote [16]	16
Figura 3-6 – Cimentación base de gravedad [16]	17
Figura 3-7 – Cimentación Jacket [16]	18
Figura 3-8 – Cimentación cubos de succión [16]	18
Figura 3-9 – Cimentación Tripods [16]	19
Figura 3-10 – Cimentación Tripiles [16]	19
Figura 3-11 – Estructura semisumergible [16]	20
Figura 3-12 – Estructura TLP [16]	21
Figura 3-13 – Estructura SPAR [16]	22
Figura 3-14 – Subestación eléctrica offshore	23
Figura 3-15 Estructura HVAC [17]	24
Figura 3-16 – Estructura HVDC [17]	24
Figura 3-17 – Comparación HVDC vs HVAC [18]	25
Figura 4-1 – Góndola Enercon	28

Figura 4-2 – Previsión de la nueva potencia instalada de los proveedores de aerogeneradores	30
Figura 4-3 – Evolución de los tamaños de turbina	31
Figura 4-4 – Tiempo por unidad de turbina instalada y por MW [27] [30]	31
Figura 4-5 – Peso de cimentación por unidad de turbina instalada y por MW [27] [30]	32
Figura 4-6 – Energía eólica offshore y proyecto green hydrogen [37]	33
Figura 4-7 – Power-to-Heat (P2H) ejemplo [18]	35
Figura 4-8 – Proyecto Deep Purple [18]	36
Figura 4-9 – Almacenamiento FLASC en aerogenerador offshore	37
Figura 4-10 Objetivo de potencia eólica marina para 2050 [11]	40
Figura 4-11 – Perspectiva de crecimiento de la potencia eólica marino [11]	41
Figura 4-12 – Perspectiva de nueva potencia energía eólica marina anual hasta 2030 [11]	41
Figura 5-1 – Evolución de la temperatura hasta 2100 [11]	39

1 INTRODUCCIÓN

La humanidad actualmente se encuentra en una situación de crisis climática, debida a que el desarrollo de las sociedades se ha basado en el uso de las fuentes de energía no renovables sucias, es decir, de carácter limitado y produciendo un impacto ambiental negativo en el medio ambiente. El uso de este tipo de energía ha provocado varios problemas en la actualidad. Primero, la previsión de escasez de las fuentes principalmente usadas, como son el gas natural o el petróleo. El segundo problema es la aceleración del cambio climático.

Según el gobierno de España [1], el cambio climático es la transformación en toda la Tierra del clima que ha existido en nuestra época, creando inconvenientes para la sociedad humana. Esta transformación además de ser natura por los diferentes mecanismos geológicos de la tierra, se han visto acelerado por la acción del hombre y todos estos cambios tienen distintas índoles, como temperaturas máximas y mínimas cada vez mayores, precipitaciones más escasas o contaminante cuyos efectos no son inmediatos, si no que florecerán a lo largo del tiempo.

El Informe de Síntesis del Quinto Informe de Evaluación del IPCC [2], concluye que es innegable el nefasto papel que está desempeñando el ser en el cambio climático, y que, de no cambiar nuestras acciones en un corto plazo, estas consecuencias serán irreversibles y con consecuencias devastadoras. Sin embargo, aún estamos a tiempo de poder tomar cartas en el asunto y mitigar los efectos.

Para conseguir poner freno al cambio climático, el ser humano se ha visto obligado a modificar las fuentes de energía utilizadas actualmente. El ejemplo más famoso de la imperiosa necesidad de un cambio, el famoso “Protocolo de Kioto, 1997”, en el cual el objetivo era reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, cuyo origen provienen del uso masivo de las fuentes de energía tradicionales.

Una de las principales herramientas para luchar contra este cambio climático es el uso de las energías renovables, es decir, la energía que se obtiene a partir de fuentes naturales prácticamente inagotables, como pueden ser el sol, el agua o el viento. De todas estas fuentes, vamos a centrar nuestro interés en la energía generada debido al viento, la energía eólica.

La energía eólica se produce gracias al movimiento de las masas de aire. El movimiento de estas masas es debido a la variación de temperatura no continua en la superficie terrestre, lo cual genera gradientes de presiones provocando que el aire se desplace de las zonas de alta presión a las zonas de menor presión. A mayor gradiente, mayor velocidad de desplazamiento y por lo tanto mayor energía cinética. En resumen, se busca obtener la energía buscada a partir de energía cinética provocada por el movimiento del aire.

En primer lugar, vamos a ver la evolución de la energía eólica a lo largo del desarrollo de la sociedad humana, evolucionando la tecnología para poder exprimir el máximo provecho al viento.

1.1. Historia del aprovechamiento del viento

El viento (energía eólica) junto a la madera (energía térmica) fueron las primeras fuentes de energía utilizadas por el ser humano. Los primeros usos que se le dieron a la energía eólica fue el de la navegación, se estima que entre los siglos VI y V a.C. ya se utilizaba el viento para poder desplazarse.

Las antiguas culturas establecidas en la región situada entre (con acceso al Golfo Pérsico, entre los siglos IV o V a.C.), basaban gran parte de sus comunicaciones en la navegación por ríos y canales [3], lo cual fomentó la aparición de los primeros barcos de vela. Esta información se obtiene de los grabados de estas culturas:



Figura 1-1 – Barco Egipcio [3]

La aparición de los primeros molinos de vientos estaba destinada para hacer funcionar órganos, estos están datados entorno el siglo I, el más famoso es fabricado por Herón de Alejandría [4].

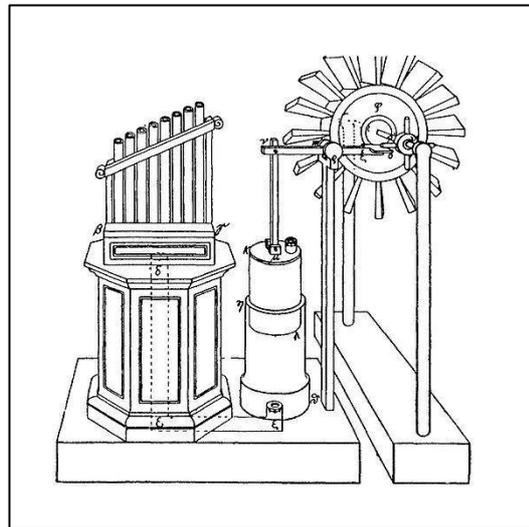


Figura 1-2 – Molino de Herón

Los molinos con aplicaciones más prácticas como el bombeo de agua o para moler trigo, no aparecieron hasta el siglo VII d.C. en las zonas de Persia [5]. Dichos molinos consistían en un eje vertical y hojas rectangulares, el viento producía el movimiento del eje donde se unían estas hojas, dicho eje estaba unido a un sistema de ejes, donde todo el conjunto producía la suficiente fuerza para el movimiento de maquinaria pesada.



Figura 1-3 – Molinos antiguos

La expansión del molino a Europa no se produciría hasta aproximadamente el siglo XII d.C. Su llegada a tierras europeas provocó un crecimiento exponencial en su desarrollo e instalándose en cualquier rincón. Estos molinos europeos estaban hechos de piedras, y las aspas en la parte superior de la estructura, eran fabricadas de madera y recubiertas de tela. Esto se utilizaba para poder mover maquinarias de manera independiente y únicamente dependiendo de la fuerza del viento. Se colocaba también una veleta detrás de las aspas, para guiarlas en la dirección del viento [5].



Figura 1-4 – Molino Europeo

Estos molinos aún siguen siendo utilizados, aunque en menor medida tras la Revolución Industrial, debido a la llegada de la máquina de vapor. Aun así, el uso de vela en los barcos y este modelo de molino, han sido los dos eventos históricos más importantes en la energía eólica.

En Estados Unidos, a principio del siglo XX, las máquinas eólicas fueron empleadas para el bombeo de agua. Su aparición fue crucial para la ganadería y agricultura en ubicaciones de difícil acceso. Además, tuvo gran importancia para desarrollo del ferrocarril en el país, pues éstas se utilizaba para abastecer de agua a las locomotoras de vapor que recorrían todo el país.



Figura 1-5 – Molino Americano

Fue en 1887, por obra del estadounidense Charles Francis Brush, cuando se construyó la primera turbina eólica que pudo producir electricidad, apareciendo ya la diferencia entre el turbina eólica y molino. El primero se utilizará para generar electricidad y el molino para moler grano o trigo. Dicho aerogenerador tenía un diámetro de 17 metros y estaba compuesto por 144 hojas de madera [6].

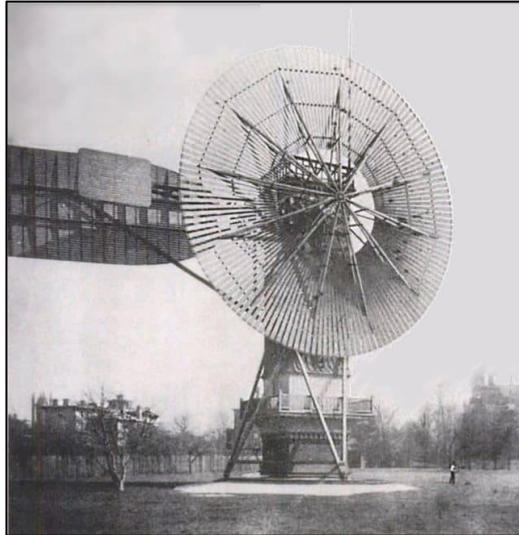


Figura 1-6 – Aerogenerador Charles Francis

La máquina eólica era bastante grande y a pesar de ello tenía únicamente una potencia de 12 kW y estuvo en funcionamiento a lo largo de veinte años. La razón por la que a pesar de su tamaño la potencia fuera tan baja era que las máquinas eólicas de rotación lenta no son muy eficientes, a diferencia de las de rotación rápida con menos palas. Esto fue demostrado por Poul la Cour [6].

No fue hasta 1941, cuando se fabricó el primero aerogenerador que alcanzaría la potencia de un megawatio, el aerogenerador Smith-Putnam, desarrollado por el ingeniero Palmer y apoyado económicamente por la empresa S. Morgan Smith Company of York. Además, tuvo la colaboración del científico Theodore von Karman [7].

Y finalmente, en torno a 1955, en Dinamarca, se desarrolló, por J.Juul el primer aerogenerador capaz de conectarse a la red eléctrica. La turbina estaba compuesta por 3 palas, era capaz de generar una potencia de 200 KW y utilizaba un generador asíncrono [6].



Figura 1-7 – Turbina Gedser

Debido a la llegada de las diferentes guerras mundiales, el número de proyectos e inversión en eólica cayó en picado, pues las crisis que se originaron debidos a las guerras propició que los gobiernos apostaron por una fuente de energía que en aquella época era muy barata y con el mayor rendimiento energético, el petróleo.

Esta apuesta prácticamente por el petróleo, provocó la primera crisis del petróleo, en la década de los 70, la aparición de esta crisis, tuvo como otra cara, la apuesta por energías renovables, pues la sociedad comenzó a darse cuenta, de que la dependencia de las fuentes de energía no renovables tendría consecuencias. Por lo tanto, se volvió a impulsar las energías renovables, para conseguir que estos proyectos comenzarán a ser financieramente rentables y mejorar la potencia de generación de energía.

La crisis medioambiental ha producido un nuevo impulso en el uso de la energía eólica, con el objetivo de reducir

las emisiones contaminantes. Esta fuente de energía, como la solar, son las principales candidatas a sustituir los combustibles fósiles. Es por ello, que cada vez son más los proyectos de parques eólicos y plantas solares.

En la actualidad, se sigue creciendo e investigando para poder sacar mayor partido a la energía eólica. Las características principales de los aerogeneradores de hoy en día, son el uso de tres palas orientadas a barlovento, velocidad y paso variable (inspiradas en las alas de los aviones), alcanzando potencias de hasta 10 MW [6].

El último paso de la energía eólica fue trasladar los campos de aerogeneradores al mar, debido principalmente a la necesidad de seguir creando parques eólicos, pero siendo cada vez mayor la escasez de localizaciones idóneas para parques terrestres, lo cual, ofrece nuevas formas de crecimiento.

2 ENERGÍA EÓLICA

En este punto se va abordar la situación actual del uso de la energía eólica. En un primer lugar, se describirá el uso de esta energía de manera general y posteriormente se hará un desglose para ser más específico en la energía eólica offshore.

2.1. Energía eólica mundial

El año 2020 ha sido uno de los años con mejores resultados en el mercado de la energía eólica, la potencia mundial eólica instalada incrementó en 94 GW, lo cual supone un incremento del 53% respecto 2019, de la cual 86.9 GW es de energía eólica terrestre y 6.1 GW de energía eólica marina, siendo 2020 e cual indica la gran resistencia que tuvo la industria eólica frente a la crisis causada por el COVID-19. Como puede observarse en la gráfica siguiente, ha sido el mayor salto de potencia instalada en el siglo XXI [8].

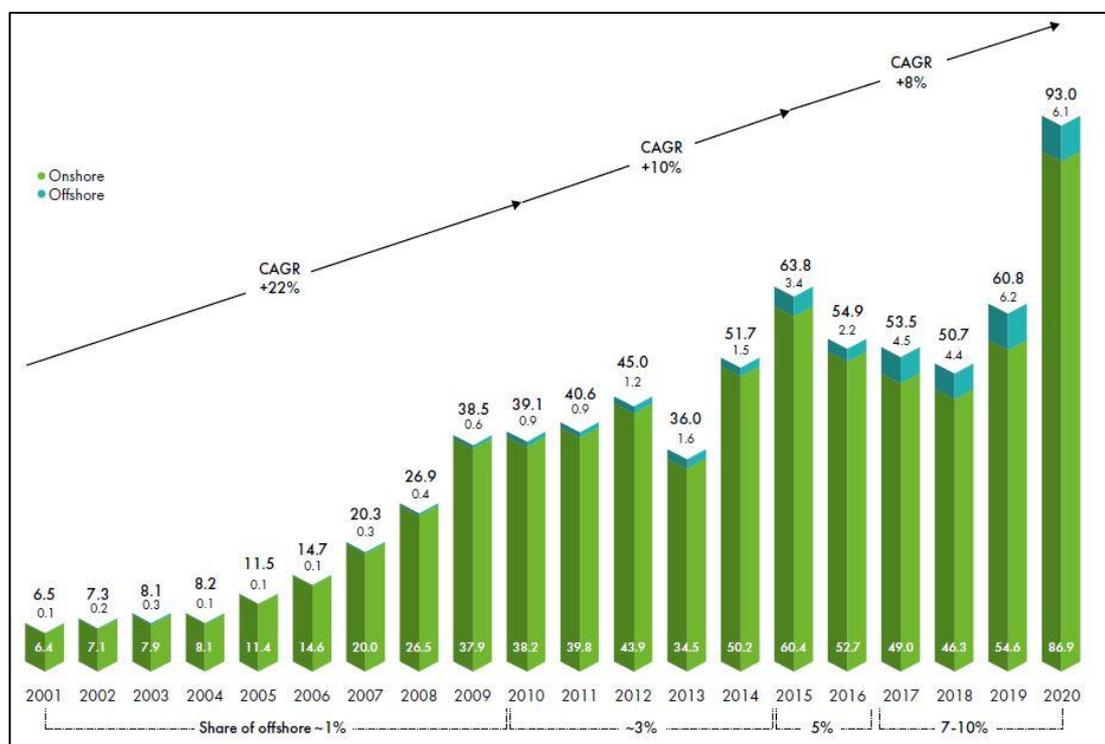


Figura 2-1 – Evolución de la nueva potencia instalada [8]

Los cinco principales mercados del mundo en 2020 para nuevas instalaciones fueron China, EE. UU., Brasil, Holanda y Alemania. Estos cinco mercados combinados constituyeron el 80,6% de las instalaciones globales el año pasado, colectivamente más del 10% más que en 2019.

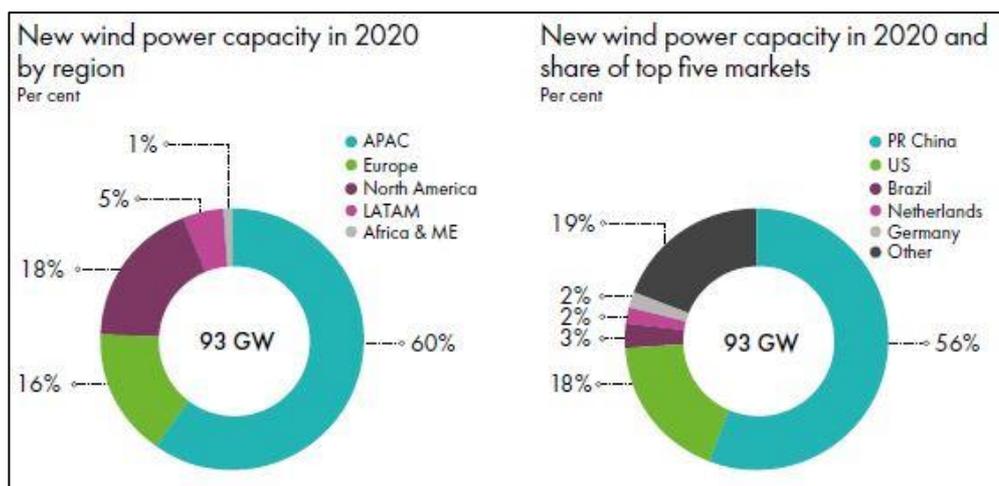


Figura 2-2 – Potencia por región y mercado [8]

Comparando el crecimiento de 2019 con el de 2020, el mercado eólico anual creció (con la combinación de tierra y mar) en todas las regiones, excepto Europa, África y Oriente Medio. Todo el aumento interanual de 32,2 GW proviene de los mercados eólicos terrestres: China 24,6 GW, EE. UU. 7,8 GW, Latinoamérica 1,0 GW, Europa 72 MW. Sin embargo, 2020 fue un año desafiante para el mercado eólico terrestre de la India. Aparte de los desafíos existentes de adquisición de terrenos, conexión a la red y permisos, la pandemia de COVID-19 afectó con fuerza al mercado y provocó retrasos en la ejecución de la construcción del proyecto. Las nuevas instalaciones en África y Oriente Medio se redujeron en 7 MW en comparación con el año anterior, principalmente debido a las instalaciones relativamente bajas en el norte de África. Las nuevas instalaciones eólicas marinas disminuyeron ligeramente en comparación con 2019, lo que se debió principalmente a la débil actividad en los dos mercados marinos europeos más grandes: el Reino Unido y Alemania [8].

En términos de instalaciones acumuladas, los cinco principales mercados a finales de 2020 se mantuvieron sin cambios. Esos mercados son: China, EE. UU., Alemania, India y España, que en conjunto representaron el 73% del total de instalaciones de energía eólica del mundo. El mercado asiático sigue dominando el mercado mundial, con una potencia total instalada de 336 GW, el 46,68% del total de potencia instalada, principalmente por el mercado chino. El mercado del continente americano, liderado por Estados Unidos, representa el 28,51 % y el mercado europeo el 29,48%, siendo este último el más importante en la energía eólica marina. Tras toda esta evolución, la potencia eólica mundial instalada se situaba en torno a los 743GW [8].

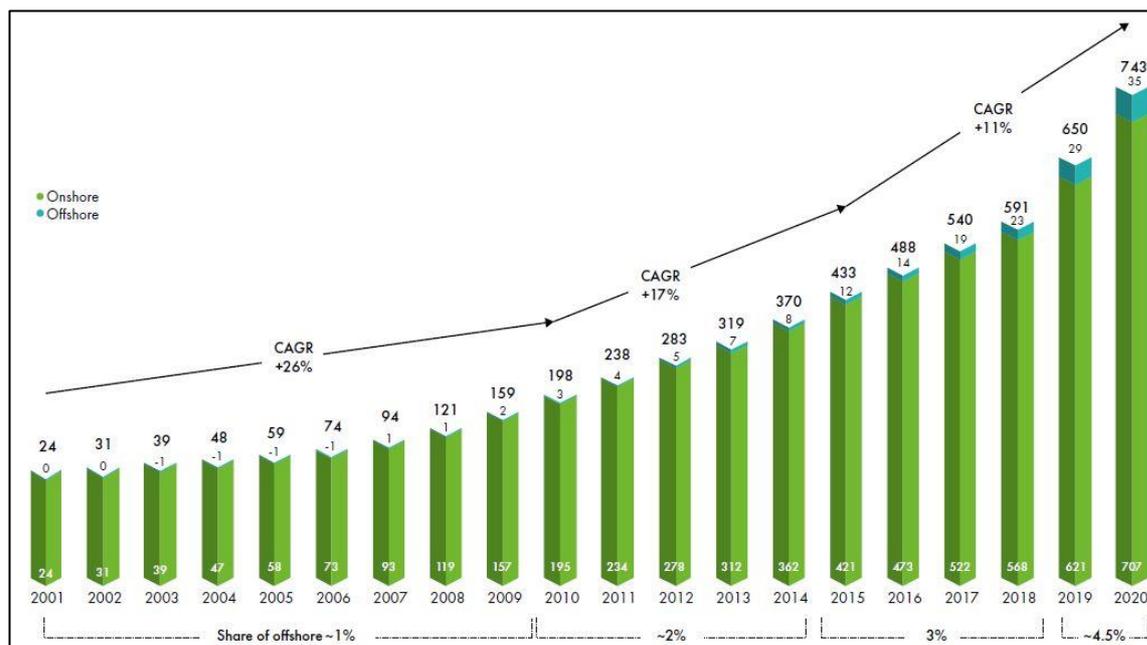


Figura 2-3 – Potencia total instalada [8]

Analizando más concretamente Europa, según WindEurope, en 2020, la nueva potencia instalada fue de 14.7 GW, menos de un 19% de lo previsto en un contexto pre-Covid, donde el 80% de esta instalación fue en tierra. Alcanzando así en Europa una potencia total instalada de 220 GW [9].

El país europeo que instaló más potencia eólica fue los Países Bajos, donde la gran parte de la energía fue offshore, siendo la que más instaló de este tipo, representando un total 13% de la potencia nueva instalada en Europa. El país que más potencia terrestre instaló fue Noruega. España creció bastante, llegando a representar el 10% del total. Sin embargo, como puede verse en el gráfico siguiente, la apuesta por la eólica offshore, se concentró en 4 países, Reino Unido, Bélgica, Alemania y los Países Bajos [9].

