

Tecnología ELISA. Torre eólica offshore de hormigón, autoflotante y telescópica

ELISA Technology. Concrete Offshore Wind Tower, Self-Floating and Telescopic

José Serna¹, Javier Nieto^{2*}, Lara Cerdán³

Resumen

Esteyco es una empresa generalista de ingeniería civil con 47 años de historia y 20 años de experiencia en la industria eólica. En particular, es puntera y pionera en el sector de las torres eólicas prefabricadas de hormigón y, como tal, hace ya 7 años, reconoció la necesidad de introducirse en el mercado eólico offshore, y buscar, mediante el I+D+i, nuevas fórmulas y productos mejorados que le permitiesen mantener una posición de liderazgo tecnológico y de conocimiento en el sector de la energía.

Así es como surgió la tecnología ELISA que se ha desarrollado durante dichos años, con fondos de distintos programas de investigación, entre los que destacan el programa europeo H2020 (proyecto H2020 SME Instrument “ELISA” y el H2020 LC3 “ELICAN”, en concreto). Esta tecnología, de torres eólicas offshore, comprende una cimentación por gravedad (Gravity Base System – GBS) autoflotante en su transporte marino, junto a una torre telescópica autoelevable, ambas de hormigón. La flotabilidad de la estructura conjunta, y la configuración telescópica de la torre, permiten que cada unidad pueda ser totalmente montada en tierra, incluida la turbina, para luego ser remolcada de manera convencional a su posición definitiva en el mar. Una vez allí, se lastra hasta el fondo marino y es auto-izada, mediante gatos hidráulicos hasta su altura final.

En particular, el proyecto ELICAN consiste en la construcción de un prototipo de torre con la tecnología ELISA, a escala real. La construcción y diversas pruebas se están llevando a cabo en la actualidad en Gran Canaria.

Palabras clave: Eólica, offshore, torres, hormigón, flotante, telescópica, costes.

Abstract

Esteyco is a civil engineering consulting firm with 47 years of history and 20 years of experience in the wind industry. More specifically, it is a pioneering and leading company in the field of precast concrete wind towers. As such, 7 years ago we decided to enter the offshore wind market in order to search, through R & D, new improved formulas and products to maintain our knowledge and technological leadership in the wind sector.

And that is how the ELISA technology commenced. This technology has been developed for many years with funds of different research programmes, for instance, the European programme Horizon 2020 (H2020 SME Instrument “ELISA” and H2020 LC3 “ELICAN” projects). The technology, for offshore wind towers, consists of a self-floating gravity base (Gravity Base System – GBS) and a self-lifting telescopic tower, both made of concrete. The self-floating nature of the whole structure and the tower’s telescopic configuration make it possible to assemble each unit onshore, including the turbine, to be towed by conventional means to its final position. Then, it is ballasted on the seabed and it is lifted to its operating height by means of conventional out-of-the-shelf heavy-lift strand jacks.

Specifically, the ELICAN project consists of building a full-scale tower prototype using the ELISA technology. Its construction and the required tests are being performed on the island of Gran Canaria.

Keywords: Offshore wind energy, tower, concrete, floating, telescopic, costs.

1. INTRODUCCIÓN. ESTADO DEL ARTE

1.1. Tipologías existentes de estructuras eólicas offshore

La figura 1 muestra la tipología y número de cimentaciones para aerogeneradores offshore instaladas a final de 2014 en Europa. La misma figura muestra representaciones

de las tres tipologías que destacan como las más empleadas hasta la fecha: cimentaciones de gravedad, monopilotes y celosías o jackets. De entre ellas, el monopilote predomina claramente, habiendo sido la opción escogida en casi un 80% de los casos hasta hoy. La solución de gravedad le sigue con algo más del 10% de los casos, mientras que la cuota de utilización de los jackets se sitúa hoy en el entorno del 5%.

Varios de los parques de primera generación, incluyendo el primer y pionero parque de Vindeby (1991) o el primer gran parque comercial con turbinas multimegawatio en Middelgrunden (2000), se instalaron sobre cimentaciones de gravedad, que siguen hoy operativas y han un tenido

* Autor de contacto: javier.nieto@esteyco.com

¹ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Chief Technology Officer, Esteyco.

² Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director División Offshore, Esteyco.

³ Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Responsable Proyectos I+D+i, Esteyco.



Figura 1. Cuota de utilización y representación de las distintas tipologías de cimentación a finales de 2014 (Fuente: EWEA).

un comportamiento muy satisfactorio haciendo gala de su natural robustez.

