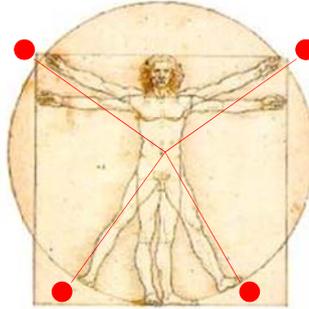


TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO

Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

VOLUMEN XIV. AÑO 2016

SEPARATA



PARQUES EÓLICOS OFFSHORE. NUEVOS RETOS PARA LA ARQUITECTURA Y CONSTRUCCIÓN NAVAL.

**Carlos Andreu Escario, Ricardo Visiers Bañón,
Juan A. García Oliva**



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO
Escuela Politécnica Superior
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: Carlos Andreu Escario, Ricardo Visiers Bañón, Juan A. García Oliva
Abril, 2016.

<http://www.uax.es/publicacion/parques-eolicos-offshore-nuevos-retos-para-la-arquitectura-y-construccion.pdf>

© De la edición: *Revista Tecnológ@ y desarrollo*

Escuela Politécnica Superior.

Universidad Alfonso X el Sabio.

28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).

ISSN: 1696-8085

Editor: Javier Morales Pérez – tecnologia@uax.es

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

PARQUES EÓLICOS OFFSHORE. NUEVOS RETOS PARA LA ARQUITECTURA Y CONSTRUCCIÓN NAVAL.

Carlos Andreu Escario ^(a), Ricardo Visiers Bañón ^(b),

Juan A. García Oliva ^(c)

(a) Ingeniero Industrial UPM, Máster Ingeniería UAX, Doctorando UAX,
email: carlos.andreu@yahoo.es

(b) Doctor Ingeniero Naval UPM, email: ricardo@visiers.com

(c) Doctor por la Universidad Alfonso X el Sabio

Correspondencia: Carlos Andreu Escario – carlos.andreu@yahoo.es

RESUMEN: La generación de energía a través de aerogeneradores marinos se ha convertido en la punta de lanza del desarrollo tecnológico de la energía eólica compitiendo en el muy corto plazo en viabilidad técnica y económica con los emplazamientos en tierra. El incremento de la potencia de las turbinas sumado al progresivo traslado hacia aguas cada vez más profundas, hasta profundidades próximas a los 200 metros en instalaciones experimentales marinas en aguas profundas, ha generado una demanda creciente de buques de instalación, operación y mantenimiento de estos parques. El presente trabajo analiza los requisitos de diseño de los distintos tipos de buques y cómo la arquitectura y construcción naval dan respuesta a las necesidades presentes del sector. Se describen los nuevos retos que la energía eólica marina plantea en un futuro inmediato a constructores y sociedades de clasificación de buques.

PALABRAS CLAVE: energía eólica, *offshore*, construcción naval.

ABSTRACT: *Generating energy through offshore wind turbines has become the spearhead of wind energy development competing in the very short economically with onshore installations. The increase in the power of turbines added to the progressive move into increasingly deeper waters has generated a growing demand for installation, operation and maintenance vessels. This paper analyzes the design requirements of different types of ships and how naval architecture and shipbuilding respond to the present needs of the sector. The new challenges posed by offshore wind energy in the immediate future builders and ship classification societies are described.*

KEY-WORDS: *shipbuilding, wind turbine, offshore wind power.*

SUMARIO: 1. Introducción 2. TIVs (*Turbine Installation vessels*) 3. Selección del buque instalador 4. Otros buques 5. Conclusiones 6. Bibliografía

1 Introducción

El contexto internacional actual sobre la energía está comprometido con la reducción de gases de efecto invernadero, con el aseguramiento de la disponibilidad y precios de los combustibles fósiles y con la seguridad energética desde todos sus aspectos. En este entorno internacional, la explotación de las energías renovables, especialmente la energía eólica, aparece como el factor indispensable que resuelve una compleja ecuación.

La energía eólica marina hoy, representa a su vez la mayor apuesta como oportunidad para Europa y es el factor clave de desarrollo de la llamada *economía azul* (*blue economy*) liderada tecnológicamente hoy por los países europeos tanto desde el punto de vista de ingeniería de implantación de proyectos en explotación como de investigación y desarrollo. En Europa se prevé un crecimiento hasta una capacidad productiva de 23,5 GW en el año 2020, triplicando aproximadamente la capacidad instalada a fecha de 2015.

Los esfuerzos actuales en investigación y desarrollo en la industria, universidades y laboratorios, apunta a una reducción en costes de capital y gastos operativos que hacen de esta fuente de producción masiva de energía una opción altamente competitiva en el año 2030, estimándose el valor del indicador LCOE (*Leveraged Cost Of Energy*¹) en 90 €/MWh para el año 2030.

Los escenarios contemplados hoy en Europa apuntan a una capacidad instalada de energía eólica marina para el año 2030 de 65 GW, potencia que representará el 25% de toda la electricidad generada en Europa. En este mismo escenario, los ahorros calculados en importaciones de combustible fósil en ese año 2030 serían aproximadamente de unos 18.000 millones de euros en Europa, siendo este escenario el que más trabajos de alta capacitación crea además de ser el más económico al compararlo con los escenarios analizados con alto componente de energía nuclear y/o manteniendo una elevada participación de energías convencionales.

Los parques eólicos marinos son instalados, operados y mantenidos mediante buques específicos para cada operación. En un principio se emplearon barcos provenientes de otros sectores, especialmente el petrolífero, o se adaptaron buques destinados a otras actividades. Sin embargo la creciente demanda de disponibilidad, operatividad en condiciones marítimas adversas y reducción de tiempo de los trabajos, ha llevado a una progresiva especialización de los buques. El presente trabajo analiza los distintos tipos de embarcaciones empleadas en el sector de la energía eólica marina, los principales factores que determinan su diseño así como las normativas que regulan su construcción y operación bajo el punto de vista del desarrollo de la arquitectura y construcción naval.

2 TIVs (Turbine Installation Vessels²)

Los primeros proyectos de instalación de parques eólicos marinos se llevaron a cabo empleando medios de transporte y elevación disponibles en el momento y de bajo coste. Este condicionamiento no fue un problema dado que se trataba de

¹ El LCOE o Leveraged Cost Of Energy (Coste de Energía Compensada) contempla todos los costes de generación de la energía por cada MW producido.

