

05-010

OFFSHORE WIND FARMS. CURRENT SITUATION

Bahamonde García, Manuel Ignacio ⁽¹⁾; Pérez Litrán, Salvador ⁽¹⁾; Macías Macías, José ⁽¹⁾; Sánchez Herrera, María Reyes ⁽¹⁾; Rodríguez Vázquez, Jesús ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad de Huelva

Currently, wind energy, which is produced in wind farms connected to the electricity grid, is the second largest renewable energy source worldwide, with an installed capacity of 650.5 GW at the end of 2019, and a large future projection in the energy context. In particular, the offshore wind industry, with an installed capacity of 29.1 GW (GWEC, 2020), spread over more than 150 wind farms in operation, is based on the experience of the offshore wind industry, as well as codes and norms of gas and oil implantations at sea. This communication gives an overview of high production wind energy in the marine environment, where Europe has the most installed power worldwide. Its historical evolution is also developed from the beginning until the current projects of increasing powers with multi-megawatt wind turbines and greater distances to the coast.

Keywords: wind energy; current situation; marine wind turbines; offshore wind farms

PARQUES EÓLICOS MARINOS. SITUACIÓN ACTUAL

En la actualidad, la energía eólica, producida en los parques eólicos conectados a la red eléctrica, es la segunda fuente de energías renovables con mayor implantación a nivel mundial, con una potencia instalada de 650,5 GW a final de 2019, y una gran proyección de futuro en el contexto energético. En particular, la industria eólica marina, con una potencia instalada de 29,1 GW (GWEC, 2020), repartida en más de 150 parques eólicos en funcionamiento, está basada en la experiencia de la industria eólica terrestre, así como en los códigos y normas de las implantaciones gasísticas y petroleras en el mar. En la presente comunicación se da una visión general de la energía eólica de gran producción en el ámbito marino, donde Europa tiene la mayor parte de la potencia instalada a nivel mundial. También se desarrolla su evolución histórica desde el inicio hasta los proyectos actuales de potencias crecientes con aerogeneradores multimegavatios y mayores distancias a la costa.

Palabras clave: energía eólica; situación actual; aerogeneradores marinos; parques eólicos marinos

