

Eólica marina flotante: Camino al desarrollo industrial.

Bernardino Couñago Lorenzo²

²Ingeniero Naval

bernardinocounago@gmail.com

RESUMEN

Posicionar un aerogenerador en aguas profundas en alta mar es un reto tecnológico al que se enfrentará el sector eólico en los próximos años.

La finalidad última de este proyecto es mostrar la viabilidad técnica de las soluciones flotantes y acercar el mundo de las tecnologías offshore y la energía eólica. Ambas ramas de la ingeniería tendrán un camino común en los próximos años por lo que se deben poner en común metodologías, procedimientos y conocimiento.

En el presente trabajo se lleva a cabo un detallado estudio y diseño de una plataforma flotante semisubmergible para aerogeneradores en un emplazamiento de aguas profundas. Se abordan los aspectos técnicos más relevantes dentro del ámbito de la ingeniería naval y se detectan los retos a los que se enfrenta el diseñador de este tipo de estructuras a lo largo del proyecto.

ABSTRACT

To install a wind turbine in deep waters environment is a technological challenge that wind sector will have to face in the next years.

The last goal of this project is to show the technical viability of floating solutions for wind turbines and to approach these two worlds: offshore technology and wind energy. Both branch of science will have a common way in the next years, so they will have to share methodologies, procedures and knowledge.

A detailed study about semisubmersible floating wind turbine is carried out in this paper. The platform is designed for be installed in deep waters environment. The most important topics from marine and offshore engineering point of view are treated and the challenges for the designer throughout the project are detected.

1. Antecedentes y estado del arte.

En los últimos años es muy habitual encontrarse en los medios de comunicación y foros especializados las noticias referentes a soluciones flotantes para aerogeneradores.

Lo cierto es que en nuestro país y en muchos otros de Europa, la eólica terrestre es una tecnología ya madura, que ha ocupado los emplazamientos de mejor recurso, de eficacia demostrada y, si no lo es ya, acabará siendo una solución competitiva a todos los niveles con los otros métodos de obtención de energía más tradicionales. En este campo la eficiencia de las máquinas, las estrategias de mantenimiento, la integración a la red, la repotenciación, etc., siguen siendo objeto de mejora en el aprovechamiento del recurso eólico, no obstante, los grandes retos tecnológicos se dirigen hacia nuevos emplazamientos que permitan seguir ampliando el parque de generación eólica.

Por otro lado, en el Mar del Norte hace unos 20 años que se dio el primer paso hacia la conquista de los mares con los parques eólicos offshore fijos o pilotados, es decir, con las cimentaciones apoyadas o hincadas (dependiendo de la solución escogida) en el lecho marino. Desde entonces la eólica offshore ha seguido un crecimiento muy importante y parece que en los próximos años así seguirá siendo.

Las líneas actuales de investigación han dado el siguiente paso hacia las soluciones flotantes. En la actualidad son varios los organismos y empresas tanto en Europa como USA que trabajan en ellas. Algunos de estos proyectos ya están en fase de pruebas o en fases avanzadas de desarrollo como los que se ven en las imágenes inferiores.



Figura 1.1. Plataforma Spar Hywind. (www.statoil.com)



Figura 1.2. Plataforma TLP Blue H (www.bluehgroup.com)



Figura 1.3. Plataforma semisubmergible Windfloat (<http://www.principlepowerinc.com>)

Además existen otros proyectos en el ámbito europeo y nacional como EOLIA, HYPRWIND , FLOTTEK y OCEAN LIDER que han trabajado y están trabajando en soluciones flotantes para aerogeneradores.

Como se puede deducir, son muchas las disciplinas que son necesarias manejar en el diseño de una infraestructura como es un parque eólico marino flotante y, por ello, durante el diseño es necesario fijar la prioridad de unas frente a otras y establecer una secuencia ordenada de cálculo que permita llegar a una solución de compromiso que garantice la viabilidad técnica, disminuyendo riesgos y, por tanto, atrayendo inversores.

Una vez que se conocen ambos mundos, la primeras cuestiones que surgirán son

- ¿cómo se comienza desde cero un proyecto de estas características?
- ¿cómo confluyen el diseño de plataformas y el de aerogeneradores?
- ¿qué procedimientos habituales en ambas ramas de la ciencia son válidos y aprovechables y en qué medida aceptables para el diseño de un aerogenerador flotante?

Primeramente, es necesario distinguir entre soluciones flotantes y fijas. En el caso de estas últimas el desarrollo está mucho más avanzado y existen diversas soluciones que ya están siendo empleadas a nivel comercial en los parques eólicos offshore del Norte de Europa. Este tipo de tecnologías todavía podrían encuadrarse dentro de la ingeniería civil, a pesar del alto componente marítimo presente en su diseño. Hablamos de las soluciones tipo monopilote, de gravedad, tripilote principalmente, para profundidades de hasta 40 m aproximadamente y las plataformas Jacket para profundidades de hasta 70 m. A los lectores interesados se les remite a las referencias [9],[26],[35],[83].

En cuanto a las soluciones flotantes, por un lado, desde el punto de vista “marítimo” se necesita partir de un bagaje en el diseño de estructuras flotantes, conocer sus características generales, sus partes y elementos y los aspectos críticos en su diseño, como estudio de estabilidad, comportamiento en la mar, cálculo de fondeo y resistencia estructural. Todos ellos enmarcados dentro de las competencias propias de la Ingeniería Naval y Offshore.

Las referencias [10],[33],[53],[65],[68],[71], pueden servir como un buen punto de partida para adentrarse en la características generales de las tecnologías offshore (flotantes y fijas).

Aquellos lectores poco familiarizados con el mundo de la ingeniería naval pueden recurrir a textos habituales como son [37],[60],[85], que aunque no se centran en el diseño de estructuras offshore, si que son de referencia en lo que a arquitectura naval se refiere. En concreto la espiral de diseño seguida en este trabajo tiene su origen en las propuestas en dichas referencias y otras similares.

Por otro lado, desde un punto de vista de la operatividad del aerogenerador es necesario conocer sus características aerodinámicas, los sistemas y equipos eléctricos y los sistemas de control. Estas disciplinas son más propias de la Ingeniería Industrial y Aeronáutica, no obstante, resulta útil que el ingeniero involucrado en las primeras fases del diseño las tenga en cuenta para garantizar la validez futura de la plataforma.

Se pueden consultar las referencias [8], [67] para conocer en profundidad el mundo de la energía eólica: tipos de aerogeneradores, elementos principales que componen un aerogenerador, parques eólicos, diseño aerodinámico, cargas en aerogeneradores, sistemas eléctricos y de control, normativa, costes y financiación, etc

2. Requisitos del diseño, selección de la configuración y dimensionamiento.

Para comenzar el diseño de una plataforma semisubmergible deben fijarse una serie de requisitos de diseño.

Dichos requerimientos parten del entorno en el queremos que se desenvuelva la estructura, esto es, el océano y de unos requerimientos iniciales operativos que exige una carga tan particular como un aerogenerador. Es decir, la plataforma debe ser capaz de superar cualquier situación de cargas medioambientales y además debe proporcionar la estabilidad suficiente, y el comportamiento en la mar ha de ser tal que no se superen unos desplazamientos y unas aceleraciones proporcionadas por el fabricante del aerogenerador.

2.1 Condiciones medioambientales.

Al comenzar el diseño de una plataforma es importante conocer las condiciones climáticas del emplazamiento.

Es necesario establecer los estados de mar que se emplearan para el diseño. Se entiende por estado de mar el conjunto de condiciones atmosféricas que se producen en un determinado periodo de tiempo. Un estado de mar quedará definido por el viento,

el oleaje y las corrientes. En el apartado 5 se muestran los estados de mar seleccionados. En el caso a estudio se han seleccionado las condiciones medioambientales de la boya de Villano, en la costa de A Coruña.

Se pueden consultar las referencias [18],[10],[53],[75],[76],[77],[78] para profundizar en lo referente a teorías de olas, espectros de energía, descripción estadística del oleaje y el viento, definición de los perfiles de corrientes, etc.

2.2 Características del aerogenerador.

Seleccionar el aerogenerador no es una tarea sencilla. En entornos offshore, donde los costes de mantenimiento son prohibitivos, debe premiar la fiabilidad de la máquina, incluso frente a la potencia nominal de la turbina.

En este trabajo se ha recurrido a la solución más extendida: aerogenerador de eje horizontal tripala HAWT de 5MW que funciona a sotavento.

Las características detalladas de este aerogenerador se pueden consultar en la referencia [52].

2.3 Selección de la configuración.

Se ha optado por una semisumergible de cuatro columnas dispuestas en los vértices de un cuadrilátero, con el aerogenerador en el centro. Los pontones forman un anillo cerrado. Se trata de evitar en la medida de lo posible la presencia de tubulares de unión (bracing system).

Las ventajas de esta configuración son entre otras:

- La simetría axial simplifica los cálculos de estabilidad y con ello el sistema de control lastre.
- El anillo cerrado limita la presencia de tubulares aportando mucha resistencia al conjunto estructural.
- Los tubulares de refuerzo dificultan la construcción, son foco de fatiga y la concentración de tensiones en sus extremos afectan a las soldaduras, siendo focos de corrosión.

Las desventajas son:

- El aerogenerador en el centro supone una carga muy concentrada que requiere un diseño específico y complejo de la cubierta que lo soporta. Si se situase sobre una de las columnas se simplifica el diseño estructural pero para ciertas direcciones del viento incidente se complica la estabilidad al carecer de elementos que proporcionen un momento adrizante.

2.4 Dimensionamiento.

Escogida la configuración se procede a parametrizar las características geométricas del modelo. De esta forma, el área de la estructura, el área de la flotación y los volúmenes totales y sumergidos serán conocidos en todo momento en función de estos parámetros de partida. Conocidos estos valores es inmediato calcular el peso de la estructura de acero, la inercia de la flotación, el centro de gravedad y de carena.

Constantes de partida:

- ✚ Peso inicial
- ✚ r_p : ratio pontón Kg/m^2 .
- ✚ $r_{c \text{ baja}}$: ratio columna baja. Correspondiente a la parte de la columna sumergida Kg/m^2 .
- ✚ $r_{c \text{ alta}}$: ratio columna alta. Correspondiente a la parte de la columna no sumergida Kg/m^2 .
- ✚ r_d : ratio cubierta Kg/m^2 .

Las variables de entrada han sido:

- ✚ H_p : altura de pontones.
- ✚ a : lado de las columnas.
- ✚ b : ancho de cada pontón.
- ✚ D_c : calado de las columnas en operación hasta la cubierta del pontón.
- ✚ H_f : francobordo máximo.
- ✚ H_d : altura de cubierta.

Se ha decidido que la plataforma sea cuadrada, por lo que, la eslora es igual a la manga, $L=B$. Esto nos permite definir el volumen de carena como sigue:

$$\nabla_{operacion} = 4 \cdot b \cdot H_p \cdot (L - 2a) + 4a^2 \cdot (H_p + D_c) \quad \text{Ec. 2.1}$$

También se puede parametrizar el área de cada uno de los elementos de la plataforma.

Para obtener el área del pontón no se considera el hueco de las esquinas correspondiente a las columnas.

$$A_p = 4 \cdot 2 \cdot (L - 2a) \cdot b + 4 \cdot 2 \cdot (L - 2a) \cdot H_p = 8 \cdot (L - 2a)(b + H_p) \quad \text{Ec. 2.2}$$

$$A_{cpartebaja} = 4 \cdot 4 \cdot (H_p + D_c) \cdot a + 4 \cdot a^2 \quad \text{Ec. 2.3}$$

$$A_{cpartealta} = 4 \cdot 4 \cdot a \cdot (H_f) \quad \text{Ec. 2.4}$$

$$A_d = 2 \cdot L^2 \quad \text{Ec. 2.5}$$

Peso inicial	923,1
Hp (m)	4,00
b (m)	5,00
a (m)	9,00
L (m)	48
Dc en operación (m)	15,00
Hd (m)	2
Hf (m)	12
rp (kg/m2)	245
rc baja (kg/m2)	245
rc alta (kg/m2)	150
rd (kg/m2)	100

Tabla 2.1. Parámetros de entrada

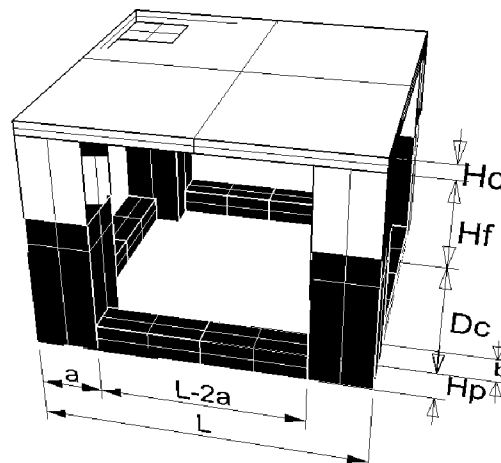


Figura 2.1. Parametrización del modelo

Se hace lo propio con la inercia de la flotación. En primer lugar se haya la inercia propia de cada columna.

$$I_{propia} = \frac{1}{12} a \cdot a^3 \quad \text{Ec. 2.6}$$

Aplicando el teorema de Steiner se calcula la inercia respecto al eje de crujía x-x:

$$I_{xx} = I_{propia} + Ay^2 = I_{propia} + a^2 \left(\frac{L}{2} - \frac{a}{2} \right)^2 \quad \text{Ec. 2.7}$$

Como las cuatro columnas son iguales y simétricas respecto los ejes x e y, para obtener la inercia total basta con sumar la inercia de cada uno .

$$I_{total} = 4 \cdot I_{xx} \quad \text{Ec. 2.8}$$

El desplazamiento se obtiene al multiplicar por la densidad del agua la expresión Ec. 2.1.

Si se aplica Ec. 2.2, Ec. 2.3, Ec. 2.4, Ec. 2.5, multiplicadas por rp, rc baja, rcalta, rd se obtiene la primera estimación del peso de acero.

El lastre necesario se determina restando al desplazamiento el peso en rosca.

$$\text{Lastre} = \Delta_{operacion} - \text{Peso en Rosca} \quad \text{Ec. 2.9}$$

Multiplicando Ec. 2.1 por la densidad del agua se obtiene el desplazamiento para el calado considerado de 19 m.

Aplicando Ec. 2.9 se obtiene el peso de lastre.

Peso necesario de lastre		
Rosca (ton)	Δ en operación (ton)	Lastre (ton)
2922	8770	5848

Tabla 2.2. Peso en Rosca, desplazamiento y lastre

Para acotar las posibles dimensiones se buscan aquellos parámetros de partida a partir de los cuales se cumplan ciertas restricciones de diseño. Estas restricciones que se han fijado son:

- Altura metacéntrica GM positiva.
- Ángulo estático de escora inducido por la mayor fuerza horizontal (thrust) debida al viento ha de ser lo menor posible.
- Periodo propio en arfada (flotando libremente) lo mayor posible y alejado de los periodos propios del oleaje..

La expresión de la altura metacéntrica para la estabilidad a pequeños ángulos es:

$$GM = KB + BM - KG = Z_B + \frac{I}{V} - Z_G \quad \text{Ec. 2.10}$$

$$Z_G = \frac{\sum_i z_i m_i}{\sum_i m_i} \quad \text{Ec. 2.11}$$

La segunda restricción de diseño parte del balance de momentos siguiente:

- Momento escorante: $F \cdot d \cdot \cos\theta$
- Momento adrizante: $\Delta \cdot GZ = \Delta \cdot GM \cdot \sin\theta$

Para que se produzca un equilibrio estático ambos han de ser iguales. De donde se obtiene el ángulo estático de escora:

$$\theta = \arctg\left(\frac{F \cdot d}{\Delta \cdot GM}\right) \quad \text{Ec. 2.12}$$

Donde:

- ✚ d: distancia desde el buje hasta la posición del fairlead.
- ✚ Δ: desplazamiento al calado de operación.
- ✚ F: Resultante de las fuerzas que el viento ejerce sobre el conjunto.

Para la tercera restricción, se hace un cálculo del periodo propio en alzada sin considerar el amortiguamiento ni la presencia de las líneas de fondeo. Se propone dos métodos de cálculo consultados en las referencias [10] y [71].

$$T_z = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g} \left(H_c + \frac{V_p}{A_w} (1 + C_{az}) \right)} \quad \text{Ec. 2.13}$$

$$T_z = 2\pi \sqrt{\frac{M + A_{33}}{\rho g A_w}} = 2\pi \sqrt{\frac{M + 4 \cdot L \cdot A_{33}^{2D}}{\rho g A_w}} = 2\pi \sqrt{\frac{\Delta_{operación} + 4 \cdot L \cdot 2,3 \cdot \rho \cdot A_p}{\rho g A_w}} \quad \text{Ec. 2.14}$$

Donde:

- ✚ Caz: coeficiente de masa añadida, (1 para pontón circular y mayor que 1 para pontones rectangulares),
- ✚ Hc: puntal de columna,
- ✚ Vp: volumen pontones,
- ✚ Aw: área de la flotación,
- ✚ A33 masa añadida.
- ✚ A₃₃^{2D}: masa añadida de la sección bidimensional.
- ✚ Ap: área sección transversal pontón

Se obtiene también el momento de inercia de la flotación como se muestra en Ec. 2.6, Ec. 2.7, Ec. 2.8) y el volumen de carena en operación aplicando Ec. 2.1, cuyo cociente es el radio metacéntrico BM.

Por último, aplicando Ec. 2.10 se obtiene el GM para el calado considerado.

Flotación recta en operación				
I (m ⁴)	Vop	BM	KB	GM op
125388	8556	14,7	7,4	9,08

Tabla 2.3. Cálculo de la altura metacéntrica

Tras comprobar que la plataforma cumple el criterio de estabilidad inicial GM>0. Se puede proseguir y obtener la segunda restricción muestra el ángulo estático de escora para un momento escorante debido al viento. Para ello se emplea el cálculo planteado en la expresión Ec. 2.12.

La posición del fairlead todavía no está definida pero se supone en la parte más baja del pontón:

Balance de momentos		
fuerza viento (ton)	brazo escorante (m)	ángulo estático operación (grados)
87	118	7,3

Tabla 2.4. Ángulo estático de escora.

Por último, se calcula el periodo propio en heave empleando la expresión Ec. 2.13.

Periodo propio en heave 13)				
Caz	Aw (m ²)	Vp (m ³)	Hc (m)	Tz (s)
1,5	324	3696	31	15,5

Tabla 2.5. Periodo propio en alteada

Este periodo propio, limitaría el diseño a ciertas zonas de la costa en la que los periodos característicos del oleaje son menores

Una posible solución consiste en disponer unas planchas horizontales que aumenten la masa añadida y amortiguamiento en la parte baja de las columnas y con ello aumentar el periodo propio.

3. Cálculos de estabilidad intacta y en averías.

Los cálculos de estabilidad son unos de los estudios más importantes a realizar en una estructura flotante. Se plantean a dos niveles: estabilidad intacta y estabilidad en averías.