² TIV : Buques de instalación de aerogeneradores

proyectos pequeños de pocas turbinas en zonas marítimas protegidas. El último de estos proyectos, a la fecha de publicación de este artículo, la instalación de un parque eólico en la entrada del puerto de Copenhague conocido como Middelgrunden (Ilustración 1), supuso el punto de partida para las grandes instalaciones marinas.



Ilustración 1. Parque eólico Middelgrunden. Fuente: www-power-technology.com

El parque eólico Middelgrunden, referente pionero de este tipo de instalaciones en Dinamarca, consta de 20 turbinas de 2 MW de potencia cada una, instaladas en línea, de 102 metros de altura máxima sobre el mar, con los rotores (de 76 metros de diámetro) situados a una altura de 64 metros sobre el nivel del mar. El parque está sobre un lecho marino de 3 metros de profundidad media situado a 4,7 kms de la costa, y utilizó como puerto base de operaciones el de Copenhague.

El montaje se llevó a cabo mediante una barcaza autoelevable propiedad de Muhibbah Marine³. El proyecto constituyó un éxito, sin embargo, los grupos de interés afectados, asociaciones civiles y organizaciones de defensa del medio ambiente, llegaron a la conclusión a partir de la finalización de la instalación de que era necesario desarrollar unos equipos ad-hoc que permitieran no solo incrementar la capacidad de transporte y elevación sino que al mismo tiempo fueran capaces de operar en condiciones de mar abierto. [Ref. 01] (Ilustración 2)

³ Barcaza MEB JB1: 48,79 m de eslora, 30,50 m de manga, calado en operación de 3 m, capacidad de carga de 10 toneladas/metro cuadrado, hasta 40 personas trabajando día/noche.



Ilustración 2. Buque TIV Friederich Ernestine en instalación. Fuente: www.offshorewind.biz

La investigación de nuevos barcos para la construcción de parques eólicos marinos había comenzado y compañías como A2SE y *Mayflower Energy* encabezaron el desarrollo tecnológico de lo que se denominarían TIVs (*Turbine Installation Vessels*) o buques instaladores de aerogeneradores. Existen básicamente tres tipologías de buques de instalación de cimentaciones de aerogeneradores marinos. Los tres tipos se han utilizado ampliamente y en muchos casos adaptados a la tarea específica de la instalación de una turbina eólica en el mar, que es la operación más compleja a llevar a cabo.

Buques Jack-up⁴ autopropulsados. (SPIVs Self-Propelled Installation Vessels⁵)
(Ilustración 2)

Capaces de cargar las estructuras de cimentación con su propia grúa, transportarlas y colocarlas en su emplazamiento definitivo donde previamente se ha autoelevado por encima del nivel del mar con el fin de operar en condiciones similares a las de tierra. Posteriormente monta las turbinas con sus propios equipos de elevación. Se trata, por tanto, de un barco completamente autosuficiente, capaz de completar todas las fases del proyecto sin la colaboración de otros buques. Siendo el buque de mayor coste

⁴ Sistemas de elevación mediante columnas sobre las que se apoya el buque.

⁵ Buques autopropulsados para instalación de aerogeneradores marinos

constituye la opción más rentable por lo que es la tipología preferida en futuros proyectos, de ahí que varias unidades se encuentren actualmente en construcción.

Barcazas Jack-up remolcadas con sistema de posicionamiento (Ilustración 3)

Se trata de barcazas con sistemas de elevación Jack-up existentes, que han sido equipadas con equipos que permiten su geo posicionamiento en el lugar de trabajo. Sin embargo deben ser remolcadas para realizar los desplazamientos desde y hacia el puerto base. Son buques de menor tamaño que los autopropulsados dado que no requieren de el equipo específico de propulsión y, por ello, menos costosos. La barcaza permanece trabajando mientras otros buques menores suministran los materiales necesarios, de forma que maximiza el tiempo de permanencia en obra reduciendo el tiempo de montaje al mismo tiempo que requiere de menos capacidad de carga que el buque autopropulsado.



Ilustración 1. Heavy Lift Vessel. Fuente: www.ogfi.com

Equipos flotantes. (HLV Heavy Lift Vessels⁶)

Empleados para la instalación de *monopilotes* en aguas abrigadas, los equipos flotantes (no anclados) han dado buenos resultados, especialmente en aguas del Mar del Norte y Mar de Irlanda, no así para el montaje de turbinas. No obstante, *Vestas* y *Bugsier* emplearon equipos flotantes para el montaje de 10 turbinas de pequeño tamaño en la isla de Tunø (Dinamarca) (Ilustración 4).



Ilustración 2. Instalación en Tunø (Dinamarca) mediante equipos flotantes. Fuente: www.motiva.fi

El empleo de este tipo de equipo conlleva algunos problemas:

- El trasvase de pilotes y materiales entre buques es engorroso y en muchas ocasiones retrasa los trabajos más allá de lo esperado.
- Existen serios problemas de seguridad inherentes a la operación desde estos buques que los hacen poco aconsejables en determinadas situaciones.

Dado que la tendencia en el sector marino es ir hacia aerogeneradores de mayor potencia que permitan hacer la inversión más rentable, los buques autopropulsados se convierten cada día en la opción más versátil y económica para llevar a cabo los trabajos de instalación tanto de cimentaciones como de las propias turbinas eólicas.

3 Selección del tipo de buque instalador

Kurt Thomsen en su libro *Offshore wind* [Ref. 02] lleva a cabo un estudio de costes de instalación de un parque eólico marino constituido por 80 aerogeneradores

⁶ Buques provistos de medios de elevación de gran tonelaje.

situados a 100 millas de la costa. Considera dos hipótesis de cálculo: en una se emplean dos barcazas remolcadas y tres remolcadores que operan a una velocidad media de 6 nudos. En la otra situación, se dispone de un buque autopropulsado tipo Jack-up, de 9 nudos de velocidad media. Las barcazas tienen capacidad para transportar dos aerogeneradores mientras que el buque autopropulsado transporta ocho simultáneamente. A partir de costes diarios de operación obtenidos del mercado actual, resulta un coste de instalación de 11,9 M€ mediante el buque autopropulsado mientras que el mismo trabajo alcanza los 20 M€ en el caso de operar mediante barcazas remolcadas. Por tanto, el buque autopropulsado se muestra más eficiente económicamente para llevar a cabo los trabajos de instalación en parques eólicos marinos. La razón de por qué no se emplean en todos los proyectos es muy simple: no existe una flota suficiente para satisfacer la demanda actual mundial de instalación. Prueba de ello es la noticia publicada en la web Wind Energy el 24 de septiembre de este año con el título: *Offshore projects face vessel shortage for large turbines until 2018* [Ref. 03]. Cada proyecto debe ser estudiado individualmente y, especialmente en el caso de grandes parques eólicos, la solución vendrá dada por una combinación de ambos tipos de buques, determinada, entre otros factores, por la disponibilidad en el momento de llevar a cabo el proyecto, el coste diario de alquiler, su versatilidad, medios de elevación, etc.