Pocos años después, se introdujo la solución del monopilote, empleada por primera vez en el parque de Lely (1994) y ya a gran escala con aerogeneradores multimegawatio en el parque de Horns Rev (2002). La tipología consiste en un sencillo pilote metálico de gran dimensión, con un diámetro análogo al de la propia torre a la que da continuidad. El monopilote se hinca varias decenas de metros en el fondo marino y en la solución más habitual se le añade en cabeza una importante pieza de transición a través de la cual queda unido a la base de la torre.

En la primera década de este siglo, se trabajó intensamente en el desarrollo de soluciones que pudiesen llenar el vacío que se preveía que el monopilote dejaría más allá de los 25-30 m de profundidad. Entre dichas soluciones se contaban diversos desarrollos de cimentaciones autoflotantes de gravedad, y distintas tipologías de jackets, como soluciones ambas amplia y satisfactoriamente usadas en otros sectores y en particular en el oil&gas, lo que las convertía en la opción natural para la siguiente generación de parques más profundos y máquinas más pesadas. Así, los jackets vieron su primera aplicación en la eólica marina a final de dicha década, en parques como Beatrice o el primer parque alemán de Alpha Ventus (2009). Conceptualmente claras, estas celosías emplean tubos metálicos y pueden adoptar diversas formas aunque hasta la fecha han sido casi siempre de 4 patas de suave inclinación. En general apoyan en el fondo a través de otros tantos pilotes hincados convencionales de reducido

diámetro y que, al contrario que el monopilote, reciben fundamentalmente carga vertical.

Finalmente, cabe comentar que, sin embargo, y contra el pronóstico generalizado, los últimos años han demostrado que ese umbral de aplicabilidad de las cimentaciones con monopilote podía llevarse bastante más allá de lo que el sector en general venía anticipando. Ello ha dado lugar al nacimiento de la siguiente generación de monopilotes, llamados XL o XXL, cuya viabilidad técnica para parques en el entorno de los 35-40 m y 6 MW de potencia unitaria se da ya por demostrada.

1.2. Procesos de instalación de parques eólicos marinos

Los procesos y medios de instalación son un aspecto absolutamente decisivo en la idoneidad, economía, riesgo y escalabilidad de cualquier solución que pueda plantearse para la construcción de parques eólicos marinos. Hasta la fecha, la instalación de cada una de las más de 3 000 cimentaciones, torres o aerogeneradores marinos que operan en el mundo ha tenido siempre un elemento en común: el uso de grandes medios marinos de heavy-lift. El protagonismo de estos impresionantes medios es muy acentuado, hasta el punto de convertirse en no pocas ocasiones en un cuello de botella que por un lado condiciona la logística y gobierna los costes y riesgos de la construcción de parques, y por otro limita la capacidad de la industria ante el nuevo paradigma hacia el que el sector se dirige: máquinas más grandes en aguas más profundas.



Figura 2. Barco Jack-up instalando monopiles y gran grúa flotante instalando jackets.

Básicamente dichos medios se agrupan en dos categorías: las grandes grúas flotantes y los barcos jack-up equipados con grandes patas descendibles que permiten apoyar en el fondo marino para elevar fuera del agua todo el casco de la embarcación (figura 2).

Estos medios específicos son muy escasos. Además, a pesar de sus mejoradas capacidades y prestaciones, siguen imponiendo decisivas restricciones en la cada vez más acentuada tendencia hacia aerogeneradores mayores y parques en aguas más profundas. Resulta ilustrativo, por ejemplo, que sólo existen en Europa tres o cuatro barcos capaces de instalar un aerogenerador de 8 MW incluso a profundidades medias, y que en otros países avanzados con enorme tradición marina como Japón, sencillamente no existe ninguno.

2. LA TECNOLOGÍA ELISA

Siendo conscientes del reto descrito, al que el sector se dirige, en los últimos 5 años ESTEYCO ha desarrollado y patentado la nueva tecnología ELISA, con el objetivo de poder contribuir a superarlo. Para ello Esteyco ha contado con el apoyo de instituciones de desarrollo tecnológico de referencia tanto a nivel nacional como internacional, incluyendo al CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial) o a los programas europeos eureka Eurostars, EEA Grants u Horizon 2020. Empresas de reconocida trayectoria en los sectores marítimo, naval u offshore han colaborado con Esteyco en dicho desarrollo, destacando ALE Heavylift, e incluyendo al propio Cedex.