3.1 Normativa.

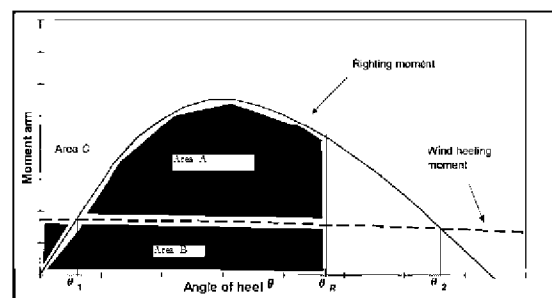
No existe una normativa aplicable directamente al caso de plataformas offshore para aerogeneradores pero se emplearán las normas del offshore del Oil and Gas. En concreto la norma a aplicar será la del Det Norske Veritas DNV cuyo detalle se puede consultar en la referencia [23]. En la referencia [6] se puede consultar una revisión de los diversos reglamentos referentes a la estabilidad para plataformas semisubmergibles que en esencia coinciden salvo pequeñas diferencias.

Los criterios de estabilidad intacta se basan en comparar la curva de brazos adrizantes con la curva de brazos escorantes, especialmente en este caso, debidas al viento.

Se pueden resumir en los siguientes puntos:

- La relación entre las áreas bajo las curvas de adrizantes y escorantes debe ser (Figura contigua) :

$$A + B \geq 1,3 \cdot (B + C)$$
- El ángulo de escora estático θ_1 (primer punto de intersección) debe ser menor de 15° -17°.
- La altura metacéntrica GM no será menor de 1m en operación, tránsito y supervivencia. Además no podrá ser menor de 0,3m al cambiar los calados de una situación a otra.



La relación de áreas compara la energía potencial adquirida por la plataforma, almacenada en forma de restauración hidrostática, con el trabajo realizado por el momento escorante de viento para inclinar la plataforma desde su posición inicial hasta el ángulo . De ahí, que el área A+B debe ser mayor que la B+C para que la plataforma sea estable. El ángulo θ_2 es el menor de los valores entre el primer punto de inundación y el segundo punto de intersección.

3.2 Condiciones de carga.

De las posibles condiciones de carga se definen aquellas que se consideran básicas. Podría darse el caso de que por el procedimiento constructivo, el calado máximo admisible en el astillero o para realizar las maniobras de ensamblaje del aerogenerador fuese necesario definir alguna otra.

- Peso en rosca. Incluye el peso de la carga útil (payload), el peso del armamento y el peso estructural.
- Calado de operación: Incluye además de lo anterior el lastre necesario para alcanzar el calado de operación de 20 m.

3.3 Estabilidad inicial y a grandes ángulos.

Siguiendo los criterios de estabilidad marcados arriba se realizan los cálculos con ayuda del programa Maxsurf-Hydromax [40]. Para ello es necesario:

1. -Estimar los pesos fijos a bordo.
2. Los pesos variables debidos al lastre se determinan directamente tras haber delimitado los tanques y definir su llenado y los añade a la situación de carga. El software realiza los cálculos hidrostáticos directamente.
3. Lanzar los cálculos de equilibrio para la condición de carga a estudio. Tener en cuenta que la estructura esta flotando libremente y en aguas tranquilas. Comprobar los calados y desplazamientos.
4. Realizar los cálculos de estabilidad a grandes ángulos. La curva de adrizantes la obtiene directamente el software proporcionando los brazos GZ en función de la escora θ .

Para la obtención de la curva de escorantes son necesarios unos cálculos previos y la definición de una serie de parámetros:

- **Áreas** proyectadas de la **obra muerta**: **A**
- Cota del centroide de dichas áreas, tomado respecto SWL: **h**
- Cota del **centroide** del área proyectada de la **obra viva**: **H**
- Velocidad extremal de viento: **v**
- **Ángulo de retroceso** "roll back angle" que sirve para delimitar el área bajo escorantes (Área 2).
- El **factor de rachas** de viento que sirve para tener en cuenta la variación repentina de la velocidad de viento.
- El **punto de inundación** se encuentra a 41 m de la quilla a la salida de los venteos de los tanques de lastre. Para delimitar el área bajo adrizantes se toma el menor de los valores entre el segundo punto de intersección θ_2 y el ángulo de escora al que se alcanza el punto de inundación θ_{PI} .

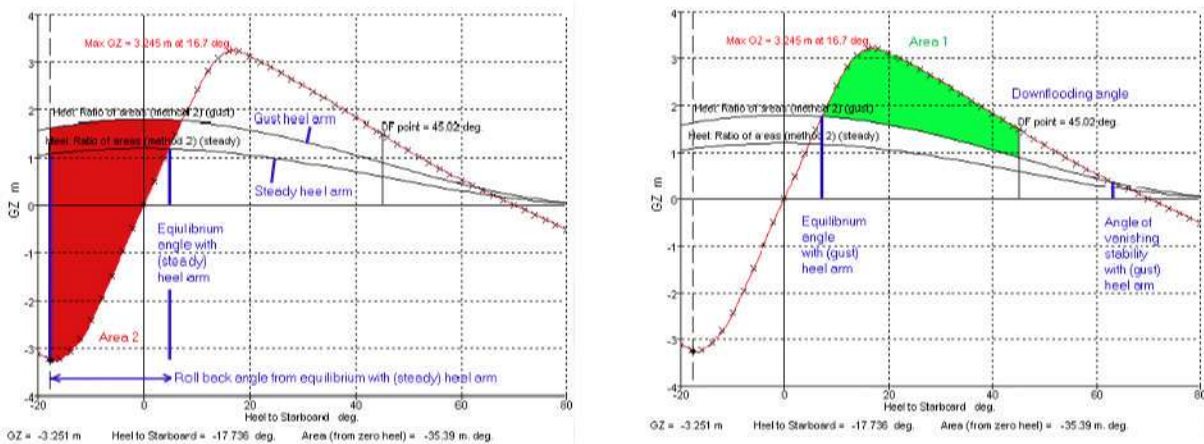


Figura 3.1. Ejemplo de descripción de las gráficas de adrizantes y de escorantes.

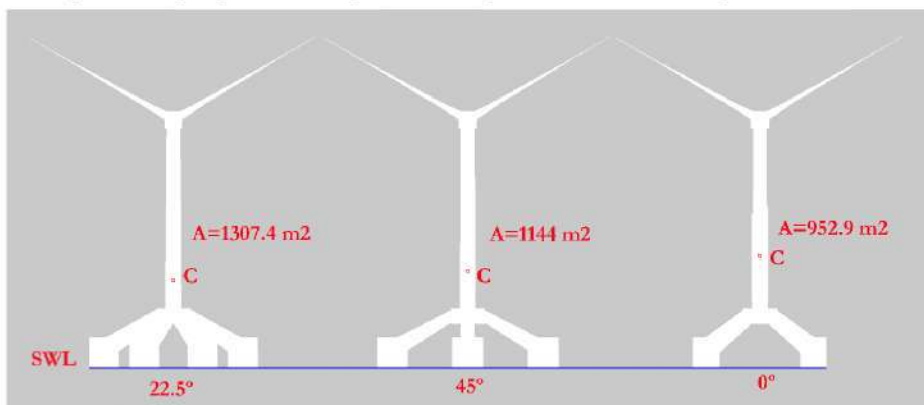


Figura 3.2. Áreas proyectadas para varias direcciones de incidencia de viento.

En la siguiente gráfica se puede observar la curva de adrizantes en operación frente a la de escorantes en la condición de viento severo¹.

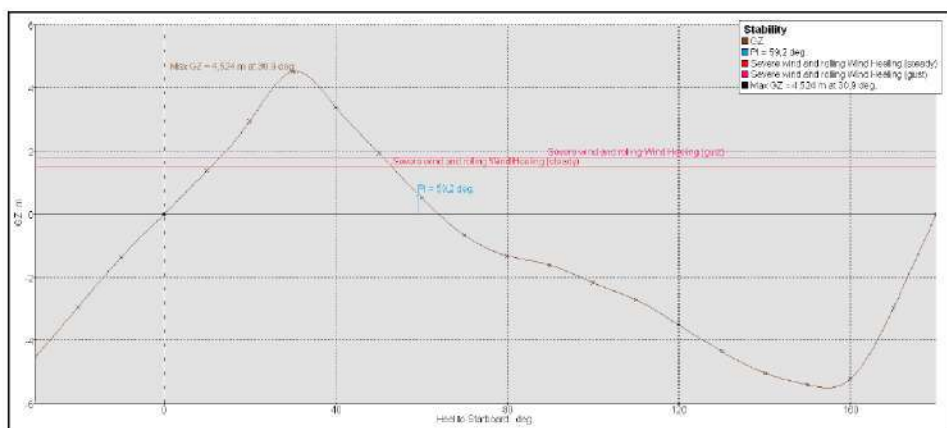


Figura 3.3. Curvas de brazos adrizantes y escorantes.

En el anexo I se puede visualizar los cálculos intermedios realizados por el programa y la verificación de los criterios de estabilidad fijados.

3.4 Estabilidad en averías.

El estudio de estabilidad tras averías también queda recogido en las normativas consultadas. En el mundo del oil & gas han ocurrido y ocurrirán accidentes de diversa gravedad, en ocasiones, con fatales consecuencias para el medio ambiente. Es por ello, que en el diseño de plataformas se han establecido una serie de criterios que establecen la estabilidad mínima exigible a una plataforma con una avería "tipo".

Ciñéndose a la normativa los criterios a cumplir en este caso son:

- El ángulo de inclinación después de la avería no debe ser mayor de 17°.
- Tras la inundación el rango entre el primer punto de intersección y el segundo punto de intersección en las curvas de momentos debe ser al menos de 7°.

En resumen se plantea la siguiente avería en la condición de operación:

Tipo de avería	Avería vertical de 3m, a la altura de la línea de flotación sobre una de las columnas. Se inunda la cámara de bombas completamente y el tanque de la columna.
Criterios a cumplir	Ángulo de inclinación menor de 17°. 7° entre puntos de intersección.

Tabla 3.1. Definición de la avería.

Análisis de estabilidad en averías.

Para simular la avería, se llena el tanque de proa babor al 100 % y además se supone inundado el cuarto de bombas de esta columna (en amarillo). Tras varias iteraciones se comprueba que es necesario bajar el techo de la cuarto de bombas porque al llenarse la posición de equilibrio es mayor de 17°.

Se parte de un cuarto con la cubierta baja a 20 m respecto línea base y el techo a 28 m respecto línea base.

A la vista de la condición de carga como mucho se puede llenar hasta el 57,5 % la cámara de bombas. Por lo tanto, es a este nivel donde se coloca el techo del cuarto de bombas. Haciendo unas sencillas operaciones resulta dicha cubierta a 24,6 m. Lo cual no interfiere con los equipos del cuarto de bombas.

¹ Este estudio para la condición en rosca o instalación no es de aplicación. La plataforma no se trasladará en rosca en estados de mar con vientos severos.

Item Name	Quantity	Total Mass tonne	Total Volume m ³
lightship	1	2413,176	
proa babor	100%	1654,778	1614,418
proa estribor	70,3%	1163,279	1134,906
popa babor	70,3%	1163,096	1134,728
popa estribor	70,3%	1163,051	1134,684
proa estribor long	100%	304,490	297,063
proa estribor trans	100%	265,604	259,126
proa babor long	100%	304,490	297,063
proa babor trans	100%	265,604	259,126
popa babor long	100%	304,437	297,011
popa babor trans	100%	264,512	258,060
popa estribor long	100%	304,437	297,011
popa estribor trans	100%	264,512	258,060
cuarto bombas inundado	57,5%	373,917	364,797
Total Loadcase		10209,382	7606,054



Situación de equilibrio	
Draft Amidships m	22,721
Displacement t	10209
Heel deg	-12,9
GMt corrected m	4,876
GML m	4,872
Trim angle (+ve by stern) deg	-13,2977

Tabla 3.2. Condición de carga tras averías y situación de equilibrio.

Tras realizar la modificación se comprueba que se cumplen los otros criterios. Suponemos que la avería se produce en una condición de viento severo como la analizada anteriormente para disponer de una curva de brazos adrizantes y chequear si hay 7 grados. entre puntos de intersección

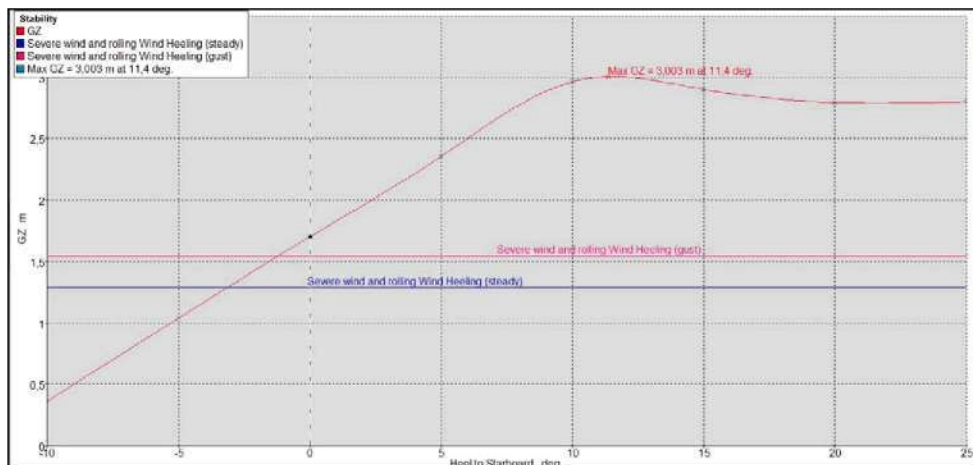


Figura 3.4. Curva de escorantes y adrizantes en averías.

En la gráfica superior se comprueba que el ángulo entre los puntos de intersección es claramente mayor de 7°.

4. Estudio de comportamiento en la mar.

La verificación de los criterios de estabilidad es imprescindible no sólo para garantizar la propia supervivencia de la plataforma, sino que también es parte de la documentación demandada por una Sociedad de Clasificación y/o las autoridades competentes del país. No obstante, para realmente conocer qué ocurre con la plataforma en el medio marino es necesario realizar un paso más, que permita analizar la dinámica de la plataforma.

Este es uno de los retos técnicos a los que se está enfrentando la industria actualmente. Ello es debido a que hasta ahora, para el estudio de estructuras flotantes fondeadas se recurría básicamente al estudio en el dominio de la frecuencia, asumiendo una serie de hipótesis simplificadoras en las que los modelos numéricos empleados se centraban en los movimientos originados por cargas debidas al oleaje y en el caso de las estructuras fondeadas también se incluyen las líneas de fondeo en el modelo numérico como

muelles lineales o no lineales de una rigidez determinada. Las cargas aerodinámicas, aunque no despreciadas, no se consideraban como un factor determinante en la dinámica de la estructura flotante².

Por otro lado, en el diseño de aerogeneradores se emplean sofisticados códigos que permiten la obtención de velocidades y cargas en las palas debidas a efectos aerodinámicos. En este caso, al ser una estructura fija, empotrada en el suelo, no se han de preocupar por los movimientos en la base de la torre.

La complejidad estriba en acoplar ambos “mundos”. Se trata de una plataforma flotante, por lo que es imprescindible analizar los movimientos en los 6 GdL. Lo que ocurre es que debido a las grandes cargas aerodinámicas sobre el aerogenerador, que no se deben despreciar en la dinámica del conjunto plataforma más aerogenerador, es necesario que en el modelo numérico empleado evalúe de alguna forma y simultáneamente las cargas variables debidas al viento y las cargas variables debidas al oleaje.

Como las cargas de viento se estudian en el dominio del tiempo, para poder modelizar en conjunto viento y olas es necesario que también los efectos del oleaje se estudien en el dominio del tiempo. Esto evidentemente complica el análisis.

Si no fuera poco, hay que incluir las cargas por corrientes, las cargas debidas al fondeo y las fuerzas de deriva.

En resumen, los modelos aero-hidrodinámicos requieren una complejidad computacional elevada y están en vías de desarrollo. Son y serán una herramienta importantísima para el diseñador, pero se debe ser cauteloso a la hora de emplear los resultados de un modo absoluto.

Al final siempre se ha de recurrir a los ensayos en canal por lo que el desarrollo de la industria no debe esperar a que se desarrollen estos programas, sino que el camino debe ser paralelo.

4.1 Análisis en el dominio de la frecuencia.

Este método ha sido empleado ampliamente en el diseño de plataformas offshore y es muy útil para las fases iniciales del diseño ya que permite conocer la respuesta de la plataforma en función del periodo/frecuencia del oleaje.

Obviando los sumatorios y subíndices y empleando una notación matricial se tiene una versión de la ecuación que define la dinámica de la plataforma.

$$(M + A)\ddot{\eta} + B\dot{\eta} + C\eta = F_{oleaje} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde el significado de cada una de las matrices se explica más abajo.

4.1.1 Características del programa Ansys AQWA LINE.

Existen diversos programas comerciales que cubren este tipo de análisis. En este caso el programa empleado será ANSYS AQWA LINE³. Ansys-AQWA LINE[®] se usa para evaluar las cargas por olas y la respuesta de la plataforma flotando libremente cuando está expuesta a olas regulares y armónicas. No se considera la presencia de las líneas de fondeo. El efecto de las líneas de fondeo sin pretensión en los movimientos inducidos por olas (WF) es bastante pequeño como el caso de un sistema de catenaria tradicional [Error! No se encuentra el origen de la referencia.] pag 58). Los efectos del viento y de las corrientes tampoco están incluidos en los fundamentos teóricos del programa⁴.

4.1.1.1 Matriz de masas [M].

La definición más genérica de la matriz de masas es : ([Error! No se encuentra el origen de la referencia.] pag 149)

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m & 0 & -mz_g & 0 & mx_g \\ 0 & 0 & m & my_g & -mx_g & 0 \\ 0 & -mz_g & my_g & I_{44} & I_{45} & I_{46} \\ mz_g & 0 & -mx_g & I_{54} & I_{55} & I_{56} \\ -my_g & mx_g & 0 & I_{64} & I_{65} & I_{66} \end{bmatrix}$$

²Las referencias [1], [14],[53],[68],[71] son guías contrastadas de dinámica de estructuras flotantes a consultar por el lector interesado.

³ Software cortesía de Ente Vasco de la Energía EVE y Tecnalia R&I.

⁴ A los lectores interesados se les remite al propio manual del usuario de AQWA para conocer las bases teóricas del programa.

En cuanto a las inercias, cuando un cuerpo presenta simetría longitudinal los productos de inercia también se anulan $I_{45} = I_{54} = I_{56} = I_{65} = 0$. Si existiese simetría transversal, como en el caso de muchas plataformas offshore los productos de inercia I_{46} , I_{56} también serían nulos.