Correspondencia: Manuel Ignacio Bahamonde García bahamonde@uhu.es

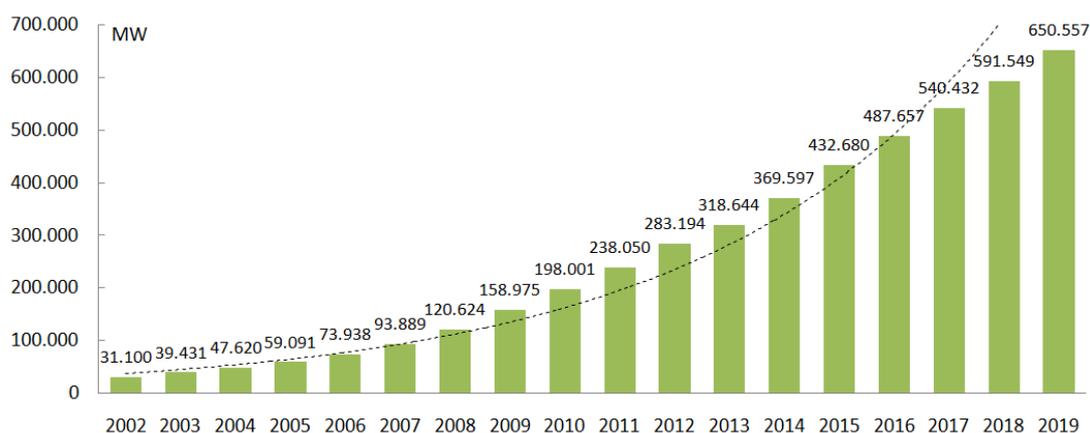


©2020 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

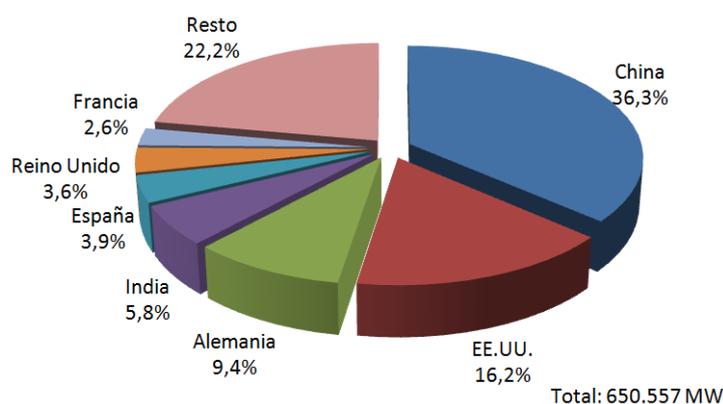
El Global Wind Energy Council (GWEC) recoge en la publicación Global Wind Report 2019, que a final de dicho año había una potencia eólica total instalada a nivel mundial de 650.557 MW, de los cuales 29.136 MW correspondían a parques eólicos marinos (pp.ee.mm). La evolución de la potencia total entre los años 2002 y 2019 se representa en la figura 1, la cual tiene una marcada tendencia exponencial, indicada por la línea a trazos.

Figura 1: Evolución de la potencia eólica mundial entre 2002 y 2019



En la figura 2 se indica, a nivel mundial, los siete países con la mayor potencia eólica acumulada a finales de 2019, estos son: China con el 36,3% (236.402 MW), EE.UU. con el 16,2% (105.466 MW), Alemania con el 9,4% (61.406 MW), India con el 5,8% (37.506 MW), España con el 3,9% (25.463 MW), Reino Unido con el 3,6% (23.340 MW) y Francia con el 2,6% (16.643 MW).

Figura 2: Países con mayor potencia eólica acumulada hasta final de 2019



Los datos de la potencia eólica instalada por regiones del mundo durante los años 2018 y 2019 se muestran en la Tabla 1. El mayor crecimiento en términos absolutos se produjo en Asia con 30.612 MW, siendo la mayor contribución la de China con 26.155 MW en 2019.

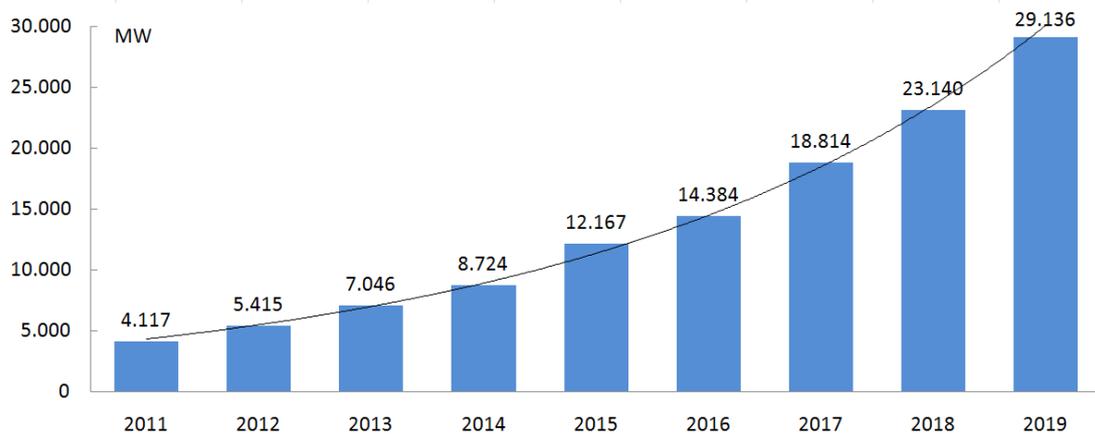
Tabla 1. Potencia eólica total por regiones del mundo en los años 2018 y 2019

Regiones del Mundo	Pot. (MW) en 2018	Pot. (MW) en 2019	Tasa de variación (%)
Europa	189.364	204.732	8,12
Asia-Pacífico	260.624	291.236	11,75
América	134.873	148.300	9,96
África y Oriente Medio	5.728	6.672	16,48
Totales	590.589	650.940	10,22

La saturación de las implantaciones eólicas terrestres, las condiciones favorables de la plataforma continental para la tecnología actual, la experiencia en instalaciones gasísticas y petroleras en mar abierto, y la política favorable de los gobiernos, ha hecho posible la transición de algunos países a las implantaciones eólicas marinas que, en la actualidad, se concentran, de forma mayoritaria, en los mares: del Norte, Báltico, de China y Amarillo.