Influencia de los distintos parámetros en el diseño del buque instalador

Eslora. Cuanto mayor sea la eslora (longitud) del barco que se emplee en la instalación de un parque, mejor será su comportamiento en malas condiciones climatológicas, especialmente frente a las olas. Por el contrario, la eslora es el factor determinante en el coste de fabricación, así a mayor eslora el coste se incrementa proporcionalmente, lo que redundará en un mayor coste de alquiler.

Manga. El ancho del buque (manga) está directamente en relación con su capacidad de asentarse en el fondo y de operar a una determinada profundidad ya que la manga determina el comportamiento del buque frente al oleaje transversal. Así a mayor manga, el balanceo es menor, permitiendo al barco posicionarse en condiciones adversas.

Altura. La altura del buque entendida como la distancia entre el fondo y la cubierta de trabajo, determina la rigidez del mismo y, por tanto, está directamente en relación con el número de soportes que necesitará para elevarse sobre la superficie del agua. Un barco menos rígido empleará más soportes (seis patas) que uno más resistente, que podrá operar con cuatro. Por otra parte, la altura entendida como francobordo (distancia de la cubierta a la superficie del agua) está reglamentada por la IMO (*International Marine Organization*⁷) por lo que la máxima carga estará limitada por esta normativa.

Calado. El calado (distancia desde la flotación al fondo del buque) determina la maniobrabilidad del barco cuando se encuentra operando a muy baja velocidad, especialmente en embarcaciones de mucha manga en proporción a la eslora como es el caso de los buques TIV. Por regla general, es deseable que el calado del barco se encuentre entre los 4,5 y 7 metros. Lógicamente el calado está directamente relacionado con la carga transportada por lo que es un factor determinante durante el proceso de diseño del buque.

⁷La IMO en España se conoce como OMI (Organización Marítima Internacional)

Parámetros operativos clave

La Unión Europea ha impulsado la realización de un proyecto en el que participan – en consorcio – las principales empresas del sector agrupadas bajo el acrónimo de LEANWIND (*Logistic Efficiencies And Naval architecture for Wind Installations with Novel Developments*). El proyecto de cuatro años de duración (2013-2017) tiene como objetivo aplicar la teoría del *Lean Manufacturing* desarrollada en la producción de vehículos por Toyota, a las fases críticas de un proyecto de instalación eólica marina en aguas profundas. En su entregable 3.2, publicado el 8 de mayo de 2015, se abordan los parámetros críticos en el diseño de los buques de instalación y mantenimiento de parques eólicos [Ref. 11]. En él, se señalan los siguientes parámetros a considerar en el momento de diseñar un buque de I&O&M (*Installation & Operation & Maintenance*⁸):

- Dimensiones principales (ya descritas anteriormente).
- Condiciones operativas durante la elevación.
- Capacidad de acomodación e instalaciones.
- Longitud de las columnas y velocidad de elevación.
- Capacidad de elevación de la grúa y límites operativos para su uso.
- Sistema de posicionamiento dinámico.
- Superficie de carga en cubierta.

El informe hace especial hincapié en la estabilidad del buque en carga determinada por:

- La posición de los elementos de elevación en la cubierta (grúas).
- Los grandes elementos transportados en cubierta y su centro de gravedad.

Los buques deben ir provistos de elementos activos de estabilización (tanques de lastre) con el objeto de compensar el posible desplazamiento del centro de carena respecto del centro de gravedad del buque en carga, evitando así un asiento excesivo del buque en navegación a plena carga. El transporte de las torres o palas sobre cubierta se convierte así en un factor limitante de la estabilidad del buque. (Ilustración 5). La estabilidad en buques tipo autoelevables está siendo objeto de numerosos estudios, pruebas en canal y simulaciones numéricas, debido a que se trata de un factor determinante en el diseño de estos buques.[Ref. 04], [Ref. 05], [Ref. 06]

⁸ Instalación, operación y mantenimiento.



Ilustración 5. Buque Sea Power, propiedad de A2SEA. Fuente: <http://www.a2sea.com>

Requerimientos basados en el aerogenerador:

- Capacidad de la grúa para elevar los *monopilotes* (hasta 500 t) y piezas de transición (200 t).
- Profundidad del agua. Determina la capacidad de elevación del buque durante la instalación de la estructura de cimentación de las torres directamente en relación con la longitud de la cimentación de las torres.
- Peso de los componentes a transportar hasta la zona de montaje (número y nivel de pre ensamblaje en puerto).
- Altura del eje sobre la superficie del agua, determina la capacidad de alzado de la grúa.
- El grado de premontaje en puerto de los diversos componentes determina la capacidad de los medios de elevación que se deben disponer en la zona de instalación. Dependiendo del modelo de aerogenerador el premontaje en tierra es mayor requiriendo mover hasta 700 t como es el caso del MHI Vestas V164 de 8 MW preparado para su transporte totalmente ensamblado en puerto.

Disponibilidad del buque

La disponibilidad del buque medida en términos de condiciones climáticas requeridas para la operación del mismo suponen un factor determinante a la hora de su diseño. Los límites de las distintas fases de operación se muestran en la Tabla 1.