4.1.1.2 Matriz de coeficientes de restauración hidrostática [C]

La matriz de coeficientes de restauración hidrostática cuantifica las fuerzas y momentos hidrostáticos sobre la estructura. Son efectos de naturaleza lineal.

El efecto de restauración que ejercen las líneas de fondeo es un efecto no lineal pero en ocasiones se puede cuantificar de un modo sencillo y se puede introducir en la matriz de fuerzas de restauración.

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} & C_{34} & C_{35} & 0 \\ 0 & 0 & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ 0 & 0 & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Donde los coeficientes se definen como sigue:

- ✦ $C_{33} = \rho g A_w$ proporcional a las toneladas por centímetro de inmersión.
- ✦ $C_{44} = \rho g \int_A y^2 dA + \rho g \nabla (z_B - z_G) \approx \rho g \nabla GM_T$ proporcional al momento para escorar 1°.
- ✦ $C_{55} = \rho g \int_A x^2 dA + \rho g \nabla (z_B - z_G) \approx \rho g \nabla GM_L$ proporcional al momento para trimar 1°.
- ✦ $C_{35} = C_{53} = -\rho g \int_A x dA$
- ✦ $C_{34} = C_{43} = \rho g \int_A y dA$
- ✦ $C_{46} = -(x_B - x_G) \nabla$
- ✦ $C_{56} = -(y_B - y_G) \nabla$

Aquí queda de manifiesto la relación entre conceptos habituales en hidrostática y la dinámica de estructuras flotantes.

Si el cuerpo flota libremente en una situación de equilibrio sin fuerzas exteriores actuando se cumple que $C_{46} = C_{56} = 0$.

4.1.1.3 Matrices de amortiguamiento y masa añadida.

Las fuerzas de radiación no están generalmente en fase con las olas, sino que se consideran por un lado los coeficientes de masa añadida relacionados con la aceleración del fluido, y por otro los coeficientes de amortiguamiento que están relacionados con la velocidad del fluido creadas.

Las matrices $A_{jk}(\omega)$ y $B_{jk}(\omega)$ están formadas por 36 elementos cada una. Los valores dependen de la velocidad de encuentro, la forma, la frecuencia de oscilación, la profundidad... Estas matrices se simplifican si se cumplen los siguientes requisitos:

Si la velocidad es nula, como en este caso, la mitad de los coeficientes son nulos.

Ante ausencia de corrientes las matrices son simétricas:

$$A_{jk} = A_{kj} \quad B_{jk} = B_{kj}$$

4.2 Resultados relevantes.

Se muestran los operadores de respuesta (RAO) para un mar de proa, y en el apéndice se muestran los resultados para varias direcciones de incidencia.

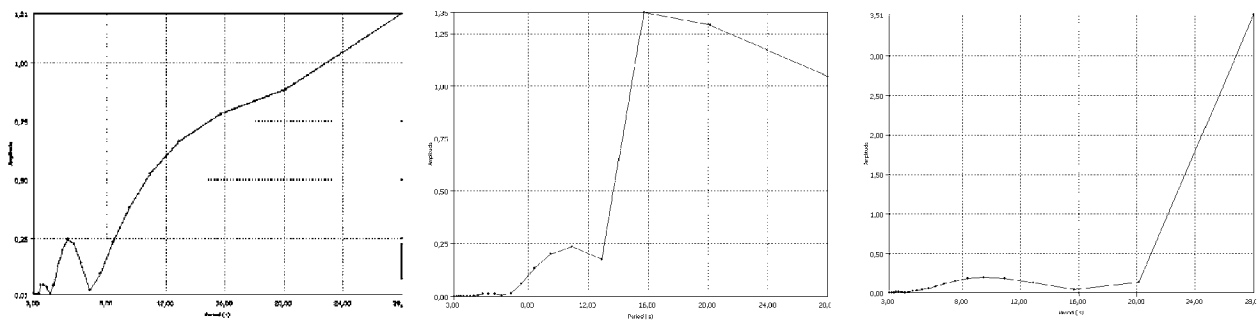


Figura 4.1. RAO's de surge, heave y pitch. Mar de proa.

Estos resultados son muy útiles. A simple vista se observa que la zona de resonancia en heave está entre los 16 s y los 18 s. Es un valor algo bajo para zonas como la costa de Galicia aunque podría ser válido para la costa de Huelva y Cádiz y por supuesto para el Mediterráneo.

Estos valores sirven para la caracterización hidrodinámica de la plataforma y se emplearán a modo de input para el software Orcaflex®, donde se pueden introducir las líneas de fondeo y realizar el análisis para distintos estados de mar.

5. Sistema de mantenimiento de la posición.

Los sistemas de mantenimiento de la posición son variados. Para este tipo de plataformas, por no estar tripuladas y por el elevado coste se descartan los posicionamientos dinámicos con hélices azimutales (thrusters).

Por lo tanto, se ha de recurrir a sistemas de posicionamiento pasivos, es decir, a líneas de fondeo tradicionales. En este trabajo no se entrará al detalle de las ventajas de unos frente a otros [4], ni en sus características principales [16], [17].

La solución matemática del problema del cálculo de la dinámica de los movimientos del conjunto sistema de fondeo más plataforma no es sencilla. Las líneas de fondeo se suelen modelizar como muelles lineales o no lineales dependiendo de las posibilidades de cálculo disponibles. El esquema de integración empleado varía de unos autores a otros.

En los modelos numéricos planteados por los investigadores del NREL (National Renewable Energy Laboratory) Jonkman, Buhl, Scлавounos [48],[49],[50],[51] se detalla el método de integración empleado (Newton-Raphson) y los algoritmos empleados para la iteración.

Otros como Cermelli, Roddier, Aubault [11], [12][13] emplean también un algoritmo resuelto mediante Newton Raphson descrito por Chatjigeorgiou y Mavrakos en su trabajo "Assessment of bottom-cable interaction effects on mooring line dynamics"

En este trabajo, y gracias al apoyo proporcionado por Tecnalia R&I y el Ente Vasco de la Energía EVE se ha recurrido al software Orcaflex® para estudiar el sistema de fondeo. Para conocer en detalle las características del programa se direcciona a la referencia [72].

5.1 Hipótesis iniciales.

En este estudio se parte de un sistema de fondeo con catenarias, rechazándose otras opciones como TLP o sistemas tensos por no ser de aplicación.

Se selecciona cadena de acero de eslabón sin conrete, que es la que se suele emplear para fondeos permanentes. Funciona mejor a fatiga y supone una disminución en el peso total de la línea, lo que para emplazamientos de alta profundidad resulta muy interesante [46].

La profundidad de referencia es 250 m. Tan sólo se estudia el sistema de fondeo en una de las plataformas, aunque este es un cálculo que debe hacerse para las distintas profundidades dentro del total del parque eólico.

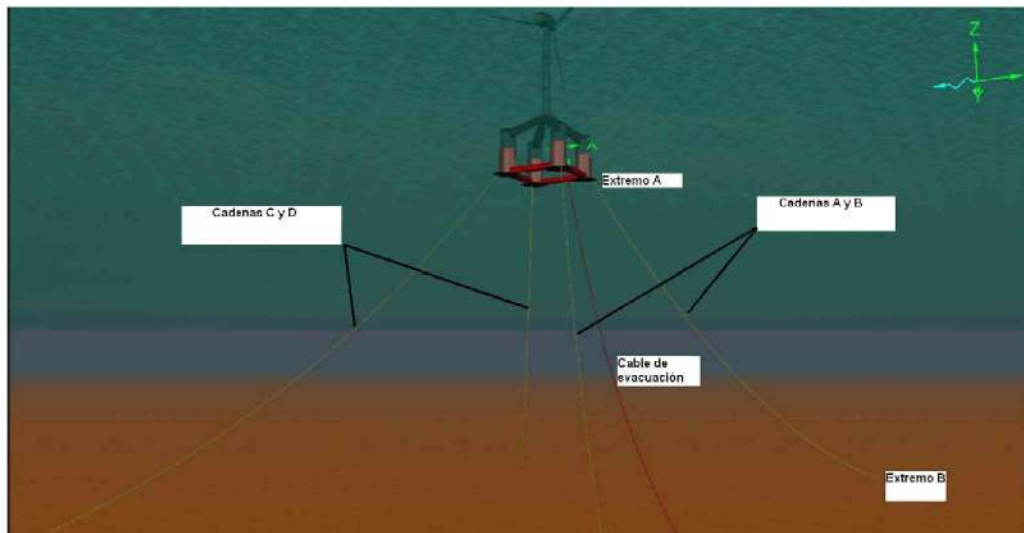
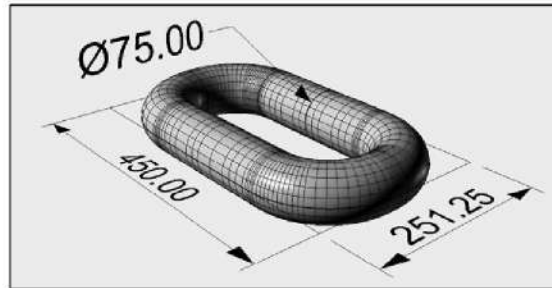
El estudio se plantea a dos niveles que facilitan la comprensión: análisis estático y análisis dinámico.

5.2 Análisis estático.

El análisis estático permite determinar las posiciones de equilibrio iniciales que adopta tanto la plataforma como las líneas de fondeo y el cable de evacuación eléctrica. No incluye los efectos dinámicos añadidos por el oleaje.

El procedimiento que se sigue consiste en introducir una estructura flotante de la que ya se han definido y obtenido sus características hidrodinámicas (Ver 4). Posteriormente se introducen las 4 líneas de fondeo con unas características mecánicas determinadas. En este caso se comienza partiendo de la posición conocida de los pilotes y para la cadena se emplean las características de la tabla adjunta⁵.

Características generales	
Profundidad d	m 250
Tipo de fondeo	catenaria
Longitud de líneas L	m 620
Tipo de eslabón	sin concreto
Dimensiones eslabón	75 mm
Grado	R3
Carga de rotura	KN 4189,5
Relación L/d	2,48



5.2.1 Situación inicial estática.

Se parte de una situación inicial en la que tan sólo intervienen los pesos propios de las cadenas y el cable de evacuación eléctrica. Los puntos fijos son aquellos donde se encuentran los pilotes.

En la Figura 5.1 la línea en rosa simula el cable de evacuación eléctrico y las amarillas las líneas de fondeo.

El único efecto apreciable es la ligera variación del francobordo de la plataforma en la que se pasa de 11 m de francobordo a 10,57 m. Se puede optar por mantenerlo así o redefinir la situación de carga reduciendo el lastre líquido hasta recuperar los 11m de francobordo.

Estático inicial	Line 1	Line 1	Line 2	Line 2	Line 3	Line 3	Line 4	Line 4
	End A	End B	End A	End B	End A	End B	End A	End B
Total Force (kN)	375,1	179,94	375,1	180,0	375,2	180,0	375,3	180,0
End Tension (kN)	375,1	174,57	375,1	174,6	375,2	174,6	375,3	174,7

Tabla 5.1 Tensión en las líneas en la situación estática inicial.

⁵ Se muestran los resultados finales. En realidad el proceso es iterativo partiendo de un eslabón de 70 mm y una longitud inicial de 3 veces la profundidad se ha de ir ajustando en función de los resultados que se van obteniendo.

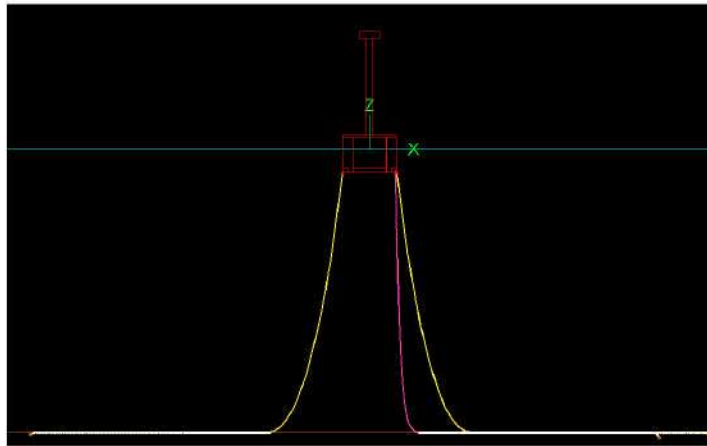


Figura 5.1. Situación inicial de equilibrio estático.

5.2.2 Efecto conjunto de corrientes y fuerza horizontal de viento.

Antes de proceder al análisis dinámico se muestra el efecto conjunto de la corriente extrema⁶ y la carga de 90 ton.

Se aprecia una excursión de 64 m y 6 grados de trimado. En los cuatro grados de libertad restantes no existen variaciones significativas respecto la posición original.

Desplazamientos (m)			Rotaciones (deg)		
X	Y	Z	Rxx	Ryy	Rzz
-64,32	0,15	-0,70	0,03	-6,00	0,01

Las tensiones han aumentado considerablemente como se puede ver en la tabla siguiente:

Estático combinado	Line 1	Line 1	Line 2	Line 2	Line 3	Line 3	Line 4	Line 4
	End A	End B	End A	End B	End A	End B	End A	End B
Total Force (kN)	1194,3	994,9	1179,5	979,7	380,0	171,6	380,5	171,9
End Tension (kN)	1194,3	993,6	1179,5	978,5	380,0	166,0	380,5	166,4

Tabla 5.2 Tensiones estáticas tras el efecto combinado de corrientes, fuerza horizontal (thrust).

5.3 Análisis dinámico.

El análisis dinámico permite evaluar la dinámica del sistema completo en múltiples estados de mar. Es posible analizar excursiones, velocidades y aceleraciones de cualquier punto de la plataforma. También existe un amplio abanico de opciones para el estudio de tensiones, análisis de curvaturas etc, en las líneas de fondeo.

5.3.1 Estados de mar. Condiciones de carga.

El análisis dinámico se realiza para diversos estados de mar de referencia.

- Ola aislada extrema (Tormenta de los 50 años).
- Espectro extremo para $H_{s,50\text{años}}$, T_p . (Tormenta de los 50 años).
- Oleaje para la velocidad de viento máxima de operación del aerogenerador.
- Oleaje para cargas por viento máximas en operación.

La direccionalidad también se tiene en cuenta, ya que los vientos y el oleaje no tienen que ser colineales.

En la tabla siguiente se definen los estados de mar⁷:

⁶ El efecto de la corriente también se añade en el análisis dinámico pero el software permite incluirlo primeramente en el estático.

⁷ Las direcciones aparecen en coordenadas globales y locales.

		Estado de mar 1	Estado de mar 2	Estado de mar 3	Estado de mar 4
		Operación normal	Operación extrema	Ola max 50 años	Tormenta 50 años
Tipo		ola (Airy)	ola (Stockes)	ola (Stockes)	Jonswap
H _s	m	3	18	23,62	13,09
T _p	s	11	15	22,07	17
Dir. olas	Grados	NW (90°)	NW (90°)	NE (0°)	NE (0°)
V _{viento}	m/s	12,5	30	44	44
Dir. Viento	Grados	NE (0°)	NE (0°)	NE (0°)	NE (0°)
V _{corriente}	m/s		0,7	-1,4	1,4
Dir. Corriente	Grados	NO	NE (0°)	NE (0°)	NE (0°)

Tabla 5.3 Tabla de estados mar.

Para poder ceñirse a la extensión propuesta para este trabajo se muestran tan sólo los resultados más relevantes y las conclusiones principales para los distintos estados de mar. También se hace notar que deberían ensayarse más estados de mar, sobre todo, mares con diversos espectros, direcciones y con las cargas aerodinámicas asociadas.

Resultan interesantes analizar diversos resultados tales como:

- Posiciones de equilibrio de la plataforma,
- tensiones en las líneas,
- desplazamientos, rotaciones, velocidades y aceleraciones de la plataforma y de la góndola del aerogenerador.

5.4 Estado de mar 1: Operación viento nominal.

A este estado de mar le corresponde un viento de 12,5 m/s. El aerogenerador está soportando el "thrust" máximo de 90 ton. Se ha optado por una direccionalidad olas-viento muy probable en Villano con el viento incidiendo en la dirección NE y el oleaje en la dirección NW.

Para simular una situación más real se adrizza la plataforma aplicando un momento adrizante del mismo orden de magnitud que el escorante como se hizo en el cuaderno 4. De esta forma, se tienen tensiones y excursiones casi reales y la plataforma está adrizada (este proceso se realiza con el sistema de trasiego de lastre).

La ola se ha modelizado con la teoría de Airy por ser la más apropiada para esta profundidad, altura y periodo.

Se ha despreciado en este caso la presencia de corrientes.

Como se trata de una ola regular el tiempo de simulación es tan sólo de 36 s ya que una vez que se amortiguan los efectos transitorios, la dinámica de la plataforma y las líneas es periódica.

5.4.1 Resultados estado de mar 1.

En este caso la plataforma se desplaza según el eje Y por el efecto del viento. Se mueve en arfada y cabeceo por el efecto de las olas que inciden perpendicularmente al viento. Las líneas B y C (las que primero se enfrentan al efecto del viento) se tensan más que D y A debido a la excursión según el eje Y (Ver Figura 5.4).

Position (m)			Orientation (deg)		
X	Y	Z	Rotation 1	Rotation 2	Rotation 3
-1,11	-34,50	-0,58	0,51	0,20	0,14

En cuanto a tensiones en las líneas, las líneas B y C alcanzan tensiones próximas a las 95 ton, que son valores aceptables, mientras que las A y D no son preocupantes en estos casos.

5.4.1.1 Movimientos de la plataforma.

En este estado de mar resulta más interesante analizar cómo se mueve la plataforma ya que el aerogenerador está en plena operación.

Los movimientos significativos se producen en arfada con 1,2 m de variación respecto el equilibrio y en largada y deriva las oscilaciones son bajas con valores menores de 2 m.

Es destacable el buen comportamiento en lo que rotaciones se refiere con valores muy poco importantes. Ver Figura 5.2

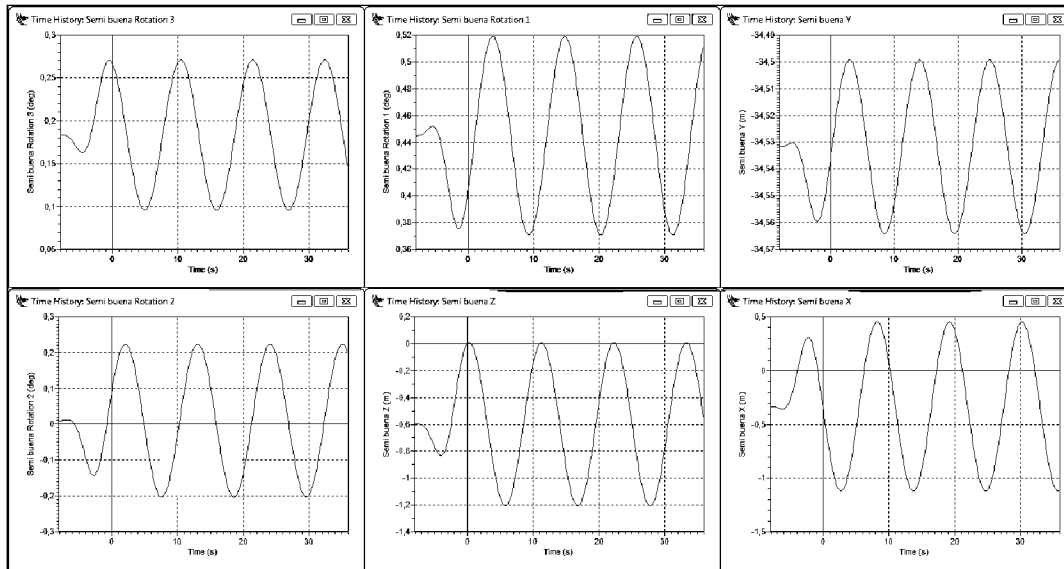


Figura 5.2. Desplazamientos en los 6 GdL en estado de mar 1.