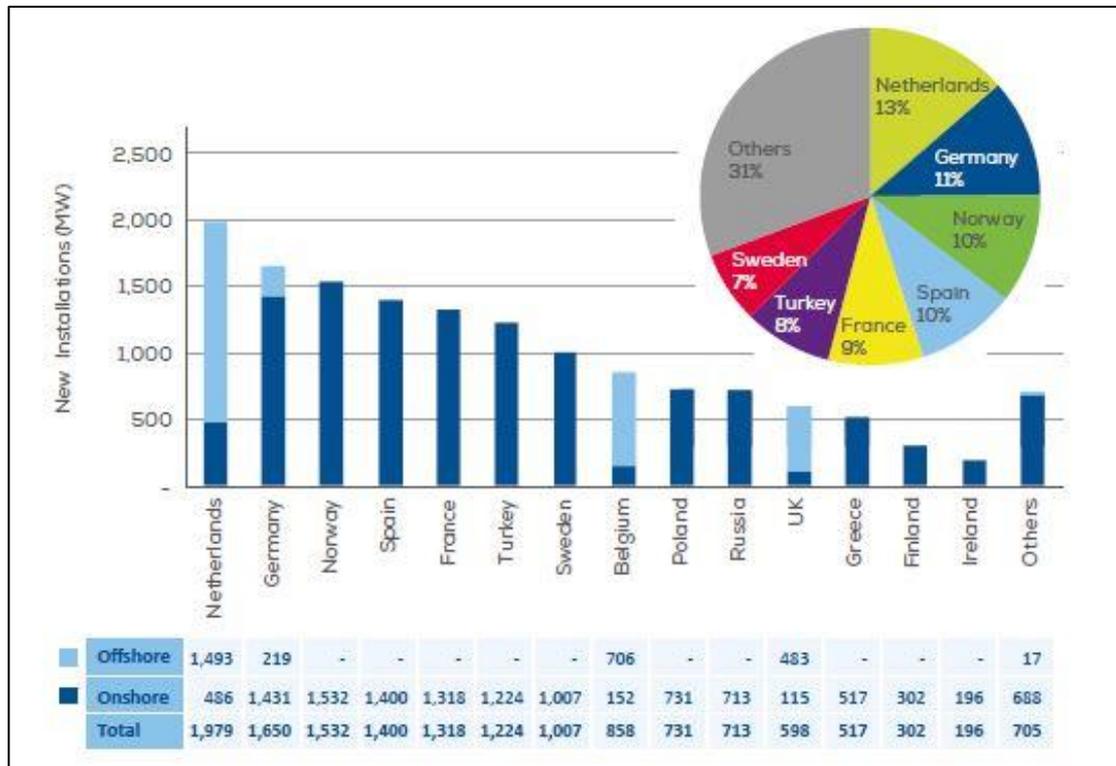


Figura 2-4 – Potencia instalada en Europa

2.2. Energía eólica en España

España ha sido una gran propulsora de la energía eólica, siendo líderes del sector durante bastante tiempo. Haciendo uso del clima y la geografía del país se ha impulsado el uso de las energías renovables, disminuyendo a su vez el uso de las fuentes de energía convencionales como son el gas o el carbón, principales contribuyentes a la contaminación.

La potencia eólica en España, pese al Covid-19, tuvo un incremento de 1720 MW, lo que le permitió estar entre los 5 países europeos que más nueva potencia eólica instalada crearon, concretamente el cuarto país. Tras este incremento, la potencia total acumulada en España a final de 2020 era de 27.446 MW, lo que hace que España sea el segundo país europeo por potencia eólica instalada tras Alemania.

La electricidad que se consumió en España con origen eólico fue de un 21,9%, siguiendo la tendencia creciente que venía de años atrás. Esta tendencia se ha mantenido y se ha consolidado como la fuente de energía de tecnología del mix, en el que se incluye a la nuclear, que más contribuye a la red. Con datos de 2020, dentro de las energías renovables, la eólica aportó el 49,7% de estas. En la figura siguiente podemos ver estructura de generación eléctrica en España, que va desde enero a julio de 2021 [10].

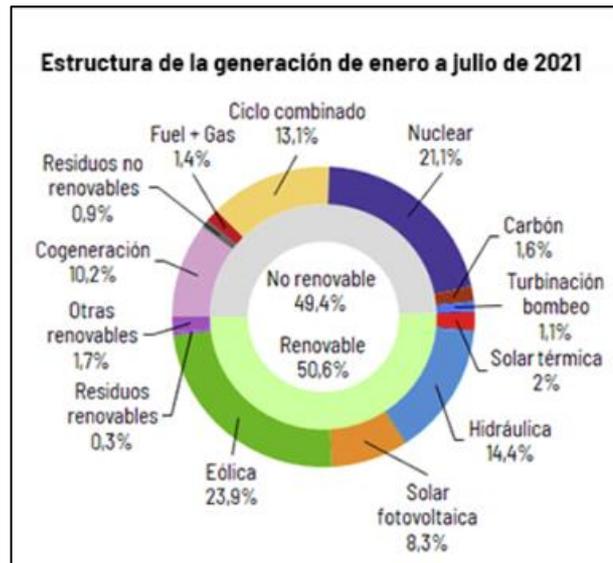


Figura 2-5 – Cuota de mercado de energía eléctrica en España [10]

Salvo en la zona de la comunidad de Madrid y de las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla, donde no existe instalación de energía eólica, en el resto de comunidades si está presente esta tecnología, siendo las zonas de Castilla y León como la que más potencia eólica tiene instalada. A continuación, vemos un desglose de cómo se distribuye toda la potencia eólica en España [10]:

Potencia eólica instalada por comunidades autónomas 2020
(En MW y porcentaje de cuota de mercado)

Fuente: elaboración AEE

CCAA	Potencia eólica Instalada en 2020 (MW)	Potencia Acumulada a Cierre de 2020 (MW)	Cuota de Mercado Sobre el Acumulado (%)	Nº de Parques Eólicos
Castilla y León	216	6.300	23,0%	267
Castilla La Mancha	65	3.886	14,2%	148
Galicia	24	3.829	14,0%	179
Andalucía	24	3.478	12,7%	162
Aragón	1.051	4.159	15,2%	168
Cataluña	0	1.271	4,6%	47
Comunidad Valenciana	50	1.239	4,5%	39
Navarra	262	1.303	4,7%	58
Asturias	0	590	2,1%	23
La Rioja	0	447	1,6%	14
Islas Canarias	29	450	1,6%	89
Murcia	0	262	1,0%	14
Pais Vasco	0	153	0,6%	7
Extremadura	0	39	0,1%	1
Cantabria	0	35	0,1%	3
Baleares	0	4	0,0%	46
TOTAL	1.720	27.446		1.265

Figura 2-6 – Potencia eólica por comunidad autónoma

El caso de la comunidad autónoma de Aragón es un caso a destacar, pues las políticas de esta comunidad, han conseguido instalar de manera consecutiva una potencia de más de 1GW, siendo esto poco frecuente a nivel de países europeos. Esto demuestra, que los apoyos de los gobiernos son fundamentales para poder potenciar este tipo de energía y alcanzar los objetivos propuestos de emisiones cero.

El sector eólico, según datos de AEE, consigue que se evite la emisión de 29 millones de toneladas de CO2 al año, además del beneficio económico generando puestos de trabajos, aproximadamente unos 30.000 empleos, las mejoras a nivel de calidad de vida del individuo, como la reducción del precio de la luz que beneficia a empresas y ciudadanos, como a largo plazo, seguir apostando por estas formas de energía, permitirán mejorar la calidad del medio ambiente. Para España, esta fuente de energía se corresponde con el 0.35% del PIB [10].

La tecnología eólica es un gran proyecto que tiene el gobierno de España, financiando a 20 centros de investigación y 9 universidades para potenciar esta fuente de energía y abanderarse como un país con políticas a seguir para potenciar la tecnología eólica. Un ejemplo de la apuesta española por la energía eólica es la cantidad de patentes que se han generado de diez años hasta la actualidad, más de 680 [10].

La apuesta por la energía eólica en España ha sido algo irregular. En un primer lugar, tras el Protocolo de Kioto la energía eólica creció de manera progresiva y constante, sin embargo, a raíz de 2007, con la crisis económica, este crecimiento se paralizó, principalmente en el periodo que abarca desde 2012 hasta 2017. Además de la crisis, una causa de este estancamiento fue la falta de terreno rentable de explotación. A partir de 2018 está tendencia cambio y sufrió un gran crecimiento en la apuesta por la eólica. La evolución de la potencia instalada en España se observa en el siguiente gráfico:

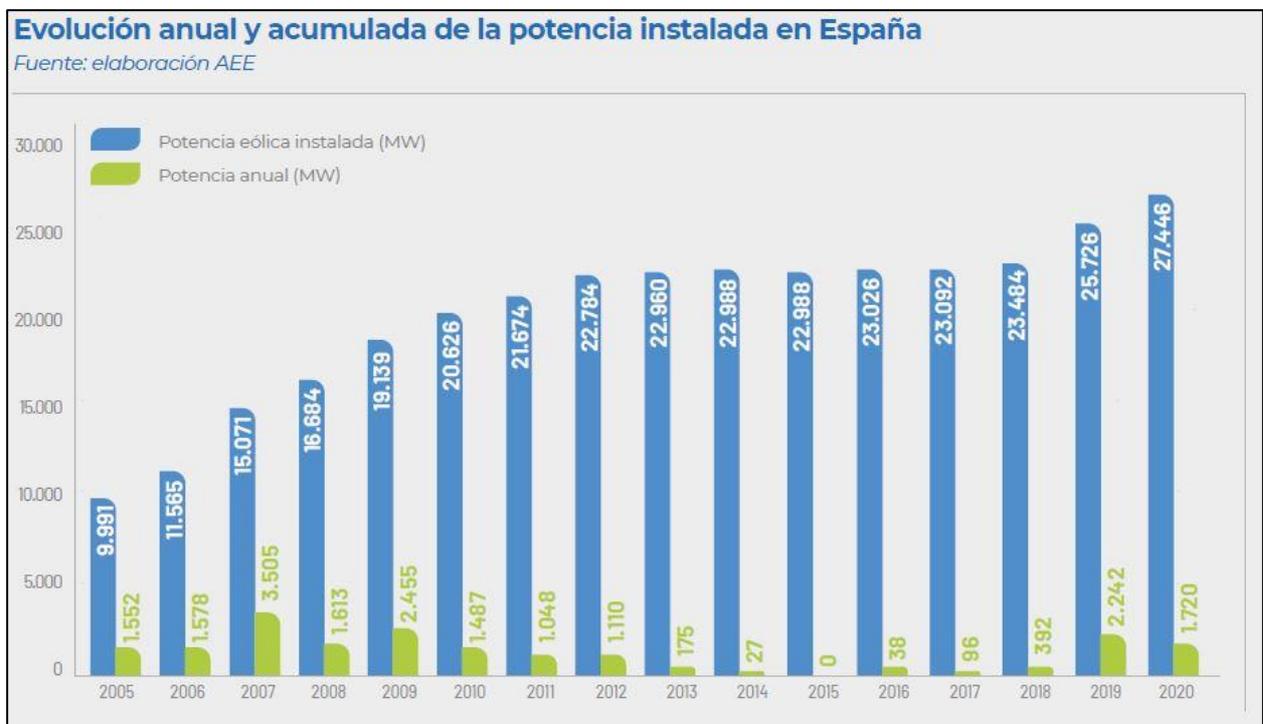


Figura 2-7 – Potencia eólica instalada en España [10]

2.3. Energía eólica offshore

La energía eólica marina es básicamente una variante de la eólica terrestre, es decir, una energía renovable y no contaminante. Lo que la diferencia principalmente de la terrestre es que los aerogeneradores se instalan en el mar, lo cual, al no haber barreras provoca que tanto la potencia que se puede generar es más elevada y constante, con menor turbulencia, lo que provoca que el rendimiento de estos aerogeneradores es mucho mayor. Otro de las razones del nacimiento de esta, es el agotamiento del terreno disponible para la instalación de parques eólicos

2.3.1 Ventajas e inconvenientes

Como se ha comentado anteriormente una de sus principales ventajas es la diferencia del viento respecto a tierra, al tener más potencia y menos turbulencia hace que el rendimiento de los aerogeneradores sea mucho mayor, lo que genera mucha mayor cantidad de energía. Todo esto propicia que las potencias de los aerogeneradores offshore sean mayores.

Otras de las ventajas que presenta el uso de parques eólicos marinos es la facilidad para el transporte e instalación de los parques, es más sencillo el transporte de los componentes a través de barcos que de camiones y trenes a zonas montañosas, que suele ser la ubicación de los parques eólicos terrestres o incluso ocupar zonas rurales privadas, algo que tiene un coste añadido en estos parques, pues las extensiones de los parques no son pequeñas.

Una ventaja más que tienen los parques eólicos offshore es que el impacto visual y acústico que producen es menor que los aerogeneradores terrestres. La posibilidad de tener las plantas eólicas a una distancia considerable de tierra, es prácticamente imposible que estas instalaciones afecten a la vida humana. Un punto además a tener en cuenta, es que los parques onshore, necesitan estar ubicadas en terrenos, que por lo general pertenecen a entes privados, lo que provoca un coste adicional la adquisición de este para poder instalar la planta.

A pesar de las innumerables ventajas que tiene los parques eólicos marinos y todo el potencial que tienen, presentan una serie de inconvenientes que provoca, cada vez menos, reticencias a su desarrollo. Y es que el principal problema de estos parques son el coste de construcción, operación y mantenimiento, es un coste muy elevado debido a la complejidad de estas operaciones. Algunas de las razones de este encarecimiento, es que para estas operaciones es necesario el uso de unos buques, los cuales están diseñados exclusivamente para estas tareas y son pocas unidades. A esto hay que sumar la infraestructura del cableado en el fondo marino, que transporta la energía obtenida hasta la costa, más el tiempo de construcción, que al final cabo, mayor tiempo de construcción más costes. Y este tiempo añadido se debe a que la climatología en las zonas marinas es adversa, lo que provoca que los trabajos se tengan que paralizar o ir más lento para trabajar en condiciones de seguridad adecuadas.

Otro aspecto a tener en cuenta en los proyectos eólicos marinos es que durante su construcción se altera el ambiente marino, debido a los distintos ruidos y vibraciones, provocando el movimiento de especies a otras zonas, con el peligro que acarrea introducir especies en zonas que no son su ecosistema. Un caso muy extremo, es que podría provocar la desaparición de otras especies.

2.3.2 Situación actual de la energía eólica marina

La industria eólica marina mundial tuvo su segundo mejor año en 2020 a pesar del impacto de COVID-19, se instaló 6,1 GW de potencia. El país que más potencia instaló este año fue China, con 3GW, además reafirmando que es la dominadora en los últimos 3 años.

Europa también creció, manteniendo la línea que venía presentando de años atrás, con una potencia de aproximadamente 3 GW, al nivel de China, donde quién más apostó por la offshore fue los Países Bajos, con casi 1,5 GW. Fue seguido de Bélgica (706 MW), Reino Unido (483 MW) y Alemania (237 MW). La aportación de otros países europeos fue minúscula, de tan solo 17 MW. Los únicos países que aportaron algo de nueva potencia instalada aparte de los ya nombrados fueron Corea del Sur con 60 MW y Estados Unidos, con 12 MW, cifras muchísimo menores respecto a los otros países que instalaron potencia en 2020 [11].

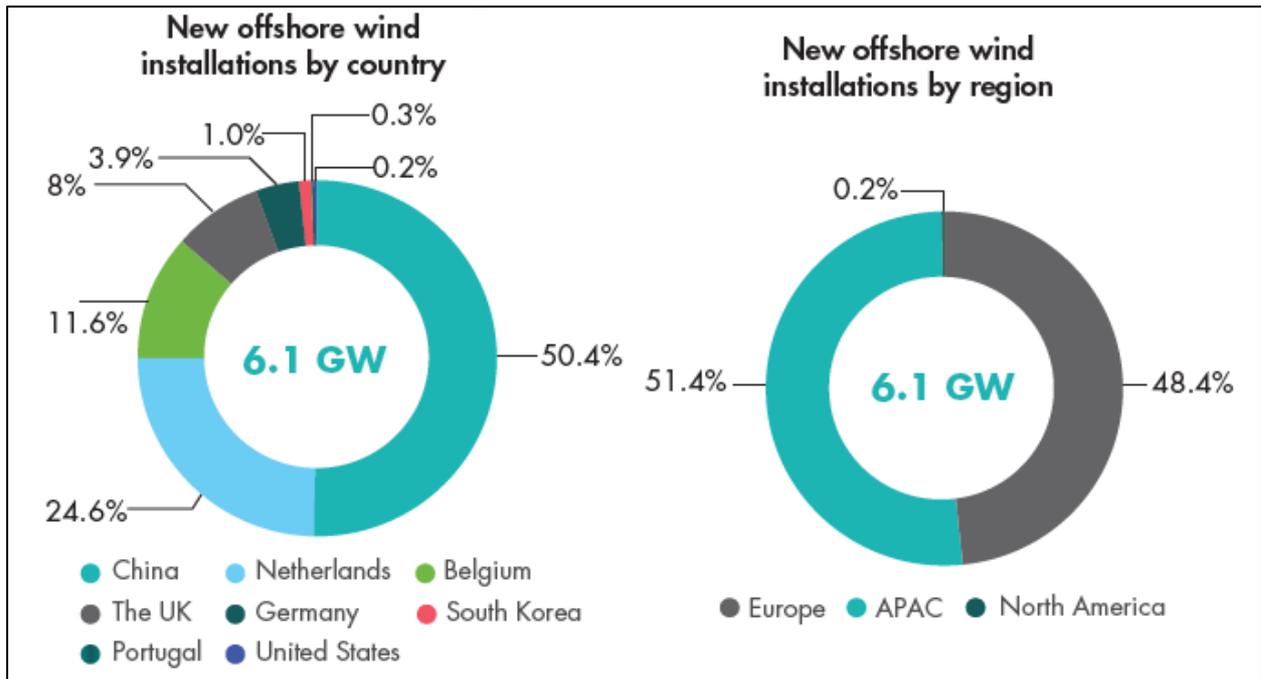


Figura 2-8 – Nueva potencia instalada en 2020 [11]

El mercado de la energía eólica marina ha crecido de 2,2 GW en 2016 a 6,1 GW en 2020, lo que eleva la cuota de nuevas instalaciones eólicas marinas del 4% al 7%, que es un 3% más baja que en 2019. Esto se debe principalmente al fuerte crecimiento de la energía eólica terrestre en 2020 [11].

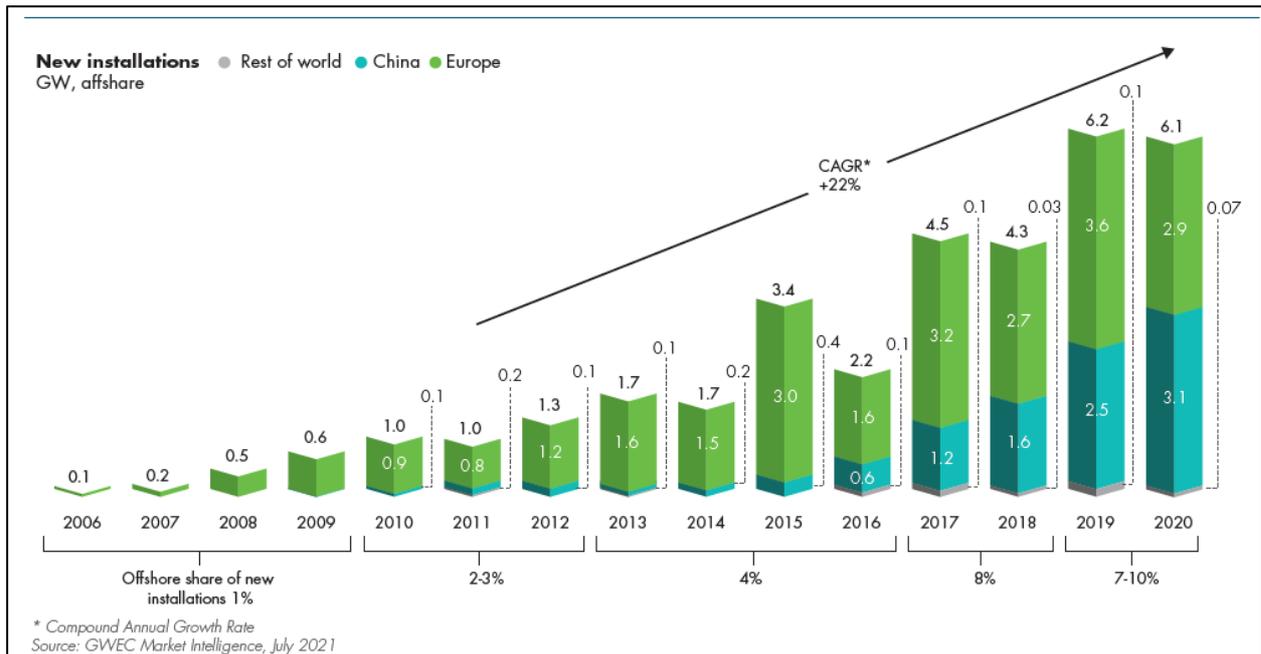


Figura 2-9 – Evolución de la nueva potencia instalada anual [11]

El mercado offshore global creció en promedio un 22% cada año durante la última década, lo que elevó las instalaciones totales a 35,3 GW, lo que representó el 5% de la capacidad eólica global total a finales de 2020.

Europa sigue siendo el mercado marino más grande a finales de 2020, representando el 70% del total de instalaciones eólicas marinas mundiales, que es un 5% más bajo que el año anterior. Las instalaciones acumuladas en Asia superaron el hito de 10 GW a finales de 2020, lo que lo convierte en el segundo mercado offshore regional más grande. China tiene actualmente un fuerte liderazgo en las actividades de energía eólica marina, seguida de Corea del Sur, Taiwán, Vietnam y Japón.

América del Norte tiene solo 42 MW de energía eólica marina en funcionamiento hasta el año pasado, pero se

espera que el despliegue en los EE. UU se acelere a partir de 2023.

El Reino Unido se mantiene en el primer lugar a nivel mundial en términos de capacidad eólica marina acumulada a fines de 2020, mientras que China ha superado a Alemania para convertirse en el segundo mercado eólico marino más grande del mundo.

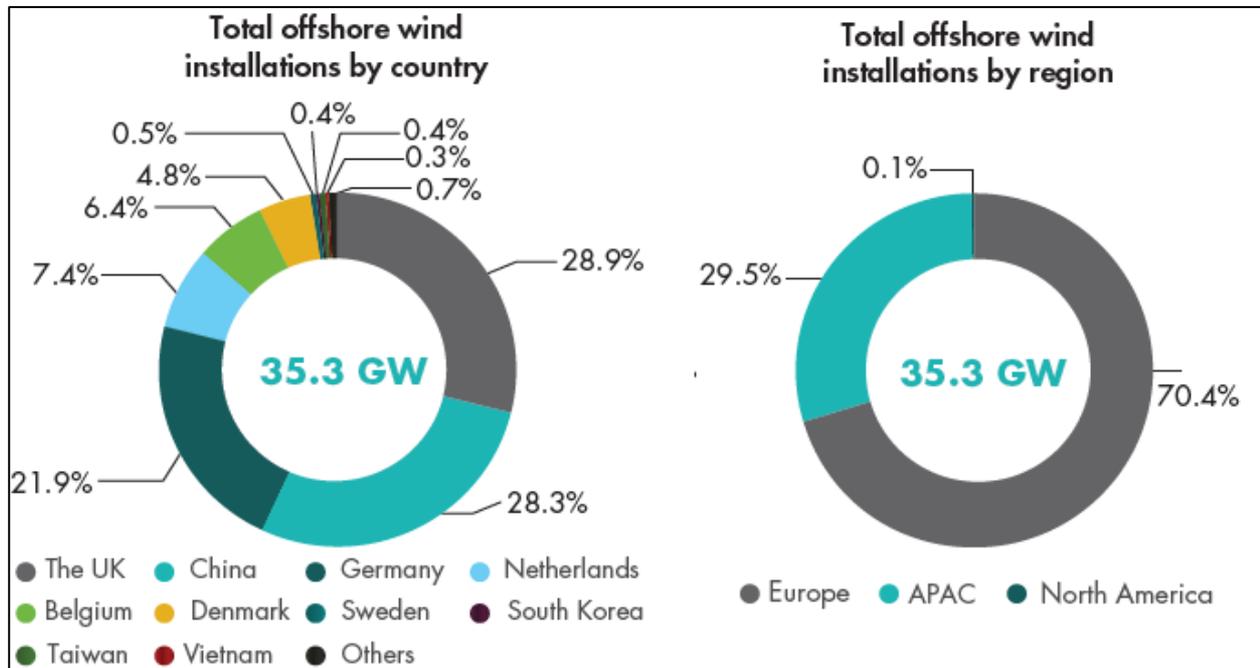


Figura 2-10 – Potencia eólica marina acumulada

2.3.2.1 Situación eólica offshore en España

España, a pesar de ser uno de los líderes en materia de energía eólica, lo cierto es que la apuesta en energía eólica marina va bastante retrasada respecto al resto de países europeos. De hecho, no tienen ningún parque marino en fase comercial, solo dos parques, con una potencia acumulada de 5 MW, que se utilizan para investigación y realización de pruebas, ubicados en las zonas de Canarias, Euskadi y Cantabria [12].