Fases de operación	Velocidad del viento (m/s)	Altura máx. de ola significativa (m)	Espacio de aire sobre LAT ⁹	Velocidad de la corriente en superficie (m/s)	Velocidad de la marea en superficie (m/s)	Período asociado (s)
<i>Entrada y salida de puerto</i>	15,3	2,8 (0°- 45°)	Sin límite	0,26	1	16,05
<i>Trayecto desde/hacia el parque</i>	15,3	2,8 (0°- 45°)	Sin límite	0,26	1	16,05
<i>Situación, aproximación y posicionamiento</i>	15,3	2,8 (0°- 45°)	Sin límite	0,26	1	16,05
<i>Elevación</i>	15,3	2,8 (0°- 45°)	Sin límite	0,26	1	16,05
<i>En elevación</i>	36,1	10	7,8 m	0,61	1	16,05
<i>Operación de la grúa</i>	16 para grúa de 50 t o 20 para grúa de 600 t	10	7,8 m	0,61	1	16,05

Tabla 1. Límites de las distintas fases de operación durante la instalación del generador. Fuente: [http://www.vroon.nl/Files/VesselParticulars/MPI%20RESOLUTION201305071005 32.pdf](http://www.vroon.nl/Files/VesselParticulars/MPI%20RESOLUTION201305071005%2032.pdf)

Además, los operadores de la industria consultados recomiendan las siguientes limitaciones debidas a la velocidad de viento en las siguientes operaciones:

- Velocidad del viento inferior a 10 m/s durante la elevación de las palas.
- Velocidad del viento inferior a 12-15 m/s durante la elevación del cuerpo electro mecánico y de control y las secciones del mástil aerogenerador.

Podemos resumir en los siguientes, lo principales factores que determinan el diseño del buque de instalación:

- Máxima carga en cubierta: determina el peso y número de los componentes de aerogenerador que se pueden transportar en cada viaje.
- Espacio libre en cubierta: determina el número de turbinas que se trasportan en cada viaje y el grado de premontaje en puerto.
- Capacidad de elevación de las grúas: limita el número de movimientos necesarios por cada aerogenerador y el premontaje en tierra.
- Longitud de las patas de elevación, está en relación con la capacidad del buque de montar el buje a una altura determinada y, por tanto, del tipo de aerogenerador que podrá instalar.

⁹ LAT = Lower Astronomical Tyde: Marea baja escorada

Capacidad de carga

Merece la pena detenerse en el análisis de lo que se denomina como capacidad de carga en los STIV (*Selfpropelled Turbine Installation Vessel*¹⁰) dada la trascendencia de este factor en la operación del buque y en su adaptabilidad a los objetivos marcados durante su diseño. En un buque se definen los siguientes conceptos:

- **Peso muerto (*Dead Weight*):** es el peso total del buque, su carga, combustibles, lastre, lubricantes, personal, provisiones, etc. En esta situación, el buque alcanza su máximo calado.
- **Peso en rosca (*Lightweight*):** es el peso del buque (el acero y equipos) sin combustibles, lastre, etc.
- **Capacidad de carga (*Cargo capacity*):** es el peso que el buque es capaz de transportar, es decir, el peso muerto menos el peso en rosca. Hay que tener en cuenta que los combustibles, aceites, provisiones y lastre se consideran parte de la capacidad de carga, por lo que esta cifra debe ser considerada con precaución a la hora de valorar la verdadera capacidad de transporte de aerogeneradores y sus componentes.

Propulsión y autoelevación.

Los sistemas de propulsión empleados en la industria naval son MDO (*Marine Diesel Oil*) o MGO (*Marine Gas Oil*) que actúan sobre una planta generadora eléctrica. Dado que nos encontramos en una actividad industrial con un marcado carácter medioambiental, los motores instalados deberán cumplir con la normativa Tier II que limita la emisión de gases NOx (de obligado cumplimiento para buques de construcción posterior a 2010). La potencia de los elementos propulsores determinará el tiempo de viaje hasta la zona de trabajo, por lo que deberá ser cuidadosamente considerado. Como ejemplo, el buque *Pacific Orca* construido por Knud E. Jansen y entregado en 2003 está equipado con 4 propulsores de 3,4 MW ABB a popa, cuatro hélices de proa (*bow thrusters*) dos de ellos de túnel y dos retráctiles de 2,2 MW cada uno totalizando 22,4 MW de potencia [Ref. 07]. Los elementos propulsores forman parte al mismo tiempo del sistema de posicionamiento dinámico (DP¹¹) mediante el cual el buque mantiene su posición durante las operaciones de autoelevación. (Ilustración 6).

¹⁰ Buque de instalación de aerogeneradores con medios propios de propulsión (no remolcado)