En las gráficas se verifica que los valores obtenidos son muy bajos, del orden de la décima parte de la aceleración de la gravedad en el caso de las traslaciones.

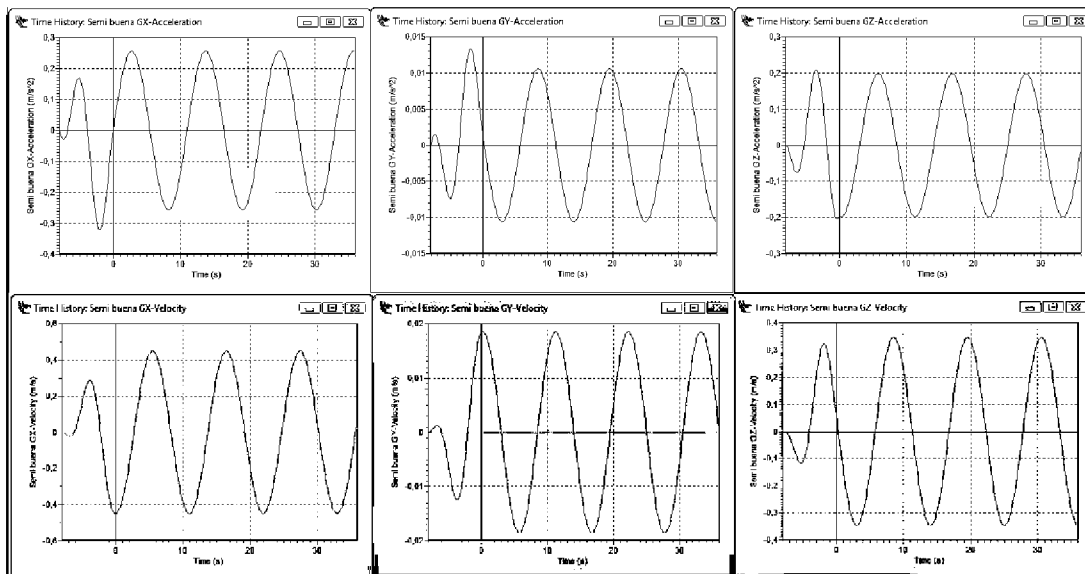


Figura 5.3. Velocidades y aceleraciones lineales (según X,Y,Z) . Estado de mar 1.

5.4.2 Conclusiones de la simulación del estado de mar 1.

Este estado de mar podría considerarse el de operación habitual de la plataforma. En general, los resultados son buenos.

Como conclusiones generales se puede decir que:

- Las tensiones están lejos de las de rotura del fondeo.
- Las excursiones y las rotaciones son moderadas por lo que el funcionamiento del aerogenerador no se verá afectado.
- Las velocidades y aceleraciones también son moderadas.
- No es necesario realizar ningún cambio en la configuración del fondeo, ni en las propias líneas.
- El tramo de cadena sobre el suelo de las líneas enfrentadas al viento se reduce considerablemente, por lo que la tensión recae directamente sobre el punto de anclaje.

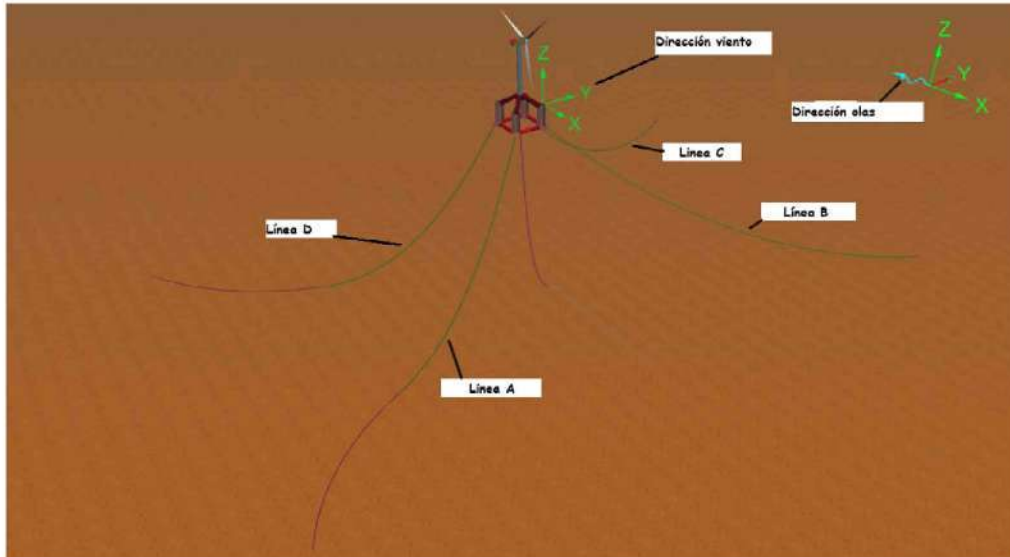


Figura 5.4. Plataforma en estado de mar 1 con las líneas B y C tensadas por efecto del viento.

5.5 Estado de mar 2: Operación extrema.

Este estado de mar se caracteriza por grandes olas (hasta 18 m) y viento muy fuerte (30 m/s). En teoría el aerogenerador podría funcionar con estas condiciones de viento.

Se hace el análisis para olas regulares aplicando la teoría de Stockes de 5º orden. El periodo del oleaje es de 15 s. Observando la RAO de heave este es un periodo cerca del pico de resonancia de la plataforma.

En cuanto al viento el aerogenerador ha debido girar las palas de manera que reduce el área enfrentada al viento para reducir las cargas. A la vista de los datos proporcionados en la referencia [52] el "thrust" aproximado para esta velocidad de viento es de 350 KN (35 ton).

Se introducen corrientes en este caso de 0,7 m/s que podrían ser perfectamente corrientes debidas al viento. Por ello, se suponen viento y corriente colineales y olas incidiendo perpendicularmente a ambos.

5.5.1 Resultados estado mar 2.

Como en el caso anterior, se muestran los resultados más importantes de esta simulación. La plataforma se desplaza en el sentido negativo del eje Y, y la escora inducida por el viento se compensa con el trasiego de agua.

Posición (m)			Orientación (deg)		
X	Y	Z	Rxx	Ryy	Rzz
4,06	-18,47	5,46	2,38	-3,39	-0,32

5.5.1.1 Tensiones en las líneas del estado de mar 2.

Las líneas B y C (las que primero se enfrentan al viento y corriente) en sus extremos unidos a la plataforma son las más sobrecargadas alcanzando las 150 y 120 ton respectivamente.

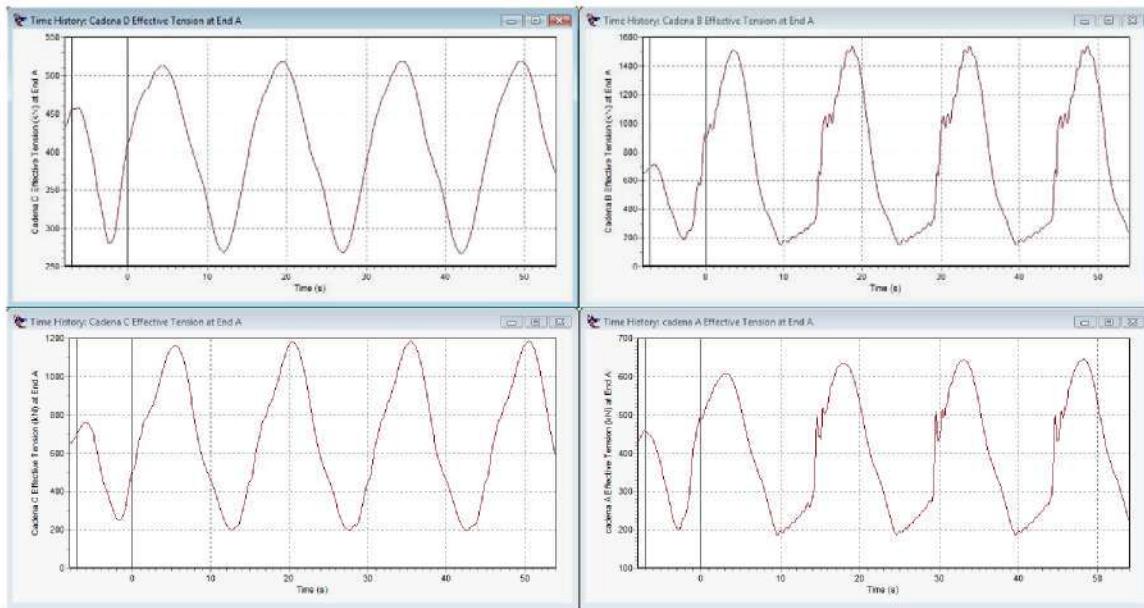


Figura 5.5. Tensiones en las líneas en el extremo A en estado de mar 2.

5.5.1.2 Movimientos de la plataforma.

En la tabla siguiente se resume la variación de los movimientos respecto a la posición de equilibrio de la plataforma.

Movimiento	Variación
Largada (m)	± 7
Deriva (m)	$\pm 0,9$
Arfada (m)	± 8
Balance ($^{\circ}$)	± 3
Cabeceo ($^{\circ}$)	± 4
Guiñada ($^{\circ}$)	$\pm 0,35$

	Variación
Vx (m/s)	$\pm 2,9$
Vy (m/s)	$\pm 0,38$
Vz (m/s)	$\pm 3,1$
ax (m/s ²)	$\pm 1,2$
ay (m/s ²)	$\pm 0,15$
az (m/s ²)	$\pm 1,5$

La estructura se mueve prácticamente en fase con la ola. El problema es que en este caso a los 15 segundos es muy cercano a la resonancia por lo que la cubierta de las columnas se sumergen bajo la cresta de la ola. Los pontones prácticamente quedan al descubierto parcialmente al paso del seno de la ola.

En el caso de velocidades y aceleraciones lineales también aumentan aunque todavía por debajo del límite fijado de 3m/s²

5.5.2 Conclusiones de la simulación del estado de mar 2.

- Las tensiones han aumentado considerablemente aunque todavía lejos de las cargas de rotura. No obstante, se toma la decisión de que la cadena debe ser al menos de grado R3.
- Los movimientos de la plataforma pueden comprometer la operación del aerogenerador. Sería necesario que el proveedor de aerogeneradores tomase decisiones a cerca del límite máximo de operación en cuanto a excursiones, rotaciones, velocidades y aceleraciones admisibles.

5.6 Estado de mar 3: Ola máxima de los 50 años.

Acorde con los datos proporcionados en la referencia [75], [76] se selecciona la ola extrema de 23,62 m y periodo de 22,07 s.

En este caso supone el viento extremo, corriente extrema y ola extrema, todos ellos colineales.

En este caso las palas están paradas por lo que el momento escorante es menor. La carga empleada es en este caso:

- Fuerza horizontal de 115 ton aplicada en el centroide del área proyectada a 31 m respecto SWL.

5.6.1 Resultados estado mar 3.

La plataforma se desplaza en el sentido negativo del eje X, y la escora inducida por el viento se compensa con el trasiego de agua. La excursión horizontal es bastante grande.

Posición (m)			Orientación (deg)		
X	Y	Z	Rxx	Ryy	Rzz
-60,02	0,93	-2,16	-5,52	0,49	3,00

5.6.1.1 Tensiones en las líneas del estado de mar 3.

En este caso las cadenas que más sufren son las que se enfrentan en primera instancia a olas, viento y corriente. Se alcanzan las 250 ton de carga. Esto indica que es necesario seleccionar una cadena de al menos grado R3, de 427 ton de carga de rotura.

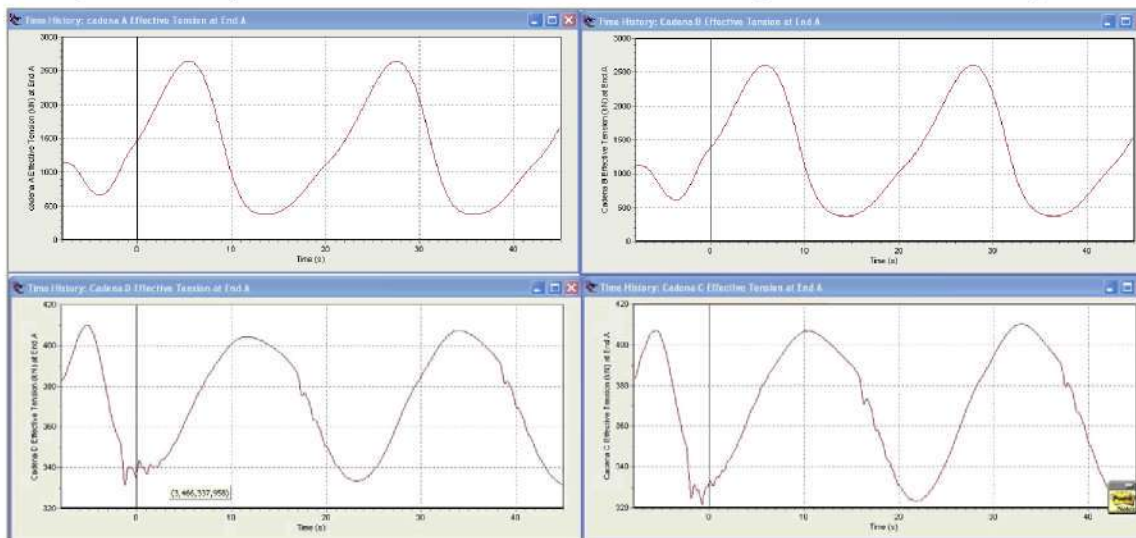


Figura 5.6. Tensiones en el extremo A en las líneas en estado de mar 3.

Como en el estado de mar 2 las líneas aguas abajo (C y D) se destensan y las carga no es sinusoidal como en el caso de las líneas más tensas.

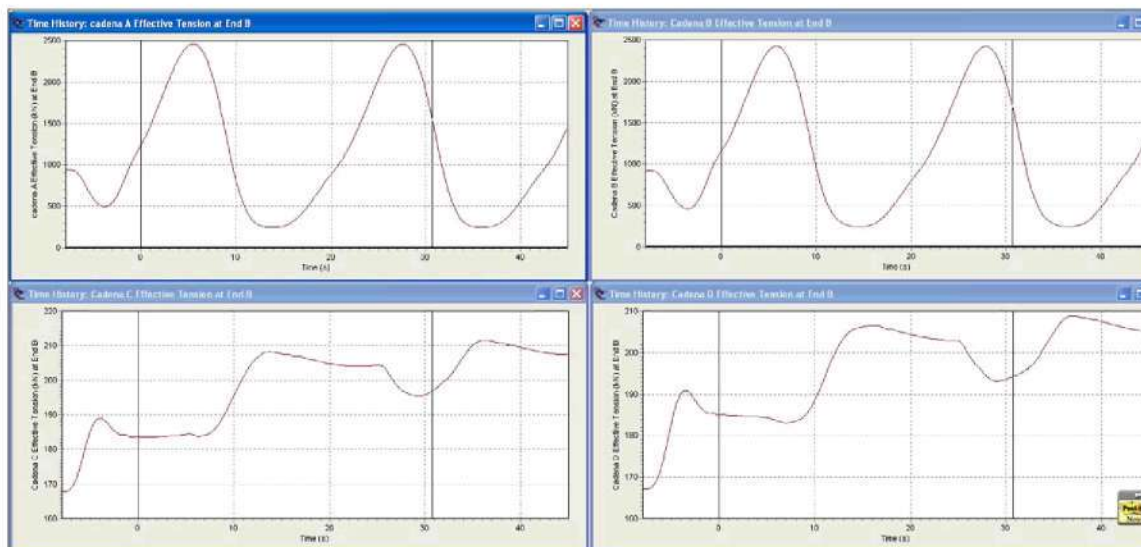


Figura 5.7. Tensiones en el extremo B en las líneas en estado de mar 3.

5.6.1.2 Movimientos de la plataforma.

En este caso con un periodo tan alto, la plataforma se mueve arriba y abajo, prácticamente en fase con la ola y también en largada adelante y atrás con una variación de $\pm 15\text{m}$. Las aceleraciones no sobrepasan el límite fijado en 3m/s^2

5.6.2 Conclusiones de la simulación del estado de mar 3.

- Si se mantiene el diámetro del eslabón se ha de recurrir a cadena grado R3.
- Hay que verificar que el pilote sea capaz de soportar las cargas en el extremo B.
- Las velocidades y aceleraciones más importantes se alcanzan en aquellos casos cercanos a la resonancia y no en este estado de mar.

5.7 Estado de mar 4. Tormenta de los 50 años.

Este análisis es más realista que los anteriores. Se introduce un espectro JONSWAP con las características indicadas en la Tabla 5.3 acorde con los datos proporcionados en la referencia [75], [76], [77], [78] para el emplazamiento seleccionado. También se incluye el efecto del viento y las corrientes.

El tiempo de simulación es un estándar de 3h (10800s) que se suele tomar en ingeniería offshore.