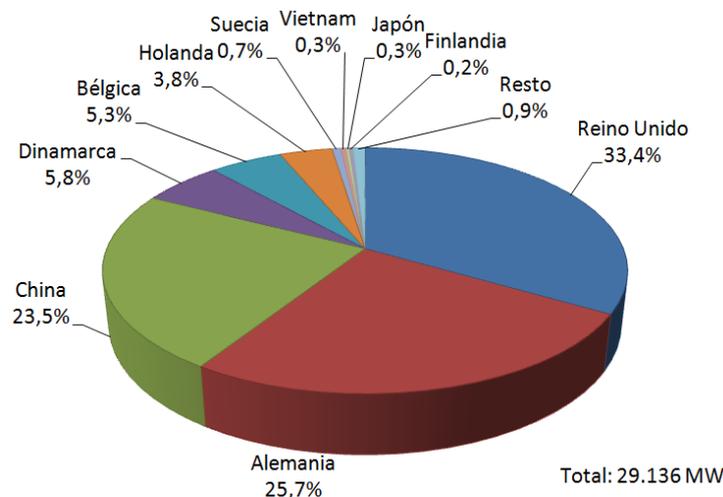
De esta manera, los pp. ee. mm. han determinado un nuevo marco para el desarrollo de la energía eólica y comienzan a realizar una importante contribución al suministro eléctrico. En la figura 3 se muestra la evolución de la potencia eólica marina total entre los años 2011 y 2019, la cual también tiene una marcada tendencia exponencial.

Figura 3: Evolución de la potencia eólica marina mundial entre 2011 y 2019



La distribución porcentual por países con la mayor potencia eólica marina acumulada hasta final de 2019 se indica en la figura 4 (GWEC, 2020).

Figura 4: Países con mayor potencia eólica marina acumulada hasta final de 2019



De nuevo China, con 2.395 MW, implantó la mayor potencia eólica marina en 2019, le siguieron Reino Unido con 1.764 MW y Dinamarca con 374 MW.

También hay que destacar, en los últimos años, las potencias crecientes y mayores distancias a la costa de los nuevos pp. ee. mm. Así, el parque eólico danés Horns Rev 3, que entró en funcionamiento en diciembre de 2018, está formado por 49 aerogeneradores MHI Vestas Offshore de 8,3 MW y una distancia media a la costa de 30 km (Vattenfall, 2020).

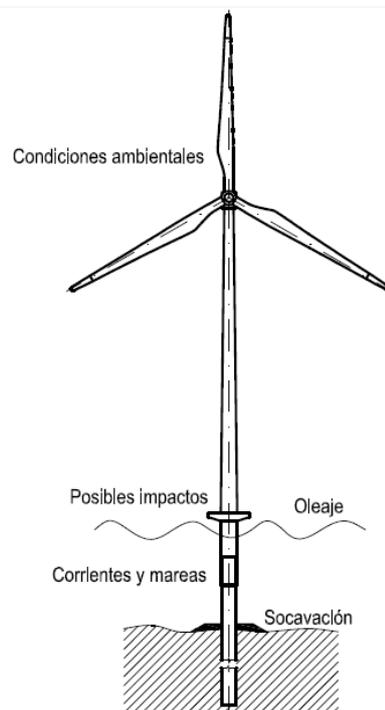
2. Objetivos

El objetivo de la comunicación es dar, en la parte introductoria, algunas referencias con datos estadísticos actualizados de la energía eólica de gran producción, al ser la segunda fuente de energía renovable por potencia instalada, detrás de la hidráulica, posicionándose como una alternativa real, en los próximos años, a determinadas fuentes convencionales de energía (IEA, 2019). A continuación, centraremos el resto del trabajo en la energía eólica en el ámbito marino, tras una breve introducción histórica, se aborda la evolución hasta la situación actual de los aerogeneradores, estructuras de sustentación y pp.ee.mm.

