

Soluciones flotantes para aerogeneradores: Plataforma Spar.

Marta Caicoya Ferreiro¹

¹ Ingeniero Naval
Ingeniería y Economía del Transporte S.A.
INECO SA
Ruiz de Alarcón,1 28014 (Madrid)
marta_caicoya@hotmail.com

Borja Alza Castillo²

² Ingeniero Naval
EDE Ingenieros, S.A.
Parque empresarial Inbisa
48510 Trápaga (Bizkaia)
borjaalza@hotmail.com

Bernardino Couñago Lorenzo³

³ Ingeniero Naval

bernardinocounago@gmail.com

RESUMEN

La calidad del recurso eólico en alta mar, el crecimiento de la industria eólica, el desarrollo sostenible además de otros factores extrínsecos, tales como los riesgos de las centrales nucleares, la vulnerabilidad de los mercados ante crisis en países productores de petróleo y las altas emisiones de CO₂ por parte de las centrales de ciclo combinado son algunos de los factores que, cada vez más, justifican la adopción de soluciones sostenibles de origen renovable donde la energía eólica flotante presenta un futuro prometedor.

Las plataformas Spar son una de las posibles opciones. En el presente trabajo se muestra un procedimiento metódico de diseño de una plataforma Spar analizando las ventajas y los inconvenientes de este tipo de estructuras para lograr el cometido de soportar un aerogenerador de gran potencia en mar abierto.

ABSTRACT

The high quality of wind resource, the wind industry growth, sustainable development and other extrinsic factors like nuclear technology risks, vulnerability of markets due to crisis in oil producing countries and CO₂ emissions of central heating boilers are some of the factors that justify floating offshore platforms for wind turbines.

Spar platforms are one of possible options. This paper shows a methodical design procedure for 5MW wind turbine. The advantages and disadvantages of these structures are analyzed and an overview regarding to other topics like construction, installation, etc. is showed.

Índice.

RESUMEN	1
ABSTRACT	1
Índice de figuras.....	3
Índice de tablas.....	3
1. Introducción.....	4
1.1 Revisión histórica.....	4
1.2 Tipos de plataformas Spar. Características generales.....	4
2. Proceso de cálculo de las dimensiones iniciales.....	6
2.1 Parametrización. Selección de los parámetros de entrada.....	6
2.2 Cálculo de características hidrostáticas.....	9
2.3 Cálculo del ángulo estático de escora y periodo propio en arfada.....	9
3. Disposición general.....	10
4. Cálculos de estabilidad.....	12
4.1 Condición de peso en rosca.....	12
4.2 Disposición de tanques.....	13
4.3 Normativa aplicable. Criterios de estabilidad intacta.....	14
4.3.1 Hidrostáticas rectas.....	14
4.3.2 Ángulo estático de escora.....	15
4.4 Estabilidad a grandes ángulos. Criterios de estabilidad intacta.....	15
5. Comportamiento en la mar.....	18
5.1 Análisis en el dominio de la frecuencia.....	19
5.1.1 Características del programa Ansys AQWA LINE.....	19
5.1.2 Resultados significativos.....	21
6. Proceso de transporte e instalación.....	23
6.1 Transporte de la Spar completa.....	23
6.2 Transporte de la Spar en partes.....	24
6.3 Instalación de la Spar en el parque eólico.....	25
6.4 Cálculos estabilidad. Plataforma en instalación.....	25
7. Resumen de características generales.....	27
Bibliografía.....	28

Índice de figuras.

Figura 1.1. Plataformas Spar. (Technip Offshore).....	5
Figura 2.1. Parámetros de entrada.....	7
Figura 3.1. Vista general plataforma Spar. Dimensiones.	10
Figura 3.2. Plataforma instalada y flotando en alta mar.	11
Figura 4.1. Compartimentación de la plataforma.....	13
Figura 4.2. Situación de equilibrio con viento de operación de 11,5 m/s.....	15
Figura 4.3. Parámetros característicos para aplicar el criterio de estabilidad.....	16
Figura 4.4. Curva de brazos adrizantes y de brazo escorante. Condición de viento severo.	17
Figura 5.1. RAO de largada.	21
Figura 5.2. RAO de cabeceo.....	22
Figura 5.3. RAO de arfada.	22
Figura 6.1 Plataforma flotando en posición horizontal.....	27

Índice de tablas.