Se trata de una solución de cimentación y torre para aerogeneradores marinos conceptualmente sencilla, pero muy ambiciosa en las principales ventajas que persigue: nada menos que permitir una completa independencia de los grandes medios marinos de heavy-lift para la instalación

del aerogenerador completo, que no tiene precedente en el sector, posibilitar una plena escalabilidad tanto en capacidad como en medios constructivos para atender la siguiente generación de parques más profundos con turbinas que tenderán a los 10 MW, y ante todo –y en consecuencia– generar una importante reducción de coste no sólo en la instalación sino también en la fabricación.

Para ello, la solución ELISA –ilustrada en la fig. 3– emplea una cimentación de gravedad convencional a modo de plataforma provisionalmente flotante, que integra una torre telescópica autoelevable junto con el propio aerogenerador completo. La torre telescópica permite bajar el centro de gravedad del conjunto, de modo que la plataforma puede ser autoestable mientras la torre está plegada. Ello permite llevar a cabo el completo ensamblaje del conjunto en puerto, en condiciones plenamente controladas y evitando los riesgos inherentes a los ensamblajes en alta mar. La instalación en parque puede llevarse a cabo con medios auxiliares de reducido coste y remolcadores convencionales como único medio de apoyo.

A pesar de ser una solución pionera a nivel mundial, se basa únicamente en la integración de sencillos sistemas y medios que se han empleado por doquier en otros sectores, como los heavy-lift strand jacks, cuyo ratio de coste por tonelada de capacidad de elevación es entre tres y cuatro órdenes de magnitud más bajo que el de un jack-up elevando cargas a 100 m de altura.

2.1. Torre telescópica autoelevable

Componente distintivo de la tecnología ELISA, la configuración telescópica de la torre eólica permite bajar el centro de gravedad del conjunto durante el transporte remolcado, haciendo posible que la plataforma de cimentación actúe provisionalmente a modo de barcaza autoestable



Figura 3. Tecnología ELISA. La plataforma de cimentación por gravedad actúa provisionalmente como plataforma flotante que integra una torre telescópica autoelevable. El conjunto puede ensamblarse por completo en puerto junto con el aerogenerador y remolcarse al parque, donde la torre se eleva sin necesidad de grúas o embarcaciones pesadas.

sobre la que el sistema completo puede pre-ensamblarse en puerto.

El sistema de torre telescópica consiste en distintos tramos tubulares de torre que se premontan en puerto en configuración “plegada”, junto con la turbina y las palas. Una vez el conjunto se ensambla en puerto, se remolca hasta el emplazamiento, y se lastra para descansar sobre el fondo marino, la torre se iza hasta su configuración definitiva por medio de cables y gatos de izado, que se reutilizan para elevar sucesivamente cada tramo de torre. Los gatos recuperables que izan cada tramo se apoyan sobre el tramo inmediatamente inferior, que a su vez guía el tramo izado en su ascenso, en un proceso de autoelevación en el que la propia torre es la única estructura de soporte requerida. Todos los trabajos para dicha operación de despliegue de la torre, incluyendo la ejecución de las juntas horizontales que unen los distintos tramos entre sí, se pueden llevar a cabo desde una única plataforma de trabajo, situada en la cabeza del tramo inferior de la torre, que se aprovecha también en situación definitiva como plataforma de acceso a la torre y el aerogenerador.

Todo el sistema fue probado y puesto a punto por ESTEYCO en colaboración con ALE Heavylift en una torre de pruebas a escala real construida en Daganzo, Madrid (fig. 4). Sus positivos resultados permitieron ensayar y probar el sistema en distintas condiciones, certificarlo y mostrar al mercado su viabilidad y sencillez.

2.2. Minimizar el trabajo en el mar

Esencial en la concepción de la tecnología ELISA, la anterior puede considerarse una regla de oro de cualquier solución que pretenda un óptimo control de riesgos y aspire a maximizar las capacidades de industrialización en la construcción e instalación de subestructuras y aerogeneradores

marinos. La solución ELISA permite un completo pre-ensamblaje de todo el conjunto formado por cimentación, torre y aerogenerador en puerto, lo que no tiene precedentes en lo que a aerogeneradores apoyados en el fondo marino se refiere. Esta es una cualidad esencial para generar procesos constructivos altamente industrializados, con los elevados ritmos de producción que el sector demanda y un mejorado control de riesgos.