3. Metodología

El estudio de los pp.ee.mm. implica una serie de condicionantes que no están presentes en las instalaciones en tierra. De esta manera, si bien los vientos son, en general, más constantes y las turbulencias más reducidas, existen un número importante de desafíos técnicos a considerar, que se encuentran relacionados con las fuerzas actuantes en condiciones marinas, tales como: socavación del fondo debido a las corrientes, cargas sobre la estructura de sustentación debidas a las mareas y al oleaje, cargas ambientales en situaciones de tormentas, etc. (Robinson & Musial, 2006). Dichos efectos se resumen de forma gráfica en la figura 5.

Figura 5: Fuerzas actuantes en un aerogenerador en condiciones marinas



En la comunicación mantendremos la acepción de pp.ee.mm. como término general de una planta de producción de energía eléctrica, aún sabiendo que muchas instalaciones que se encuentran en funcionamiento no cumple algunos de los requisitos citados en la definición, bien porque son proyectos de demostración formado por un sólo aerogenerador que vierte su energía a una subestación eléctrica terrestre o bien porque se encuentra situado en la misma costa, donde no existen condiciones marinas, como las relativas al régimen de vientos y a las condiciones hidrodinámicas que afectan a las estructuras de sustentación.

4. Energía eólica marina

La energía eólica marina marca su inicio en el año 1990 en la localidad sueca de Nordersund del Mar Báltico con la implantación de un aerogenerador de 220 kW, a 250 metros de la costa y con el lecho marino a una profundidad de 7 metros. No obstante, se suele citar el primer parque eólico marino al parque eólico danés Vindeby, que entró en funcionamiento en septiembre de 1991 en la costa del Mar Báltico, siendo desmantelado en septiembre de 2017. Dicha implantación, se encontraba situada entre 1,5 y 3 km al norte de la isla de Lolland, cerca de la localidad de Vindeby, y constaba de 11 aerogeneradores Bonus de 450 kW.

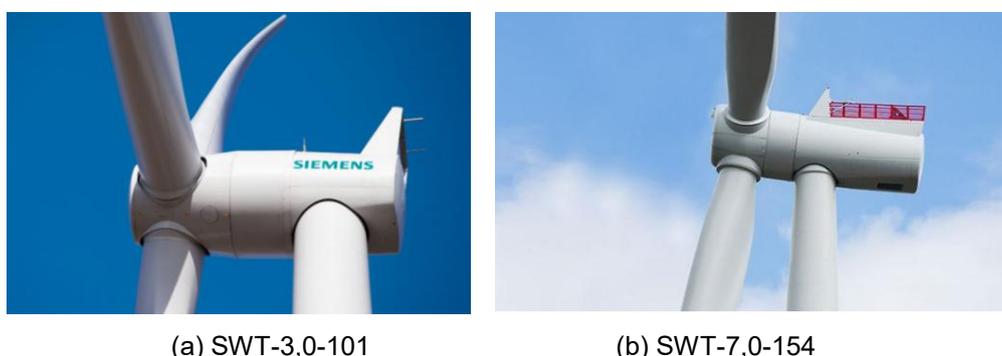
4.1. Aerogeneradores marinos

El gran potencial de las costas marítimas en la generación eólica está impulsando a los fabricantes a desarrollar aerogeneradores específicos para este tipo de emplazamientos, con todas las implicaciones que conlleva en gran parte de sus componentes. Así, desde el punto de vista de diseño, la vida útil debe ser al menos 20 años, considerando tanto las cargas eólicas como las cargas marítimas, de tal manera que, se considera un emplazamiento marino, si la estructura soporte del aerogenerador está sujeta a cargas hidrodinámicas (IEC, 2009).