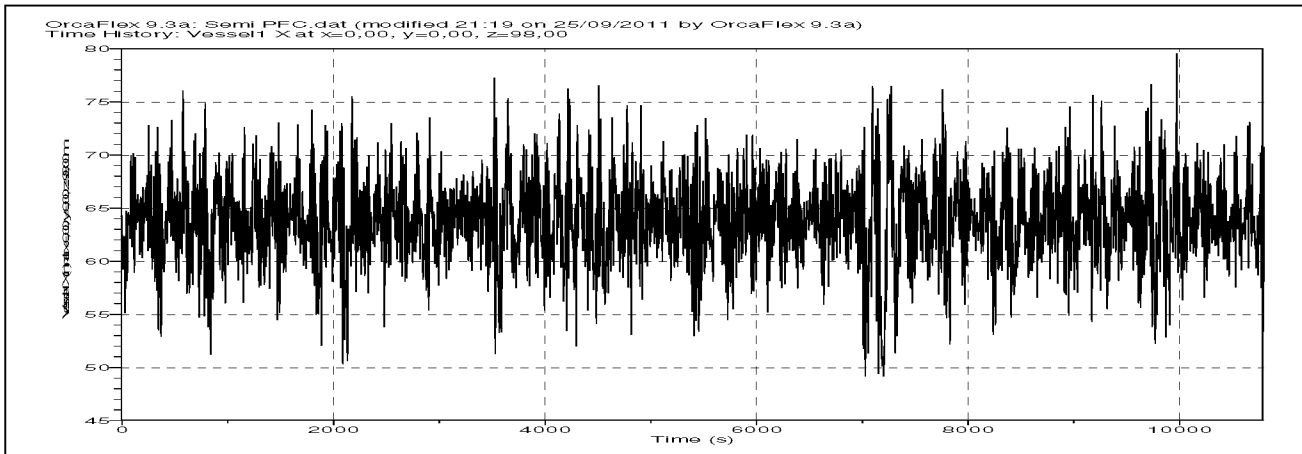
De esta forma se está incluyendo un mar irregular con un oleaje variable que queda definido al concretar las características del espectro de altura significativa, periodo y el factor de pico γ .

5.7.1 Resultados Estado de mar 4. Tormenta de los 50 años.

Se muestran las series temporales completas y los valores estadísticos asociados a cada serie. Los resultados más interesantes mostrados son desplazamientos a la altura de la góndola en largada, arfada y rotación en cabeceo.

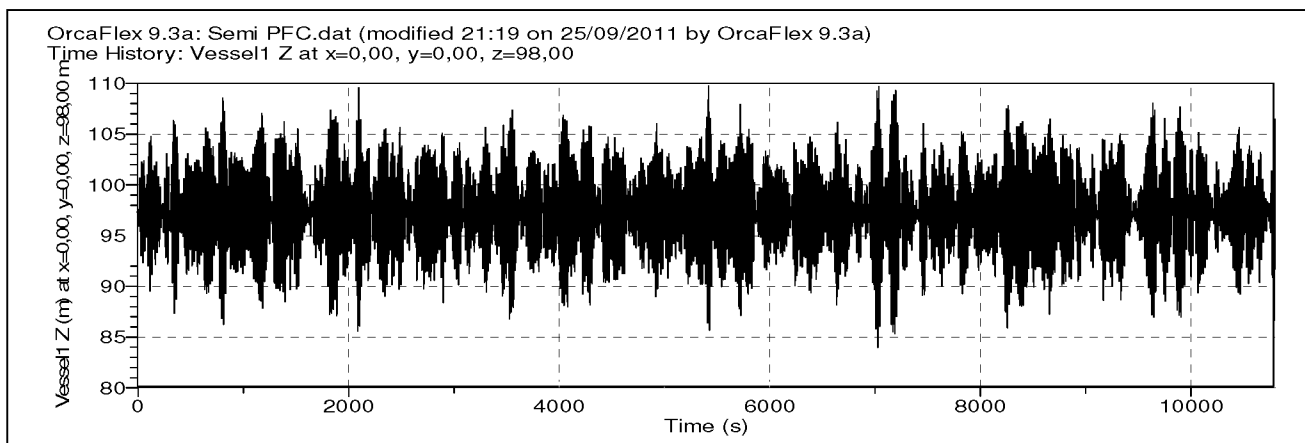
También se han incluido las aceleraciones de la góndola según eje X y según eje Z.

Por último, se chequean las tensiones en las líneas de fondeo.



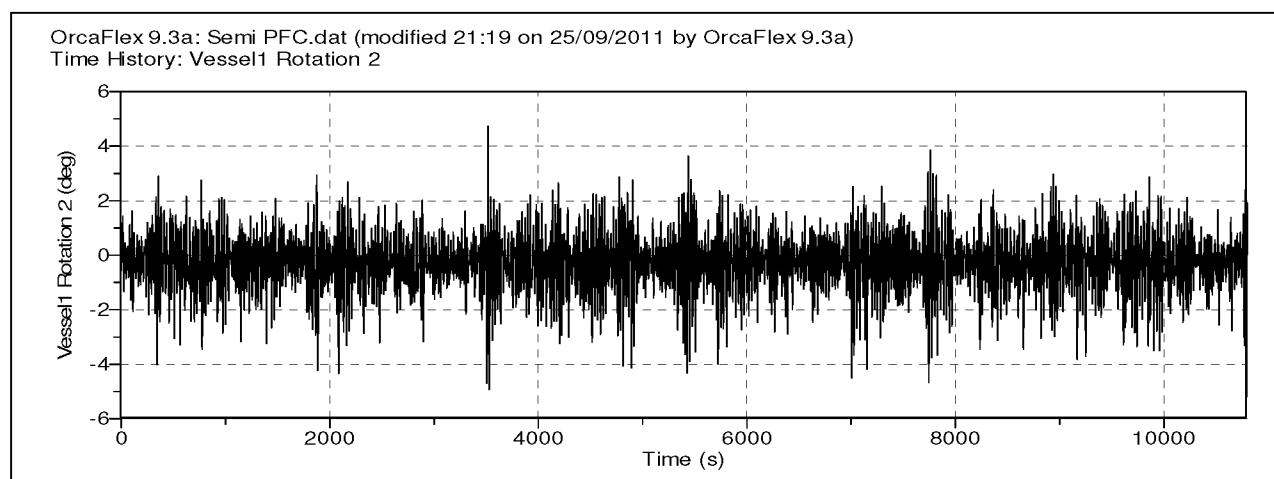
Variable	Period (s)		Min	Time	Max	Time	Mean	Standard Deviation
	From	To	m	s	m	s		
X (m) at x=0, y=0, z=98 m	0	10800	49,19	7202,8	79,50	9973,3	63,86	3,980

Figura 5.8. Desplazamientos horizontales en Z = 98 m



Variable	Period (s)		Min	Time	Max	Time	Mean	Standard Deviation
	From	To	m	s	m	From		
Z (m) at x=0,00, y=0,00, z=98,00 m	0	10800	83,97	7026,7	109,733	5417,7	97,268	3,936

Figura 5.9. Desplazamientos verticales en Z=98m



Variable	Period (s)		Minimum	Time	Maximum	Time	Mean	Standard Deviation
	From	To						
Rotation 2 (deg)	0	10800	-5,31	10791,1	4,73	3517,9	-0,318	1,13

Figura 5.10. Rotaciones según eje Y. Cabeceo.

Como se puede ver a lo largo de los 10800 s la góndola se mueve en valores máximos horizontalmente hasta ± 30 m, unos ± 26 m en arfada y rota en cabeceo $\pm 5^\circ$. Nótese que este efecto es debido al oleaje y que la escora debida al viento ya ha sido compensada con el sistema de trasiego de agua.

No obstante, las variaciones estadísticas respecto a la media (desviación estándar) son valores moderados que hablan del buen comportamiento de la plataforma.

En la figura siguiente se muestran dos instantes muy concretos de la plataforma. El primero es uno de los momentos en los que la plataforma se encuentra más emergida y el segundo es uno de los instantes en el que se encuentra más sumergida y ligeramente trimada a proa.

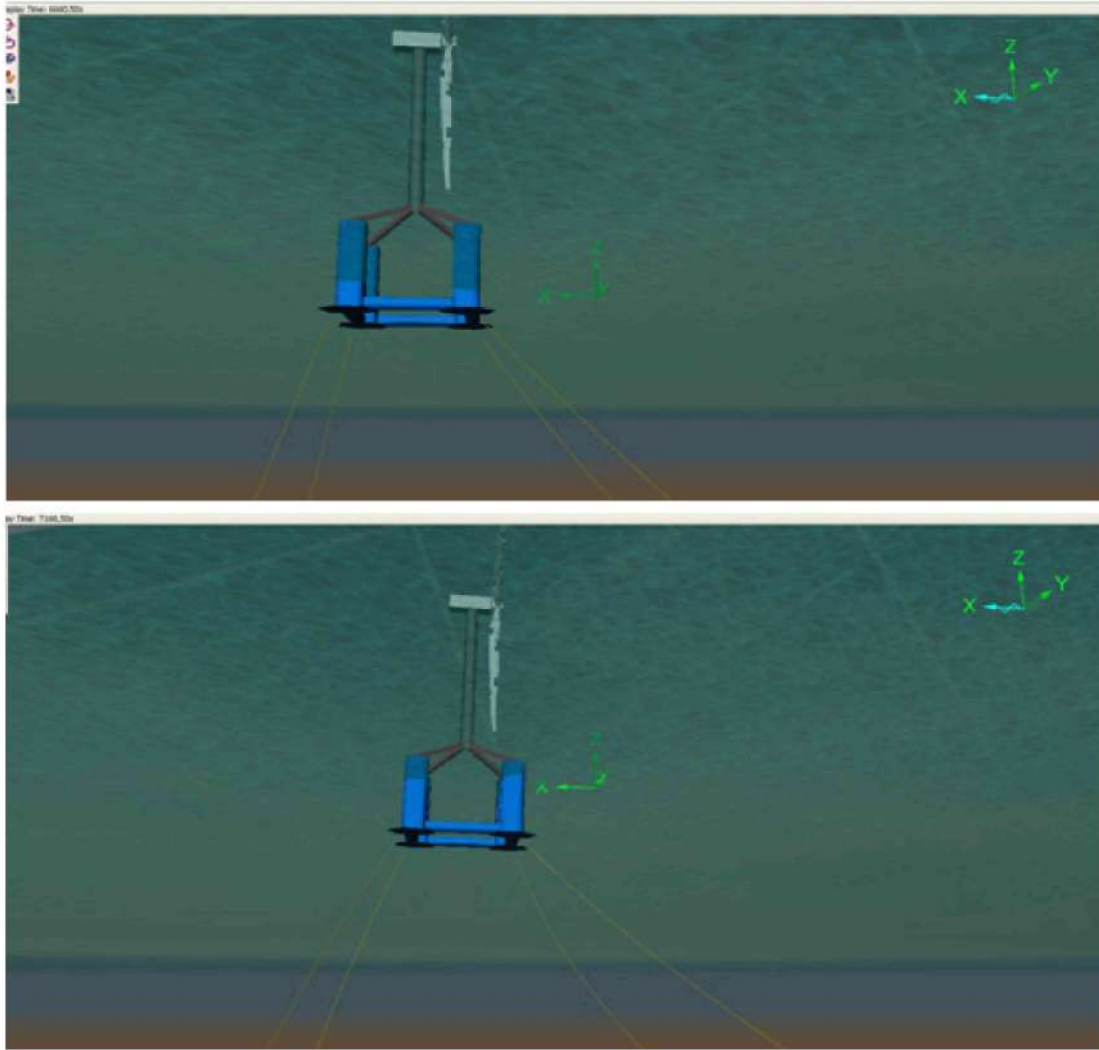
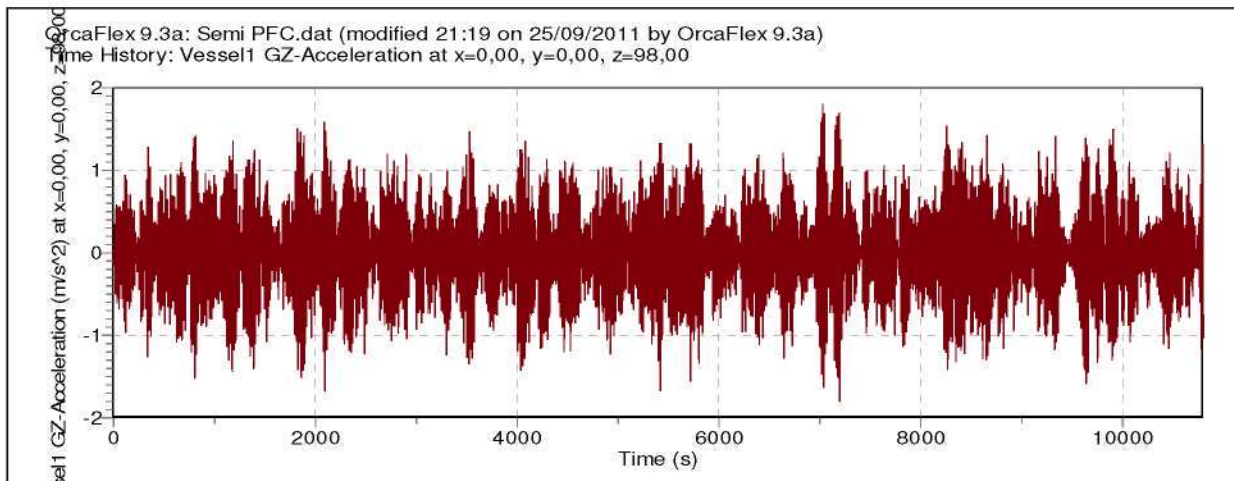
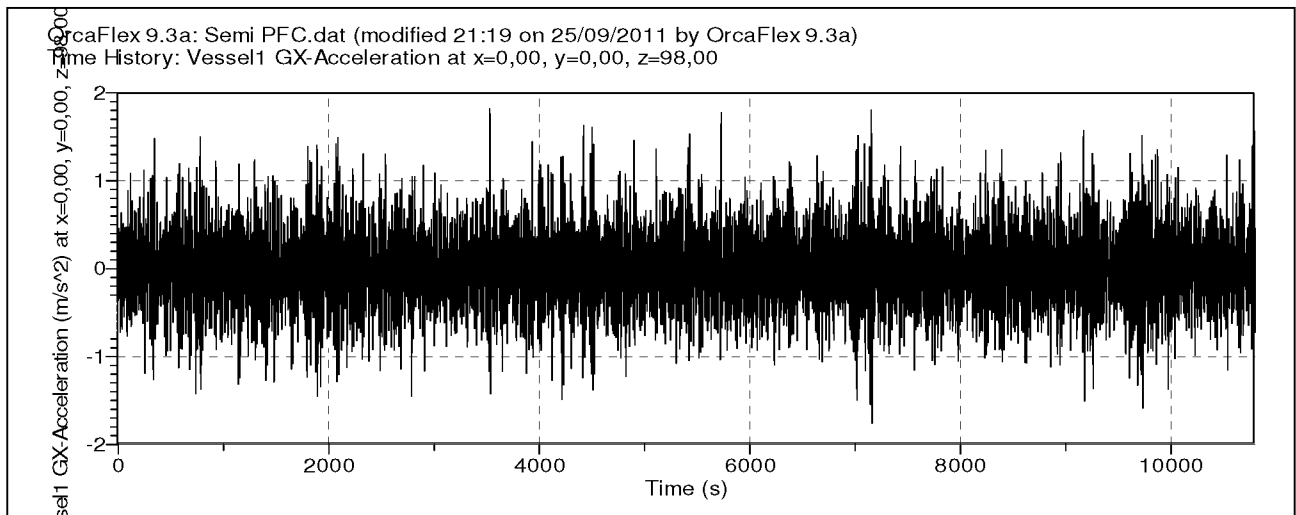


Figura 5.11. Posición de la plataforma en los instantes 6660 s y 7160 s respectivamente.



.Variable	Period (s)		Minimum	Time	Maximum	Time	Mean	Standard Deviation
	From	To						
GZ-Acceleration (m/s ²) at x=0,00, y=0,00, z=98,00 m	0	10800	-1,79	7195,4	1,79	7026,8	0,00014	0,54

Figura 5.12. Aceleraciones según eje Z a la cota Z=98m.



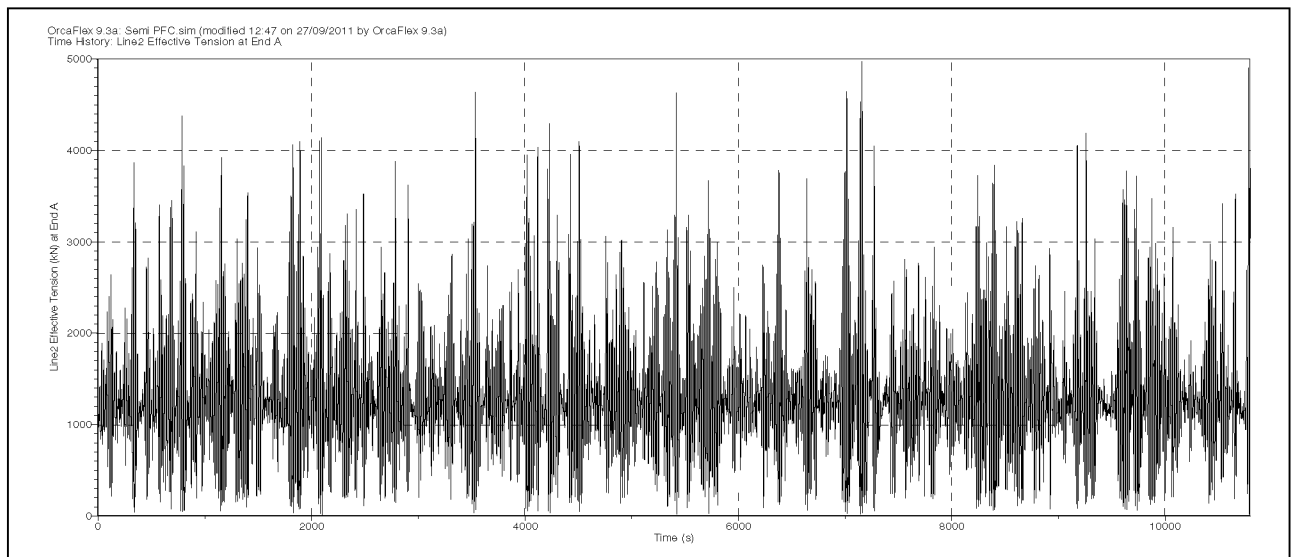
Variable	Period (s)		Minimum	Time	Maximum	Time	Mean	Standard Deviation
	From	To						
GX-Acceleration (m/s ²) at x=0,00, y=0,00, z=98,00 m	0	10800	-1,75	7160,6	1,81	3528,5	0,00025	0,445

Figura 5.13. Aceleraciones según eje X a la cota Z=98m.