La configuración telescópica no sólo ofrece ventajas disruptivas en lo que se refiere al proceso de instalación marina, sino que también simplifica enormemente el trabajo de ensamblaje en puerto al reducir notablemente la altura de trabajo requerida para el montaje de los grandes componentes de torre y aerogenerador. Lo que posibilita un mejor aprovechamiento de las infraestructuras portuarias existentes, habitualmente preparadas para el manejo de grandes pesos, pero no a grandes alturas. A lo anterior se suma un diseño de la plataforma de cimentación que permite calados reducidos (<8 m) y el hecho de que la flotación autoestable del conjunto hace posible el acopio de unidades a flote, reduciendo mucho los requerimientos de espacio portuario necesario para la producción. Todo ello hace que el abanico de áreas portuarias adecuadas para una eventual fabricación sea suficientemente amplio.

En definitiva, el esquema general de construcción e instalación es relativamente sencillo, como se ilustra en la figura 5.

La cimentación y la torre se construyen en puerto, donde también se instala el aerogenerador. Todo el conjunto se transporta hasta su ubicación definitiva en el parque eólico marino y allí, llenando el interior de agua, se lastra. Una vez apoyada en el fondo, la torre telescópica se despliega gracias a los gatos de izado.

Es cierto que existen otras soluciones en distinto grado de desarrollo, que:



Figura 4. Tecnología ELISA. Vista interior de torre telescópica de prueba a escala real construida en Daganzo de Arriba, Madrid.

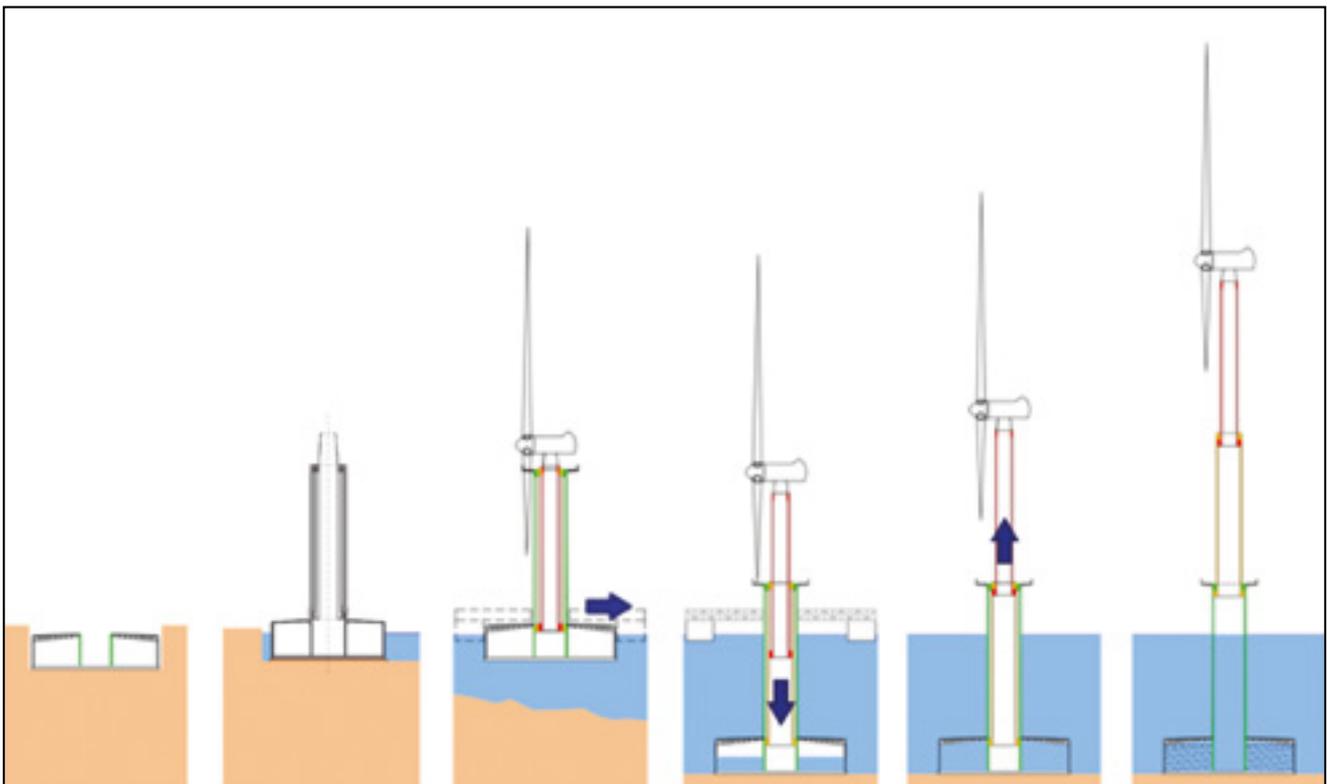


Figura 5. Tecnología ELISA. Proceso general de construcción e instalación.