Las características generales de los aerogeneradores para instalaciones en el mar son: mayor potencia nominal, mayor diámetro del rotor, menor altura del buje, clase IEC para toda la gama de vientos y turbulencias, aunque preferentemente son de baja turbulencia, mayor protección anticorrosión y antihumedad. Siendo los fabricantes con la mayor potencia instalada en pp. ee. mm. la española Siemens-Gamesa, seguida por la danesa MHI-Vestas (4C Offshore, 2020).

El aumento de la potencia unitaria de los aerogeneradores de gran producción ha ido acompañado de una mejora general en el diseño, de tal forma que las góndolas reducen longitud y peso, siendo esto una constante en la mayoría de los fabricantes. Como ejemplo de esta evolución, en la figura 6(a) se muestra el aerogenerador Siemens SWT-3,0-101, de 3,0 MW y 101 m de diámetro de rotor, que modifica el diseño habitual de la góndola, que se basaba desde sus inicios en el aerogenerador Bonus. Asimismo, en la figura 6(b) se muestra el aerogenerador Siemens SWT-7,0-154, de 7,0 MW y 154 m de diámetro del rotor, sin multiplicadora y generador síncrono con imanes permanentes, que se fabrica desde 2017.

Figura 6: Aerogeneradores Siemens-Gamesa



Siemens-Gamesa también ofrece al mercado eólico, desde 2019, el modelo SG 8,0-167 DD, de 8 MW, recomendado para emplazamientos con vientos altos. También, para este tipo de

emplazamientos, tiene previsto fabricar en serie, en 2022, el aerogenerador SG 10,0-193 DD, de 10 MW, donde la generación eléctrica está basada en la tecnología Direct Drive.

Por su parte, MHI-Vestas actualmente está probando tres aerogeneradores de 8,4 MW sobre estructuras de sustentación flotantes en la costa portuguesa de Viana, en el mismo emplazamiento donde probó este tipo de estructura con un aerogenerador de 2 MW (DYNA, 2020).

Dentro del rango de alta potencia, General Electric (GE) está desarrollando en la costa holandesa, cerca de Rotterdam, el prototipo Haliade X, de 12 MW y 220 m de diámetro de rotor, que ya comenzó a diseñar la francesa Alstom antes de ser absorbida por GE. La producción en serie de dicho prototipo se espera que sea en 2022, con entregas iniciales previstas para el parque eólico británico Dogger Bank.