¹¹ *Dynamic Positioning*

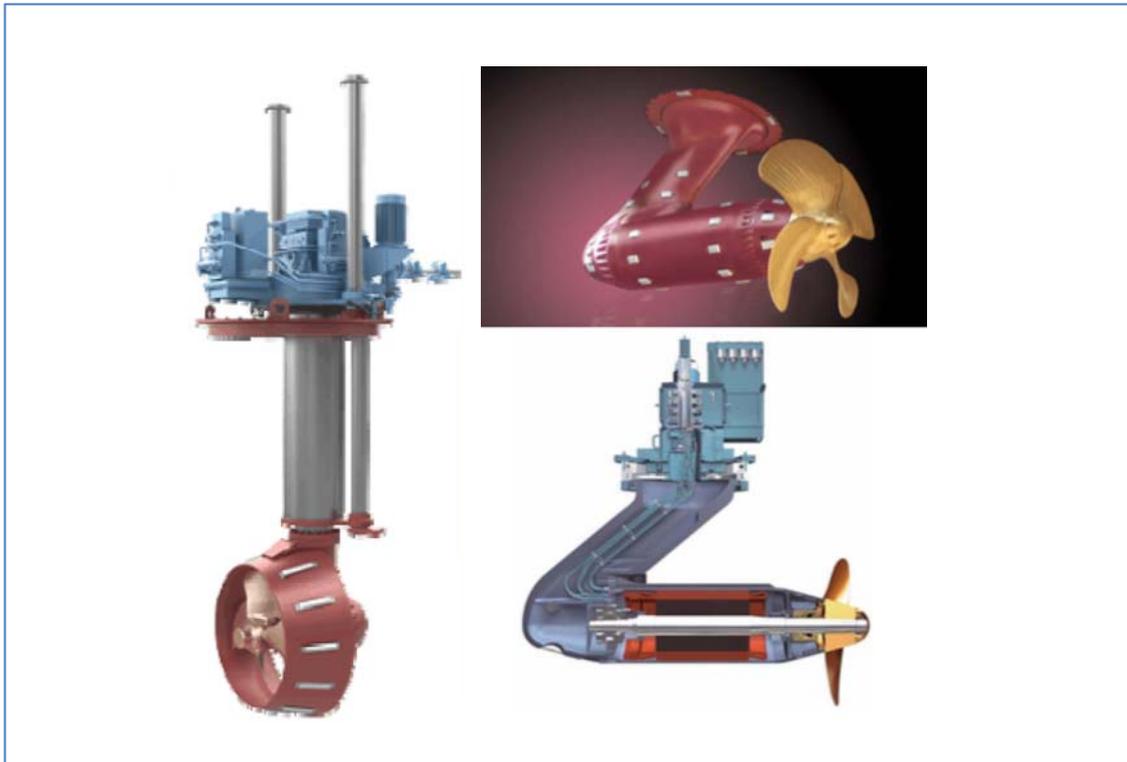


Ilustración 6. Equipo propulsor del "Pacific Orca". A la izquierda bow thruster a la derecha Compact Azipod de ABB. Fuente: Knud E. Hansen

La maniobra de elevación se realiza mediante las patas con las que está equipado el barco accionadas mediante un sistema eléctrico independiente del propulsor que también alimenta a la grúa principal ya que ésta no opera simultáneamente con el sistema de movimiento de las patas. El número de ellas depende de las dimensiones principales del buque (eslora y manga), su peso muerto y su resistencia estructural. Habitualmente se emplean cuatro o seis (Ilustración 7). Si la distancia entre la grúa principal y la pata situada en la banda opuesta es fija, el buque con cuatro patas será más ancho que el de seis para los mismos requisitos de diseño, dado que los *spudcans*¹² serán un 45% mayores. De esta forma, al ser más ancho y de menor eslora, el barco equipado con cuatro patas presentará una mayor resistencia a la propulsión y menor estabilidad direccional. A este factor se añade el peor comportamiento del barco con cuatro patas frente a una situación de fallo en una de ellas. El factor crítico a la hora de decidirse por un buque con seis patas es su mayor coste.

¹² *Spudcan* es el cono invertido, u otra construcción similar, que se coloca al final de las patas con el fin de evitar que ésta quede incrustada en el fondo.

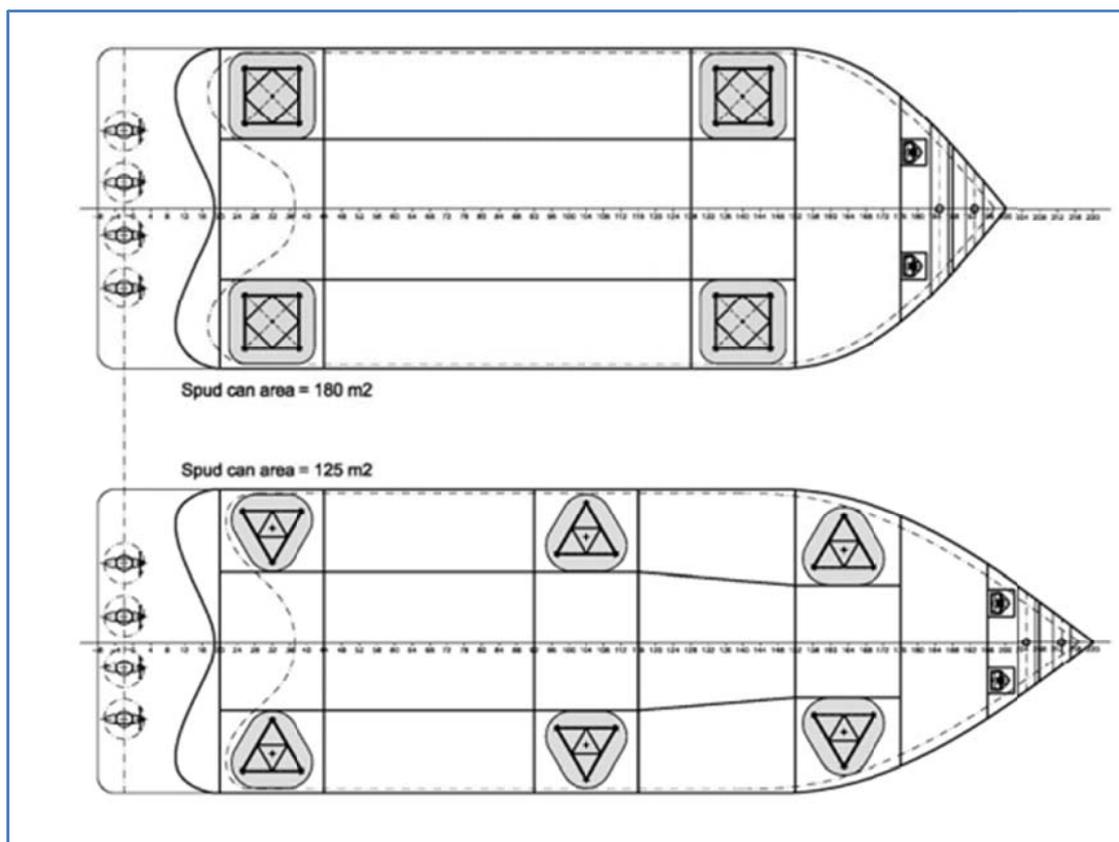


Ilustración 7. Configuración de buque con cuatro y seis patas de elevación. Fuente: Knud E. Hansen

A su vez las patas pueden estar construidas mediante cerchas o en chapa, bien en forma cilíndrica o en forma cuadrada. Las primeras cuentan con la ventaja de su menor peso mientras que las de chapa son más sencillas y económicas.

El sistema de movimiento de estas patas puede ser de dos tipos, eléctrico o hidráulico. Los sistemas hidráulicos son más fiables, su diseño es más compacto, son más resistentes y su coste es menor que los sistemas eléctricos. Por el contrario requieren de un mantenimiento a largo plazo más complejo debido a su elevado número de componentes, además del riesgo de vertido de aceites que este tipo de instalación conlleva. (Ilustración 8)

Los sistemas de elevación eléctricos son más rápidos (velocidades medias de elevación del buque de alrededor de 1 m/min), requieren de un menor mantenimiento a largo plazo, y poseen redundancia por diseño (es posible operar con uno o dos fuera de servicio). En su contra, son más caros que los sistemas hidráulicos porque requieren sobredimensionarlos a fin de evitar su desgaste por fatiga. Este factor debe ser considerado con cautela dado que un buque de estas características hará uso de su sistema de elevación hasta 280 veces al año con el fin de rentabilizar su tiempo de operación.