- Bien consiguen remolcar únicamente una cimentación autoflotante; es decir, no se evita el gran medio para instalar torre y turbina (p.ej. Gravitas o Seatower).
- Bien consiguen transportar toda la estructura, incluida torre y turbina, que se ensamblan en puerto, pero empleando para ello un gran medio de transporte 'ad hoc' (p.ej. proyecto GBF).
- Fácilmente escalable, pudiendo adaptarse a distintos tamaños de turbina y profundidades.
- Empleo exclusivamente de medios asequibles (grúas, remolcadores, etc.), lo que redunda en una gran flexibilidad en la planificación de la construcción e instalación.
- El hormigón es más robusto y duradero que el acero empleado en otras soluciones, sobretodo en ambiente marino.

En definitiva, la tecnología ofrece las siguientes ventajas:

- Reducción significativa del coste respecto a las soluciones actuales (> 35%), sobretodo para profundidades mayores de 35 m.
 - Completa independencia de grandes medios marinos.
 - Construcción y ensamblaje en tierra/puerto, turbina incluida, minimizando así las tareas en el mar, y reduciendo notablemente el riesgo.
 - Muy fácil de industrializar, empleando además entre un 80 - 90% de medios locales en todo el proceso.
- Finalmente, en cuanto a su producción en serie, cabe destacar que en Esteyco hemos realizado ya diversos casos de estudio, basados en parques eólicos reales, que nos han permitido corroborar la viabilidad y ventajas de la tecnología. Unas instalaciones de fabricación en puerto con un área aproximadas de 8-10 Ha permitirán producciones no inferiores a 60 unidades/año (>1 unidad/semana), culminando la fabricación e instalación de todas las unidades de un parque comercial medio de 500 MW en menos de dos años.



Figura 6. Tecnología ELISA. Fabricación en serie. Implantación en un puerto real.

3. DE LA TEORÍA A LA PRÁCTICA: EL PROYECTO ELICAN

Actualmente ESTEYCO está finalizando la construcción de un prototipo a escala real, que se espera que esté produciendo energía en el año 2018.

El prototipo cuenta con una importante financiación de la unión Europea, a través de los proyectos ELISA/ELICAN que fueron seleccionados en el programa Horizonte 2020 entre un gran número de muy diversos proyectos de toda Europa que competían por dichos fondos para la investigación y el desarrollo. Esteyco lidera el consorcio que lleva a cabo el proyecto, en el que también participan SIEMENS-GAMESA, ALE Heavylift, UL-DEWI (Deutsches Windenergie Institut) y PLOCAN (Plataforma Oceánica de Canarias).

El prototipo soportará un aerogenerador de 5 MW plenamente operativo y se ubicará a una profundidad de 30 m. Con un diámetro de rotor de 132 m, se convertirá en el mayor aerogenerador de España y el primero en todo el sur de Europa instalado sobre el fondo marino. El coste

estimado para la construcción del prototipo será de aproximadamente 15 M€, lo que a pesar de los importantes costes ligados al prototipaje, a la insularidad, a su completa monitorización y a las inversiones en instalaciones y medios constructivos repercutidos a una única unidad, arroja ratios de coste de 3 M€/MW que incluso tratándose de un prototipo se sitúan por debajo de los actuales costes de mercado en parques en serie, lo que da idea de la economía y el potencial de la solución.

Su cimentación, con un diámetro de 32 m y un puntal de 7 m, servirá de apoyo a una torre telescópica de 3 tramos que situará el aerogenerador a una altura de 115 m sobre la cota de apoyo en el fondo marino. Los tramos de la torre se componen de un total de 12 dovelas de hormigón prefabricado, que se transportan hasta el puerto y se pre-ensamblan para conformar cada uno de los 3 tramos tubulares de la torre.