Tabla 1.1. Listado de plataformas Spar. (Elaboración propia).....	5
Tabla 2.1. Restricciones de diseño	6
Tabla 2.2. Parámetros de entrada.....	8
Tabla 2.3. Principales características geométricas.	8
Tabla 2.4. Parámetros hidrostáticos y altura metacéntrica.....	9
Tabla 2.5. Ángulo estático de escora.	9
Tabla 2.6. Periodo propio de arfada.	10
Tabla 4.1. Condición de peso en rosca	12
Tabla 4.2. Condición de carga en operación.....	13
Tabla 4.3. Condición de equilibrio en operación.....	14
Tabla 4.4. Tabla de hidrostáticas rectas.....	14
Tabla 4.5. Condición de equilibrio en operación con viento	15
Tabla 4.6. Resultados del análisis de los criterios de estabilidad en operación	18
Tabla 6.1. Condición de carga en instalación.....	26
Tabla 6.2. Condición de equilibrio en instalación	26

1. Introducción.

El objetivo de este trabajo consiste en diseñar una plataforma tipo “Spar” capaz de albergar un aerogenerador de grandes dimensiones (al menos 5 MW). El alcance del diseño se limitará a un nivel conceptual, tratando de mostrar en cada fase los retos y dificultades que entraña para el diseñador una carga tan particular como supone el aerogenerador.

1.1 Revisión histórica.

Para poder comenzar el diseño es necesario, en primera instancia, buscar precedentes de estructuras similares ya construidas. En el mundo del offshore del petróleo y el gas encontramos las primeras plataformas Spar. Aunque pueda no parecerlo, la Spar es un concepto relativamente reciente dentro del mundo de la ingeniería naval y las tecnologías offshore.

Las primeras plataformas Spar tenían fines meteorológicos y de investigación. Aparecen en los años sesenta y ya tenían dimensiones considerables. Ver tabla Tabla 1.1

En 1996 aparece la primera: la plataforma de producción de crudo Neptune. Es una gran plataforma a 590 m de profundidad, con 215 m de puntal, un diámetro de 22 m y con seis líneas de fondeo mixto cadena con cable.

Todas las plataformas desde la Neptune se encuentran instaladas en el Golfo de México, excepto una, Kikeh, que está en la costa de Malasia.

Recientemente se ha diseñado y construido una plataforma específica para soportar un aerogenerador: el proyecto Hywind de la empresa Statoil Hydro.

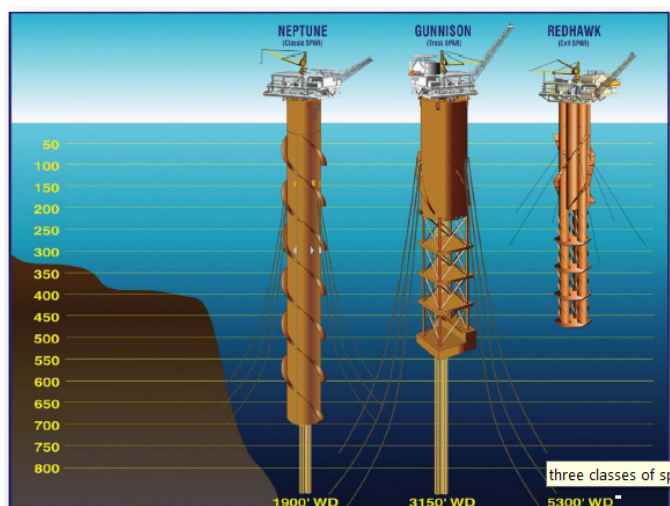
Resumiendo, exceptuando las primeras Spar de “pequeñas” dimensiones en la actualidad se puede hablar de un total de 17 plataformas Spar:

- 3 plataformas Spar clásicas.
- 12 plataformas con celosía.
- 1 plataforma “cell spar”.
- 1 plataforma para aerogeneradores.

1.2 Tipos de plataformas Spar. Características generales.

Como ya se ha anticipado existen tres tipos de plataformas Spar.

- Las plataformas clásicas son las primeras y consisten en grandes cilindros verticales de acero.
- Las plataformas con celosía (Truss Spar) son una evolución de las anteriores y presentan en su zona intermedia un tramo formado por una estructura en celosía, similar a la que tienen las plataformas fijas tipo jacket con el objetivo de reducir el peso y el coste.