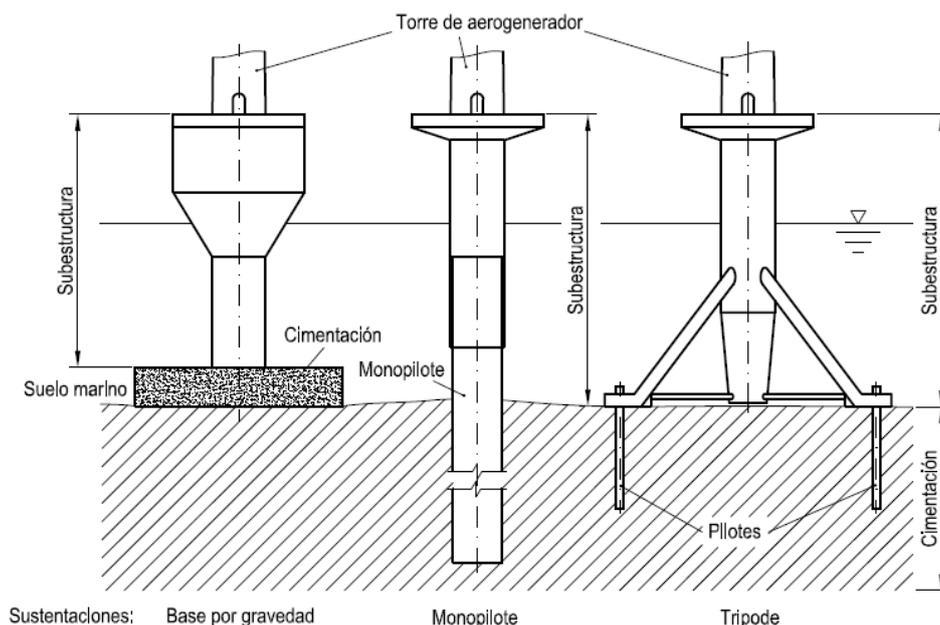
4.2. Estructuras de sustentación

La selección del tipo de sustentación para los aerogeneradores de un parque eólico marino está determinado por varios factores, tales como: la tipología de suelo, la profundidad, la erosión del fondo marino, el tamaño y tipo de aerogenerador, las condiciones ambientales (temporales, altura de las olas, corrientes marinas, etc.) y los costes económicos.

En las estructuras de sustentación se distingue la cimentación y la subestructura que, mediante una pieza de transición, se une a la torre del aerogenerador. La cimentación fija la subestructura al lecho marino y debe ser protegida contra la socavación, mediante materiales, como piedras o rocas, que contrarresten dicho proceso.

En la figura 7 se indican las partes de la sustentación no flotantes para implantaciones de aerogeneradores marinos, según establece AENOR (2010). En ella se puede distinguir: la cimentación, la subestructura y el aerogenerador. La cimentación fija la subestructura al fondo marino, mientras que esta sirve de apoyo al aerogenerador. Es habitual que en la parte superior de la subestructura se sitúe una pieza de transición para la unión de la torre del aerogenerador.

Figura 7: Partes de las estructuras de sustentación no flotantes



Debido a los condicionantes que afectan a los pp.ee.mm., no existe un límite predeterminado para asignar una estructura de sustentación a una determinada profundidad, pero si una tendencia que las agrupan. Así, los aerogeneradores del parque eólico marino belga Thornton Bank 1, utilizan base por gravedad con una altura de hasta 44 m, siendo las alturas medias de dichas estructuras mucho menores.

En la Tabla 2 se indican las estructuras de sustentación para aerogeneradores marinos, las profundidades de uso medio y la frecuencia de sus aplicaciones.

Tabla 2. Clasificación y uso de las estructuras de sustentación

Denominación	Profundidades	Aplicaciones en pp.ee.mm.
Base por gravedad (gravity base)	Hasta 15 m	Frecuentes
Monopilote (monopile)	Hasta 25 m	Muy frecuentes
Trípode (tripod)	De 20 a 50 m	Crecientes
Celosía (jacket)	De 20 a 50 m	Crecientes
Tripila (tripile)	De 25 a 40 m	Reducidas
Cámara de succión (suction bucket)	Hasta 30 m	Reducidas
Soportes flotantes (floating platforms)	Mayor de 50 m	En fase de investigación

Desde el principio los proyectos de pp.ee.mm. en Europa han estado dominado por dos tipos de sustentaciones: la base por gravedad, como las empleadas en los parques eólicos Nysted y Middelgrunden, y el monopilote, como los utilizados en los parques eólicos North Hoyle y Kentish Flats. Siendo, en la actualidad, la estructura más utilizada el monopilote, hasta profundidades de 25 m.

Para profundidades entre 20 y 50 m, con mayores aerogeneradores, tienen viabilidad las sustentaciones del tipo trípode y de celosía, ambas utilizadas en el parque eólico alemán Alpha Ventus.

La implantación de aerogeneradores marinos para profundidades superiores a 50 m supone una auténtica barrera para el desarrollo de la energía eólica marina. La instalación de los aerogeneradores sobre soportes flotantes se encuentra en un largo periodo de investigación y desarrollo, no existiendo una tecnología que predomine. Destaca en la costa de Noruega el proyecto de demostración Hywind, en funcionamiento desde junio de 2009, el fondo marino se encuentra a 220 m, consta de un soporte flotante lastrado (spar buoy) y un aerogenerador Siemens SWT-2,3-82.