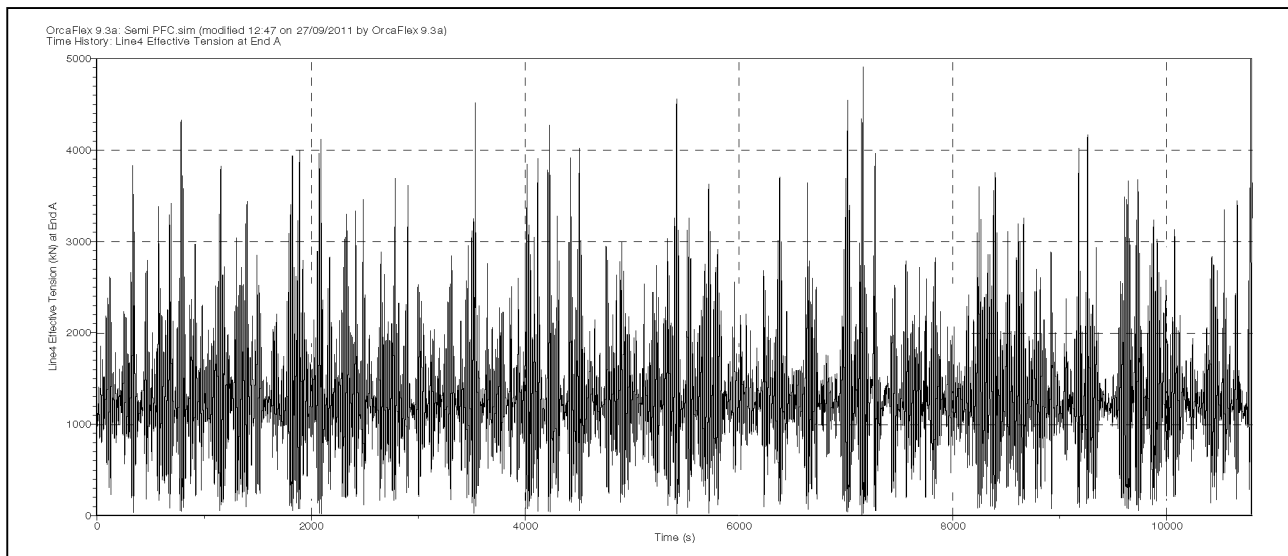
Las aceleraciones son un factor muy importante para operatividad del aerogenerador. En las dos gráficas anteriores se muestran que no se alcanzan los valores máximos admisibles según el X y el eje Z.

En las dos gráficas siguientes en las que se analizan las líneas más sobrecargadas se puede ver como se alcanzan las mayores tensiones de las mostradas hasta ahora.

Estos valores obligan a subir el grado de la cadena a grado R4 con una carga de rotura de 597 ton. (Otra posible opción sería subir el diámetro de la cadena y habría que relanzar los cálculos. Al final esta decisión es una cuestión de costes y de disponibilidad de cadena).



Variable	Period (s)		Minimum	Time	Maximum	Time	Mean	Standard Deviation
	From	To						
Effective Tension (kN) at End A	0	10800	16,358	2097,5	4970,7	7159,8	1317,7	674,56



Variable	Period (s)		Minimum	Time	Maximum	Time	Mean	Standard Deviation
	From	To						
Effective Tension (kN) at End A	0	10800	15,93	7147,8	4996,3	10782,8	1317,7	656,4

Figura 5.14. Tensiones en las líneas que primero se enfrentan al viento.

6. Definición estructural.

El objetivo es plantear el procedimiento de diseño y los resultados obtenidos. Asimismo se identificarán aquellos análisis que aunque no se realizaron deberían hacerse en fases más avanzadas de proyecto y con el software apropiado.

Para poder ceñirse a las extensiones fijadas para este trabajo no se muestran todos los cálculos intermedios necesarios para llegar a la definición de la estructura.

6.1 Definición de los estados límite, categorización de cargas y cargas de diseño

El método de diseño empleado de acuerdo con los reglamento de la sociedad de clasificación será el LRFD (Load and Resistance Factor Design) [20].

Los estados límite definen una condición más allá de la cual se excede un requerimiento de diseño estructural determinado.

Siguiendo los estándares establecidos en [20] se definen 4 estados límite:

- Estado límite último (Ultimate Limit States ULS), correspondiente a la cargas resistentes máximas.
- Estado límite de fatiga (Fatigue Limit States FLS), que está relacionado con el fallo debido a cargas cíclicas.
- Estado límite de servicio (Serviceability Limit States SLS), que se refiere a condiciones normales de uso.
- Estado límite accidental (Accidental Limit States ALS), aplicable en condiciones en las que el elemento estructural ha sido dañado.

6.2 Caracterización estructural, materiales y categorización de las inspecciones.

Cada Sociedad de clasificación usa una nomenclatura y unos criterios de clasificación propios aunque en esencia coinciden.

Por ejemplo, el DNV clasifica los aceros en base a su carga de resistencia y dentro de cada grupo resistente los clasifica en A, B, C, D atendiendo a las características de soldabilidad y la temperatura de diseño

Es importante también mostrar que la trazabilidad del material es crucial para la construcción de estructuras metálicas. La colada de la que ha salido en la acería, el tipo y calidad del acero, las pruebas que ha pasado, los tratamientos térmicos a los que se ha sometido, ya que son requisitos que exige la SSCC.[24]

Para comenzar un diseño estructural se realiza una caracterización de los elementos de la misma definiéndolos como ([20],[21]Sec2 B)

- Elementos primarios entendiéndose como tales aquellos que constituyen los elementos básicos de la estructura cuyo fallo podría ser muy importante para la integridad del conjunto.
- Elementos secundarios entendiéndose como tales aquellos cuyo fallo no resultan críticos ,etc.
- Elementos especiales son aquellas estructuras que por su configuración o por una situación de carga particular se salen de la categorización anterior y requieren una inspección todavía más cuidadosa.

En las siguientes figuras se muestran dos ejemplos de caracterización estructural. En la Figura 6.1 se puede ver la categorización estructural de panel plano de acero con reforzado típico en construcción naval y offshore.

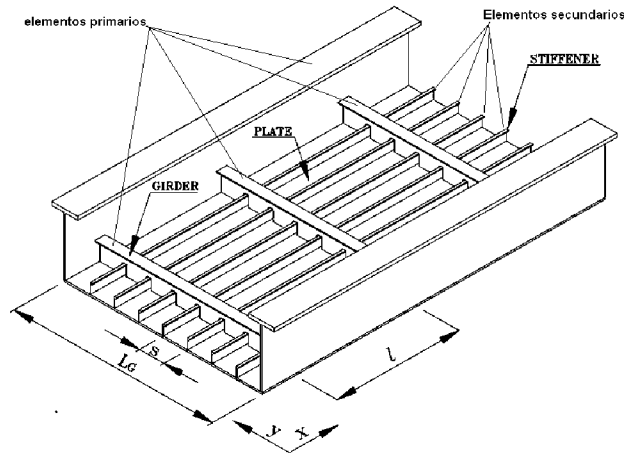


Figura 6.1. Categorización estructural de un panel plano

En concreto, en una semisumergible los miembros estructurales se agrupan en:

a) Categoría especial.

1. Zonas de cubierta, mamparos y refuerzos que soportan cargas concentradas.
2. Casco externo de los nodos entre columnas con cubierta y columnas con pontones.
3. Aquellos elementos que a modo de conexión se diseñan para mantener alineados dos elementos estructurales y proporcionar un reparto de cargas adecuado.
4. Las zonas donde pudiesen estar alojadas la base de una grúa o de maquinillas o similares del sistema de fondeo.

b) Categoría primaria.

1. Zonas de cubierta, mamparos y refuerzos que no soportan cargas concentradas.
2. El casco de las columnas y pontones.
3. Mamparos, cubiertas y refuerzos que no entren dentro de la categorización especial y que sirvan para dar continuidad estructural y refuerzo local.
4. Los soportes de subestructuras a bordo, polines de equipos, etc que no entren en la categoría especial.

c) Categoría secundaria.

1. En general todo aquello que no se ha considerado ni primario ni especial.

Esta clasificación es importante no solo a efectos de diseño sino también en lo referente a inspecciones, ya que, dependiendo del tipo de elemento estructural las inspecciones de soldaduras tienen una caracterización distinta. [24]

En cuanto a los materiales con ayuda de las tablas de la sección 4 de la referencia [20] se establecen como materiales principales para la construcción de la plataforma:

- Acero NV del grupo de resistencia NS clase A para 0° con tensión de fluencia de 235 N/mm²
- Acero de alta resistencia NV 36 tensión de fluencia 355 N/mm², clase A.

6.3 Diseño de la estructura del casco.

El diseño estructural de una estructura offshore puede ser desglosado en dos niveles principales:

- Resistencia local.
- Resistencia general o global.

6.3.1 Resistencia local. Escantillonado

Los espesores de los mamparos, cubiertas y chapas de forro son los mínimos que cumplan los requisitos de resistencia local, aunque a veces es necesario aumentar el escantillonado para cumplir los requerimientos de resistencia global o de resistencia a la fatiga.

Cada sociedad de clasificación desarrolla sus propias reglas para los escantillones mínimos de las planchas de acero. Generalmente, también tienen en cuenta factores que consideran la pérdida de espesor debida a la corrosión.

En este proyecto se emplean como base para los cálculos de resistencia local las normas del DNV.

Las reglas para la determinación de escantillonados se basan en presiones hidrostáticas uniformes sobre la plancha en estudio.

Estas presiones se estiman a partir de dos componentes: las cargas producidas por presión externa debidas a la profundidad y las cargas por olas.

Siguiendo las recomendaciones del DNV para el cálculo de espesor (Ver [20]Sec 5, F300) :

$$t = \frac{15,8 K_a s \sqrt{p}}{\sqrt{\sigma_p K_p}} + t_k \quad mm \quad \text{Ec. 6.1}$$

Donde:

- s = clara entre refuerzos (dirección corta).
- l = distancia entre bulárcamas (dirección larga).
- p = presión (kN/mm²).
- σ_p = esfuerzo admisible por la chapa en cuestión. Ej : acero NV A de 235 N/mm²
- t_k = factor de corrosión que puede valer 1,5 o 2 mm.
- $K_a = \left(1,1 - \frac{0,25s}{l}\right)^2 \leq 1$
- $K_p = 1$ si los extremos están fijados (soldados o similar)
- $K_p = 0,5$ si los extremos de los refuerzos están simplemente apoyados

La presión p se calcula como suma de una presión estática y otra dinámica multiplicado por los correspondientes factores de seguridad

Table A1 Load factors, Ultimate Limit States			
Combination of design loads	Load categories		
	Permanent and variable functional loads, $\gamma_{f,G,Q}$	Environmental loads, $\gamma_{f,E}$	Deformation loads, $\gamma_{f,D}$
a	1.2 ¹⁾	0.7	1.0
b	1.0	1.2	1.0

1) If the load is not well defined, e.g. masses or functional loads with great uncertainty, possible overfilling of tanks etc., the coefficient should be increased to 1.3.

Tabla 6.1 Factores de seguridad

$$P_d = P_s \cdot \gamma_{f,G,Q} + P_e \cdot \gamma_{f,E} \text{ donde}$$

$$P_s = \rho g C_w (T_E - z_b) \quad (kN \cdot m^2) \geq 0$$

$$P_s = \rho g C_w (D_D - z_b) \quad (kN \cdot m^2) \text{ si } z_b \geq T_E$$

$$P_s = \rho g C_w (D_D - T_E) \quad (kN \cdot m^2) \text{ si } z_b < T_E$$

Ec. 6.2

El proceso es simple:

- Se calculan las presiones de diseño con las Ec. 6.2.
- Se fija un valor para la clara entre refuerzos s (normalmente oscila entre 500 mm – 700 mm)
- Entrando en Ec. 6.1 se obtiene el espesor de las planchas del casco.

Conocida la plancha se determina el refuerzo interno necesario para soportar un momento flector de diseño que se calcula con las expresiones.

$$M_{extremo} = \frac{1}{12} h s l^2$$

Ec. 6.3

$$M_{central} = \frac{1}{24} h s l^2$$

Ec. 6.4

T_E = extreme operational draught (m) measured vertically from the moulded baseline to the assigned load waterline

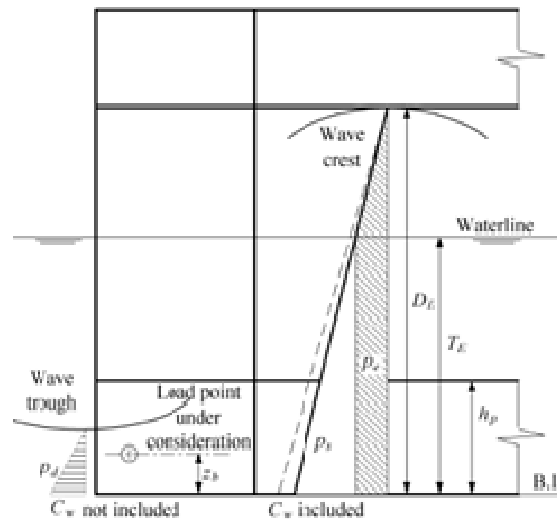
C_w = reduction factor due to wave particle motion (Smith effect) $C_w = 0.9$ unless otherwise documented

D_D = vertical distance in m from the moulded baseline to the underside of the deck structure (the largest relative distance from moulded baseline to the wave crest may replace D_D if this is proved smaller)

z_b = vertical distance in m from the moulded baseline to the load point

p_s = permanent sea pressure

p_e = environmental sea pressure.



Conocido el momento flector es sencillo determinar el módulo resistente de la sección perfil bulbo+plancha asociada.

Si se emplea la expresión proporcionada por el DNV OS C101 sec 5 F400 los módulos que se obtienen son algo mayores.

$$Z_{admisibile} = \frac{l^2 s P_d}{12 \sigma_p}$$

Ec. 6.5

De este modo es conocido el módulo mínimo necesario que se ha de comparar con el módulo de la sección a estudio. El cálculo del módulo geométrico de una sección como la de la Figura 6.2 es un ejercicio sencillo [64] Se busca el perfil bulbo que junto con la chapa asociada proporciona el módulo resistente calculado anteriormente con la ec 6.5

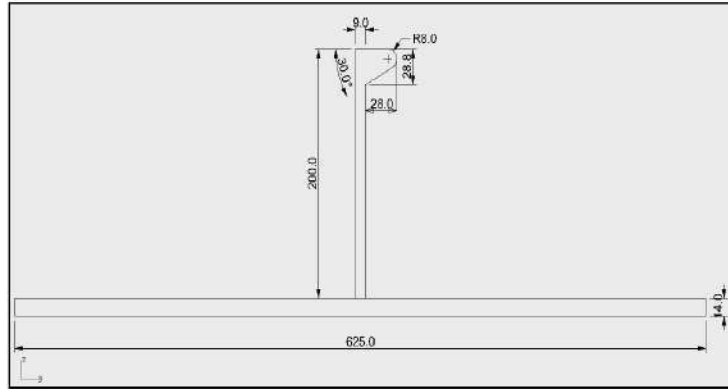


Figura 6.2. Bulb + plancha asociada. Parámetros significativos.

Este proceso es repetitivo y se puede realizar para distintos calados y escantillonar a distintos niveles.

6.3.2 Cálculo de cuadernas de los pontones.

Para el cálculo de las cuadernas se toman como referencia las indicaciones de los reglamentos DNV OS C101 Sec 5 G, DNV OS C103. En el capítulo 7 de la referencia [10] se explica de un modo más didáctico el cálculo de las mismas.

Las cuadernas se disponen transversalmente a lo largo de los pontones a una distancia $b=1550$ mm. Están constituidas por un alma y un ala (platabanda) formando una T. El alma de la bulárcama en T está atravesada por los bulb 200x9 calculados anteriormente en 6.3.1

El espesor de las bulárcamas, tanto para el alma (web) o el ala (flange plate) no puede ser menor que el calculado con la Ec. 6.1. para las planchas de forro. Por lo tanto, no ha de ser menor que 14 mm. (DNV OS C101 Sec 5 G200)

La altura del alma de la bulárcama es :

$$d_w = 3 \cdot d_s$$

Ec. 6.6

Siendo d_s la altura del bulbo.

Se considera que esta altura es la misma para toda la sección, incluso para las zonas curvadas. De este modo ya se tienen definidas las características del alma de la bulárcama:

- Distancia entre bulárcamas (frame spacing): 1550 mm.
- Espesor de acero del alma t_w : 14 mm.
- Altura de la bulárcama d_w : $3 \times 200 = 600$ mm

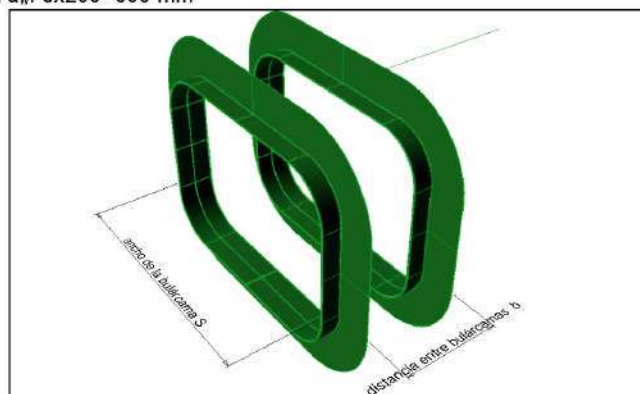


Figura 6.3. Magnitudes efectivas para el diseño de las cuadernas.

El ancho de la bulárcama S se mide a una altura igual a $1,25 \times d_w = 750$ mm al tratarse de una sección con las esquinas redondeadas (ver página 599-601 de la referencia [10]).

Ancho efectivo máximo de la bulárcama en la zona horizontal⁸ $S_{1max} = 3410,56$ mm

Ancho efectivo máximo de la bulárcama en la zona vertical $S_{2max} = 2373,26$ mm

6.3.1 Definición de la estructura de las columnas.

El cálculo de la plancha y los refuerzos se realiza como se ha propuesto más arriba, pero atendiendo a la variación de calado.

El cálculo de presiones de diseño y los espesores se realiza en intervalos de 5 m. Esto es debido a que en dichos intervalos se produce una variación significativa del espesor de las planchas. De este modo el escantillón de las columnas irá disminuyendo.

Tras determinar el espesor de las planchas, se calcula el modulo admisible y como anteriormente se calcula el bulb asociado de forma que cumpla con el modulo admisible. El bulb discurre verticalmente a lo largo de las columnas.

El cálculo de anillos es igual al propuesto para los pontones. El hecho de haber optado por un mismo bulb simplifica el cálculo y la anchura d_w anillo será la mismo para toda la columna. Tan sólo variarán los espesores acorde con la plancha de forro de la columna. Primero se calcula el módulo mínimo que proporciona la normativa.

z1	z2	z3	Z4	z5
371,06	302,34	164,92	96,20	16,49

Tabla 6.2. Módulo resistente admisible a distintas cotas en la sección de las columnas.

Ahora se pasa a definir el perfil T que define el anillo y la plancha efectiva asociada, así como la magnitud S.

- Alma del perfil T del anillo: 3 x 180 mm= 540 mm
- Espesores del alma: varían con el tramo de columna en el que se encuentre el anillo. Tiene que ser al menos como el de la plancha efectiva asociada. La platabanda también se selecciona de manera que contribuya al modulo de la sección en T. Se ha de tratar que los espesores sean del mismo orden de magnitud que el ala y la plancha efectiva asociada.

Los resultados se muestran en la sección siguiente.

6.4 Secciones maestras de pontones y columnas.

Tras los cálculos de resistencia local se puede comenzar a definir las secciones maestras de los pontones y columnas.

Cuando los espesores de chapa no sean números enteros se redondea al alza. Así, por ejemplo, si las planchas de fondo tienen según la norma 13,72 mm, se toma 14 mm.