España, a pesar de tener un gran kilometraje de costa, aproximadamente 6000 kilómetros, el principal problema es la evolución de la profundidad del lecho marino, que, a diferencia de los países del norte de Europa, esta crece muy rápidamente en profundidad. Teniendo en cuenta que las estructuras actuales, solo llegan hasta 50 metros de profundidad, hace que el desarrollo de parques eólicos offshore no haya proliferados en el país. Además, el construir este tipo de parques cerca de la costa, es una decisión que ni se contemplaba, pues supone un impacto paisajístico que podría afectar a uno de los principales motores de ingreso de España, el turismo [10] [12].

Es cierto que hubo intentos de fomentar la energía eólica marina por parte del Gobierno de España mediante el Plan de Energías Renovables, PANER 2011-2020, cuyo objetivo era que las energías renovables representen un 20% del consumo final bruto de energía, de los cuales se contara con una potencia eólica offshore acumulada de unos 3000 MW en el año 2020, pero como se ha descrito, el objetivo de este plan, no se ha alcanzado [13].

3 ESTADO DEL ARTE

Un parque eólico marino supone una fuente limpia y renovable de energía que aprovecha la fuerza del viento en zonas alejadas de la costa, donde el viento alcanza velocidades mayores y más constantes debido a la ausencia de barreras naturales. Son instalados en zonas marítimas poco profundas, de hasta 60 metros de profundidad, y lejos de la costa o de zonas con rutas de tráfico marítimo o espacios naturales protegidos. Estos parques continúan siendo una apuesta para suplir la cada vez mayor demanda de energías renovables de muchos países como España.

Una planta de aerogeneradores offshore está formada por diferentes elementos. El elemento más característico y visible es el propio aerogenerador, pero también forma parte el soporte que sostiene el aerogenerador, la infraestructura que lo conecta a la red o los diferentes elementos que se utilizan para la gestión o mantenimiento de la planta.

3.1 Aerogenerador

Los aerogeneradores tienen como función la transformar la energía eólica en energía eléctrica, lo cual, convierte este elemento en el actor principal de un parque eólico.

La base de estos aerogeneradores son los aerogeneradores terrestres, diferenciándolos de estos principalmente en la en que deben soportar la corrosión producida por el mar como las mayores velocidades e intensidades del viento en mar abierto. Estos hechos provocan que se deba hacer una inversión mayor en otros aspectos, como son:

- Góndola y torre herméticas para proteger de las inclemencias de estar en medio del mar.
- Acabados superficiales para evitar la corrosión debida a la salinidad del mar.
- Transformador y equipo informático incluido dentro de la torre.
- Incluir un sistema de deshumidificación.

La forma más habitual de los aerogeneradores offshore es la de tres palas unidas a un rotor, separadas 120°. Al estar en el mar, la altura de estas, no son tan altas, eso es debido a la rugosidad superficial del viento en el mar al ser menor que en tierra provoca que la velocidad del viento para una misma altitud, la velocidad de este sea mayor en el mar que en tierra.

La ubicación del mar, permite que el impacto acústico no sea un factor limitante, como se comentó en el punto 2.3.1, por lo que es posible alcanzar mayores velocidades de punta de pala, para conseguir este incremento se debe reducir el peso de las palas, lo cual también es un beneficio, pues reduce el peso global del aerogenerador

A modo de esquema, la configuración de un aerogenerador es la siguiente:

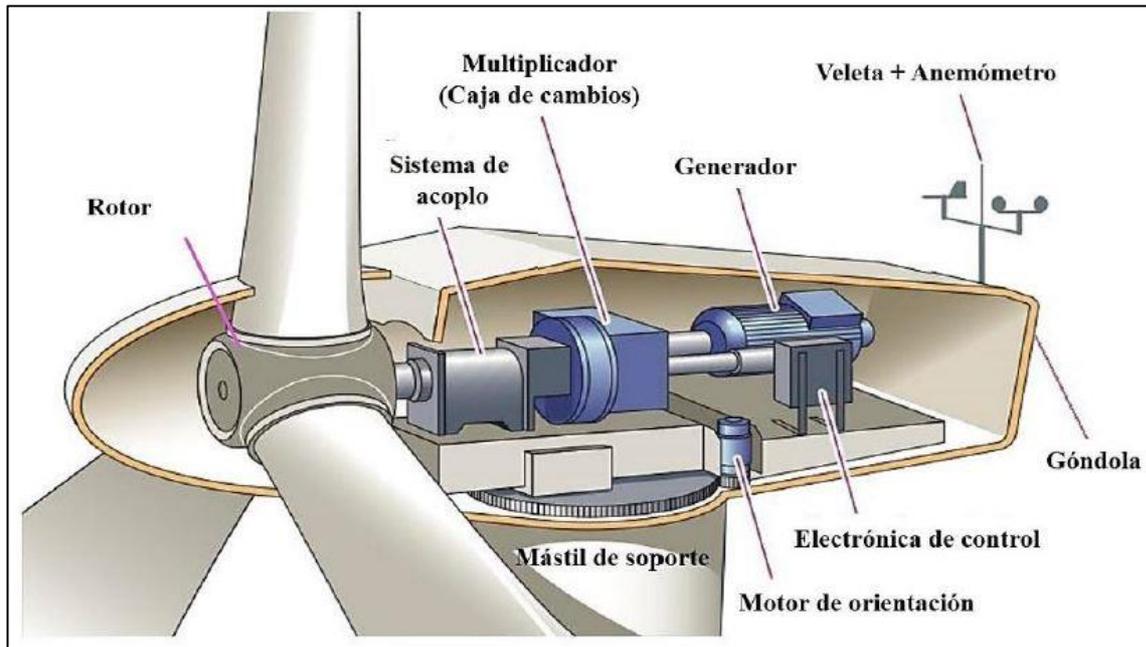


Figura 3-1 – Esquema de un aerogenerador

3.1.1 Rotor

El rotor, instalado sobre la góndola utilizando una brida de rodamientos, está compuesto por el buje y las palas. A continuación, se detallarán más en detalle estos elementos.

3.1.1.1 Palas

Las palas son las actrices principales del sistema de captación, su función es la de coger la energía eólica y transforma el movimiento lineal del viento en uno rotatorio, por lo que están diseñadas para maximizar la eficiencia aerodinámica. Están fabricadas actualmente de una mezcla de fibra de carbono y materiales metálicos. El primero se utiliza principalmente en los extremos de la pala, debido a su bajo peso, mientras que el segundo se usa en la conexión al buje.

Las características que tienen más importancia a la hora de su diseño para obtener una mayor eficiencia son:

- Relación de aspecto, es el cociente entre el cuadrado del radio de la pala y la superficie en planta de las palas.
- Solidez que consiste en la relación entre la superficie en planta de las palas y el área de barrido de la turbina.
- Espesor relativo, es la fracción entre el espesor del perfil respecto a la cuerda.
- Relación de cuerdas, es la fracción entre la cuerda en la punta y la cuerda en la raíz.

De manera general, se añade una protección en el interior y exterior de la pala frente a relámpagos, pues es la causa más habitual de avería en las palas. Dependiendo del fabricante, la tecnología utilizada puede variar, por ejemplo, las palas pueden instalarse componentes adicionales para mejorar las prestaciones de la pala y mejorar su eficacia, como reguladores de pérdida para estabilizar el flujo de aire o para reducir la pérdida de sustentación se pueden usar alerones.

3.1.1.2 Buje

Es el elemento que conecta las palas del aerogenerador al eje, de este modo, las palas transmiten su movimiento al eje a través de este elemento. Para proteger este elemento debido a su criticidad, se utiliza una funda ovalada que se denomina cubierta [14].

Existen tres tipos de bujes:

- Bujes rígidos: Se utilizan sobre todo en rotores de 3 palas o más. Está diseñado para conservar los componentes del buje en un lugar fijo en relación con el eje principal. Este buje permite que el ángulo de paso de las palas pueda modificarse, pero no permite otro movimiento.
- Bujes basculantes: se utilizan en casi todos los aerogeneradores de dos palas y están fabricados para reducir las cargas aerodinámicas no equilibradas que se transfieren al eje. Esta configuración permite moverse a las palas unos grados en la dirección perpendicular al eje.
- Bujes de palas abisagradas: es una combinación entre los dos bujes anteriores, se resume en un buje rígido con bisagras para reducir las cargas excesivas con vientos fuertes. Se utilizan en aerogeneradores instalados a sotavento.

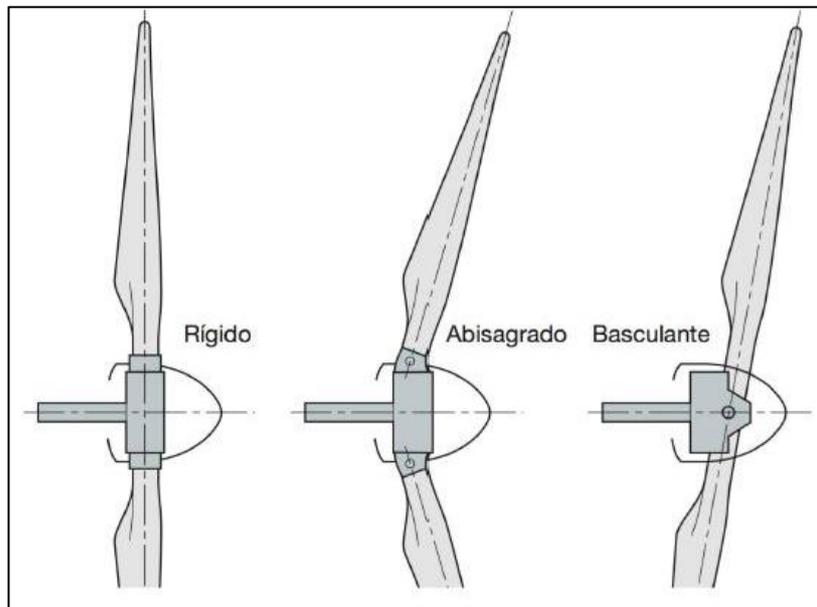


Figura 3-2 – Tipos de Bujes

3.1.2 Multiplicador

Es un componente del que el aerogenerador puede disponer o no. En caso de tenerlo el aerogenerador poseerá dos ejes en vez de uno. La opción más habitual es la de usar una multiplicadora, por ser la más económica en grandes aerogeneradores. La misión de la multiplicadora es convertir las bajas velocidades transferidas de las palas al buje a las altas velocidades requeridas para la generación eléctrica.

3.1.3 Eje

En el aerogenerador habrá uno o dos ejes dependiendo de si el aerogenerador tiene multiplicadora. En caso de ser un único eje este es corto y robusto para aguantar los esfuerzos. Si el aerogenerador posee dos ejes, uno sería como en el caso de un solo eje, robusto y corto, en el que las velocidades de giro son menores. El segundo, el cual está sometido a velocidades de giro mayores que en el primero, el eje es más largo y de menor radio.

Otros elementos que aparecen en el eje son el freno, que se utiliza para bajar la velocidad de giro del eje, y el rodamiento principal que sirve para transferir esfuerzos y alinear.

3.1.4 Generador

Es el encargado de transformar la energía rotativa procedente del eje en energía eléctrica a través del generador. Los generadores que nos podemos encontrar en un aerogenerador son síncronos y asíncronos.

- Generadores síncronos: Se utilizan para aerogeneradores ubicados en zonas alejadas. Estos aerogeneradores transforman corriente continua a partir de la alterna de la red. Una característica de estos generadores, es que no tienen la necesidad de usar caja multiplicadora.
- Generador asíncrono o de inducción: A diferencia del síncrono, este si necesita de una caja multiplicadora, requieren de más mantenimiento y de estar sincronizado con la red eléctrica. Una característica de este tipo de aerogenerador es que la velocidad es de tipo variable. Es el más usado en los aerogeneradores eólicos.

3.1.5 Sistema de orientación

Este sistema también es conocido como sistema de “Yaw”, la función de este subsistema es la de maximizar el aprovechamiento eólico, haciendo lo más grande posible la superficie a atravesar por el viento, para ello debe lograr que el aerogenerador se mantenga en un plano perpendicular al viento.

Hay dos tipos, el pasivo que utiliza elementos mecánicos y el activo, que usa elementos electrónicos, en los aerogeneradores offshore, los más usados son los segundos, y hacen uso de sensores como la veleta y el anemómetro, permiten conocer la velocidad y dirección del viento, de un microprocesador que calcula la desviación del aerogenerador respecto a la dirección del viento y acciona un motor eléctrico para cambiar la dirección de la turbina y optimizar el funcionamiento de esta.

3.1.6 Sistema de regulación y control

Este sistema se incluye en el aerogenerador para hacer frente a los resultados de las variaciones de velocidades del viento, que producen pérdidas de rendimiento debido a la disminución de la velocidad.

Existen dos técnicas de regulación, la de palas variables y fijas, siendo la primera la más usada actualmente, esta es conocida también como sistema de “Pitch”. Este sistema modifica la orientación de las palas respecto a la dirección del viento para poder optimizar su rendimiento, pudiendo establecer una posición de mínima resistencia, posición de bandera, de canto al viento, o una posición de máxima captación.

Este sistema también es el responsable de decidir si parar o arrancar el aerogenerador en caso de se detecte un fallo o avería.

3.1.7 Torre

El objetivo de la torre es la de soportar la góndola respecto a la superficie y colocarla a la altitud para la que se haya diseñada. Esta además puede girar sobre su propio eje para poder orientar el rotor en la dirección del viento para evitar que el rendimiento del aerogenerador disminuya

3.2 Cimentaciones

La ubicación de los parques eólicos marinos en medio del mar, provoca que una serie de ventajas descritas anteriormente, pero esta localización trae unas consecuencias negativas, y es el desarrollo de una cimentación para poder soportar las turbinas offshore. Estas cimentaciones son de una complejidad y coste muchísimo mayor que en los parques eólicos onshore, suponiendo casi un 20% del coste total del desarrollo de una turbina offshore.

Estas estructuras deben diseñarse para poder ser estables y soportar las embestidas de las olas, el movimiento de las aguas por las corrientes marinas, así como las embestidas del viento.

Para las cimentaciones pueden hacerse una categorización, las cimentaciones poco profundas y las estructuras flotantes. La diferencia de usar una u otra es la profundidad que tiene la zona donde se va a construir el parque eólico. La primera se usa para profundidades no mayores a los 50 m, por una gran diversidad de razones, como son la dificultad de transporte de grandes cimentaciones, a mayor tamaño se requieren procesos de diseño,

fabricación e instalación más complejos, en resumidas cuentas, inversiones económicas mayores que las hacen inviable superar dicha profundidad.

Mientras que las flotantes a día de hoy los procesos de diseño y fabricación son bastante costosos, además que para garantizar la estabilidad necesita una gran cantidad de sensores y computadoras, por lo que el encarecimiento que supone a los proyectos, han provocado que todavía haya muchos proyectos con estas estructuras.

En el reporte de 2020 de WindEurope [15], en Europa la distribución de cimentaciones usadas fue la siguiente:

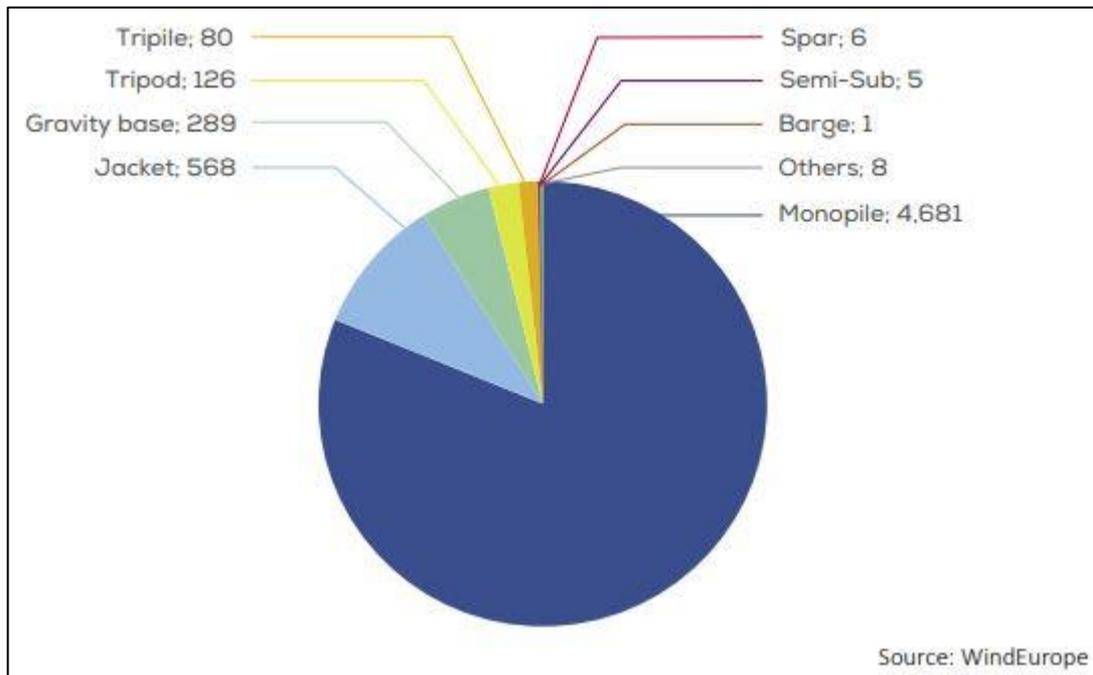


Figura 3-3 – Distribución de uso de cimentaciones en Europa

3.2.1 Cimentaciones poco profundas

Las propiedades fundamentales de todas las clases de cimentaciones poco profunda son dos, ser resistentes al constante choque de las olas contras estas y de tener la suficiente resistencia a la corrosión que produce el agua del mar. Hay diferentes de cimentaciones poco profundas, todas ellas están diseñadas para instalarse en zonas donde no se superen los 60 metros de profundidad y todos sus esfuerzos son transferidos al lecho marino.

Como se ha escrito en el párrafo anterior, hay una gran variedad de cimentaciones, la elección de una u otra para un parque eólico dependerá de cada proyecto y de las diferentes limitaciones que tenga.

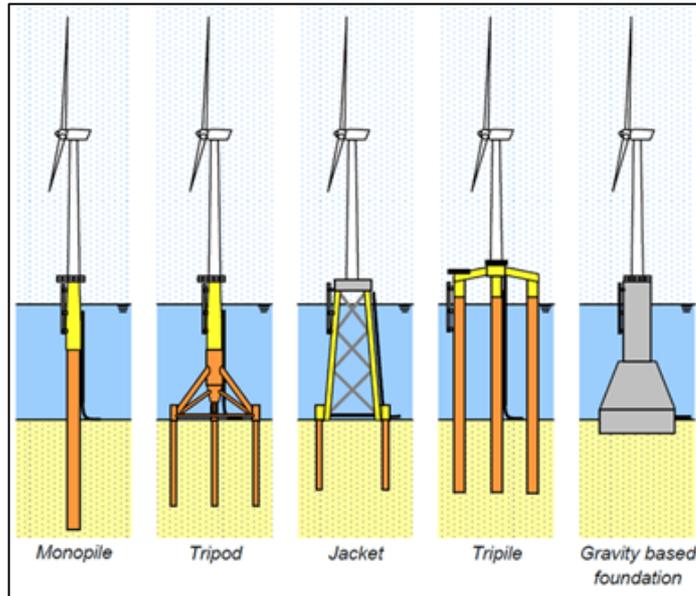


Figura 3-4 – Cimentaciones poco profundas

3.2.1.1 Monopilotes

Estas cimentaciones han sido las más escogidas en la mayoría de las instalaciones eólicas offshore, y toman como referencia las experiencias del diseño de la industria del gas y del petróleo, muy similar a la usada en los aerogeneradores de tierra.

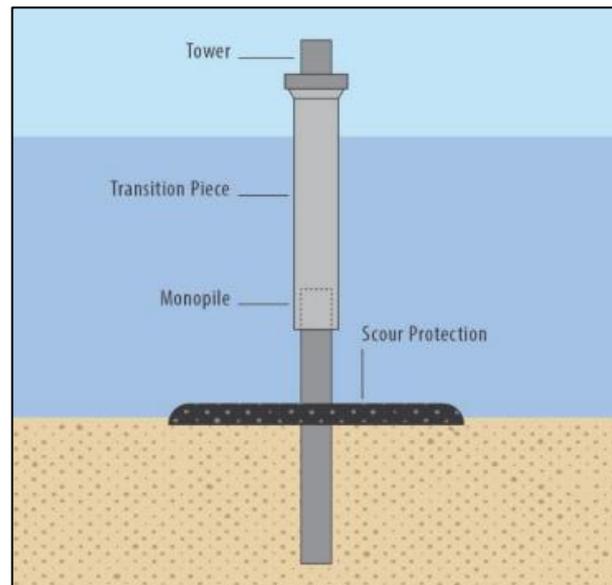


Figura 3-5 – Cimentación monopilote [16]

Su estructura consiste en un único pilote de acero de un determinado diámetro, es por ello que se trata de una construcción muy económica debido a la sencillez de su diseño y fácil construcción. Su instalación consiste en instalar parte del pilote en el lecho marino. Se instalan en profundidades no mayores de 25 metros, sobresaliendo este por encima de la superficie del agua unos 5 o 10 metros.

El punto negativo de los monopilotes es que su instalación no es factible en lechos marinos muy duros, pues la perforación del lecho marino encarece su instalación, como en lechos demasiado blandos, que no garantizan la seguridad del aerogenerador. Otra desventaja, es que cuanto mayor sea el aerogenerador que va instalado sobre el monopilote o el estar sometida a unas circunstancias más adversas, el peso de este crece considerablemente requiriendo de un diseño más complejo y por lo tanto incrementando el coste. Otro punto negativo, es que la desinstalación de este tipo es bastante compleja, por lo que debe estudiarse muy bien, la viabilidad del proyecto.