5. Parques eólicos marinos

Un parque eólico marino es una planta de producción de energía eléctrica, mediante una agrupación de aerogeneradores conectados a una red interna que transfiere la energía a través una o varias subestaciones, generalmente ubicadas en el mar, y desde estas se produce la interconexión eléctrica con una subestación terrestre. Los componentes principales son: estructura de sustentación, pieza de transición, torre, aerogenerador, sistema eléctrico y de conexión a la red, y sistema de telecontrol.

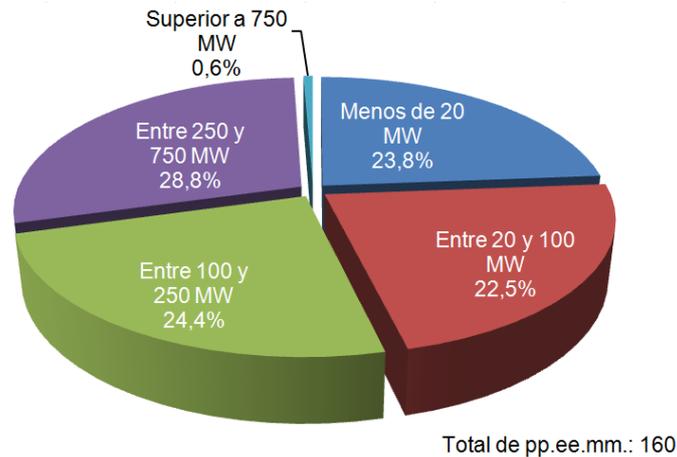
Los pp.ee.mm. pueden ser descritos por características tales como: la potencia nominal, el número y potencia de los aerogeneradores, la profundidad del lecho marino, la distancia a la costa y el tipo de estructura de sustentación. Dichos proyectos, en relación a la potencia nominal, pueden ser clasificados como: demostración y comercial, en el primero de los casos son implantaciones de pequeña potencia en donde se pretende adquirir la experiencia suficiente para abordar proyectos más complejos y, en el segundo caso, se basa en implantaciones que tienen como objetivo la explotación comercial.

Una clasificación más extensa dada por Kaiser y Snyder (2012) para los pp.ee.mm. es la siguiente:

- Demostración: < 20 MW.
- Precomercial: desde 20 a 100 MW.
- Comercial pequeño: desde 100 a 250 MW.
- Comercial completo: desde 250 a 750 MW.
- Comercial grande: > 750 MW.

Siguiendo dicha clasificación, en la figura 8 se indica la distribución porcentual según el rango de potencia instalada en los pp.ee.mm. en funcionamiento hasta final de 2019 (4C Offshore, 2020), donde el 23,8% corresponden a proyectos de demostración, con una potencia inferior a 20 MW, y el 76,2% restante poseen una potencia igual o superior a 20 MW.

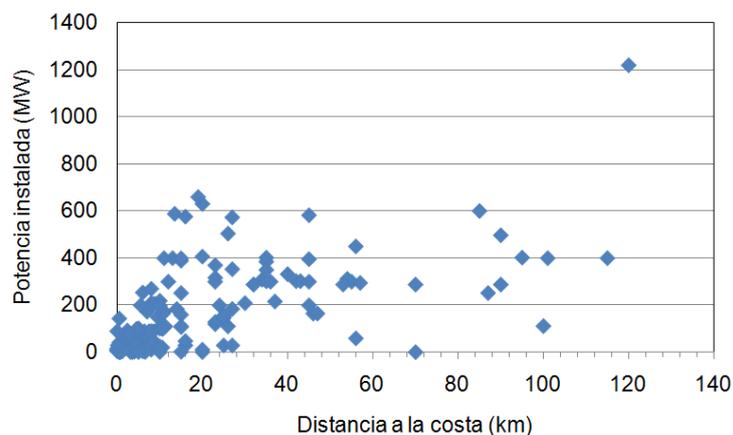
Figura 8: Distribución de la potencia en pp.ee.mm. en funcionamiento



En general, los proyectos de demostración son de potencia reducida, a veces con un solo aerogenerador, y cerca de la costa, que permiten acumular la experiencia necesaria para otros proyectos de más envergadura.