Para llegar hasta aquí, se han seguido, durante los últimos años, cada una de las fases necesarias para ir validando la tecnología (figura 8), entre las que destacan:



Figura 7. Tecnología ELISA. Prototipo ELICAN en fase final de construcción (Gran Canaria).



Figura 8. Tecnología ELISA. Distintas fases de validación de la tecnología, previas al proyecto a escala real ELICAN.

- Diseño conceptual y básico
- Diseño de detalle
- Ensayos de laboratorio de los componentes críticos (juntas de la torre telescópica)
- Ensayos a escala en tanque de pruebas
- Prototipo 'onshore' a escala real de la torre telescópica (figura 4)
- Certificación (DNV-GL y TÜV-SÜD)

Actualmente se están llevando a cabo diversas pruebas de los distintos sistemas y procedimientos para el lastrado de la cimentación y el izado de la torre, ensayando todos los equipos en distintas situaciones y facilitando la completa certificación del sistema. Una vez completadas las pruebas, el prototipo será remolcado hasta su emplazamiento final en el área de ensayos de PLOCAN (figura 9), promovida conjuntamente por el Gobierno de Canarias y el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO), y que cuenta ya con la reserva y los permisos para llevar a cabo este tipo de proyectos. Allí, como actividad final, el prototipo será ampliamente monitorizado tanto durante su instalación como durante su posterior operación.

4. CONCLUSIONES

En el presente artículo se han esbozado las características principales del mercado eólico offshore y, en particular, aquéllas referidas a la construcción e instalación de las estructuras que soportan a las turbinas generadoras de electricidad.

A partir de éstas, se han podido explicar las cualidades de la tecnología desarrollada por ESTEYCO, que permitirá la instalación de dichas estructuras sin necesidad de los grandes medios (buques y grúas marinas) necesarios en la actualidad a tal efecto.

Dichas cualidades se resumen básicamente en la auto-flotabilidad de la estructura durante su transporte, y en que se trata de una torre telescópica que puede ir plegada en el trayecto. Ambas características permiten el remolque y el fondeo de la estructura empleando sólo remolcadores convencionales, y con la turbina ya montada sobre ella desde puerto.

La tecnología se encuentra en un estado muy avanzado de desarrollo; en la actualidad se está construyendo un prototipo a escala real en Gran Canaria.



Figura 9. Tecnología ELISA. Visualización del prototipo del proyecto ELICAN en su ubicación final en el área Plocan (Gran Canaria).

Dicho pionero prototipo, en suma, aspira a ser al tiempo final y principio. Final de un exigente proceso de desarrollo tecnológico, e inicio del camino para que la tecnología resultante pase a contribuir de forma productiva a un más limpio, sostenible y económico mercado energético.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Dada la novedad del concepto, no se cuenta con ninguna referencia relevante al respecto. No obstante, para la adecuada consecución del proyecto, y su validación por el organismo competente, se han observado las siguientes normativas.

Normativa de rango superior:

DNVGL-ST-0126: *Support Structures for Wind Turbines* (Apr. 2016).

EUROCODE-2 / EN-1992: *Design of Concrete Structures*.

EUROCODE-3 / EN-1993: *Design of Steel Structures*.

DNVGL-ST-N001: *Marine operations and marine warranty* (Jun. 2016).

Normativa general:

GL-Noble Denton 0001-ND Rev. 01.1: *General Guidelines for Marine Projects* (Jun. 2016).

GL-Noble Denton 0013-ND Rev. 08.1: *Guidelines for Load-outs* (Jun. 2016).

GL-Noble Denton 0015-ND Rev. 05.1: *Guidelines for Concrete Gravity Structures* (Jun. 2016).

GL-Noble Denton 0030-ND Rev. 06.1: *Guidelines for Marine Transportations* (Jun. 2016).

DNV-OS-J101: *Design of Offshore Wind Turbine Structures* (May. 2014).

DNV-OS-H101: *Marine Operations, General* (Oct. 2011).

DNV-RP-H103: *Modelling and Analysis of Marine Operations* (Apr. 2011).

DNV-RP-H101: *Risk Management in Marine and Subsea Operations* (Jan 2003).

DNV-OS-C301: *Stability and Watertight Integrity* (Jul. 2014).

DNV-RP-H104: *Ballast, Stability and Watertight Integrity-Planning and operating Guidance* (Sep 2011).

IEC 61400-3: *Design requirements for offshore wind turbines* (2009).

EUROCODE-1 / EN-1991: *Actions on Structures*.