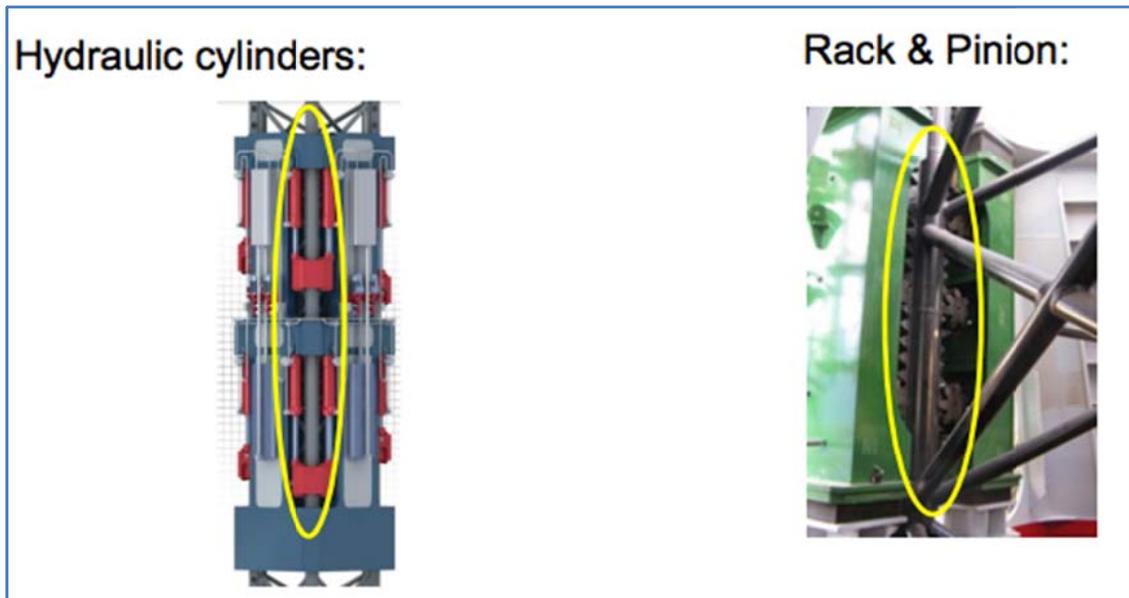


Ilustración 8. Sistemas de elevación hidráulico y eléctrico. Fuente: Aker Solutions

Reglamentación

Las especiales características de operación de los TIVs provocan que su reglamentación se componga de diferentes reglas, así son de ámbito general de aplicación :

- MODU Code (IMO). *Code For The Construction And Equipment Of Mobile Offshore Drilling Units.*
- SOLAS (IMO) *Safety of Life at Sea.*
- SPS (*Sanitary and Phytosanitary Measures*).
- Reglas de la Sociedad de Clasificación correspondiente.
- MARPOL (Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los Buques)

La reglamentación de esta tipología tan específica de buque plantea una serie de cuestiones actualmente bajo debate internacional. Por un parte, como todo sistema que se desplaza en el mar, los TIVs están sujetos a la normativa internacional IMO en cuanto a contaminación (MARPOL), seguridad (SOLAS) y construcción. Ahora bien, un buque de instalación de aerogeneradores transporta una tripulación que puede superar las 100 personas por lo que serán de aplicación las regulaciones referentes a buques de pasaje (>12 personas). Asimismo podríamos decir que opera en dos situaciones completamente distintas: una primera de travesía o navegación y una segunda de operación en situación estática una vez elevado sobre la superficie del agua. En esta segunda situación la regulación debe corresponder a la entidad responsable de seguridad y salud, mientras que en navegación deberá someterse a los reglamentos propios de dicha contingencia.

Las trece principales Sociedades de Clasificación están agrupadas bajo la IACS (*International Association of Classification Societies*), entre ellas se encuentran

Lloyds Register of Shipping (LR), *Det Norske Veritas (DNV)*, *Germanischer Lloyd (GL)* y *American Bureau of Shipping (ABS)*. DNV fue la primera en promulgar una reglamentación específica para TIVs basada en la existente para buques de perforación y operación de instalaciones petrolíferas (*oil & gas*) [Ref. 08]. El objetivo de la clasificación de un buque es garantizar su resistencia estructural y la fiabilidad de sus sistemas de propulsión, gobierno, generación de energía y sistemas auxiliares. Para ello las sociedades de clasificación emiten sus propias reglamentaciones a la vez que verifican el cumplimiento de las normativas propias del país de abanderamiento del buque.

El proceso de clasificación comienza durante la fase de diseño centrándose principalmente en la fabricación e instalación de los elementos principales así como en las especificaciones técnicas. Durante la construcción los técnicos de la sociedad de clasificación inspeccionan el buque con el fin de verificar que está siendo construido conforme a los planos aprobados y las reglas de la propia sociedad. El inspector visita también las instalaciones de los proveedores principales para verificar que los componentes suministrados cumplen con la normativa. Finalmente asisten a las pruebas de mar previas a la entrega del buque al armador. Una vez verificadas todas las fases, la sociedad emite el correspondiente certificado de clasificación.

Ya con el buque en operación, la sociedad es responsable de efectuar inspecciones periódicas en las que comprueba que los niveles estándares se siguen cumpliendo. Estas inspecciones siguen un ciclo de cinco años en los que se realizan inspecciones anuales, e intermedias. Al final del ciclo se debe renovar la certificación original del buque para lo cual se lleva a cabo una inspección especial en seco y a flote.

Al tratarse de un sector tremendamente dinámico en el que los nuevos diseños se suceden, las sociedades de clasificación están obligadas no solo a seguir las evoluciones sino que deben adelantarse mediante acuerdos de colaboración con los principales diseñadores y constructores navales, de manera que los buques en fase de diseño o producción puedan ser objeto de certificación previamente a su entrega. Nos encontramos, por tanto, en una situación que requiere una agilidad poco común en un sector como el naval.