3.2.1.2 Bases de gravedad

Las bases de gravedad se instalan directamente sobre el fondo del mar, con profundidades máximas de 30 metros, su fijación a este es por gravedad. Se diseña de manera que tenga un gran peso para garantizar la estabilidad de la estructura soporte y del aerogenerador, ante las cargas que realizan el mar y el viento sobre el conjunto. Este gran peso se concentra en una base de un tamaño muy grande para evitar que toda la estructura vuelque.

Actualmente son las más usadas tras las monopilotes, debido a la facilidad de construcción y lo económicas que resultan, siendo además estructuras en el que se puede hacer un desmantelamiento completo. Sin embargo, presenta varias desventajas, como que su uso está limitado a aguas poco profundas, un máximo de 30 metros de profundidad, y en lechos marinos horizontales con pocos cambios de marea. Otro punto negativo, es la dificultad de transporte y almacenaje, producido por su gran peso o volumen.

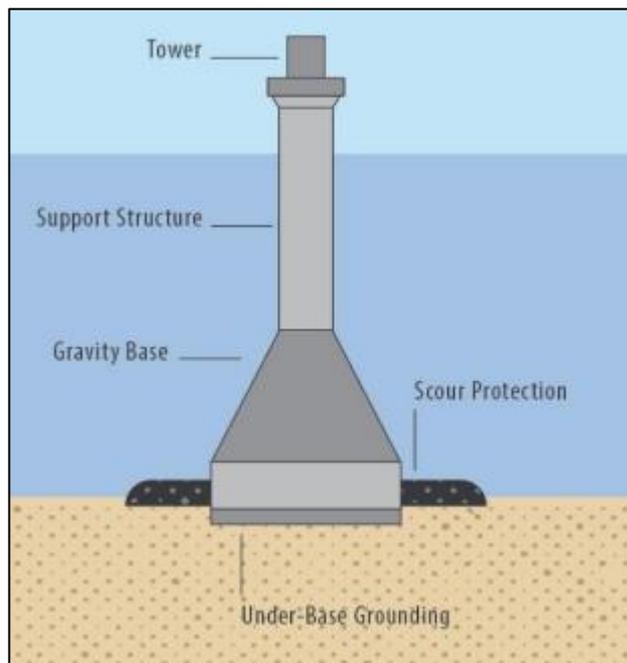


Figura 3-6 – Cimentación base de gravedad [16]

3.2.1.3 Jackets

También conocidas como estructuras tabulares y han sido muy usadas en la industria del petróleo y gas. Su estructura adquiere una gran resistencia y un peso considerablemente bajo debido a que está basado en un conjunto de celosías que imprimen una alta resistencia frente al oleaje, debido a que su geometría genera bastante rigidez con una menor necesidad de materiales, lo cual permite alcanzar profundidades mayores de 40 metros. Esta estructura es fijada al suelo mediante de diferentes maneras, las más habituales son los cubos de succión o pilotes

Este diseño tan beneficioso tiene su parte negativa, y es que tanto su transporte como instalación es más complicado y caro. Además, el diseño requiere una fabricación mucho más compleja que en los casos anteriores.

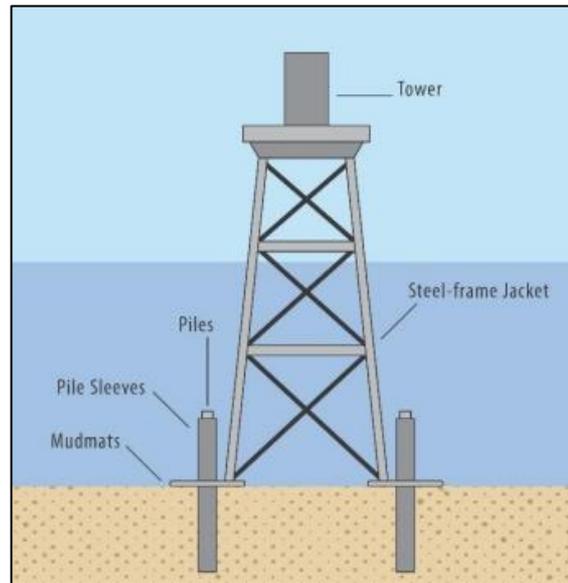


Figura 3-7 – Cimentación Jacket [16]

3.2.1.4 Cubos de succión

Estas estructuras son básicamente un cilindro con un radio enorme que sostiene la torre del aerogenerador y desciende hasta el fondo del mar donde se fija mediante vacío. A pesar de que su diseño es bastante sencillo se requiere una gran exactitud en su instalación. Este tipo de cimentaciones están en desuso, pues ya han presentado diferentes fallos.

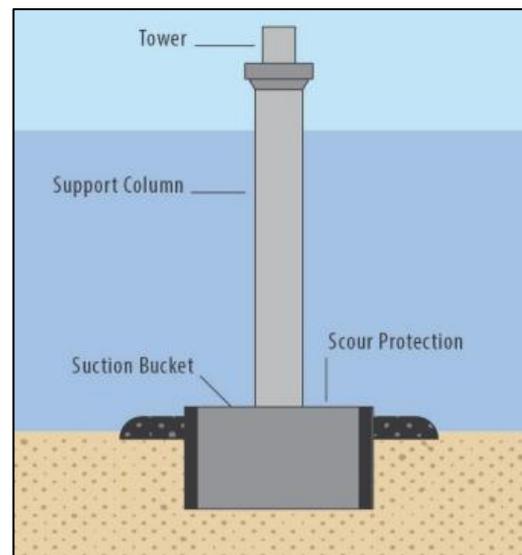


Figura 3-8 – Cimentación cubos de succión [16]

3.2.1.5 Tripods

Esta estructura puede describirse como un conjunto de cuatro monopilotes. Uno de gran tamaño que sostiene la torre y se introduce del mar, donde en vez de plantarse en el suelo, se divide en otros tres formando un triángulo, siendo estos tres de un tamaño mucho menor que el central. Esta forma triangular permite que el reparto de la carga este más distribuido y aumenta el número de puntos de fijación y más repartidos por el fondo del mar. El objetivo de esta estructura es la de reducir el peso del monopilote central, pues al no tener que introducirse hasta el fondo marino, se reduce su tamaño

En comparación con otras estructuras, una de sus ventajas es que puede ser instaladas en aguas más profundas, en torno a los 20 o 40 metros. Sin embargo, la necesidad de pilotaje provoca que el fondo marino esté libre de

rocas grandes. La unión de los monopilotes de la zona triangular al central está sometida a fatiga, por lo que es un punto clave en el diseño. También es necesario un buen estudio del oleaje y la dirección histórica del viento para instalar los tres apoyos de manera que la estructura sufra lo menos posible.

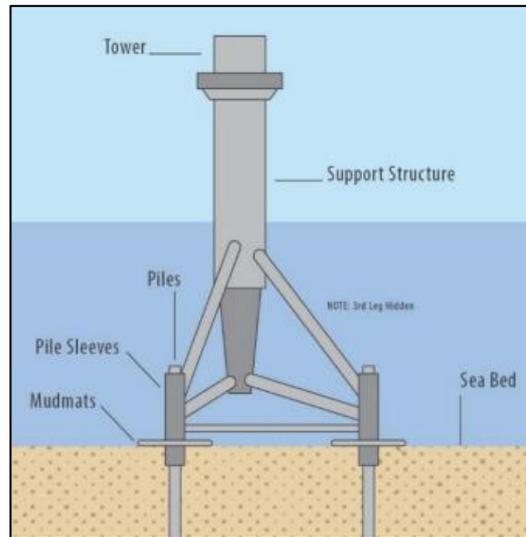


Figura 3-9 – Cimentación Tripods [16]

3.2.1.6 Tripiles

Esta estructura es una variante del monopilote, en dicha estructura en vez de disponer de uno de un gran tamaño, se tienen tres menores, los cuales se unen por encima del nivel de mar. La longitud de los pilotes varía con la profundidad del terreno, su rango está aproximadamente entre los 60 y 95 m de longitud y los 3 m de diámetro. La profundidad adecuada para estos sistemas de cimentación offshore está entre los 25 y 50 m aproximadamente.

La gran ventaja de esta estructura es la facilidad para moldear su diseño en función de las características de la zona donde va a ser instalado, pudiendo variar cada monopilote individual, teniendo como resultado tres monopilotes diferentes unidos en un elemento común.

Estas estructuras a pesar de ser un diseño simple requieren una fabricación compleja, unida de la necesidad de una soldadura pesada, que, junto a las protecciones necesarias para la corrosión, provocan que sea bastante costoso.

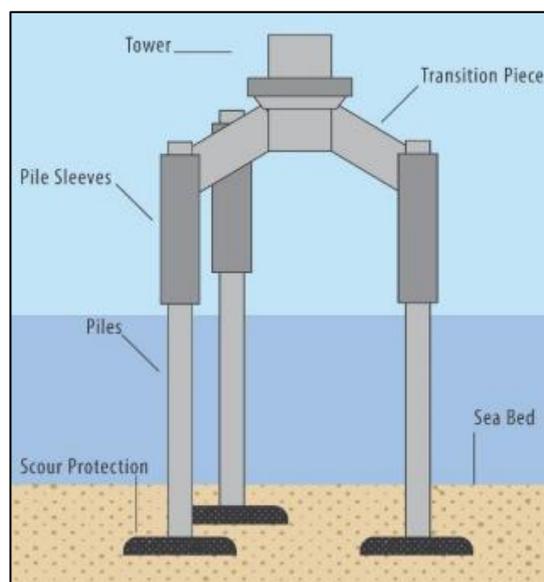


Figura 3-10 – Cimentación Tripiles [16]

3.2.2 Estructuras flotantes

En la actualidad, prácticamente todos los proyectos de parques eólicos offshore utilizan cimentaciones fijas, sin embargo, esto no cubre todo el potencial de proyectos offshore, pues hay pocos países que dispongan de fijas ancladas al fondo del mar. Sin embargo, existen varios países donde la disponibilidad de áreas con buen recurso eólico y profundidad suficientemente baja para que las cimentaciones fijas sean económicamente viables es muy escasa. En Europa, las costas mediterránea y atlántica presentan esta dificultad en la mayoría del territorio. m aproximadamente.

Las estructuras flotantes son consiste en unos elementos que flotan en el mar y que para evitar que se desplacen, mediante unos cables o cadenas, que se denominan líneas de fondeo, se fijan al fondo del mar. Han aparecido en el mercado varias propuestas basadas en esta idea, sin embargo, no ha aparecido ninguna solución que sea lo suficientemente rentable para empezar su producción comercial. Lo que más encarece este tipo de estructura es la gran cantidad de sensores, computadoras y superficies de control necesarios para garantizar la estabilidad de la estructura, algo que no es necesario en las cimentaciones fijadas al fondo del mar.

A pesar de estos inconvenientes existen varias propuestas de desarrollo, pues las ofrece también ventajas muy potenciales, como sería las construcciones de parques eólicos en profundidades mayores de 70 m, una mayor flexibilidad en los procesos de construcción e instalación, la capacidad de transferir pesadas cargas de flexión hacia el agua en vez de al suelo rígido y los trabajos de desinstalación son mucho más fáciles que para las cimentaciones fijas.

En la actualidad hay tres modelos que tienen más fuerza, ‘spar’, estructura Semisumergible y ‘tensioned leg platform’ (TLP).

3.2.2.1 Estructura semisumergible

Este tipo de estructura es ya utilizada en la industria petrolífera y del gas. En estas, parte de la estructura queda flotando en la superficie marina, mientras que las patas de la estructura están conectadas a unos tanques de flotación a los que se le conoce como flotadores.

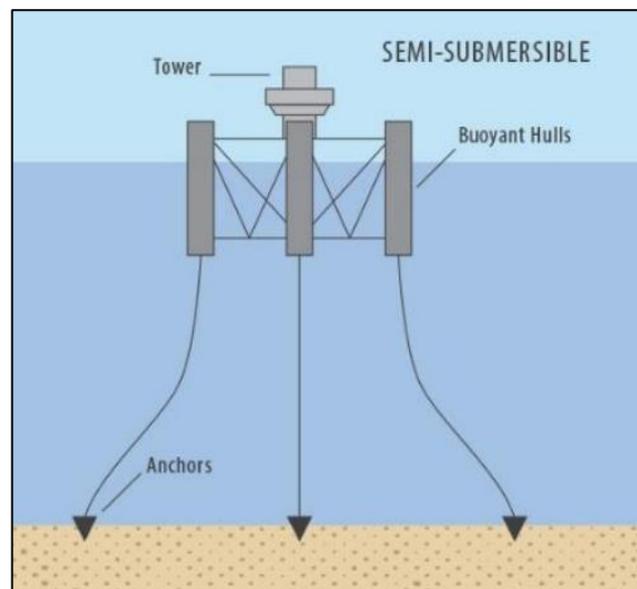


Figura 3-11 – Estructura semisumergible [16]

Este tipo de sistema se basa en la flotabilidad de la estructura, para garantizar la estabilidad a pesar del movimiento de las aguas, el sistema eleva o descende el centro de gravedad utilizando un conjunto de lastres, pues al descender aumenta la estabilidad del conjunto, pero corre el riesgo que, al descender de manera excesiva, podría introducirse agua en la plataforma.

Para evitar su movimiento a lo largo del mar ya sea por el viento o las olas, se fija el sistema flotante al fondo del mar mediante una combinación de cables y cadena, instalados de manera catenaria, para hacer de las líneas de fondeo más resistentes y evitar que se rompa.

Algunas de las ventajas que poseen este tipo de estructura es que es fácil de producir en masa, su posición es estable, con leves movimientos y existe la posibilidad de realizar reparaciones fuera de agua.

Una estructura que sigue este modelo es la “tri-floater”, la cual está formada por tres columnas que tienen un tanque de lastre situado en el fondo para amortiguar los movimientos. Se está investigando mucho para mejorar sus cualidades, como por ejemplo un sistema automático de lastrado que permita mejorar su comportamiento frente a temporales.

3.2.2.2 Estructura Tension Leg Platform (TLP)

Estas estructuras basan su funcionamiento en una estructura con mucha flotabilidad, la cual está formada por una estructura diseñada para tener una gran flotabilidad y poder resistir el impacto de las olas y por un gran peso lastre en la parte inferior de la plataforma que aporta estabilidad al conjunto y la plataforma. Esta estructura esta unidas al fondo marino a través de una serie de cables de acero tensionados, llamados tendones. Esta alta tensión limita los movimientos horizontales, mientras que los movimientos verticales se eliminan utilizando unos tendones con una gran rigidez axial y baja elasticidad, algo ya bastante probado en plataformas petrolíferas.

El inconveniente de este tipo de estructura es su precio, pues poseer equipos de fondeo con características especiales, haga que se encarezca, además, los tendones deben instalarse, fabricar e inspeccionarse muy a fondo, pues son críticos para garantizar la durabilidad y robustez de la estructura a largo plazo.

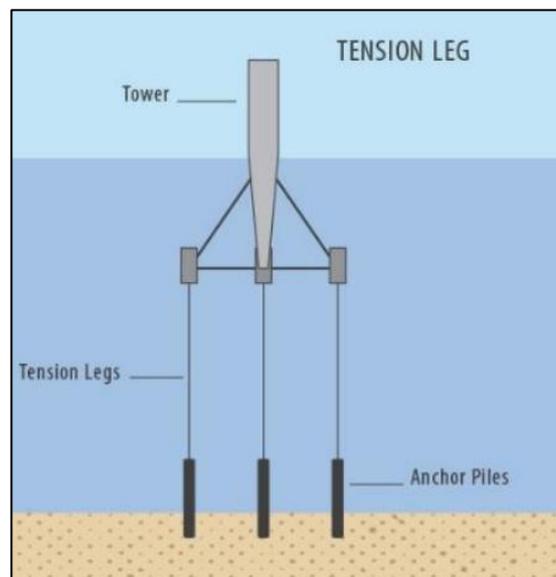


Figura 3-12 – Estructura TLP [16]

3.2.2.3 Estructura SPAR

El funcionamiento de este modelo consiste en una estructura cilíndrica vertical semisumergible, al igual que la estructura TLP, utiliza un lastre para aumentar la estabilidad disminuyendo el centro de gravedad, su fijación al fondo marino es a través de anclajes tradicionales.

Algunas ventajas que ofrece este sistema es que se trata de un diseño estable, con pequeños y lentos movimientos, la instalación es relativamente sencilla y se puede utilizar en zonas de gran profundidad. Sin embargo, es bastante sensible a un oleaje de gran periodo, además que supone un gran coste de desplazamiento debido a su gran peso.

En la actualidad, las clases de estructura SPAR que está teniendo fuerza en el mercado, principalmente en el petrolífero, son las estructura Truss SPAR, la cual está diferenciada de la normal, en que su parte central tiene una estructura de celosía, lo que produce que tanto el peso como el coste de desarrollo sea menor. El otro modelo, es el Cell SPAR, formado por un cilindro central de gran tamaño con otros de menor tamaño unidos a su alrededor por placas circulares, teniendo la ventaja de que no necesita amarres para mantener la posición vertical, aunque sí se encuentra atado al fondo del mar mediante cables o cadenas.

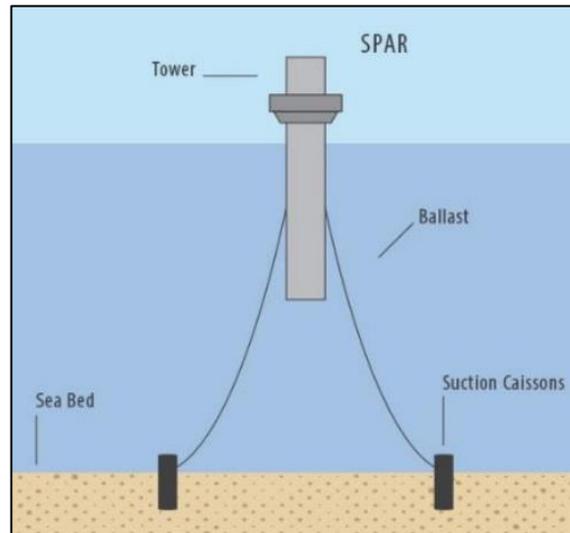


Figura 3-13 – Estructura SPAR [16]

3.3 Infraestructura de red

Una vez generada la energía eléctrica en el mar, es necesario transportar esta energía a la red eléctrica. Para ello, es necesaria una conexión eléctrica que vaya del parque a la red, dicha conexión se realiza a través de líneas eléctricas y subestaciones transformadoras, aunque también es necesario otro tipo de equipos.

Según la potencia del parque eólico y de la distancia a la que se encuentre este del punto de unión a la red eléctrica, habrá dos formas para realizar este transporte. Esta diferencia es para intentar minimizar las pérdidas debidas al transporte de la electricidad.

El primer método consiste en llevar la energía producida en media de tensión en una única línea desde los aerogeneradores hasta tierra, sin embargo, este método está quedándose atrás, debido a que los parques eólicos offshore cada vez tienen más potencia y están más alejados de la costa.

El segundo método de transporte es llevar la potencia generada por los aerogeneradores en media tensión hasta una subestación offshore, donde convierta la corriente a alta tensión y se transporta a una subestación en tierra. La necesidad de una subestación en el mar, hace que este método tenga un coste mayor, pero acaba siendo más eficiente en los nuevos parques por las razones ya comentadas.

La necesidad principal de cuando hay mucha distancia, es los límites de los cables de media tensión, los cuales pueden transportar una media de 30-40 kW. Si la potencia del parque es mucho mayor, el transporte requiere una gran cantidad de cables, es por ello que convirtiendo la energía a alta tensión el número de cables a utilizar se reduce. Además, hay que tener en cuenta, que estos cables van por el fondo del mar, por lo que es necesario proteger estos cables de la corrosión y poseer un buen aislamiento eléctrico para evitar daños en estos. Por norma general, se usan cables revestidos de acero y reforzados con plástico para evitar que se surjan defectos en la instalación y transporte y para que no fallen ante solicitaciones bruscas, en definitiva, cables que son caros.

En la actualidad la mayoría de los parques eólicos trabajan con en media tensión con unos valores entre 33 kV y 66 kV. En la actualidad, las líneas más usadas para transmitir energía son las de media tensión a 66 kV debido al incremento de potencia de los parques eólicos.

3.3.1 Subestación offshore

Las subestaciones offshore están diseñadas basadas en las estaciones petrolíferas y de gas ubicadas en el mar. El equipo eléctrico que se monta en una subestación offshore es muy similar al que se utilizaría en tierra, tan solo con una protección ambiental adicional. Sin embargo, la subestación offshore supone un mayor riesgo, pues un fallo en la subestación puede llevar enormes problemas en la producción de energía. Los diseños se han

elaborado para que tengan redundancia, y los parques más recientes tienen dos transformadores y dos cables de exportación hasta la orilla. En parques eólicos de gran potencia son necesarias varias subestaciones, pudiendo ser una ventaja a la hora de proporcionar redundancia añadiendo conexiones de alta tensión entre las mismas.



Figura 3-14 – Subestación eléctrica offshore

En los parques eólicos, la energía eléctrica que se genera en el aerogenerador a partir de la energía mecánica del movimiento de las palas, esta energía que se genera es de corriente alterna. De esta manera llega a la subestación offshore, y a partir de este paso existen dos modos de transportar la energía, mediante alterna, que es el método más común HVAC (High Voltage Alternate Current) o media corriente continua, que puede darse para casos determinados, HVDC (High Voltage Direct Current).

3.3.1.1 Estructura HVAC

Las estructuras HVAC son estaciones de alta tensión de corriente alterna. A la subestación les llega la energía a unos valores de entre 33 y 66 kV de los aerogeneradores a través de unos cables de media tensión. En la subestación existe un transformador de gran potencia que eleva el voltaje de la corriente eléctrica a unos 132-245 kV, manteniéndola la energía en alterna.

La energía transformada se transporta en alterna hasta la subestación onshore mediante un o varios cables, en función de la potencia a transportar. En los parques eólicos a una distancia de 10 Km de la costa se usan este tipo de transmisión, pero a partir de los 100 Km se ha comprobado que la eficiencia del transporte empieza a disminuir, debido a las grandes pérdidas de energía reactiva. Otro problema del transporte en alterna, es que la intensidad en régimen permanente está limitada por intensidad máxima admisible [17].