6.4.1 Sección maestra de los pontones

En la Figura 6.4 se muestra la sección maestra correspondiente al pontón.

Algunos criterios que se siguieron para dibujarla han sido:

En las chapas de los costados las peñas de los bulb apuntan hacia abajo para evitar que se acumulen aguas y lodos y se disponen respecto a la línea transversal media.

En las chapas de cubierta y de fondo se disponen simétricamente respecto la línea de centro con las peñas apuntando hacia el exterior para que el reparto de esfuerzos sea homogéneo en la sección.

En la zona de los pantoques los bulb se disponen orientados hacia el centro de curvatura de la plancha.

Este reparto tratando de mantener las simetrías se hace con varios objetivos:

- ⬇ Que no existan direcciones en la sección más débiles estructuralmente y que los repartos de esfuerzos sean homogéneos
- ⬇ Proporcionar continuidad estructural al conjunto con otros posibles refuerzos.

Las bulárcamas se han dibujado según los cálculos mostrados en 6.3.2. Se ha optado por diseñarlas de modo conservador y tomando como válido el escantillón de las planchas de fondo para reforzar toda la sección.

⁸ Al igual que en casos anteriores este es un proceso iterativo. Si se toma S demasiado ancho es necesario un refuerzo muy grande de ahí que se haya optado por un refuerzo longitudinal en la crujía del pontón, tras comprobar que la clara de costado a costado del pontón suponía un refuerzo excesivo.

Como ya se ha comentado se ha tomado la distancia S como la mitad de la $S_{max} = 3410 \text{ mm}$ para poder cumplir los criterios de modulo admisible. Para reducir esta magnitud se refuerza la sección con un perfil T longitudinal que recorre todo en pontón en cada uno de los lados de la sección.

De este modo y a falta de la verificación de cargas globales y de pequeños refuerzos y de otros detalles estructurales, ya se tiene definida la sección de los pontones.

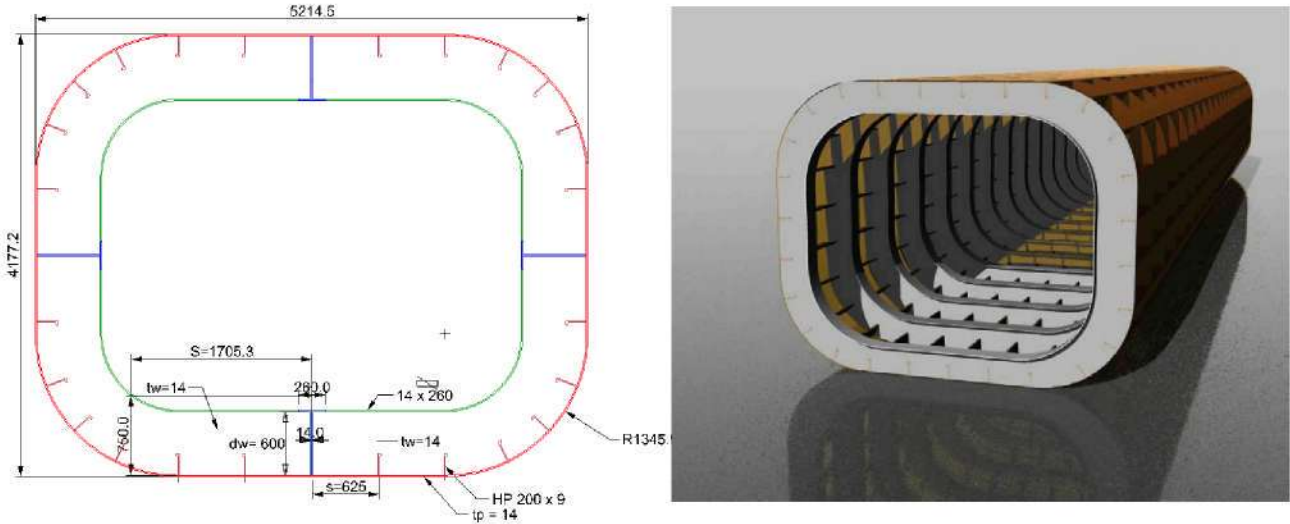


Figura 6.4. Sección maestra del pontón.

En la Figura 6.5 se puede contemplar la sección maestra de las columnas. El proceso es muy similar al seguido para la sección de los pontones. La diferencia pasa porque cada 5 m el espesor de las planchas de forro se ve reducido. Además se ha optado por sencillez que el bulb vertical sea el mismo para toda la columna. Los anillos se diseñan con los mismo criterios que las bulárcamas de los pontones.

Por último, el tamaño de la sección origina la necesidad de incluir refuerzos verticales en T al igual que en el caso de los pontones. En este caso se han incluido dos por lado, tal y como se puede ver en las figuras siguientes.

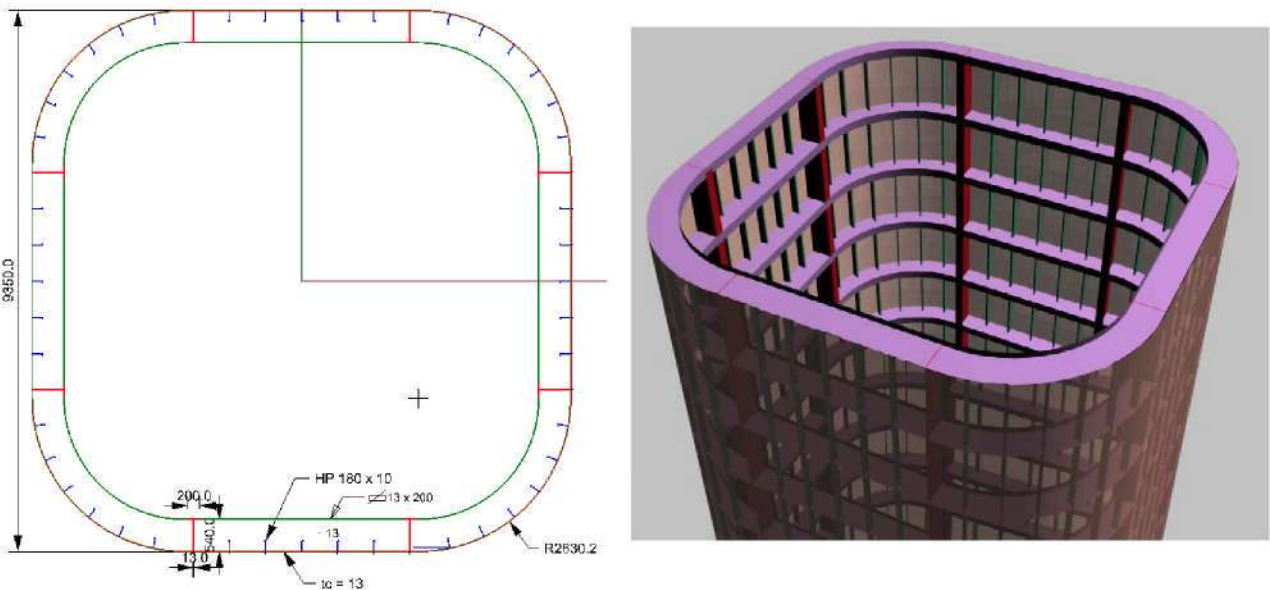


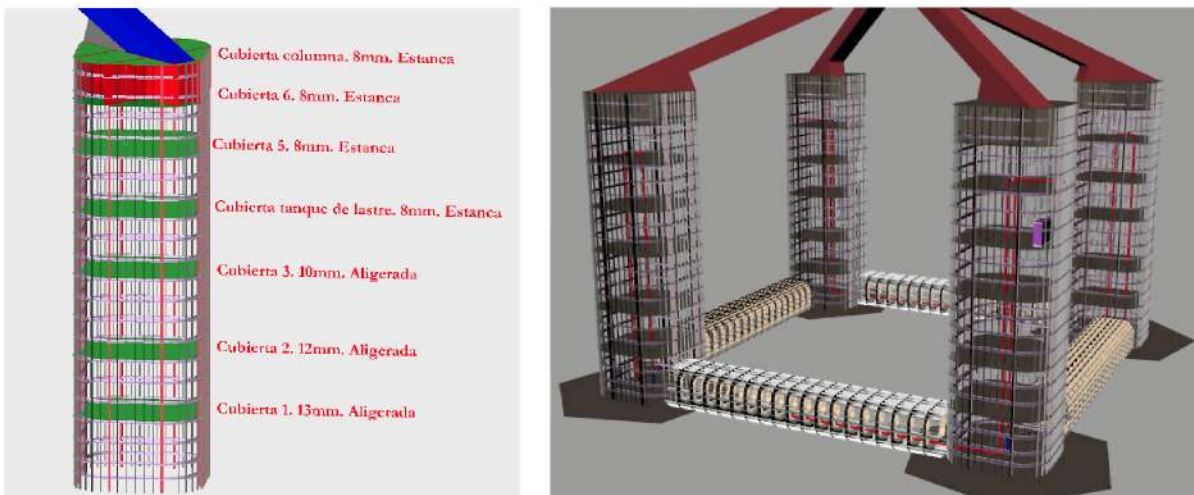
Figura 6.5. Sección maestra de las columnas.

Por último, para completar la definición estructural de las columnas es necesario incluir cubiertas intermedias que sirven para mejorar la resistencia global del conjunto. Es una solución habitual es este tipo de estructuras esbeltas verticales.

Estas cubiertas están aligeradas ya que se recuerda que cada uno de los cuatro tanques de lastre abarcan toda la columna. El escantillón de estas cubiertas es el mismo que tendrían los anillos situados en las respectivas cotas.

En la imagen se muestran estas cubiertas con los nombres cubierta 1, cubierta 2, cubierta 3, cubierta tanques de lastre, cubierta 5, cubierta 6, cubierta columna.

La cubierta que delimita el tanque de lastre se encuentra a 20 m. En la sección de estabilidad se explicó que para cumplir la normativa de estabilidad en averías se dispone 4,6 m por encima de la cubierta del tanque de lastre una cubierta estanca. (Cubierta 5).



6.5 Resistencia global.

En la sección 4 del DNV RP C103, así como en las secciones 4,5, y apéndice B del DNV OS C103 se detallan los métodos que tradicionalmente se vienen empleando en el sector de las estructuras offshore para el cálculo de cargas globales.

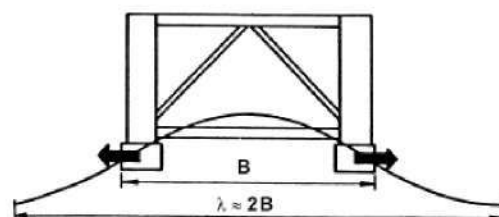
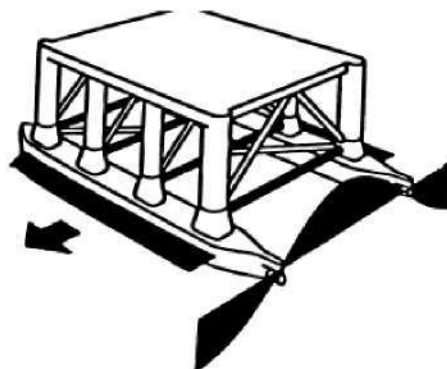
6.6 Descripción de las solicitaciones principales en una plataforma semisumergible.

Las cargas medioambientales generan los movimientos de la plataforma. Estas fuerzas se manifiestan, lo que a su vez tienen una repercusión sobre la estructura originando esfuerzos cortantes, flectores y torsionales.

Se pueden descomponer en:

- Fuerzas que tienden a separar los pontones (Split Forces) F_s
- Momentos torsionales M_t
- Esfuerzos cortantes F_L

En el caso del anillo cerrado estas solicitaciones son importantes en ambas direcciones la transversal y la longitudinal al ser una plataforma con simetría radial.



6.6.1 Split Forces.

Las fuerzas Split son más importantes para mareas de proa (0°) y de través (90°) y con olas cuya longitud sea el doble de la eslora y manga respectivamente. En el caso en estudio serían olas de 96 m de longitud, unos 7,8 s de periodo y para una altura de 1 m tendrían 0.3 grados de pendiente. (figura contigua)

Para un mar de través estas cargas serán absorbidas por los pontones transversales, es decir, los de proa y popa. Además también se transmiten a la cubierta.

6.6.2 Momentos torsores.

Los mares de amura (45°) generan un momento torsor en el conjunto de la plataforma. Si además la longitud de ola incidente es de aproximadamente la diagonal de la plataforma, es decir, unos 67 m, 6,5 s que no suelen sobrepasar los dos metros de altura en la zona del cabo Villano. Este momento, genera una respuesta estructural máxima en los nodos de unión pontón-columna y columna-cubierta.

6.6.3 Fuerzas cortantes.

Los mares de entre $\theta = 45^\circ$ a $\theta = 60^\circ$ con longitudes de ola de 1,5 veces la diagonal son los que resultan más críticos para el caso de fuerzas cortantes, es decir olas de 100 m, con unos 8 segundos de periodo que tampoco suelen sobrepasar los dos metros de altura.

En una plataforma de anillo cerrado estos esfuerzos cortantes suelen ser mayores que los torsores y las Split.

Como es habitual, estas situaciones de carga no se producen aisladas y es habitual combinar los efectos.

6.6.4 Momentos flectores.

Otro fenómeno importante para mares de proa y de través es el momento flector originado por las olas cuya longitud sea algo mayor que la longitud de los pontones. Cuando la cresta de la ola está en la mitad de los pontones se genera una situación de quebranto máximo y viceversa en el caso del arrufo.

Como en el caso de los barcos, la propia distribución de pesos y empujes crea una distribución de cortantes y de flectores que afectará principalmente a los pontones.

6.6.5 Aceleraciones.

Los movimientos de las plataformas originan aceleraciones según los tres grados de libertad.

Las aceleraciones longitudinales de la cubierta introducen esfuerzos cortantes y los correspondientes momentos flectores que afectan a los nodos estructurales.

Las aceleraciones transversales en este caso debido a la simetría que presenta la plataforma producen efectos iguales a los de las aceleraciones longitudinales.

Las aceleraciones verticales no son críticas en cuanto a lo que a efectos estructurales globales se refiere. Pueden resultar importantes para los cables y fondeos pero no estructuralmente.

6.7 Respuesta estructural global.

Tras describir los fenómenos más importantes en la plataforma se estaría en condiciones de realizar el análisis de resistencia global.

Al realizar este tipo de análisis no es demasiado práctico incluir todas las cargas que intervienen sobre la plataforma. Es más eficiente hacer varios modelos y en cada uno analizar fenómenos separadamente, es decir, por un lado se analiza a nivel global y por otro a nivel local.

El modelo global estará caracterizado por su resistencia global y debería ser representado por modelo de elementos finitos tridimensional de gran volumen y espesores delgados o "paredes delgadas"..

¿Qué incluye o debería comprender el modelo de casco completo?

Un modelo de casco completo se aplica a pontones columnas y cubiertas en conjunto.

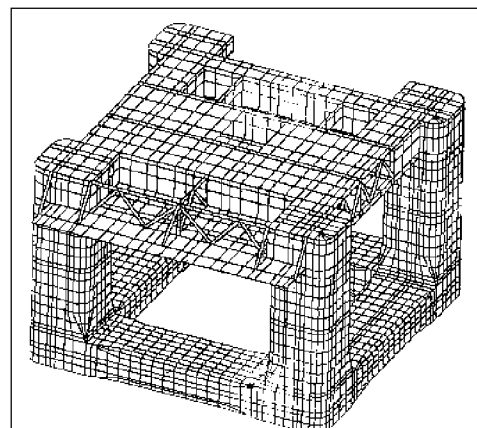


Figura 6.6. Ejemplo de modelo de casco completo

Además debe incluir:

- Mamparos transversales y longitudinales de los pontones.
- Cubiertas, mamparos de tanques y troncos de acceso que formen parte de la estructura primaria

Estos cálculos determinarían si existe la necesidad o no de un mayor refuerzo, sobre todo, de la zona de cubierta, posibles vigas horizontales realizando la unión entre las columnas, etc.

Por último, otras cargas medioambientales como las corrientes son despreciables en comparación con los efectos de las olas y tan sólo es interesante su contribución para las reacciones en las anclas, el fairlead y el cable de evacuación eléctrico.

Las fuerzas generadas por las líneas de fondeo al ser un sistema con catenaria son de poca importancia en el diseño global de la estructura.

Tal y como se puede consultar en el DNV OS C103 Apéndice B el método más apropiado o habitual para el diseño estructural de una semisumergible de anillo cerrado considerando el emplazamiento como de “ambiente severo” consiste para el caso en estudio:

- Unidad clase Y ya que la plataforma se diseña para largas estancias en el emplazamiento de al menos 10 años
- Modelo hidrodinámico como el empleado en los programas como AQWA, WAMIT, SESAM. Además, en nuestro caso debido a la presencia de las planchas antiheave podría ser útil un modelo que incluya las fuerzas de arrastre (Morison).
- El análisis global debería ser tipo “casco completo” mientras que en un buque suele servir el análisis tipo “buque viga”
- El análisis de fatiga debería fundamentarse en métodos estocásticos.

Table A1 Methods and models which should be used for design of typical column-stabilised units							
		Two-pontoon semisubmersible			Ring-pontoon semisubmersible		
		Hydrodynamic model, Morison	Global structural strength model	Fatigue method	Hydrodynamic model, Morison	Global structural strength model	Fatigue method
Harsh environment, restricted areas or world wide	X	1	4	6	1	5	7
	Y	1	4	7	1	5	7
Benign areas	X	2	3	6	1	5	7
	Y	1	4	6	1	5	7

Definitions
X-unit following normal class survey intervals (survey in sheltered waters or drydock every 4 to 5 years).
Y-unit located for a longer period on location – surveys carried out in-water at location.

Hydrodynamic models
1) Hybrid model - Sink-source and/or Morison (when relevant, for calculation of drag forces).
2) Morison model with contingency factor 1.1 for ULS and FLS. The contingency factors shall be applied in addition to the relevant load factors.

Global structural models
3) Beam model.
4) Combined beam and shell model. The extent of the beam and shell models may vary depending on the design. For typical beam structures a beam model alone may be acceptable.
5) Complete shell model.

Fatigue method
6) Simplified fatigue analysis.
7) Stochastic fatigue analysis, based on a screening process with simplified approach to identify critical details.

Harsh environment, restricted areas or world wide
— Units (X) designed for operation based on world wide requirements given in Classification Note 30.5.
— Units (Y) designed for operation based on site specific requirements.

Benign waters
— Units (X) designed for operation based on site specific criteria for benign waters.
— Units (Y) designed for operation based on site specific criteria for benign waters.

Tabla 6.3 Métodos y modelos para unidades con columnas de estabilización. (Semisumergibles).