4 Otros buques

Europa contaba a mediados de 2014 con 7.343 MW de energía eólica marina instalada repartidos en 2.304 aerogeneradores en 73 parques. Cada turbina requiere, por término medio, seis visitas de mantenimiento al año, una de ellas programada (mantenimiento preventivo) y las cinco restantes correspondientes a intervenciones por averías (mantenimiento correctivo). Esto significa que cada día más de 40 aerogeneradores deben ser revisados y las cifras siguen aumentando cada año.

La instalación, operación, mantenimiento y desinstalación de un parque eólico marino requiere la participación de buques de no menor importancia que los TIVs que responden, principalmente a tres categorías: transporte de personas (*Crew Transfer Vessels CTVs*), buques polivalentes (*Multipurpose Vessels MPVs*) y buques de servicio (*Service Vessels SOVs*).

Otros buques necesarios para la instalación

Buques de tendido de cables (Cable lay vessel) (Ilustración 9)

Los primeros parque eólicos marinos estaban situados en aguas someras cercanas a la costa por lo que los trabajos de tendido de cables podían ser realizados desde barcazas equipadas con los elementos necesarios.

A medida que los parques se fueron separando de la costa y aumentaron su potencia instalada, se requirieron cables con mayor protección lo que exigió la participación de buques más sofisticados. La última generación de buques de tendido de cables la forman embarcaciones multipropósito capaces de tender cable y monitorizarlo simultáneamente, alcanzado hasta las 8.500 t de peso muerto. [Ref. 09]



Ilustración 9. Buque cablero "Nexus". Fuente: Van Oord

Flotel (Ilustración 10)

El empleo de buques de acomodación de personal ha aumentado a medida que los parques eólicos incrementan su potencia instalada y se sitúan a mayor distancia de la costa. Los trabajos de instalación y mantenimiento requieren un mayor número de personal para el que se debe proveer de instalaciones donde permanecer durante prolongados períodos de tiempo. Para ello se emplean desde cruceros de pasaje anclados hasta plataformas autoelevables que al mismo tiempo dispongan de instalaciones de almacenamiento y talleres. Estos buques hacen posible la operación 7/24 sin necesidad de realizar viajes frecuentes con la consiguiente pérdida de tiempo de trabajo en parque. En este caso se trata de una tipología que ha sido trasladada del sector petrolífero donde se vienen utilizando desde hace tiempo [Ref. 10].



Ilustración 10. Flotel "Edda Fides" construido por el astillero español Barreras en Vigo. Fuente: <https://vadebarcos.wordpress.com/>

Buques de apoyo (Construction Support Vessels) (Ilustración 11)

Se trata de buques multipropósito, provistos de medios de elevación, helipuerto para transporte de personal y espacio para carga de diversas dimensiones y diseños, muchos de ellos provenientes del sector del petróleo donde se vienen empleando desde hace años. Sus características (autonomía, calado, medios de propulsión, etc.) están condicionadas a la zona de operación y habitualmente disponen de sistemas de posicionamiento dinámico que les permiten realizar operaciones de trasvase en la zona del parque. Dadas sus características, este tipo de buque también es empleado durante operaciones de mantenimiento donde los TIVs se hacen más lentos y costosos.

Buques de transporte de personal (Crew Transfer vessels CTVs)

Se trata de pequeños barcos de alta velocidad (20-30 nudos) empleados para transportar personal técnico, herramientas y repuestos con el fin de realizar labores de mantenimiento y reparación que puedan ser resueltos sin la necesidad de equipos pesados. Con una capacidad de carga reducida (1,5-3 t), también son empleados durante la fase de instalación dada su rapidez de respuesta [Ref. 12].

Existen distintos diseños que dan respuesta a los requisitos planteados por esta tipología de buques: monocascos, catamaranes y SWATH (*Small Waterplane Area Twin Hull*¹³).



Ilustración 11. Buque offshore multipropósito. Fuente: <http://maritime-connector.com/>

Monocascos (Ilustración 12)

Este tipo de barco, empleado en los primeros parques, está siendo sustituido actualmente por multicascos y *swath* debido a su limitación de acceso a la turbina por altura de olas (<1m), la imposibilidad de incorporar medios de elevación y su limitado espacio para acomodación de personal técnico.

Buques de transporte de personal (Crew Transfer vessels CTVs)

Se trata de pequeños barcos de alta velocidad (20-30 nudos) empleados para transportar personal técnico, herramientas y repuestos con el fin de realizar labores de mantenimiento y reparación que puedan ser resueltos sin la necesidad de equipos pesados. Con una capacidad de carga reducida (1,5-3 t), también son empleados durante la fase de instalación dada su rapidez de respuesta [Ref. 12].

Existen distintos diseños que dan respuesta a los requisitos planteados por esta tipología de buques: monocascos, catamaranes y SWATH (*Small Waterplane Area Twin Hull*¹⁴).

¹³ Catamarán de área de flotación reducida.

¹⁴ Catamarán de área de flotación reducida.

Monocascos (Ilustración 12)

Este tipo de barco, empleado en los primeros parques, está siendo sustituido actualmente por multicascos y *swath* debido a su limitación de acceso a la turbina por altura de olas (<1m), la imposibilidad de incorporar medios de elevación y su limitado espacio para acomodación de personal técnico.



Ilustración 12. Barco monocasco de transporte de personal. Fuente: www.offshorewind.biz

Catamaranes (Ilustración 13)

El catamarán se ha convertido en la opción más habitual para el traslado de personal a los parques. Su diseño con dos cascos le permite navegar en condiciones adversas, transportar un mayor número de personas en menor tiempo y acceder al aerogenerador con mayor altura de ola que los monocascos (hasta 1,2 m).

SWATH (Small Waterplane Area Twin Hull). (Ilustración 14)

Los buques tipo *swath* están actualmente entrando en el mercado de la energía eólica marina con fuerza. Se trata de un catamarán (dos cascos) cuya sección en la superficie de flotación es mínima incorporando sendos volúmenes bajo la flotación en forma fusiforme lo que le dota de una gran flotabilidad, reduciendo la resistencia por formación de ola sin incrementar la resistencia al avance, lo que le permite alcanzar

altas velocidades con menos potencia propulsora. Su mayor calado permite situar las hélices a mayor profundidad aumentando su eficiencia propulsora. La menor superficie en flotación dota a estos barcos de mayor estabilidad pudiendo operar en condiciones de mar adversas.