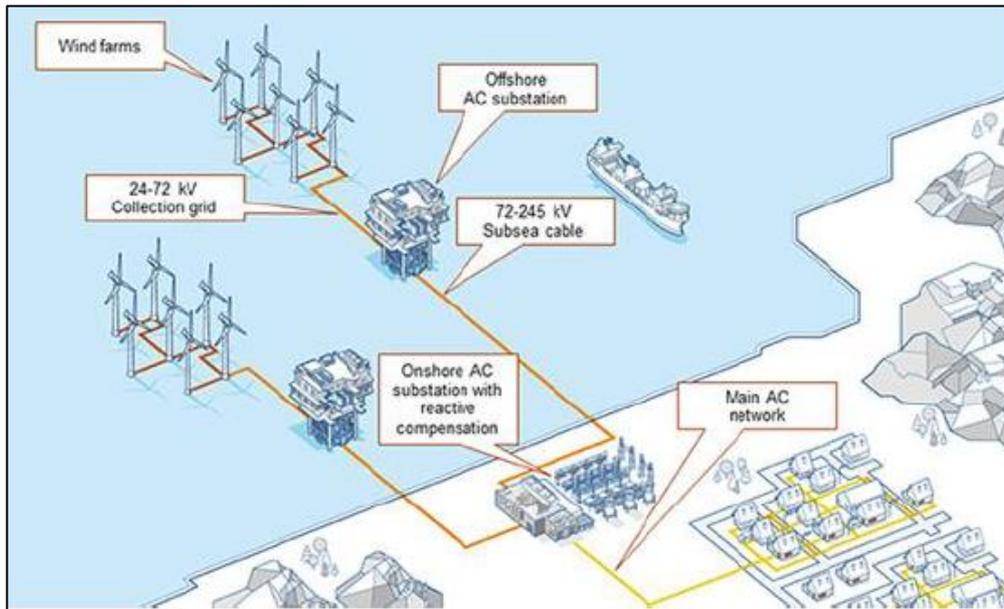


Figura 3-15 Estructura HVAC [17]

3.3.1.2 Estructura HVDC

Las estaciones HVDC, a diferencia de las HVAC, cuando le llega la energía alterna producida por los aerogeneradores, la transforma en corriente continua manteniendo el voltaje. Una vez transformada, si se eleva la tensión hasta unos 100-500 kV para transportarla hasta la estación en tierra.

Estas estaciones a diferencia de las HVAC son mucho más caras de diseñar y fabricar, pero el avance producido en la tecnología de conversión de potencia ha provocado que sean usadas en instalaciones ubicadas a mucha distancia de la costa, pues este tipo de transporte reduce las pérdidas producidas en el transporte de la energía. Comparado con las HVAC, las pérdidas debidas al transporte supondrían un solo 20% de las que se producirían con corriente alterna. Además, otras ventajas que ofrece este tipo de estructuras es que se necesitan menos aisladores y menos sección de línea para el transporte de la energía [17].

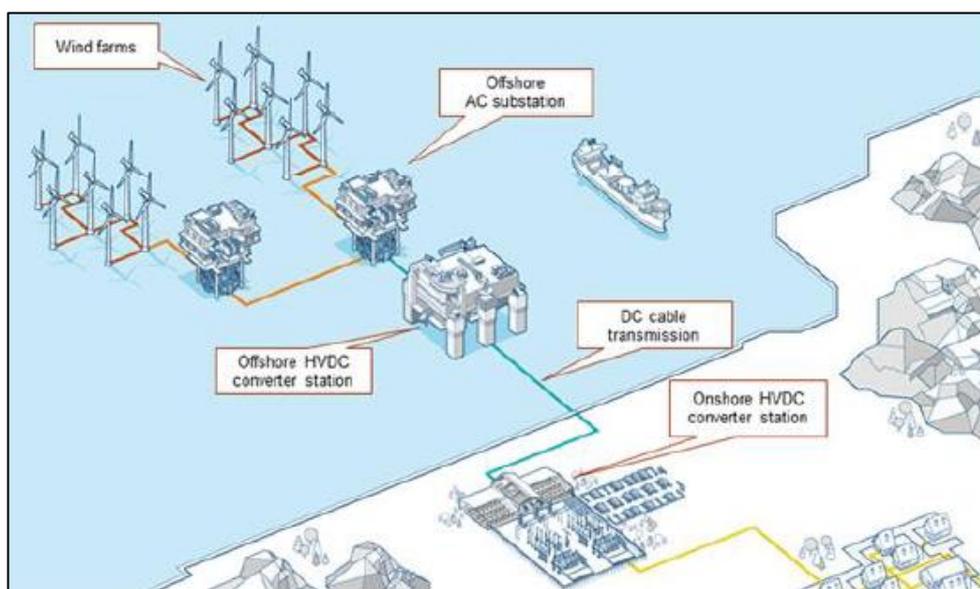


Figura 3-16 – Estructura HVDC [17]

Estas subestaciones están comenzando a utilizarse bastante en los nuevos proyectos a pesar de no estar muy lejos de la costa, debido a que la potencia de estos parques cada vez es mayor. También existe variedades de subestaciones HVDC, cada una con características propias. Las que actualmente se está utilizando más son la

HVDC ‘Line Commutate Converter (LCC)’ o convertidores de conmutación de línea y las HVDC ‘Voltage Sourced Converter (VSC)’ o convertidores de fuente de tensión.

Las subestaciones LCC HVDC se caracterizan por el uso de tiristores, que son elementos electrónicos que se basan en conmutar utilizando la realimentación interna, las ventajas que ofrecen estas subestaciones es su buen funcionamiento en altas potencias y reaccionan bastante bien ante sobrecargas. Sin embargo, necesitas un sistema de refrigeración importante y utilizar filtros armónicos para DC y AC

Las VSC HVDC utilizan transistores para funcionar. Estas subestaciones a diferencia de las LCC HVDC, no son capaces de soportar sobrecargas y la potencia en la que trabajan son más bajas, sin embargo, las ventajas de estas tecnologías es que no necesitan ni filtros de armónicos ni sistemas de arranques tras un apagón, y además que es espacio que ocupan es muchísimo menor, prácticamente algo más de la mitad, entre un 50% y 60% [18].

Una vez presentadas sobre la mesa las diferentes características, ventajas e inconvenientes entre ambos tipos de estaciones, lo que determina la instalación de una u otra es el precio y beneficio que se le puede extraer. Según [18], se ha estudiado cual estación sería más rentable para transmitir la energía eléctrica en función de la distancia a la costa. En estos estudios, no queda un límite muy bien definido de cuál podría ser la distancia exacta, algunos estudios indican 50 Km, pero a día de hoy, no hay ningún proyecto tan cerca de la costa que contemple una subestación HVDC.

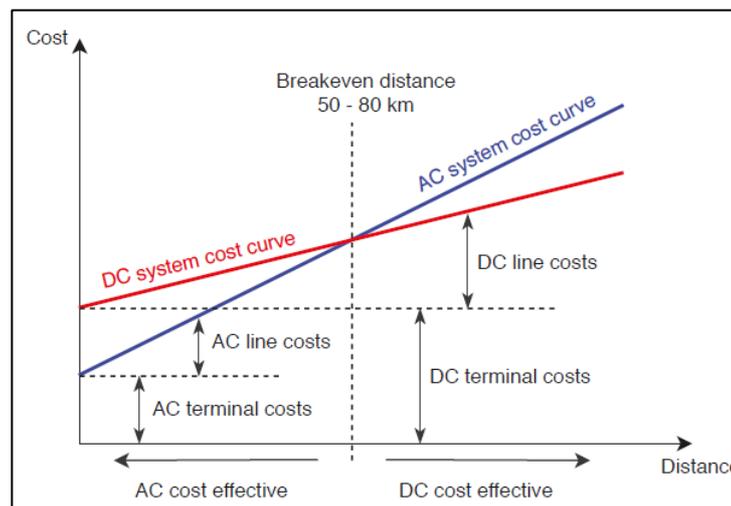


Figura 3-17 – Comparación HVDC vs HVAC [18]

En la figura, podemos observar que el precio de construir una subestación HVDC es más caro que una HVAC, pero a medida que aumenta la longitud del cable de transmisión de energía, va siendo más rentable que la HVAC, debido a que solucionar los problemas de pérdida de energía en la transmisión de corriente alterna requiere de sistemas complejos y caros. Actualmente, los HVDC se utilizan para distancias mayores a los 100 Km y como método de conexión de varios parques eólicos offshore.

4 PRODUCTORES DE AEROGENERADORES Y FUTURO ENERGÍA EÓLICA OFFSHORE

En este punto vamos a ver cuáles son los principales proyectos y fabricantes en la actualidad del sector eólico offshore y además abordaremos cual son los planes futuros para esta tecnología. Además, se realizará una comparación de los resultados que dan este tipo de parques frente a otras tecnologías de producción de electricidad.

4.1 Principales productores aerogeneradores

Debido al crecimiento de mercado que se está produciendo en la energía eólica renovable, está produciendo que el coste por MW decrezca, esto provoca que las grandes empresas incrementen sus apuestas en mayores proyectos lo que provoca que la pequeña competencia no pueda entrar en el mercado eólico, lo cual lleva a un mercado en el que sobresalen unas pocas compañías, algunas de las principales son:

- **Vestas**

Vestas Wind Systems A/S es de origen danés, nació en 1945 pero no fue hasta 1979 donde accedió al mercado eólico, siendo en 1989 cuando se centró únicamente en éste. Es actualmente la mayor proveedora de aerogeneradores en el mundo, con una potencia instalada de 145 GW en más de 80 países. Genera casi 30.000 puestos de empleos repartidos por todo el mundo [19].

- **GE Renewable Energy**

GE Renewable Energy es una filial de la empresa General Electric, una empresa gigantesca con más de 120 años de experiencia, lo cual hace que esta filial tenga un buen respaldo. Cuenta con una potencia instalada de 62 GW repartida en más de 49.000 turbinas en alrededor de 30 países. Ha sido pionera en el llamado "parque eólico digital", el cual busca optimizar el rendimiento de los parques utilizando modelos predictivos a partir de los datos que obtienen. Recientemente ha puesto en marcha el mayor aerogenerador offshore del mundo, el Haliade-X 12 MW [20].

- **Goldwind**

Es la empresa enfocada en el mercado eólico más importante de Asia. Tiene en casi 30 países unas 40.000 turbinas que hacen que la potencia instalada por esta empresa sea de más de 70 GW. Está centrada en el estudio y puesta en marcha de aerogeneradores de gran tamaño y parque eólicos de medio tamaño [21].

- **Envision**

Envision Energy, con sede en Shanghai, China, es uno de los fabricantes de turbinas eólicas más grandes del mundo, también proporciona software de gestión de energía y servicios de tecnología energética. La compañía ha instalado más de 12500 aerogeneradores en todo el mundo con una potencia acumulada de 40 GW [22].

- **Siemens Gamesa**

Es una de las empresas líderes en el mercado eólico y la líder en solitaria en energía eólica offshore, con 15 GW. A nivel total, tienen una potencia instalada de 100 GW con unas 30.000 turbinas aproximadamente. El origen de esta empresa es en 2017, tras la unión de las empresas Siemens Wind Power y la empresa española Gamesa [23].

- **Enercon**

El mérito de esta empresa, es que, dentro del mercado eólico, es de las pocas que se mantiene como una sociedad independiente, a diferencia de las otras que son anónimas. Incluso con este estatus, se ha convertido en la empresa alemana más importante de aerogeneradores. Los datos que tienen esta

empresa es de 50 GW de potencia instalada. Los aerogeneradores de esta empresa tienen la fama de ser fácilmente distinguibles por tener unas palas con un extremo curvado, parecido al winglet de una aeronave y porque su góndola con la forma de una gota de agua [24]:



Figura 4-1 – Góndola Enercon

- **Nordex SE**

Nordex es otra empresa de origen teutón con nacimiento en 1985, en una época anterior al aumento de la demanda internacional de aerogeneradores, acaecido principalmente en la primera mitad de la década de 1990. Más adelante, en 2016, se unió a la con la división eólica de la española Acciona. Cuenta con una capacidad de energía eólica de más de 25 GW divididas en 7.500 turbinas distribuidas en más de 25 países. [25].

4.1.1 Productores de aerogeneradores en 2020

Existen una gran variedad de empresas productoras de aerogeneradores tanto para proyectos onshore como offshore. A finales del año 2020, según datos de GWEC Market Intelligences, la empresa que más turbinas eólicas ha vendido hasta finales de 2020 fue Vestas, la cual en solo 2020 construyó nuevos parques hasta en 32 países diferentes, considerando tanto el mercado eólico terrestre como el offshore.

GE Renewable Energy, tuvo un año increíble, situándose como la segunda empresa que más potencia eólica instaló con unos 14 GW, a pesar de los grandes desajustes producidos por la pandemia, gracias a los proyectos con España y Estados Unidos, siendo casi todos para parques terrestres, además se mantuvo por segundo año consecutivo como el principal distribuidor en el país norteamericano [26].

Otra empresa que mantuvo una buena evolución, fue Goldwind, la cual se mantuvo como la tercera empresa en potencia eólica instalada por segundo año consecutivo, con unos 12 GW de potencia y batiendo por primera vez 1 GW de potencia nueva instalada en mercados ajenos al chino. Si hay que remarcar, que debido a la finalización del Feed in Tariff (FIT) en China, lo cual permitirá la entra de fabricantes occidentales en el mercado chino, perdió bastante cuota de mercado en China [26].

Envision se alzó hasta el cuarto puesto, superando el quinto puesto de 2019, con una potencia nueva en 2020 de 10 GW, suponiendo la mayor potencia anual instalada para compañía. Finalmente, en el quinto lugar mundial se ubica Siemens Gamesa, que a pesar de instalar aproximadamente 9 GW en más de 30 mercados, descendió tres puestos respecto al año anterior, en el cual instaló 10 GW. Una causa de este descenso se debe a la poca apuesta por los países europeos en eólica offshore, aun así, se mantuvo como mayor proveedor de aerogeneradores offshore en 2020 [26]. A modo de resumen:

Ranking	Proveedor	Instalaciones en 2020	Cambio	Comentarios
1	Vestas	16,186 MW	-	Se mantiene a la cabeza por quinto año consecutivo
2	GE Renewable Energy	14,135 MW	+2	Subiendo dos posiciones desde la 4a posición en 2019
3	Goldwind	13,606 MW	-	Permanece en 3a posición por segundo año consecutivo
4	Envision	10,717 MW	+1	Subió desde la quinta posición en 2019
5	Siemens Gamesa	8,678 MW	-3	Bajó de la 2a posición en 2019

Tabla 1 – Tabla de principales proveedores de aerogeneradores [26]

4.1.2 Productores de aerogeneradores en el futuro

Como la energía eólica es una de las fuentes de energía renovable más usada en el mundo y la que se espera que siga creciendo constantemente, la previsión que hay respecto a los fabricantes, es que los principales proveedores de turbinas eólicas fortalezcan aún más su dominio del mercado invirtiendo fuertemente en I + D en términos de innovación.

Se prevé que Vestas, Siemens Gamesa y General Electric, los que son actualmente los mayores productores de turbinas eólicas aumenten del 43% hasta, en 2029, casi el 60% de la cuota del mercado eólico, según la investigación realizada por Wood Mackenzie [27]. Gran parte es debido a la finalización del Feed in Tariff (FIT) en China, lo cual permitirá la entrada de fabricantes occidentales en el mercado chino, obteniendo una participación mayor del 10% [28].

Vestas, tendrá una fuerte competencia en los años venideros contra Siemens Gamesa debido a la gran apuesta que están haciendo los diferentes gobiernos en materia eólica marina, de hecho, según Shashi Barla, Analista Principal de Wood Mackenzi, estima que Siemens Gamesa acabará consolidando como el líder del mercado en torno 2025 y mantendría esa posición hasta prácticamente 2030 [27].

Se estima que, al estar el mercado tan concentrado en unas pocas empresas, estas prácticamente doblen toda la potencia instalada para inicios de 2030. Vestas y Siemens Gamesa superarán con creces la marca de 200 GW de potencia instalada, combinando eólica terrestre y marina. La tercera en discordia será General Electrics acercándose a los 200 GW. La única empresa China en llegar a los 100 GW por estas fechas será Goldwind, según los informes de Wood Mackenzie [27] [28].

Lo lógico es que Vestas potencie el desarrollo de las turbinas de más 15 MW, siendo esta una solución tecnológica que desarrollaremos más adelante. Con este tipo de turbinas, Vestas se afianzará en el mercado eólico marino en torno a 2025, cuando estas turbinas empiecen a instalarse, pues reduciría los costes de producción de los parques offshore [28].

General Electric tiene en marcha la producción en serie de Haliade-X en 2021 para poder hacérselo llegar a los clientes a partir de 2022. GE apuesta por un rotor más grande para las entregas, lo que provocará como resultado una un aumento en la cuota de mercado de la empresa hacia el final de esta década [28].

En China, tienen la esperanza de que SEwind y MingYang den un gran salto en el mercado offshore chino alcanzando el 60% de la cuota de mercado combinada durante los próximos 10 años, a pesar de la creciente competencia de otros operadores, como los occidentales tras la eliminación del FIT [28].

Se espera que las creaciones de nueva potencia eólica aumenten en más de 700 GW durante la próxima década, lo que provocará que se alcance las instalaciones acumuladas a 1.160 GW por 2027, respecto a los 651 GW

actuales, lo que indica que la demanda de aerogeneradores será la mayor de la historia. Por lo tanto, el futuro de los principales fabricantes de aerogeneradores del mundo parece muy prometedor con grandes oportunidades de crecimiento en los próximos años [28].

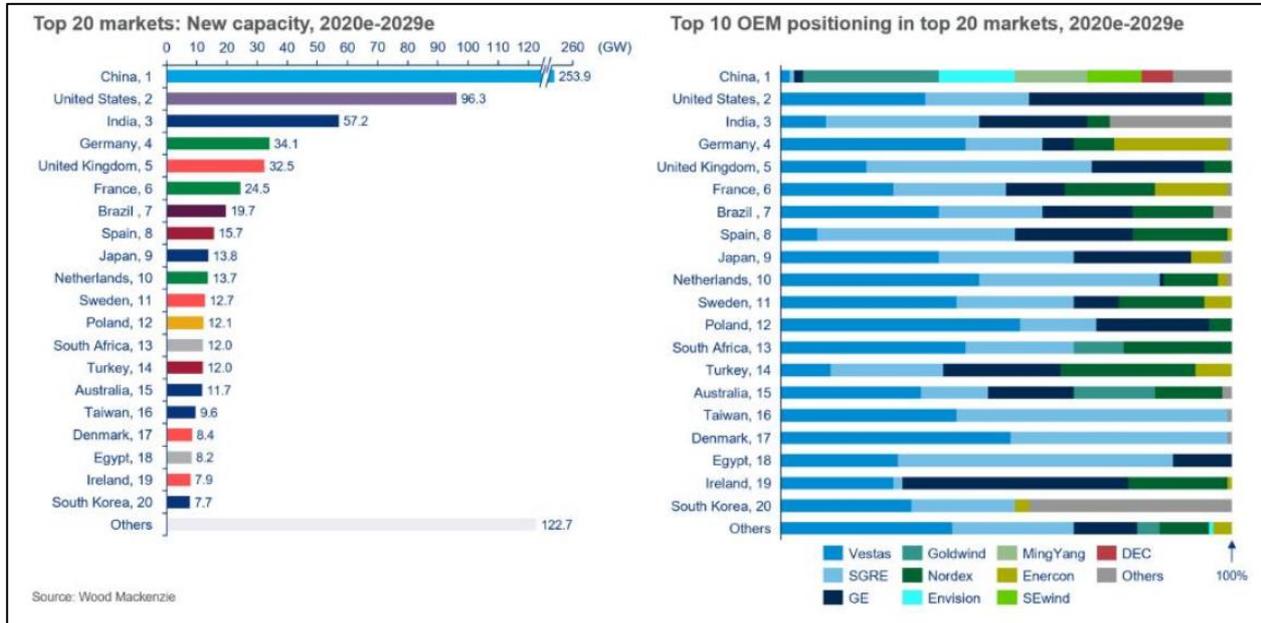


Figura 4-2 – Previsión de la nueva potencia instalada de los proveedores de aerogeneradores

4.2 Evolución de la tecnología

El futuro de la energía eólica marina debe seguir evolucionando respecto a la eficiencia, la potencia, la tecnología y estructura. Con nuevos cambios y mayores inversiones, el viento puede convertirse en un líder dentro de la industria de las energías renovables.

Para el futuro de la energía eólica marina hay distintos proyectos para seguir mejorando e intentar convertir esta producción de energía en una candidata a desbancar a los combustibles fósiles.

4.2.1 Aumento del tamaño de los aerogeneradores

Para alcanzar este objetivo hay diversos caminos que abordar, uno de ellos es la necesidad de que los aerogeneradores sean más potentes. En la actualidad los aerogeneradores son de 12-14 MW. Una forma de incrementar esta potencia es desarrollando aerogeneradores más grandes, pues a mayor altitud, mayor es la velocidad del viento, Eric Lantz determino que la velocidad del viento se incrementa de 1 a 1,5 m/s al subir de 80 a 160 metros de altitud [29]. Históricamente, se observa que cada vez estos aumentan de tamaño a medida que la tecnología lo va permitiendo:

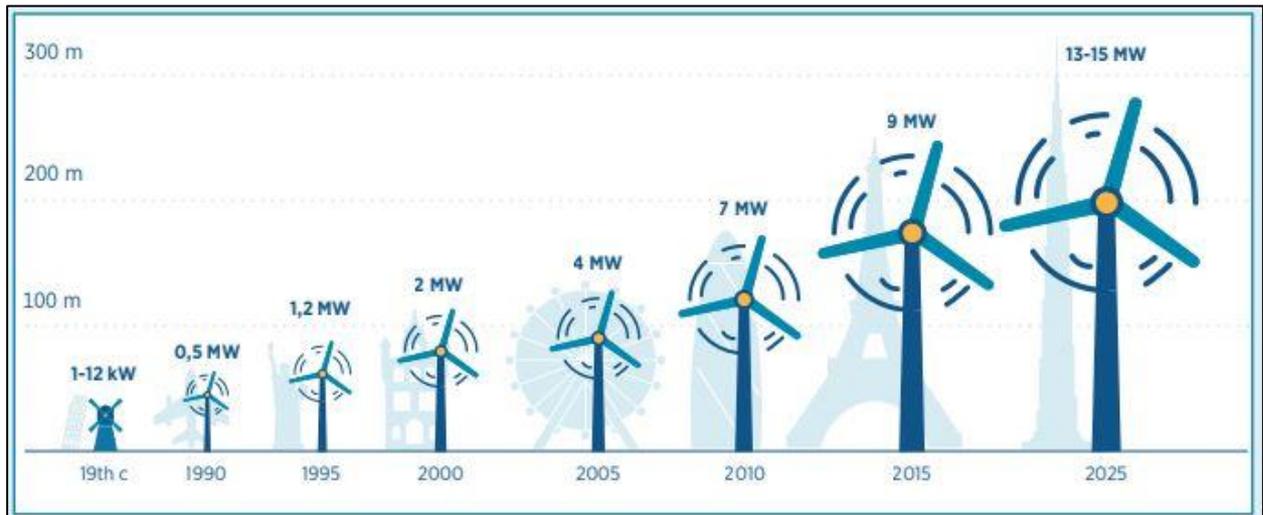


Figura 4-3 – Evolución de los tamaños de turbina

Según los informes desarrollados por Wood Mackenzie, se observa que a medida que el tamaño de las turbinas ha ido incrementando, los tiempos necesarios para la instalación de los parques eólicos se han reducido, según el informe se estimó que entre 2011 y 2020 se descendió un casi 60 % del tiempo medio de instalación de turbina. Pero no solo queda ahí la cosa, si la comparación se realiza por el tiempo de instalación por MW, el tiempo que se reduce es de un 80%. Esto nos muestra una de las razones porque la tendencia de los futuros aerogeneradores es la de aumentar su tamaño, alcanzándose turbinas con diámetros de 300m y con una potencia de más de 20 MW [27] [30].