Asimismo, en la figura 9 se muestra, hasta final del año 2019, la relación entre la potencia instalada en los pp.ee.mm. en funcionamiento y su distancia a la costa, extraída con datos de 4C Offshore (2020).

Figura 9: Relación entre la potencia instalada y la distancia a la costa



El valor más extremo que aparece en dicha gráfica es el parque eólico marino de Reino Unido Hornsea Project One, que posee una potencia de 1.218 MW y se encuentra a una distancia media de la costa de 120 km, estando formado por 174 aerogeneradores Siemens SWT-7,0-154

Los proyectos eólicos en general y los de tipo marino en particular conllevan grandes inversiones de capital, grandes retos de ingeniería y existen un número importante de factores que influyen en su desarrollo.

El diseño, la logística, los requisitos de los buques adaptados (vessels) y la infraestructura de cada explotación en alta mar son únicos, aunque pueden existir similitudes entre dichos proyectos. Asimismo, el mercado de servicios, el nivel de competencia, las condiciones ambientales y el apoyo del gobierno regional son específicos de cada país, e introducen una diversidad que hay que tener en cuenta.

La configuración definitiva de un parque eólico marino depende de las condiciones meteorológicas y oceanográficas, de la potencia nominal, del número y tipo de aerogeneradores, de los impactos visuales, de los requerimientos regulatorios, y de determinadas condiciones específicas del lugar. Siendo el potencial eólico del emplazamiento un factor determinante para la implantación.

6. Conclusiones

En la actualidad, la energía eólica de gran producción es la segunda renovable con mayor implantación a nivel mundial y contribuye de forma destacada en el mix energético de algunos países (IEA, 2019). Asimismo, la energía eólica marina ha experimentado un rápido crecimiento en los últimos años, con la implantación de nuevos pp.ee.mm, de potencias crecientes y mayores distancias a la costa, alcanzando a final de 2019 una potencia acumulada de 29.136 MW.

Los aerogeneradores, además de mayores potencias nominales, presentan grandes innovaciones, de tal forma que son auténticas centrales de producción de energía que entregan de forma precisa, sin fluctuaciones, la energía a la red eléctrica, a través de los centros de transformación normalmente situados en alta mar, cuando se tratan de pp.ee.mm. comerciales.

Las estructuras de sustentación resuelven las implantaciones marinas hasta una profundidad de 50 m. A partir de esta, supone una auténtica barrera tecnológica que está siendo objeto de investigación y desarrollo mediante estructuras de sustentación flotantes.

En los últimos años los pp.ee.mm. en funcionamiento son de potencia crecientes y mayores distancia a la costa.

7. Referencias

4C Offshore: Marine Consultants. <https://www.4coffshore.com/> [15-02-2020].

AENOR (2010). Aerogeneradores. Parte 3: Requisitos de diseño para aerogeneradores marinos. UNE-EN 61400-3. Madrid.

DYNA (2020). El tamaño sí que importa. Ed. DYNA. Ingeniería e Industria.

GWEC (2020). Global Wind Report 2019. Ed. Global Wind Energy Council (GWEC).

IEA (2019). Offshore Wind Outlook 2019. Ed. International Energy Agency (IEA).

IEC (2009). Wind turbines-part 3: design requirements for offshore wind turbines. IEC 61400-3. Ed. International Electrotechnical Commission (IEC).

Kaiser, M. & Snyder, B.F. (2012). *Offshore wind energy cost modeling*. Verlag London: Springer.

MHI Vestas Offshore Wind A/S. <http://www.mhivestasoffshore.com/> [15-01-2020]

Robinson, M. & Musial, W. (2006). *Offshore wind technology overview*. National Renewable Energy Laboratory NREL/PR-500-40462.

Siemens Gamesa Renewable Energy. <https://www.siemensgamesa.com/> [15-01-2020].

Vattenfall. <https://powerplants.vattenfall.com/horns-rev-3> [15-02-2020]

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