Ilustración 13. Catamarán de transporte de personal. Fuente: www.damen.com



Ilustración 14. Buque offshore tipo swath. Fuente: www.mtu-report.com

Buques polivalentes y de servicio (Ilustración 15)

Bajo esta denominación se encuentran una amplia tipología de buques, desde barcazas autoelevables hasta pequeños barcos de transporte de material. Su elección depende de la operación a realizar en el parque. Así, si se trata de reemplazar un gran componente, se recurrirá a una pesada barcaza autoelevable, si bien su baja velocidad en navegación, el tiempo que requiere la elevación y su limitada operatividad por causas climatológicas la desaconsejan para llevar a cabo labores que requieran una intervención rápida.

En los últimos años los buques de mediano porte con capacidad para acomodar a los técnicos y trasladarlos hasta los aerogeneradores están aumentando su presencia en los parques. Con espacio para transportar material de repuesto y equipados con talleres de mantenimiento, estas embarcaciones pueden permanecer varias semanas en el parque para lo que disponen de sistemas activos de estabilidad que reducen el incómodo balanceo una vez fondeados así como de instalaciones que permiten a sus ocupantes mantenerse en contacto con sus familias durante prolongados períodos de tiempo.



Ilustración 15. Buque de servicio offshore (OSV) “ESVAGT”. Fuente: www.esvagt.com

5 Conclusiones

La industria de la generación eólica marina se encuentra en constante desarrollo impulsada por la creciente creación de parques, especialmente en Europa. El incremento de la distancia de los aerogeneradores a la costa propicia el desarrollo de todo tipo de buques necesarios en las distintas fases de instalación, operación y mantenimiento. Quedan atrás los primeros años en que el sector empleaba buques transformados para satisfacer una demanda escasa y geográficamente limitada a las aguas someras del Mar del Norte. Los requisitos de operatividad son cada vez más exigentes de tal modo que los nuevos diseños deben satisfacer elevados estándares de disponibilidad, fiabilidad y eficiencia [Ref. 03]. Factores como la capacidad de acomodación de personal técnico, potencia de elevación de las grúas, superficie disponible de carga en cubierta, velocidad de navegación o autonomía, determinan las dimensiones principales, estructura, potencia propulsora o sistema de posicionamiento dinámico a la hora de definir los parámetros de diseño de los nuevos buques.

Todo lo expuesto, nos induce a pensar que los buques de instalación deberán incrementar su porte a fin de estar capacitados para transportar aerogeneradores de mayores dimensiones, dada la tendencia actual hacia el incremento de la potencia de éstos que redundará en un aumento de su tamaño. Buques de tipo autoelevables con grandes superficies de almacenamiento en cubierta y capacidad de elevación por encima de las 1000 t se convertirán en la tipología más frecuente. En este sentido arquitectos y diseñadores navales deberán hacer frente a nuevos retos optimizando los equipos de abordaje y adaptándolos a los nuevos requisitos.

Los catamaranes se han mostrado como los más eficientes a la hora del transporte y acomodación del personal técnico de los parques. Su mayor maniobrabilidad sumada a la velocidad y capacidad de operación en condiciones climatológicas adversas los convierten en el buque más idóneo para este tipo de actividad. En el corto plazo se prevé un incremento en su desplazamiento para dar cabida a un mayor número de personas y equipos, aumentando su capacidad de estiba y elevación.

Otras tipologías como buques de tendido de cable o buques de acomodación de personal trabajador del parque no parece que vayan a experimentar un cambio sustancial en cuanto a su diseño dado que aquellos buques provenientes de otros sectores (petróleo o telecomunicaciones) se han mostrado eficientes a la hora de llevar a cabo las tareas requeridas por el sector de los parques eólicos.

Las sociedades de clasificación deben adaptarse a este entorno dinámico, alcanzando acuerdos con los principales constructores que permitan una constante actualización de las normas constructivas que garanticen la seguridad de las tripulaciones y técnicos a bordo.

No cabe duda de que el futuro traerá nuevos desarrollos en arquitectura y construcción naval y que los equipos de diseño se deberán enfrentar a retos que ahora desconocemos a medida que los aerogeneradores aumenten su potencia y los parques se alejen en un futuro – ya muy próximo – hacia aguas profundas más alejadas de las costas.

6 Bibliografía

- [Ref. 01] DOUGLASS WESTWOOD. (2013). *Assessment of Vessel Requirements for the U.S. Offshore Wind Sector*. Douglass Westwood.
- [Ref. 02] THOMSEN, K. E. (2014). *Offshore wind*. Elsevier- Academic Press.
- [Ref. 03] FC Business Intelligence. (24 de 09 de 2015). *Wind Energy Update*. Retrieved 2 de 12 de 2015 from Wind Energy Update: <http://analysis.windenergyupdate.com>
- [Ref. 04] LV, T., XU, C.-h., & CHEN, G.-m. (2015). Stability Analysis of Offshore Wind Turbine Installation Jack-Up Vessel Based on Multi-attribute Decision Making Theory. *Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference*. (pp. 602-607). Hawaii (USA): International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE).
- [Ref. 05] ZHANG, Y.-K., LI, Y.-J., & WANG, Y. (2013). Numerical analysis on standing stability of wind turbine installation vessel. *Journal of Jiangsu University* , 239-243.
- [Ref. 06] SUNGWOOK, L., & BOOKI, L. (2015). A numerical study on manoeuvrability of wind turbine installation vessel using OpenFOAM. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* , 466~477.
- [Ref. 07] KNUD E. HANSEN. (2010). *Design of Pacific Orca*. Helsingør: Knud E. Hansen.
- [Ref. 08] Det Norske Veritas. (Abril de 2011). Standard for Classification of wind turbine installation unit. *Offshore Standard Det Norske Veritas DNV-OS-J301*.

- [Ref. 09] Energy Institute. (2014). *Construction vessel guideline for the offshore renewables industry*. Londres: Energy Institute.
- [Ref. 10] ORECCA. Offshore Renewable Energy Conversion Platforms Coordination Acts. (2013). *Offshore Infrastructure: Ports and Vessels*. EEC.
- [Ref. 11] LEANWIND Consortium. (2014). *D3.2 - Key design parameters and criteria related to installation and maintenance vessels design; their layouts, crane operations and access systems*. Unión Europea. Bruselas: LEANWIND Consorcio-EU.
- [Ref. 12] European Community ERDF. (2010). *Vessels and platforms for the emerging wind and wave power market*. EEC.