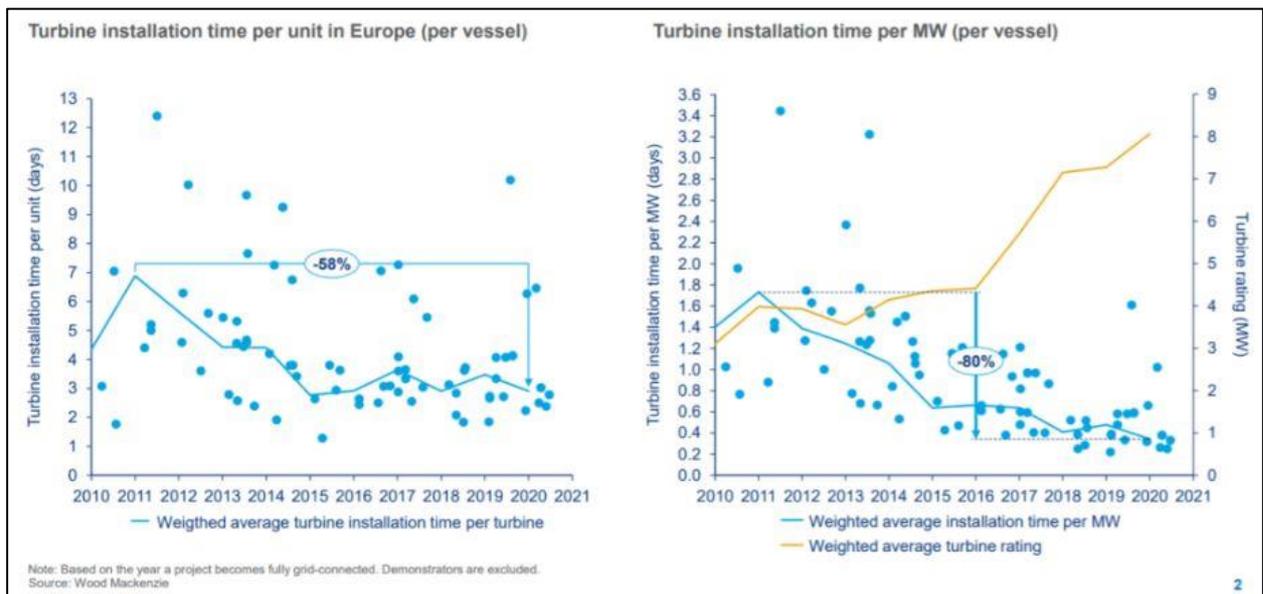


Figura 4-4 – Tiempo por unidad de turbina instalada y por MW [27] [30]

Sin embargo, este crecimiento trae consigo inconvenientes, como es la limitación que supone estos tamaños enormes en la cadena de suministros, pues los costes y dificultades para el transporte e instalación crecen con el tamaño de la turbina. Otro problema al que se enfrentan el incremento de tamaño es la exposición a climatologías más adversas, al estar a más altura, la fuerza del viento es mayor, con lo que los momentos también son mayores. Además, la expansión a mayor mercado y mares, provocara que pueda que tenga que enfrentarse a torbellinos o tornados.

Otro reto al que debe enfrentarse el incremento de tamaño es el peso de la plataforma en la que se instala en aerogenerador. En un estudio mencionado anteriormente, también se detalla que este incremento del tamaño de los aerogeneradores conduzca a que a finales de década se duplique el peso por unidad de monopilotes para futuros proyectos. Sin embargo, este incremento de peso es de tan solo un mero 6% si lo hacer por MW, lo que añade un beneficio más al incremento de tamaño [27] [30].

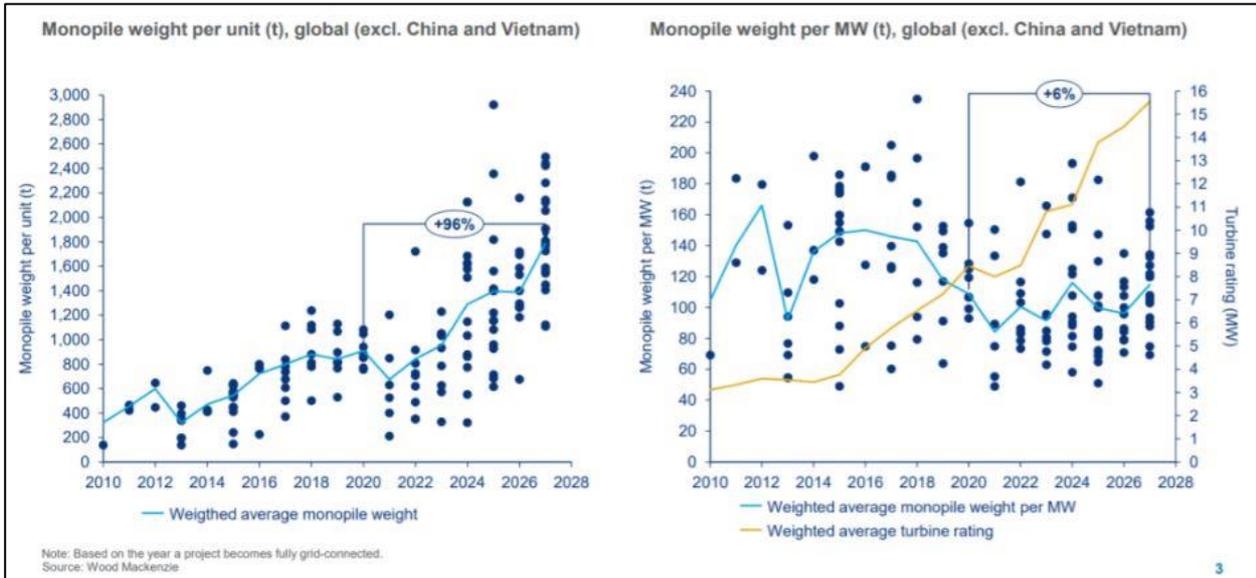


Figura 4-5 –Peso de cimentación por unidad de turbina instalada y por MW [27] [30]

Un ejemplo de la tendencia es el aerogenerador MySE 16.0-242, de Mingyang Smart Energy Group, el cual dispondrá de un rotor de 242 metros de diámetro, palas de 118 metros y un área de barrido de 4,6 hectáreas, aproximadamente el tamaño de 10 campos de fútbol. estará hecho para resistir tifones, afirma MingYang. Tendrá una potencia de 16 MW y se estima que podrá generar unos 80 GWh de electricidad al año [31].

Otro ejemplo es el modelo producido por Vestas, el V236-15 MW, que según afirman se alzarán hasta 280 metros de altitud y tendrá una potencia de 15 MW produciendo 80 GWh al año, al igual que el modelo chino, barriendo una superficie de barrera una superficie de 43.000 metros cuadrados. Comparado con su modelo anterior, la V174 de 9,5 megavatios, producirá un 65% más que su antecesora. así, en un parque de novecientos megavatios -900 MW- se pueden instalar 34 máquinas menos aumentando un 5% la producción asegura Vestas [32]. Se estima que esta turbina se instale en 2022 y que la producción en serie comience en 2024 [33] [19].

La gran turbina de GE Renewable Energy, la Haliade-X, ya está en funcionamiento su prototipo. Esta turbina es capaz de generar hasta 74 GWh de producción bruta de energía anual, consiguiendo que se evite emitir hasta 52.000 toneladas de dióxido de carbono, que es lo mismo que las emisiones de 11.000 vehículos en un año. Su primer prototipo alcanzó 12 MW de potencia, pero recientemente, se ha alcanzado en un nuevo modelo hasta 14 MW [20] [33] [34].

4.2.2 Aparición de nuevas tecnologías

La aparición de tecnologías nuevas también beneficia a la energía eólica marina, por ejemplo, el Big Data, computación en la nube y la inteligencia artificial se intercalan para mejorar esta energía. Los nuevos sistemas y software pueden combinar estos tres campos de diferentes maneras.

El Big Data puede realizar un seguimiento de los datos del nivel de energía de la turbina. Si hay una etapa sin viento, las turbinas pueden ahorrar más energía para esa etapa. La tecnología en la nube puede enviar información en tiempo real a las instalaciones en tierra para que puedan realizar un seguimiento adecuado de las turbinas. La inteligencia artificial se aplica con los datos para proveer una perspectiva de los niveles de salud de las turbinas. Puede pronosticar qué partes requerirán mantenimiento, lo cual puede conseguir una reducción en los costes de mantenimiento.

4.2.2.1 Proyecto Green Hydrogen

De las tendencias emergentes discutidas anteriormente, la producción de hidrógeno verde utilizando electricidad eólica marina es un modelo de negocio innovador que recibió la mayor atención en 2020. Los desarrollos futuros de la energía eólica marina están siendo testigos de un acoplamiento con la producción de hidrógeno a través de electrolizadores y más de una docena de proyectos. se han propuesto desde 2019. Estos proyectos están atrayendo el interés mundial, y de la cartera total de proyectos planificados de más de 200 GW, ya se han

propuesto al menos 17 GW de proyectos acoplados a la energía eólica marina, principalmente en Europa. Esta capacidad tiene una participación del 53% del total de proyectos de electrólisis anunciados de varias fuentes de electricidad [35].

La cartera de proyectos de electrólisis a corto o medio plazo impulsados por energía eólica marina (2021-2035) está dominada por países del noroeste de Europa, a saber, Alemania con 10 GW, seguida de los Países Bajos con 4,3 GW, Dinamarca con 2,3 GW y el Reino Unido con 112 MW. El consorcio AquaVentus en Alemania, con una capacidad de 10 GW, es el proyecto planificado más grande seguido por North2 y Massvlakte 2 en los Países Bajos con capacidades de 200 MW cada uno [35]. El proyecto AquaVentus destaca la importancia de la cooperación entre países para maximizar los rendimientos eólicos y mejorar las oportunidades de acoplamiento con las tecnologías habilitadoras.

El creciente interés en acoplar la energía eólica marina con la producción de hidrógeno se puede atribuir a múltiples factores:

- La energía eólica marina tiene uno de los factores de capacidad más altos entre todas las energías renovables. Esto corresponde a una mayor tasa de utilización del electrolizador (tiempo de ejecución) y, por lo tanto, aumenta la producción de hidrógeno y, en última instancia, disminuye los costos generales y aumenta los ingresos.
- Ventaja de ubicación cerca de los centros de demanda. Los clusters industriales se ubican en zonas costeras, lo que los posiciona como los principales benefactores del hidrógeno producido para sus operaciones.
- Eliminación de las limitaciones de disponibilidad de terrenos y mejora de la flexibilidad del sistema de energía. El desarrollo de proyectos de hidrógeno verde a escala de gigavatios en tierra requiere recursos terrestres notables en contraste con los del desarrollo en alta mar.

Un desafío que aún debe superarse es el aumento del precio de la electricidad. El LCOE global promedio de USD 115 / MWh se traduciría en un precio del hidrógeno de alrededor de USD 5,5 por kilogramo incluso sin considerar el costo de inversión del electrolizador, el transporte a la costa y otros componentes. Para poner esto en perspectiva, el hidrógeno de origen fósil cuesta USD 1,2-2,4 / kg (dependiendo del precio del gas) [36].

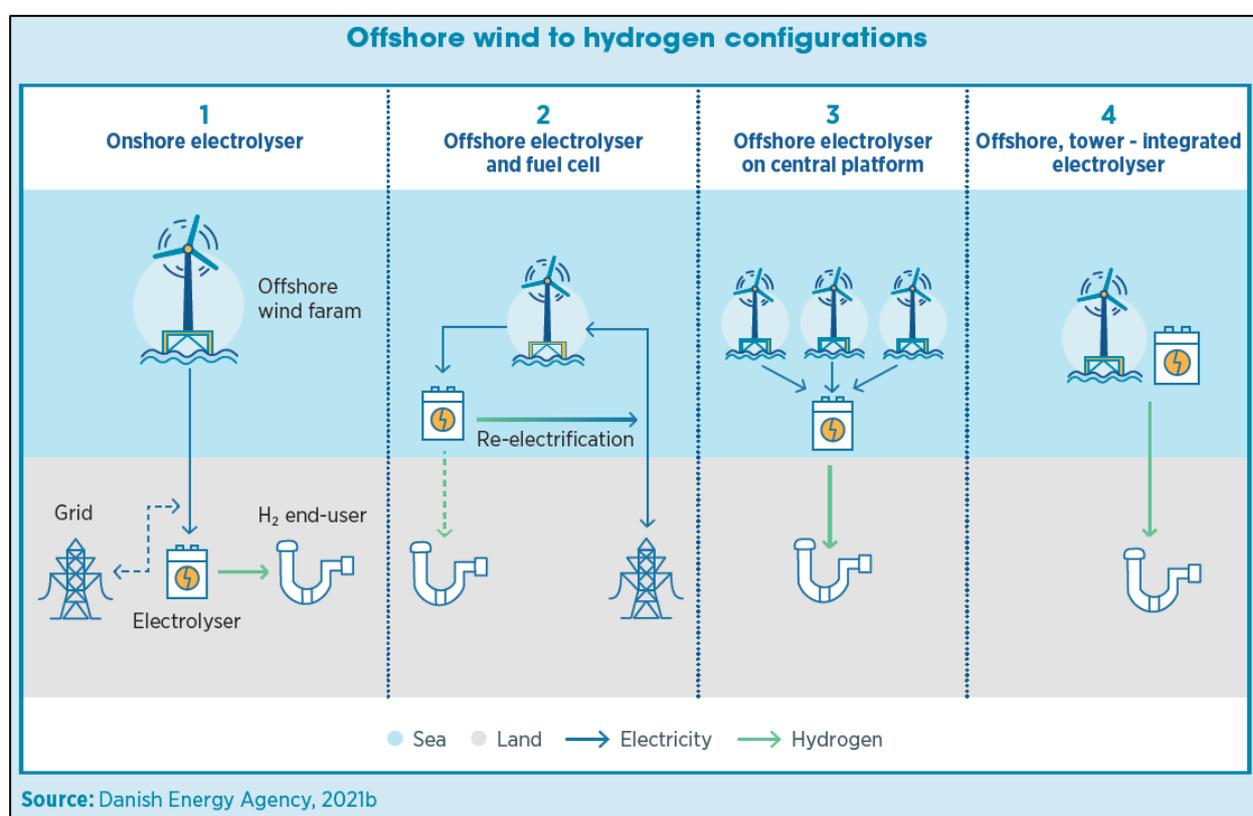


Figura 4-6 – Energía eólica offshore y proyecto green hydrogen [37]

4.2.2.2 Proyecto P2X

Otro proyecto para seguir mejorando la energía eólica offshore es el “Power-to-X conversion (P2X)” [18], se basa en convertir energía (electricidad) en diversas sustancias (X). Las diferentes alternativas disponibles en la conversión P2X son:

- Power-to-heat (P2H): El exceso de generación eléctrica se vincula a un dispositivo de calor (caldera eléctrica, bomba de calor), evitando cualquier portador energético intermedio y aumentando posteriormente la eficiencia global.
- Power-to-liquid (P2L): se pueden encontrar diferentes alternativas en la literatura específica, incluida la producción de gas de síntesis a través de la hidrogenación de CO₂ y el desplazamiento inverso de gas de agua; co-electrólisis de CO₂ y H₂O; o directamente a través de la electro-reducción de CO₂ a metanol.
- Power-to-chemicals (P2C): A partir del gas de síntesis obtenido con la conversión de energía a líquido, se pueden producir varios compuestos en consecuencia.
- Power-to-gas (P2G): El hidrógeno se obtiene a partir de un proceso de electrólisis y la posible conversión posterior a metano con CO₂.
- Power-to-Mobility (P2M): El exceso de generación eléctrica es aprovechado por el sector de la movilidad a través de vehículos eléctricos con un motor eléctrico del 90% de eficiencia en lugar de un motor de combustión interna (eficiencia del 20%) o pila de combustible (eficiencia del 50%).
- Power-to-power (P2P): la electricidad se convierte en energía química o mecánica, que se almacena y luego se reconvierte en energía eléctrica.

Se espera que estas transformaciones sean muy relevantes en los futuros sistemas eléctricos, ya que el exceso de electricidad generada puede almacenarse de diferentes formas y luego utilizarse, por ejemplo, como combustible para centrales eléctricas. Por tanto, se mejoraría la flexibilidad del sistema, de esta forma, las plantas P2X de alta capacidad podrían incrementar el suministro de fuentes de energía renovables proporcionando seguridad en el suministro en términos de instalaciones de almacenamiento.

Además, la conversión P2X proporciona un vínculo real entre diferentes sectores, promoviendo la transición hacia un futuro sistema urbano de energía inteligente [38]. Como ejemplo, la figura siguiente muestra la conversión de potencia a calor. Dinamarca, es una de las que está más interesada en la conversión de electricidad en hidrógeno y combustibles líquidos a través de soluciones P2X. Por tanto, pueden convertirse en líderes en esta tecnología, ya que grandes empresas danesas ya trabajan con ella [39].

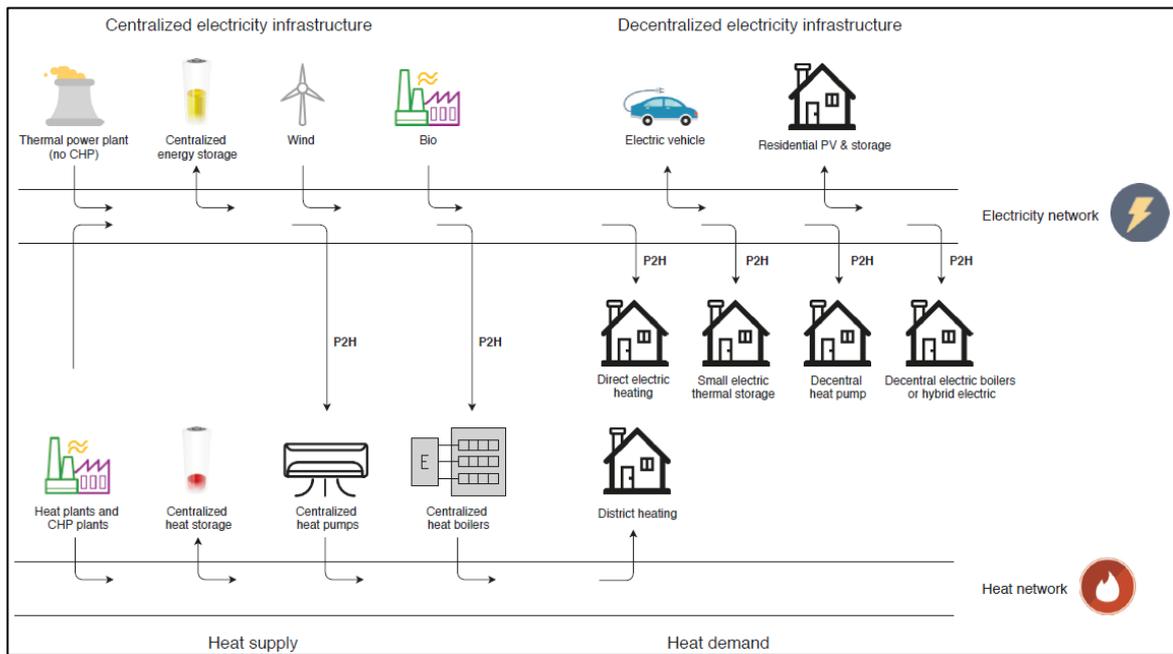


Figura 4-7 – Power-to-Heat (P2H) ejemplo [18]

Varios autores ya han analizado estas tecnologías combinadas con el recurso eólico. En [40] se analizan diferentes opciones de flexibilidad para plantas de energía eólica, concluyendo que las soluciones P2H proporcionan los escenarios más rentables con las emisiones de CO₂ más bajas. Se ha estudiado en Dinamarca que el uso de P2G es una herramienta eficaz para complementar las centrales eólicas. Sin embargo, tanto los costes de inversión de las instalaciones como las pérdidas de energía (debido a la baja eficiencia en el proceso de conversión) son elevados. Por tanto, el hidrógeno producido a partir de la energía eólica también tiene un coste elevado [41]. Otros autores concluyen que se debería considerar la combinación de una planta de energía eólica-hidrógeno para vender hidrógeno directamente, ya que la recarga de hidrógeno para generar electricidad es extremadamente costosa. En consecuencia, los trabajos futuros deben enfocarse en reducir los costos de inversión y mantenimiento para tales soluciones de conversión de energía [42].

4.2.2.3 Almacenamiento de energía en alta mar

Como la generación eléctrica debe venderse inmediatamente para abastecer el consumo eléctrico, y debido a la naturaleza estocástica de las fuentes de energía renovables, el almacenamiento de energía surge como una solución importante para estas fuentes [18]. Sin embargo, dado que las tecnologías tradicionales de almacenamiento de energía son difíciles de utilizar en un entorno marino, se están desarrollando nuevas alternativas para almacenar energía en alta mar. En [43] se proporciona una revisión completa de las soluciones de almacenamiento de energía renovable marina existentes, a continuación, describiremos algunas de las que se proponen.

4.2.2.3.1 Almacenamiento en forma de energía de hidrógeno.

El excedente de electricidad producida por la planta eólica offshore puede almacenarse como hidrógeno y utilizarse más tarde para generar energía en pilas de combustible o como combustible en vehículos de hidrógeno. La mayoría de las alternativas disponibles se basan en la tecnología P2X, como se describió anteriormente en el punto 4.2.2.2.

Un ejemplo de tales alternativas se puede encontrar en el proyecto Deep Purple [44], que se basa en las importantes emisiones de CO₂ de la producción de petróleo y gas de Noruega. El proyecto Deep Purple tiene como objetivo convertir la electricidad de las plantas eólicas marinas en hidrógeno y almacenar dicha energía en el lecho marino. A continuación, el hidrógeno se puede utilizar para varios fines:

- Suministrar energía estable y renovable a instalaciones de petróleo y gas.
- Suministrar energía estable y renovable a islas remotas
- Proporcionar una infraestructura costera de hidrógeno al sector marítimo.

- Proporcionar producción local de energía, hidrógeno y oxígeno para la agricultura.