7. Discusión de los resultados, conclusiones y retos futuros.

El objetivo de este trabajo consistía en mostrar los estudios y análisis clave que son necesarios llevar a cabo en fases conceptuales de diseño de una plataforma semisumergible para un aerogenerador.

La plataforma que se ha diseñado a modo de caso a estudio, verifica los criterios de estabilidad, comportamiento en la mar y requisitos estructurales básicos.

Los resultados aunque aceptables, deben contrastarse con las pertinentes pruebas en canal. Por ejemplo, el efecto añadido de las planchas antiheave es difícilmente cuantificable con los métodos empleados y sin duda mejoran el comportamiento de la plataforma.

Deberían realizarse más simulaciones en distintos estados de mar y seguir comprobando que los desplazamientos y aceleraciones están dentro de los límites fijados para el aerogenerador y que las tensiones en las líneas de fondeo no sobrepasan los límites de rotura.

No se han analizado los sistemas y equipos auxiliares a bordo. En este caso el sistema de lastre activo es imprescindible para compensar las escoras inducidas por el viento.

También han quedado fuera del alcance el estudio de la dinámica del umbilical (cable de evacuación eléctrica) que dependiendo de la configuración escogida es decisiva para la integridad del mismo en estados de mar severos.

Conclusiones:

- Las plataformas semisubmergibles para aerogeneradores son soluciones viables técnicamente. El know how adquirido en la construcción naval e ingeniería offshore son un aval técnico que garantiza que un aerogenerador flotante no sea más que una “adaptación” de las tecnologías ya existentes.
- El diseño del aerogenerador debe ser específico para las soluciones flotantes ya que los movimientos y aceleraciones a los que se ve sometido no permite que los aerogeneradores en tierra se adapten directamente al entorno flotante. Es necesaria la colaboración entre el diseñador de la plataforma y el del aerogenerador.
- Aquellas plataformas diseñadas de manera que el aerogenerador se instale en tierra suponen una gran ventaja técnica y económica.

Retos futuros:

- Desde el punto de vista de la estabilidad es necesario una reglamentación específica y tal vez menos restrictiva que la empleada para las plataformas del petróleo. También deberían fijarse unos valores de referencia para el roll back angle.
- Desde el punto de vista del comportamiento en la mar es necesario continuar con el desarrollo de software que permita la simulación aero-hidrodinámica que cuantifique en al mismo tiempo las sollicitaciones que el oleaje, las corrientes, la deriva, las líneas de fondeo y el viento, ocasionan sobre un aerogenerador flotante.
- Estructuralmente sería necesario implementar los resultados anteriores para realizar modelos de elementos finitos que admitan como input las cargas aerodinámicas, hidrodinámicas y de las líneas de fondeo. Es decir, un software que permita la interacción fluido-estructura como los ya existentes pero con la añadidura de que tengan en cuenta las cargas aerodinámicas.
- Superado el reto técnico, el gran objetivo es buscar la eficiencia económica ya que los presupuestos que se manejan en el mundo del petróleo son inadmisibles en el campo de las renovables.
- Desde un punto de vista estratégico, las empresas del sector marítimo deberían tener una participación más activa dentro del mundo de las renovables marinas y mostrar a las grandes empresas interesadas en construir parques eólicos flotantes que es más que viable técnicamente la construcción de plataformas, su instalación, el mantenimiento, la operación y la gestión del negocio marítimo.

8. Agradecimientos.

Agradecer a las siguientes personas, empresas y organismos el apoyo ofrecido para este trabajo.

Ramón Barturen Antépara: Ingeniero naval y Máster IME en Negocio y Derecho Marítimo. Stream-Repsol Gas Natural LNG

Manuel Moreu Munáiz: Doctor ingeniero naval. Seaplace S.L.

Miguel Ángel Herreros Sierra: Doctor ingeniero naval. ETSI Navales.

Miguel Taboada Gosálvez: Ingeniero naval. Seaplace S.L.

Manuel Montes: Ingeniero naval. Seaplace S.L.

Antonio Rico Rubio. Ingeniero naval. Tecnalia R&I.

Goren Aguirre. Ingeniero naval. Tecnalia R&I.

Ente Vasco de la Energía EVE
Tecnalia Research & Innovation”

ANEXO I:

Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
My custom criteria	Severe wind and rolling				Pass	
Brazos escorantes	Wind arm: $a v^2 A (h - H) / (g \text{ disp.}) \cos^n(\phi)$					
	constant: $a (0.5 \rho_{\text{air}} C_d) =$	0,001	tonne/m ³			
	wind velocity: $v =$	51,5	m/s			
	area centroid height (from zero point): $h =$	62,54	m			
	total area: $A =$	952,9	m ²			
	$H =$ vert. centre of projected lat. u'water area	8,022	m			
cosine power: $n =$	0					
gust ratio	1.2					
Áreas bajo curvas	Area2 integrated to the lesser of roll back angle from equilibrium (with steady heel arm)	22,0 (-11,0)	deg	-11		
	Area 1 upper integration range, to the lesser of: spec. heel angle	50,9	deg	50,9		
	first downflooding angle	59,2	deg	0		
	angle of vanishing stability (with gust heel arm)	50,9	deg	0		
	Angle for GZ(max) in GZ ratio, the lesser of:			0		
	angle of max. GZ	30,9	deg	30,9		
Criterio	Criteria:				Pass	
	Angle of steady heel shall not be greater than (\leq)	15	deg	11	Pass	26,67
	Area1 / Area2 shall not be less than (\geq)	130	%	139,6	Pass	7,38
Valores intermedios	Intermediate values					
	Heel arm amplitude		m	1,504		
	Equilibrium angle with steady heel arm		deg	11		
	Equilibrium angle with gust heel arm		deg	13,1		
	Area1 (under GZ), from 13.1 to 50,9 deg.		m.deg	124,1093		
	Area1 (under HA), from 13.1 to 50,9 deg.		m.deg	68,2162		
	Area1. from 13.1 to 50,9 deg.		m.deg	56,8931		
	Area2 (under GZ), from 0,1 to 13,1 deg.		m.deg	3,4997		
	Area2 (under HA), from 0,1 to 13,1 deg.		m.deg	43,5382		
Area2, from 0,1 to 13,1 deg.		m.deg	40,0385			

Figura 8.1. Tabla de input y resultados de aplicación de los criterios de estabilidad en operación..

Bibliografía y referencias:

- [1] **Álvarez Campana J.M^a** *Comportamiento del buque en la mar*. ETSIN. (Oct 2009).
- [2] **ANSYS-AQWA LINE-NAUT-LIBRIUM manuals**. (Abril 2009).
- [3] **Baquero A.** *Resistencia al avance del buque*. ETSIN. (Dic 2008)
- [4] **Barturen Antépara, R., Couñago Lorenzo, B., Díaz Huerta I.** *Estudio técnico financiero sobre la construcción de un parque eólico marino flotante en el litoral español*. 49º Congreso de ingeniería naval e industria marítima. Bilbao 2010.
- [5] **Bea, Gregg, Hooks, Riordan, Russell, Williams** *Conceptual Design of a Semi-Submersible Floating Oil and Gas Production System for Offshore Malaysia*.
- [6] **BMT Fluid Mechanics**. *Review of issues associated with the stability of semi-submersibles*. (2006)
- [7] **Butterfield S., Musial W., Jonkman J., Sclavounos P.** *Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbines*. NREL y MIT (Sept 2007).
- [8] **Burton T., Sharpe D., Jenkins N., Bossanyi E.** *Wind Energy Handbook* (2001).
- [9] **Caminero Martínez A., Moreu Gamazo J., Taboada Gosálvez A.** *Estructuras Soporte de los aerogeneradores fijos offshore*. 49º Congreso de ingeniería naval e industria marítima. Bilbao 2010.
- [10] **Chakrabarti S.** *Handbook of offshore engineering*. (2006).
- [11] **Cermelli, Roddier, Buso.** *MINIFLOAT: A Novel Concept of Minimal Floating Platform for Marginal Field Development*. ISOPE (2004).
- [12] **Cermelli, Roddier, Aubault.** *Structural Design of a Semi-Submersible Platform with Water-Entrapment Plates Based on a Time-Domain Hydrodynamic Algorithm Coupled with Finite-Elements*. ISOPE 2006.
- [13] **Cermelli, Roddier, Aubault.** *WINDFLOAT: A floating foundation for offshore wind turbines Part I, II: Hydrodynamics analysis*. OMAE (2009).
- [14] **Cummins, W.E.** *The impulse response function and ship motion*. (1962).
- [15] **Daniel Merino Hoyos.** *Plataforma flotante para subestación eléctrica en instalación eólica en mar abierto*. PFC nº 2. ETSIN. (2010)
- [16] **Department of defense of USA.** *Design: Moorings*. (2005)
- [17] **Det Norske Veritas.** *DNV-OS-E301. Position Mooring*. (Octubre 2008).
- [18] **Det Norske Veritas** *DNV-RP-C205. Environmental condition and environmental loads*. (April 2007).
- [19] **Det Norske Veritas.** *DNV-OS-B101 Metallic Materials*.
- [20] **Det Norske Veritas.** *DNV OS C101 Design of offshore steel structures (LRFD Method)*.
- [21] **Det Norske Veritas.** *DNV OS C103 Structural design of column stabilised units*. (Oct 2008).
- [22] **Det Norske Veritas.** *DNV OS C106 Structural design of deep draught unit*.
- [23] **Det Norske Veritas.** *DNV OS C301*.
- [24] **Det Norske Veritas.** *DNV OS C401 Fabrication and testing of offshore structures*. (Abril 2004)
- [25] **Det Norske Veritas** *DNV OS D201 Electrical installations*. (Oct 2008)
- [26] **Det Norske Veritas.** *DNV OS J101. Design of offshore wind turbine structures*.
- [27] **Det Norske Veritas.** *DNV RP C103 Column stabilised units*. (Feb 2005).
- [28] **Det Norske Veritas.** *DNV RP C201 Buckling strength of plated structures*.
- [29] **Det Norske Veritas.** *DNV RP C202 Buckling Strength of shells*.
- [30] **Det Norske Veritas.** *DNV RP C205. Environmental Conditions and Environmental Loads*. (2007)
- [31] **Det Norske Veritas** *DNV RP E301*
- [32] **Det Norske Veritas** *DNV RP E302*
- [33] **Det Norske Veritas.** *DNV RP F205. Global Performance Analysis of Deepwater Floating Structures*. (Octubre 2004).
- [34] **Det Norske Veritas.** *DNV, Nauticus. Programa de cálculo de estructuras navales* (2009)
- [35] **Dolores Esteban M.** *Propuesta de una metodología para la implantación de parques eólicos offshore*. ETSI Caminos Canales y Puertos. UPM. (2009).
- [36] **ECN -MARIN-TNO -TUD- MSC.** *Study to feasibility of and boundary conditions for floating offshore wind turbines*. (2002).
- [37] **Eyres J.D.** *Ship construction*. 5ª Edición. Editorial Butterworth-Heinemann. (2001)
- [38] **Ferguson.** *A Typical Design Solution for an Offshore Wind Energy Conversion System*. TU Delft, Institute for Wind Energy. (1998).

- [39] **Fernández Díez.** *Energía Eólica.* Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria.
- [40] **Formation Design Systems.** *Hydromax user manual.* (2009).
- [41] **G.R. Fulton, D.J. Malcolm, H. Elwany, W. Stewart, E. Moroz, and H. Dempster** *Semisubmersible platform and anchor foundation system for wind turbine support.* NREL. (2004 y 2005).
- [42] **Instituto hidrodinámico de la marina.** *Carta náutica n° 413 : de las Islas Sisargas a Cabo Villano.*(Junio 2009).
- [43] **Instituto técnico de la estructura de acero.** *Tomo 17: Sistemas estructurales: Palataformas petrolíferas .*
- [44] **Ishihara T., Bilal Waris M., Sukegawa H.,** *A study on influence of heave plate on dynamic response of floating offshore wind turbine system .*
- [45] **Ishihara T, Phuc. P. V.** *A study on the dynamic response of a semi-submersible floating offshore wind turbine system Part 2: numerical simulation.* ICWE12 CAIRNS 2007 .
- [46] **Fernández J.** *Reliability of mooring chains.* Vicinay Cadenas S.A. *TEKNA conference on DP and mooring of floating offshore units.*(2008).
- [47] **Jonkman J.M.** *Influence of Control on the Pitch Damping of a Floating Wind Turbine.* NREL. (Marzo 2008).
- [48] **Jonkman J.M.** *Loads Analysis of a Floating Offshore Wind Turbine Using Fully Coupled Simulation.* NREL.(Jun 07)
- [49] **Jonkman J.M. , Buhl M.L** *Development and verification of a fully coupled simulator from offshore wind turbine..* NREL (2007).
- [50] **Jonkman J.M., Sclavounos P.D.** *Development of fully coupled aerolastic and hydrodynamic models for offshore wind turbines.* NREL. (Enero 06)
- [51] **Jonkman J.M.** *Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine.* NREL. (Nov 2007).
- [52] **Jonkman J.M., S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott .** *Definition of a 5MW reference wind turbine for offshore system development.* NREL . (2009) .
- [53] **Journé J.M.J., Massie W.W.** *Offshore Hydromechanics.* TU Delft. (2001).
- [54] **Jovic, Strachan** *Offshore wind farm with centralised power conversion and DC interconnection.* (2009).
- [55] **Karimidad M.** *Dynamic response of floating wind turbine.* Sharif University of Technology. (2010).
- [56] **Kim S , Sclavounos P.D..** *Fully Coupled Response Simulations of Theme Offshore Structures in Water Depths of Up to 10,000 Feet. .* ISOPE (2001)
- [57] **Laurence Hansch D. .** *Weight distribution method of determining gyradii of ships.* Society of Allied Weight Engineers (2006).
- [58] **L.Tao , S. Cai .** *Heave motion suppression of a Spar with a heave plate.* (2003).
- [59] **L.Tao, B. Molin, M. Scolan, K. Thiagarajan.** *Spacing effects on hydrodynamics of heave plates on offshore structures.* (2007).
- [60] **Lewis E.V.** *Principles of naval architecture Vol I. Stability and strength.* (1988)
- [61] **López Piñeiro A.** *Sistemas eléctricos y electrónicos a bordo. Distribución eléctrica a bordo* (2007)
- [62] **López Piñeiro A.** *Sistemas eléctricos y electrónicos a bordo. Iluminación* (2007)
- [63] **López Piñeiro,A.** *Sistemas eléctricos y electrónicos a bordo. Diseño general de la planta eléctrica* (2007)
- [64] **Martín Domínguez, R.** *Cálculo de estructuras de buques. Vol I.* ETSIN (1969).
- [65] **M.C. Deo.** *Waves & Structures..* IIT- Bombay. (En 2007)
- [66] **Musial W., Butterfield S., Bonne A.** *Feasibility of floating platform systems for wind turbines.* NREL (2004)
- [67] **Navales A.P Martínez E.T.** *Energía Eólica.* Prensa Universitarias de Zaragoza. (1977).
- [68] **Newman J.N.** *Marine hydrodynamics.* The MIT Press. (1977).
- [69] **NORSOK.** *Subsea production control umbilical.* (2005).
- [70] **Olivella Puig, J.** *Teoría del buque: Ola trocoidal, movimientos y esfuerzos. (Capítulo4)* (1998)
- [71] **O.M.Faltinsen.** *Sea loads on ships and offshore structures.* (1990).
- [72] **Orcina.** *Orcaflex user manual.*
- [73] **Otheguy y Serrano.** *PFC 1519:Unidad FPSO North Sea. Cuaderno 6. Estructura.* ETSIN
- [74] **Prieto J. , R. Granadino.** *Interconexión eléctrica península-baleares en HVDC. VI Jornada técnica sobre líneas aéreas de alta tensión* (2007).
- [75] **Puertos del estado** *Clima medio del oleaje. Boya de Villano.*
- [76] **Puertos del estado** *Extremos máximos del oleaje. Boya de Villano.*
- [77] **Puertos del estado** *Recomendaciones para obras marítimas ROM 0.4-91. Acciones climáticas I: OLEAJE* (1991).
- [78] **Puertos del estado** *Recomendaciones para obras marítimas ROM 0.4-95. Acciones climáticas II: VIENTO* (1995).
- [79] **Schachner,J .** *Power connection for offshore wind farm .* TUDelft, University of Leoben. (2004).
- [80] **Skaare B. , Hanson T.D , F.G. Nielsen, R. Yttervik, A. M. Hansen ,K. Thomsen, T. J. Larsen.** *Integrated dynamic analysis of floating offshore wind turbines.*

- [81] **Sofía Montón.** *Tecnologías aplicables en parques eólicos marinos*. PFC. ETSI Industriales. UPM. (2009).
- [82] **Tracy, C.** *Parametric design of floating wind turbine*. Massachusetts Institute of Technology .MIT (2007).
- [83] **Van der Tempel.** *Design of support structures of offshore wind turbines*. Delft University (Abril 2006)
- [84] **Vryhof.** *Mooring manual*. (2005).
- [85] **Watson D.G.M.** *Practical ship design*. (Chapter 10) .
- [86] **Wayman E.N., Slavounos P.D., Butterfield S., Jonkman J., Musial W.** *Coupled dynamic modelling of floating wind turbine system*. MIT & NREL. (Marzo 2006).
- [87] **Whitee J.E.**, *Fully coupled dynamic analysis of a floating wind turbine system*. Massachusetts Institute of Technology. MIT. (2004)
- [88] **Wu S., Murray J.J., Virk G.S.** *The motions and internal forces of a moored semi-submersible in regular waves*. Elsevier Science. (1997)
- [89] **Younis.** *Estimating the hydrodynamic forces on a mini-TLP with computational fluid dynamics and design-codes techniques*. Ocean engineering (2000)
- [90] **Zambrano, T., McCreedy, T., Kiceniuk, D. Roddier, C Cermelli.** *Dynamic modeling of deepwater offshore wind turbine structures in gulf of México Storm Conditions*. OMAE (2006).

Algunas páginas web consultadas de interés.

<http://www.offshorewindenergy.org>
<http://www.offshore-wind.de>
<http://www.windpower.org>
<http://www.bwea.com/offshore>
<http://www.repower.de>
<http://www.statoilhydro.com>
<http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/fast>
<http://www.lmwindpower.com/Blades/Products/Blade%20summary/5000.aspx>
www.technip.com
<http://www.deenma.com>
<http://www.opex-energy.com>
<http://www.lr.tudelft.nl>
<http://www.ae.illinois.edu/m-selig/ads.html>
www.idae.es
www.puertos.es
<http://www.talentfactory.dk>
www.globalwindmap.com
<http://atlaseolico.idae.es>
<http://www.sway.no/>
<http://www.principlepowerinc.com/>
<http://www.bluehgroup.com/>
[http://www.statoil.com /](http://www.statoil.com/)
<http://www.offshoremoorings.org>
<http://www.delmarus.com>
<http://www.sptoffshore.com>
<http://www.windfinder.com>
<http://www.hyperwind.eu>