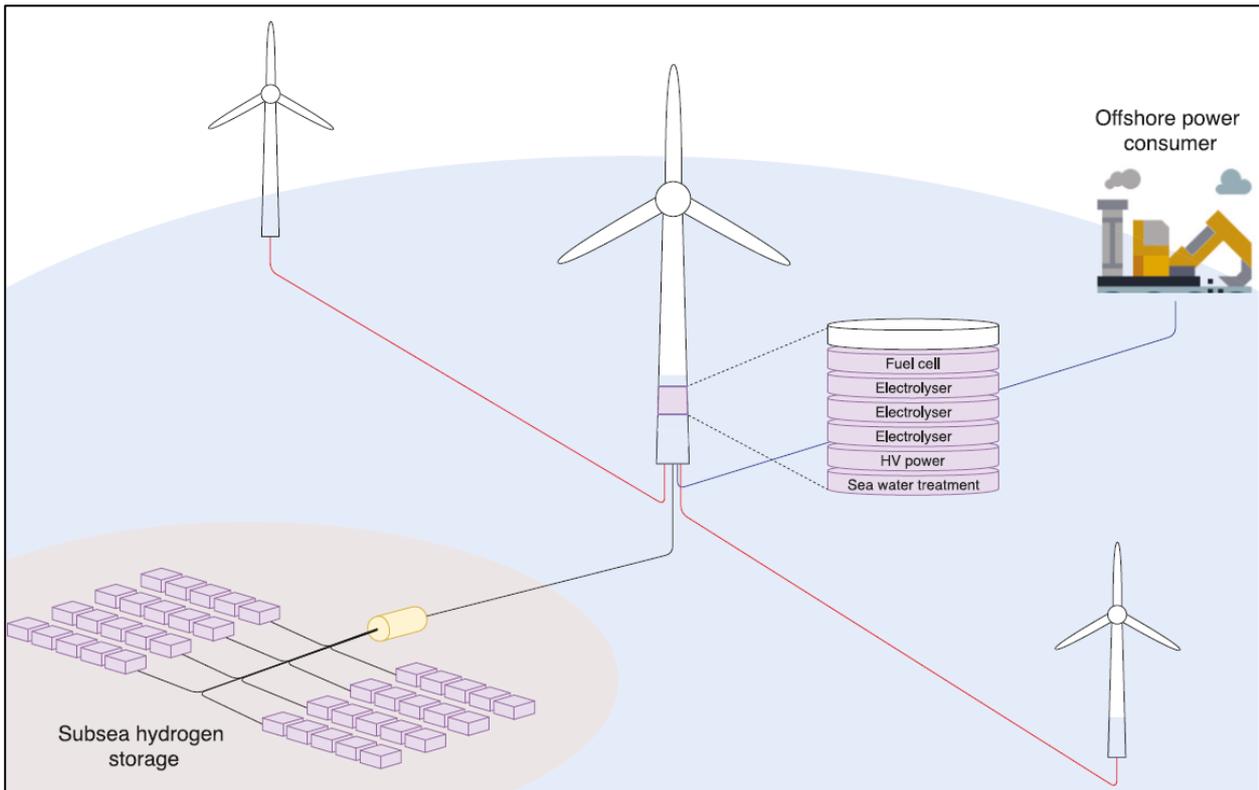


Figura 4-8 – Proyecto Deep Purple [18]

4.2.2.3.2 Almacenamiento en forma de energía de aire comprimido.

Los sistemas de almacenamiento de energía de aire comprimido son una solución propuesta al almacenamiento de energía basado en la compresión del aire. La integración de este sistema con la generación de energía eólica y solar puede aumentar la tasa de participación de las fuentes de energía renovables, puesto que teóricamente, el sistema de almacenamiento de energía de aire comprimido es menos costoso que otros sistemas de almacenamiento y es lo suficientemente grande y potente como para almacenar energía a nivel de escala de servicios públicos. Además, debido al elevado coste de instalación y capital de los cables de transmisión submarinos, los operadores marinos pueden aumentar el factor de capacidad del cable, reduciendo potencialmente el coste medio de la energía eólica marina y aumentando la fiabilidad y el valor económico de la energía suministrada [18] [45].

La Incubadora de Empresas TAKEOFF (Universidad de Malta) ya ha patentado una tecnología de almacenamiento llamada FLASC, con el objetivo de integrar el almacenamiento de energía a gran escala en los campos de generadores offshore. Esta solución está hecha a medida para el mercado offshore, explotando la infraestructura y las cadenas de suministro existentes. FLASC utiliza aire comprimido para almacenar energía, confiando en la presión hidrostática de las áreas de aguas profundas para mantener una presión estable en el almacenamiento de aire comprimido [18] [46].

Dado que utiliza la infraestructura existente, se considera una solución rentable. Esta solución también se puede utilizar para:

- Convertir el suministro de fuentes de energía renovables intermitente en uno escalonado, simplificando su integración en la red al permitir que el gestor de la red eléctrica programe operaciones en intervalos de tiempo específicos.
- Controlar la velocidad de rampa de la energía generada en caso de cambios repentinos en las condiciones naturales.

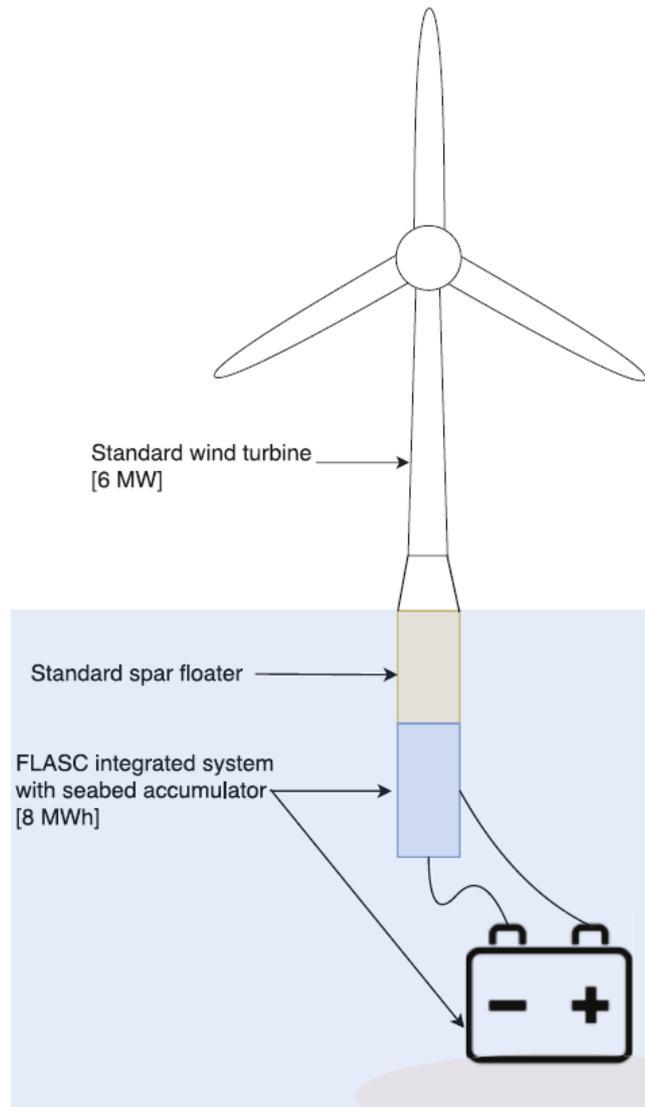


Figura 4-9 – Almacenamiento FLASC en aerogenerador offshore

En mayo de 2018 se instaló un prototipo a pequeña escala en el Gran Puerto de Malta. Después de un año, se completó la campaña de pruebas. Los resultados confirmaron una eficiencia térmica constantemente alta en una variedad de condiciones meteorológicas y regímenes operativos después de cientos de ciclos de carga. El prototipo fue retirado y desmantelado, y hoy en día el equipo de FLASC se centra en el desarrollo de un demostrador a gran escala en mar abierto [46].

4.2.2.4 Búsqueda de localizaciones más óptimas

La energía eólica offshore debe ir apostando por alcanzar zonas de mayor profundidad y alejadas de la costa para poder hacer frente a la creación de nuevos parques eólicos. Para alcanzar este objetivo entran en juego proyectos como el P2X para poder conservar la energía generada, el desarrollo de nuevas subestaciones más desarrolladas y el uso más extendido de las plataformas flotantes, que como ya se comentó, está intentando alcanzar proyectos con profundidades mayores a los 50 metros.

Aquí entran en juego el desarrollo y mejora de las instalaciones HVDC que comentamos en el punto 3.3.1.2. Actualmente se utilizan dos tecnologías HVDC diferentes: convertidores de conmutación de línea (LCC) basados en tiristores y convertidores de fuente de tensión (VSC) basados en transistores bipolares de puerta aislada (IGBT) [108]. Entre ellos, no existe un consenso claro sobre qué tecnología es mejor: algunos autores consideran que los LCC son superiores a los VSC en términos de confiabilidad, costo y eficiencia, mientras que otros afirman que el sistema de transmisión VCS-HVDC es el más prometedor tecnología.

Recientemente, se ha discutido otra tecnología llamada unidad rectificadora de diodos (DRU), aunque no se ha implementado todavía. Durante los últimos años, DRU – HVDC ha estado en discusión. Una DRU incluye varios diodos, un transformador y un reactor de suavizado. Como la tecnología DRU solo puede convertir CA en CC, se debe utilizar una topología híbrida que combine DRU y VSC/LCC, introduciendo el DRU como rectificador offshore y el LCC/VSC como convertidor onshore. Las principales ventajas de DRU – HVDC en comparación con LCC – HVDC y VSC – HVDC son [18] [47]:

- Reducción de volumen (80%) y peso (66%) de la plataforma.
- Reducción de pérdidas de potencia hasta un 20%.
- Reducción del costo total hasta un 30%.
- La capacidad aumentó en un 33%.
- Mayor confiabilidad y eficiencia.
- Reducción de los costos de operación y mantenimiento.

Sin embargo, se deben resolver varios problemas antes de implementar una conexión DRU-HVDC [48]:

- Como la DRU es un dispositivo pasivo no controlable, el sistema de transmisión alterna del parque eólico offshore debe ser regulado y controlado por la turbina, por lo que requiere una configuración diferente a la actual
- El convertidor en tierra (LCC/VSC) controla el voltaje HVDC. Posteriormente, el voltaje de CC de salida de la DRU debe ser mayor que el valor de voltaje mínimo para comenzar a conducir y transmitir la energía a la estación en tierra.
- Se necesitan filtros pasivos o dispositivos de compensación activos para eliminar las corrientes armónicas inyectadas por la DRU.
- Se necesitan etapas de control de voltaje y frecuencia en la red marina para la conmutación de DRU.
- Una DRU no puede proporcionar potencia activa auxiliar para la subestación de la turbina eólica, lo que constituye un inconveniente para el autoencendido de esta.
- Una DRU no puede proporcionar potencia reactiva, necesita convertidores de potencia u otros dispositivos para compensarla.

Otra investigación que va enfocada en este camino, y es el de desarrollo de un nuevo concepto de subestación flotante para parques eólicos marino, para poder hacer frente a la necesidad de desarrollar parques eólicos cada vez más alejados de la costa, el proyecto WIND2GIRD, en el que sus impulsores ha sido un conjunto de empresas vascas. A fecha de julio de 2021, no existe ninguna subestación flotante comercial en el mercado. Además, dentro este proyecto también hay metas como el desarrollo de nuevos materiales y sistemas de anti-degradación capaces de incrementar la robustez junto una disminución del peso [49] [50].

En el futuro, la energía eólica verá aún más actualizaciones para hacerla más eficiente. Con palas más aerodinámicas, las turbinas pueden manejar todo tipo de vientos, desde velocidades bajas a altas y patrones cambiantes. La durabilidad y la robustez, también, siempre tienen espacio para mejorar. Cuanto más puedan soportar estas turbinas y palas, más tiempo durarán, lo que ahorra dinero.

4.3 Futuro de la energía eólica marina

El mapa de recomendaciones de políticas hasta ahora en competencia se ha vuelto mucho más claro, ahora que las principales instituciones energéticas internacionales están de acuerdo sobre el papel principal de la energía renovable necesaria para cumplir los objetivos de París y ofrecer neutralidad de carbono para 2050.

El consenso sobre la escala del cambio necesario, desde los sistemas energéticos hasta el cambio de comportamiento, nunca ha sido tan fuerte. Hay un impulso creciente por parte de los gobernantes de la que reconocen el cambio climático como el desafío preeminente que enfrenta nuestra forma de vida. La avalancha de actualizaciones en materia de energías sostenibles y los objetivos netos cero realizados durante el último año

por los EE.UU., la UE, China, Japón, el Reino Unido y otras naciones han cerrado la brecha de reducción de emisiones requerida para 2030 para una vía de 1,5 °C que cumpla con los requisitos de París en un aumento al 14%, según Climate Action Tracker [11].

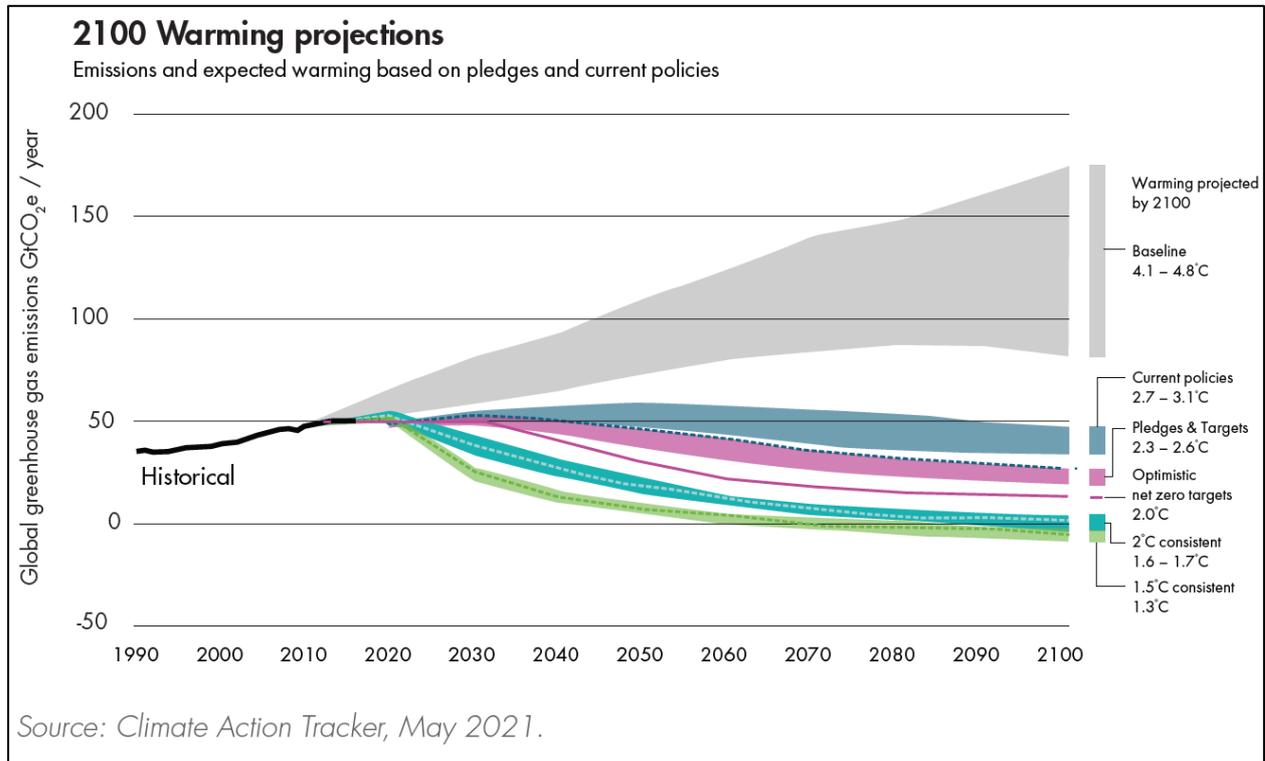


Figura 4-10 – Evolución de la temperatura hasta 2100 [11]

A través de la gráfica que nos facilita [11], es indispensable que estas medidas se mantengan a lo largo del tiempo o incluso mejorar para poder evitar llegar a una situación en la que no haya marcha atrás. La energía eólica marina será un vector clave en la respuesta global al cambio climático. La producción de energía representa alrededor de las tres cuartas partes de las emisiones globales de gases de efecto invernadero y será el área focal de los esfuerzos de reducción del cambio climático.

Tanto la International Energy Agency (IEA) como la IRENA han trazado hojas de ruta mediante las cuales la energía eólica y solar fotovoltaica suministran alrededor del 70% de la generación de electricidad para 2050, y ambas tecnologías se amplían drásticamente para ofrecer las reducciones profundas de emisiones necesarias. Desde ahora hasta 2050, la energía eólica marina se convierte en un factor central. tablón de des carbonización global, transformando el sistema eléctrico en generación, infraestructura, flexibilidad y producción de combustibles verdes como el hidrógeno. Su aplicación no discrimina entre economías emergentes y economías avanzadas, ni una región del mundo sobre otra [11] [36].

La energía eólica marina es una tecnología clave en estos escenarios netos cero, con la energía eólica marina de fondo fijo preparada para una rápida aceleración durante esta década y la energía eólica marina flotante que libera un enorme potencial para el desplazamiento de combustibles fósiles a partir de 2030 en adelante. La IEA pide que la energía eólica marina crezca como parte del despliegue total de energía eólica, del 7% en 2020 a más del 20% a partir de 2021 en adelante. Su hoja de ruta requiere que las instalaciones de energía eólica marina crezcan 13 veces, de los 6,1 GW instalados en 2020 a 80 GW para 2030. IRENA prevé más de 2.000 GW de capacidad instalada de energía eólica marina para 2050 en su escenario de 1,5 °C, casi una cuarta parte del total. capacidad de energía eólica en ese momento [11] [36].

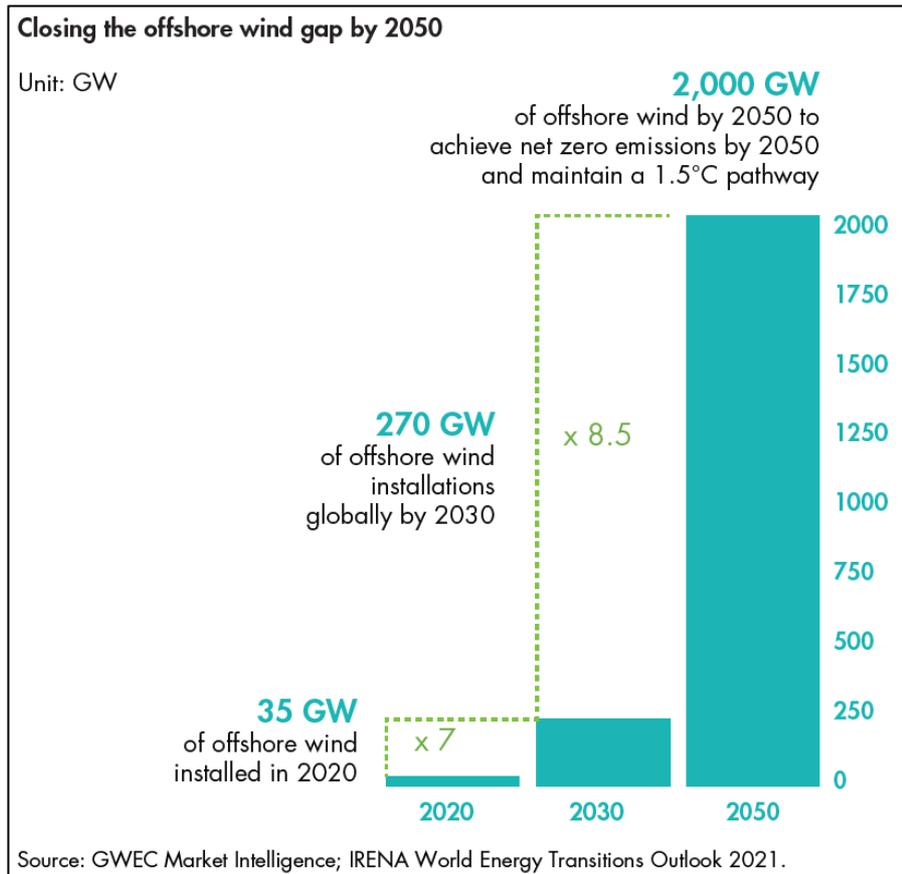


Figura 4-11 Objetivo de potencia eólica marina para 2050 [11]

Solo hemos comenzado a arañar la superficie del potencial eólico marino. Con 35 GW instalados en la actualidad, principalmente en Europa y China, la energía eólica marina comprende menos del 0,5% de la capacidad eléctrica instalada mundial. No obstante, el recurso eólico marino disponible en todo el mundo es formidable. El Banco Mundial ha identificado más de 71.000 GW de potencial de recursos técnicos disponibles en todo el mundo, casi 10 veces la capacidad eléctrica instalada actual en el mundo [11].

Con base en el objetivo de IRENA de 2.000 GW, que se requeriría para lograr la neutralidad de carbono y mantener una ruta que cumpla con las normas de París, GWEC Market Intelligence prevé que Asia emerja como la región eólica marina más prominente del mundo, hogar de casi el 40% de las instalaciones para 2050, seguido por Europa (32%), América del Norte (18%), América Latina (6%), la región del Pacífico (4%) y África y Oriente Medio (2%).

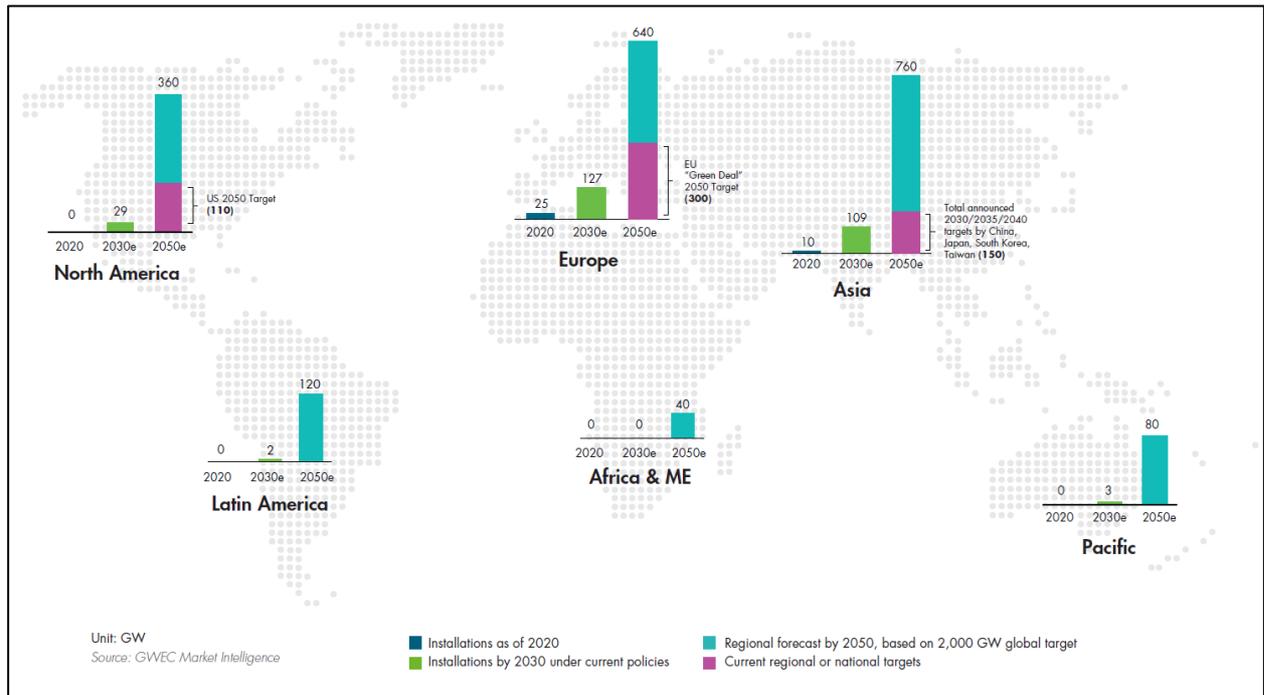


Figura 4-12 – Perspectiva de crecimiento de la potencia eólica marina [11]

Con miradas más a medio plazo, las perspectivas del mercado mundial de la energía eólica marina hasta 2030 se han vuelto aún más prometedoras en los últimos 12 meses, ya que los gobiernos de todo el mundo continúan aumentando sus niveles de ambición, la fuerte caída del coste de la energía eléctrica producida por eólica marina la convirtió en una de las fuentes de energía más competitivas, el continuo avance en la comercialización e industrialización de la energía eólica flotante y el papel cada vez más importante que está adquiriendo para facilitar la cooperación entre industrias y la des carbonización, como la transición del sector del petróleo y el gas a las energías renovables y Power-to-X [11].

Con una tasa de crecimiento anual promedio compuesta de casi el 30% hasta 2025 y el 12,7% hasta el final de la década, se espera que las nuevas instalaciones anuales superen los hitos de 20 GW en 2025 y potencialmente 40 GW en 2030.

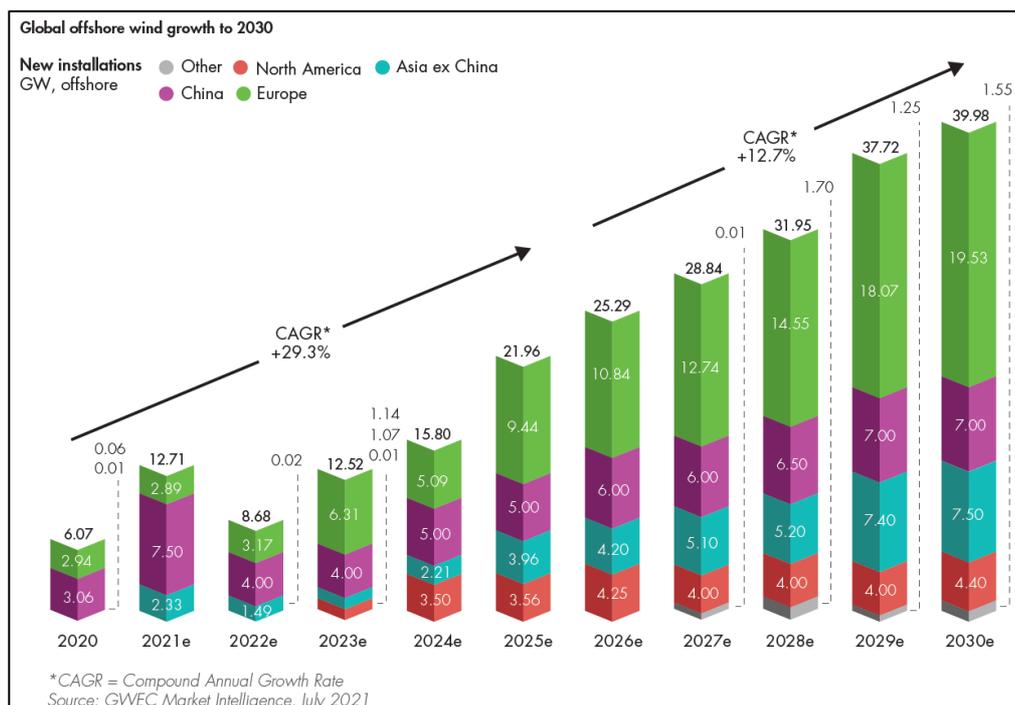


Figura 4-13 – Perspectiva de nueva potencia energía eólica marina anual hasta 2030 [11]

GWEC Market Intelligence espera que se agreguen más de 235 GW de nueva capacidad eólica marina durante la próxima década, lo que elevará la capacidad eólica marina total a 270 GW para 2030. El 30% de este nuevo volumen se instalará en la primera mitad de la década (2021 -2025), y el resto se conectará en el segundo semestre (2026-2030). Se espera que el volumen anual de instalaciones eólicas marinas se triplique, de 6,1 GW en 2020 a 23,1 GW en 2025, lo que elevará su participación de nuevas instalaciones globales del 6,5% actual al 20% para 2025.

Europa conserva su condición de mercado eólico marino regional más grande a finales de 2020, pero las nuevas instalaciones fuera de Europa, predominantemente en Asia, ya superaron a Europa el año pasado por primera vez. Es probable que esta situación se mantenga hasta 2030, aunque las instalaciones anuales en Europa pueden superar el hito de 10 GW en 2026. A corto plazo (2021-2023), la mayor parte del crecimiento fuera de Europa provendrá de Asia, principalmente China y Taiwán, y Vietnam, con contribuciones de los EE. UU. Japón y Corea del Sur crecerán en importancia a partir de 2024.

Nuestra perspectiva del mercado eólico marino a corto plazo se construyó utilizando un enfoque ascendente y se basa en la base de datos global de proyectos eólicos marinos de GWEC Market Intelligence, que cubre proyectos actualmente en construcción, resultados de subastas globales y licitaciones eólicas marinas anunciadas en todo el mundo. Para las perspectivas del mercado a medio plazo, además de los proyectos existentes, también se ha utilizado un enfoque de arriba hacia abajo, que tiene en cuenta la política existente, los esquemas de apoyo, los planes de subasta de energía eólica marina y los objetivos de energía eólica marina a nivel nacional y regional a medio / largo plazo.

4.3.1 Futuro de la energía eólica marina en España

Como ya se comentó, España va bastante atrasada a nivel eólico marino respecto a Europa, a pesar de ser un país importante en generación de electricidad a través de la energía eólica. Recientemente, en Julio de 2021, se saca a consulta la propuesta de “Hoja de Ruta de la Eólica Marina y las Energías del Mar” [51].

En esta hoja de ruta, marca como meta alcanzar al menor 3 GW de potencia eólica marina en 2030, la gran mayoría flotante, pues como se comentó en el punto 2.3.2, las aguas españolas alcanzar grandes profundidades a muy poca distancia de la costa. Este objetivo, ayudaría a cumplir los objetivos de la Estrategia sobre las Energías Renovables Marinas de la Comisión Europea, que prevé alcanzar 7 GW de eólica flotante, por lo que para España supondría aportar un 40% de la meta europea [51].

Según la AEE, las Islas Canarias será el punto por donde comience a desarrollarse la energía offshore en España. El objetivo de la estrategia energética de estas islas es tener al menos disponible para 2025 una potencia de al menos unos 300 MW [52].

El Plan de Ordenación del Espacio Marítimo (POEM) [53], que se aprobará a finales de 2021, asigna cerca de 8.000 km² de espacio marítimo para poder desarrollar plantas eólicas marinas. Las cinco zonas donde más podrían realizarse estos proyectos son: Noratlántica y Sudatlántica (Océano Atlántico), Estrecho y Alborán y Levantino-Balear (Mediterráneo) y Canarias (alrededor de las Islas Canarias), dando un potencial de crecimiento hasta los 24 GW de potencia eólica instalada, pero habría que tener en cuenta que esta zona no es de uso exclusivo para este tipo de proyecto, quedará en manos del gobierno correspondiente en cómo utilizar estas áreas [52].

También será muy importante y necesario determinar cuál será el rol y las responsabilidades de los operadores de sistemas de transmisión en la integración de la red eólica marina. En principio, debería ser la Red Eléctrica de España quien tuviera la responsabilidad de organizar transporte de esta electricidad, aunque el borrador de la Hoja de Ruta no indica cómo se implementará esta energía en los planes de crecimiento de la red eléctrica española.

5 CONCLUSIONES

El mundo se encuentra en aguas desconocidas en lo que respecta a la acción climática. Por un lado, existe una ventana de tiempo cada vez más estrecha para actuar con decisión en esta década para detener el calentamiento global. Según las políticas y promesas vigentes a partir de mayo de 2021, y que aún no se han implementado, los aumentos de la temperatura promedio global alcanzarán los 2,4 ° C a finales de siglo, lo que indicará las dificultades significativas y los impactos ambientales sin precedentes que se avecinan.

La energía eólica marina tiene un grandísimo potencial, y es un actor clave, para la consecución de los objetivos marcados para la reducción a cero de las emisiones de dióxido de carbono, sin embargo, esta tecnología tiene todavía muchos aspectos por pulir, se está en camino para ello, para poder ser la alternativa para la gran mayoría de países con acceso al mar.

Algunos de los aspectos que limitan esta tecnología es la incapacidad para desarrollar parques eólicos en zonas con profundidades mayores de los 60 metros, pues impide que se aproveche toda la extensión de mar disponible, o incluso hay países que, debido a sus características geográficas, una profundidad de más de 50 metros, se alcanza prácticamente muy cercano a la costa, por ejemplo, España, lo cual impide crear grandes parques offshore. Es por ello que es necesario una gran inversión en investigación y puesta en marcha de proyectos con estructuras flotantes, tal y como se está produciendo, pues permitiría la construcción de parque eólicos más grandes y la entrada en este mercado a una gran cantidad de países.

Pero el alejarse de la costa tiene otros inconvenientes que es el transporte de la energía a tierra. Hay una gran cantidad de alternativas que están surgiendo, como son los programas Power-to-X o el proyecto Green Hydrogen, que es consiste en almacenar la energía producida para su posterior aprovechamiento en tierra. En un cambio de enfoque esta la apuesta por las subestaciones HVDC las cuales buscan minimizar las pérdidas que se producen al transportar una gran distancia la energía eléctrica, cada vez surgen más alternativas como la LCC, VCS o DRU.

Otro de los puntos a los que se enfrenta la eólica marina, es a la necesidad de sustituir a las fuentes de energía clásicas como el petróleo y el carbón, por lo que cada vez la potencia de los aerogeneradores deberá ser mayor, por lo que cada vez se espera que el tamaño de los aerogeneradores siga creciendo. Este aumento de tamaño tendrá que ir de la mano de un crecimiento de las cimentaciones, por lo que la mejora de la ciencia de materiales, así como de procesos de diseño, producción y transporte, se convierten en actores clave, para poder seguir creciendo en este sentido. El proyecto WIND2GRIND, a pesar de que su objetivo es el desarrollar una subestación flotante, también tiene como misión la búsqueda de nuevos materiales que no incrementen mucho el peso al aumentar el tamaño de la cimentación.

Las consideraciones cambiantes están fomentando la expansión de la energía eólica marina, desde las visiones de la exportación de hidrógeno renovable y la economía nacional hasta la creación de empleo a gran escala en el contexto posterior al COVID-19. Los mecanismos del mercado también están cambiando, ya que la financiación climática internacional está creando un entorno más propicio para los proyectos eólicos marinos de gran densidad de capital y se están desincentivando la captación y generación de combustibles fósiles.

Esta apuesta por la eólica, tanto marina como terrestre, dando incentivos para su producción hace que muchos países presenten proyectos de este tipo de parques por lo que ha generado un crecimiento exponencial en los principales fabricantes de aerogeneradores. La fuerte competencia unida a unas empresas ya consolidadas, con una gran experiencia en su historia y unos aerogeneradores de grandísima calidad, provoca que el mercado se concentró en muy pocas manos, como son Vestas, Siemens Gamesa o GE Renewable Energy, que se estima que manejen entre estas 3 casi el 60% de la cuota de mercado. Por lo que la entrada al mercado eólico de distintas start-ups es bastante complejo.

En Europa, desde que se instaló el primer parque eólico, la apuesta por esta energía no ha parado de aumentar. A través de una estrecha colaboración entre los países europeos y las partes interesadas experimentadas en las últimas tres décadas, se ha construido una sólida cadena de suministro de energía eólica marina en los países

vecinos del Mar del Norte y el Mar Báltico. A día de hoy, la energía eólica marina no solo se ha establecido como una generación de energía competitiva en costos de elección para los gobiernos en el continente europeo, sino que también creó casi 100 mil empleos e impulsó el crecimiento económico local. Países como Reino Unido, Alemania o Dinamarca, poseedores de grandes zonas marinas, son los países que más están apostando por la energía eólica offshore.

Esta forma de energía se ha convertido en la tecnología de generación de electricidad más competitiva después de la energía eólica terrestre y la energía solar fotovoltaica, pero con ventajas considerables en términos de poder implementarse en escala, convirtiéndola en una fuente de energía clave para ayudar a Europa a cumplir el objetivo cero para 2050, estimando una potencia instalada de 300 GW.

Respecto al resto del mundo, Europa se alza como la líder en este mercado, seguido del asiático. Tanto China como Japón están realizando una gran apuesta por esta forma de energía. El caso de Japón es que, debido a sus características topográficas, tiene muchísimo potencial en este sentido, de hecho, algunas perspectivas estiman que este país podría alcanzar hasta 500 GW de potencia eólica marina.

En cuanto a Estados Unidos, se encuentra bastante alejado respecto a Europa y Asia, todavía no se ha realizado una gran apuesta por la eólica marina, aunque en los últimos discursos, se está anunciando que se tendrá una potencia instala de 30 GW para 2030 y de unas 110 GW para 2050, cifras muchísimo menores en comparación con las expectativas de Asia y Europa.

En cuanto a España, a pesar ser una potencia eólica terrestre, todavía le quedan grandes pasos que dar en cuanto a energía eólica offshore, y lo cierto, es que parece que no hay un futuro claro respecto a esto dentro del país, solo pinceladas de posibles escenarios. Es necesario, que los políticos empiecen a tomar decisiones consensuadas con expertos y con cooperación, para conseguir que estos tipos de energía comiencen a despegar en el país y no quedarnos atrás en la consecución de emisiones cero para el año 2050.

Es cierto que aprovechar el potencial de la energía eólica marina en un mundo neto cero requerirá un cambio radical en la voluntad política. Pero también exigirá una mayor colaboración entre los responsables políticos, los consumidores industriales, los financiadores públicos, la sociedad civil y la propia industria para aprender de la última década del viaje de la energía eólica marina y fomentar un camino más sostenible, visible, ambicioso hacia un futuro de emisiones cero.

REFERENCIAS

- [1] Gobierno de España, «Qué es el cambio climático,» [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/cumbre-cambio-climatico-cop21/el-cambio-climatico/>.
- [2] Climático, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio, Noviembre 2014. [En línea]. Available: https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/recursos/mini-portales-tematicos/Cclimatico/informe_ipcc.aspx.
- [3] Premium, «HISTORIA DE LA ENERGÍA EÓLICA,» Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://premiumenergia.es/historia-de-la-energia-eolica/>.
- [4] B. Sorensen, de *Renewable Energy: Four Volume Set*, 2018.
- [5] «Wikipedia - Energía eólica,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_e%C3%B3lica.
- [6] H. d. l. e. eólica, Danish Wind Industry Assciaton, (DWIA), 2013.
- [7] «Somos Eólicos - El día que se puso en marcha la primera turbina de viento,» 2011. [En línea]. Available: <https://www.somoseolicos.com/2011/noticias/el-dia-que-se-puso-en-marcha-la-primera-turbina-de-viento/#:~:text=Conocida%20como%20la%20m%C3%A1quina%20Smith,potencia%20construida%20durante%20muchos%20a%C3%B1os.&text=La%20turbina%20funcion%C3%B3%20a%20trav%C3>.
- [8] G. W. E. C. (GWEC), «Global Wind Report 2021,» 2021.
- [9] Wind Europe, «Wind energy in Europe,» 2020.
- [10] A. E. E. (AEE), «AEE,» [En línea]. Available: <https://www.aeelica.org/comunicacion/la-actualidad-eolica/4683-el-sector-eolico-es-optimista-tras-la-publicacion-del-borrador-de-la-hoja-de-ruta-para-el-desarrollo-de-la-eolica-marina-y-de-las-energias-del-mar-en-espana-2>.
- [11] Global Wind Energy Council (GWEC), «Global Offshore Wind Report 2021,» 2020.
- [12] A. B. F., «Eólica marina en España: ahora es el momento,» *Renewable Energy Magazine*, [En línea]. Available: <https://www.energias-renovables.com/eolica/eolica-marina-en-espana-ahora-es-el-20210209>.
- [13] G. d. España, «Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER) 2011-2020,» [En línea]. Available: <https://energia.gob.es/desarrollo/EnergiaRenovable/Paginas/paner.aspx>.
- [14] ABB, Cuaderno de aplicaciones técnicas nº 12 Plantas eólicas..
- [15] WindEurope, «Offshore wind in Europe. Key trends and statistics 2020».
- [16] B. O. E. M. (BOEM), «Comparison of Environmental Effects from Different Offshore Wind Turbine Foundations,» 2020.
- [17] K. Das y N. Antonios Cutululis, «Offshore Wind Power Plant Technology Catalogue - Components of

- wind power plants, AC collection systems and HVDC systems,» 2017.
- [18] J.-S. L.-G. y. V. N. V. María Dolores Esteban, «Offshore Wind Power Integration into Future Power Systems: Overview and Trends,» de *Offshore Wind Farms*, 2020.
- [19] Vestas, «Vestas,» [En línea]. Available: <https://www.vestas.com/en>.
- [20] G. R. Energy, «GE Renewable Energy,» [En línea]. Available: <https://www.ge.com/renewableenergy/home>.
- [21] Goldwind, «Goldwind,» [En línea]. Available: <https://www.goldwind.com/en/>.
- [22] Envision, «Envision,» [En línea]. Available: <http://www.envision-group.com/>.
- [23] Siemens Gamesa, «Siemens Gamesa,» [En línea]. Available: <https://www.siemensgamesa.com/es-es>.
- [24] Enercon, «Enercon,» [En línea]. Available: <https://www.enercon.de/home/>.
- [25] Nordex ES, «Nordex ES,» [En línea]. Available: <https://www.nordex-online.com/es/>.
- [26] SmartGridSpain, «GWEC publica la clasificación mundial de proveedores de turbinas eólicas para 2020,» [En línea]. Available: <https://smartgridspain.org/web/eolica/2021/03/24/gwec-publica-la-clasificacion-mundial-de-proveedores-de-turbinas-eolicas-para-2020/>.
- [27] Wood Mackenzie, «Wood Mackenzie,» [En línea]. Available: <https://www.woodmac.com/>.
- [28] W. E. TRADE, «Los tres principales fabricantes de turbinas eólicas capturarán el 60% del mercado para 2029,» [En línea]. Available: <https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/energia-eolica/los-tres-principales-fabricantes-de-turbinas-eolicas-capturaran-el-60-del-mercado-para-2029>.
- [29] O. R. J. N. E. D. K. D. Y. G. S. Eric Lantz, «Increasing Wind Turbine Tower Heights: Opportunities and Challenges,» National Renewable Energy Laboratory, 2019.
- [30] El periódico de la energía, «El tamaño sí importa para el futuro de la energía eólica marina,» 03 06 2021. [En línea]. Available: <https://elperiodicodelaenergia.com/el-tamano-si-importa-para-el-futuro-de-la-energia-eolica-marina/>.
- [31] WORLD ENERGY TRADE, «El futuro de la energía eólica son los aerogeneradores gigantes,» [En línea]. Available: <https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/energia-eolica/el-futuro-de-la-energia-eolica-son-los-aerogeneradores-gigantes>.
- [32] Energias-Renovables.com, «Vestas anuncia la instalación en Dinamarca del aerogenerador más grande del mundo,» [En línea]. Available: <https://www.energias-renovables.com/eolica/vestas-anuncia-la-instalacion-en-dinamarca-del-20211015>.
- [33] World Energy Trade, «La enorme turbina eólica marina Haliade-X de 14 MW de GE ya está operativa,» [En línea]. Available: <https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/energia-eolica/la-enorme-turbina-eolica-marina-haliade-x-de-14-mw-de-ge-ya-esta-operativa>.
- [34] C. RUS, «XATAKA - La turbina eólica Haliade-X ha vuelto a pulverizar el récord mundial de producción: 14 MW y sólo es un prototipo,» [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/energia/turbina-eolica-haliade-x-ha-vuelto-a-pulverizar-record-mundial->

produccion-14-mw-solo-prototipo.

- [35] BloombergNEF, «New Energy Outlook 2021,» 2021.
- [36] International Renewable Energy Agency (IRENA), «Energy Transformation 2050,» 2020.
- [37] International Renewable Energy Agency (IRENA), «Offshore Renewables - An action agenda for deployment - A CONTRIBUTION TO THE G20 PRESIDENCY,» 2021.
- [38] B. Nastasi y G. Basso, Power-to-gas integration in the transition towards future urban energy systems., 2017.
- [39] Brintbranchen, «Hydrogen and P2X on the rise in Denmark».
- [40] S. Pilpola y P. Lund, Different flexibility options for better system integration of wind power., 2019.
- [41] S. Hosseini y M. Wahid, «Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development.,» 2016.
- [42] M. Schuster y T. Walther, «Valuation of combined wind power plant and hydrogen storage: A decision tree approach.».
- [43] Z. Wang, R. Carriveau, D. Ting, W. Xiong y Z. Wang, «A review of marine renewable energy storage.,» 2019.
- [44] TechnioFMC, «Energy Transition, Deep Purple,» [En línea]. Available: <https://www.techniofmc.com/en/what-we-do/subsea/energy-transition-deep-purple/>.
- [45] S. Weitemeyer, D. Kleinhans, T. Vogt y C. Agert, «Integration of Renewable Energy Sources in future power systems: The role of storage,» de *Renew. Energy*, 2015.
- [46] FLASC, «FLASC Web,» [En línea]. Available: <https://www.offshoreenergystorage.com/>.
- [47] O. Saborío-Romano, A. Bidadfar, Ö. Göksu, L. Zeni y N. Cutululis, «Power Oscillation Damping from Offshore Wind Farms Connected to HVDC via Diode Rectifiers.,» de *Energies*, 2019.
- [48] R. Li, L. Yu y L. Xu, «Operation of offshore wind farms connected with DRU-HVDC transmission systems with special consideration of faults.,» de *Glob. Energy Interconnect*, 2018.
- [49] «Wind2Grid Project,» [En línea]. Available: <https://www.wind2gridproject.com/es/>.
- [50] «El proyecto WIND2GRID diseñará y desarrollará un nuevo concepto de subestación offshore flotante,» SMARTGRIDINFO, [En línea]. Available: <https://www.smartgridsinfo.es/2021/03/29/proyecto-wind2grid-disenara-desarrollara-nuevo-concepto-subestacion-offshore-flotante>.
- [51] Gobierno de España, «El MITECO saca a información pública la propuesta de Hoja de Ruta de la Eólica Marina y las Energías del Mar,» [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/el-miteco-saca-a-informaci%C3%B3n-p%C3%BAblica-la-propuesta-de-hoja-de-ruta-de-la-e%C3%B3lica-marina-y-las-energ%C3%ADas-del-mar/tcm:30-529100>.
- [52] Asociación Empresarial Eólica (AAE), «La eólica marina española alcanza un hito clave,» [En línea]. Available: <https://aeolica.org/la-eolica-marina-espanola-alcanza-un-hito-clave/>.

[53] Gobierno de España, «Plan de Ordenación del Espacio Marítimo,» [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/ordenacion-del-espacio-maritimo/default.aspx>.

[57] M. D. E. Pérez, Propuesta para la implantación de parques eólicos off-shore., 2016.