- El último concepto son las “cell Spar” de las que tan sólo existe una unidad en la actualidad. Consiste en un conjunto de grandes tubulares de acero anidados verticalmente.

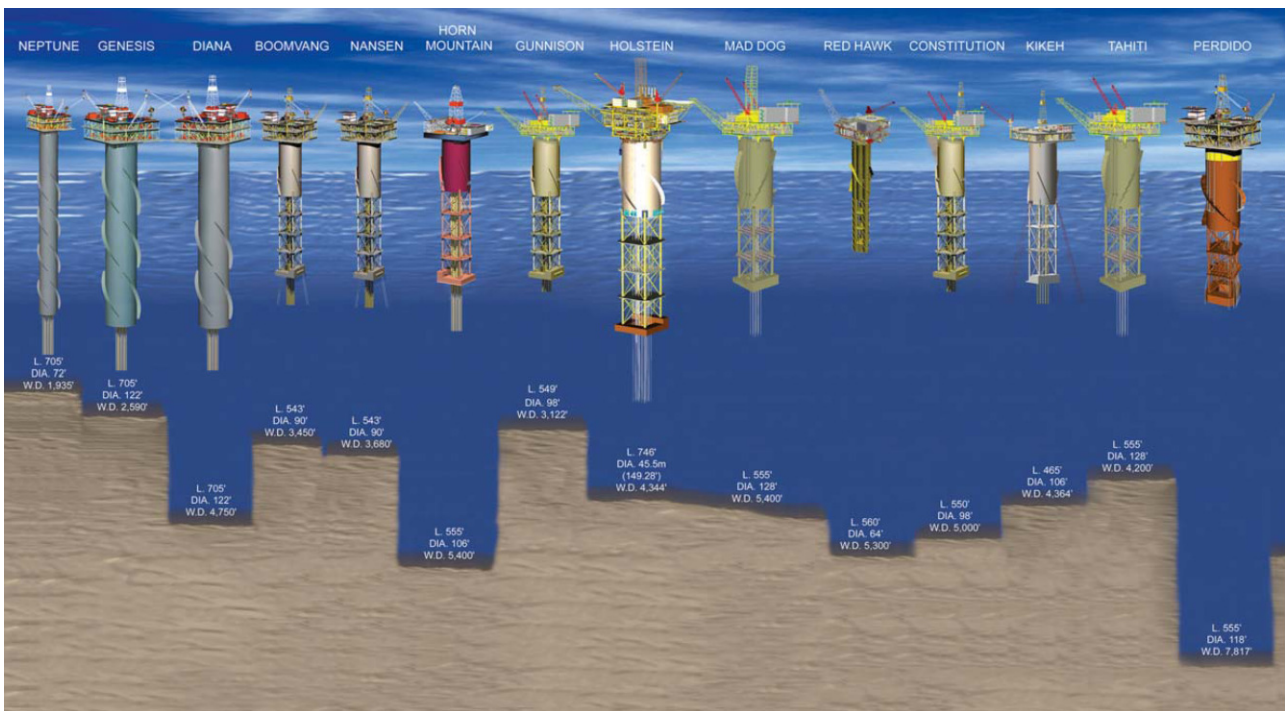


Figura 1.1. Plataformas Spar. (Technip Offshore)

Nombre	Propietario	Año de instalación	Tipo	Función	Puntal (m)	Diámetro (m)	Fondeo
Flip	US Navy	1965	Clásica	Oceanografía	108,2	6,5	-----
-----	Nippon Telegraph	Años 60	Clásica	Comunicaciones	138,66	6	4 líneas
Brent	Shell	Años 70	Clásica	Almacenamiento	147	29	6 líneas
-----	Agip	1992	Clásica	Almacenamiento	71	7,5	4 líneas
Neptune	Ker McGee	1996	Clásica	Producción	215	22	6 líneas; cadena+cable pilotes hincados
Genesis	Chevron Texaco	1998	Clásica	Producción	215	37,2	14 líneas;cadena+cable pilotes hincados
Hoover Diana	Exxon Mobil	2000	Clásica	Producción	215	37,2	12 líneas
Nansen	Ker McGee	2001	Celosía	Producción	165,5	27,4	9 líneas
Medusa	Murphy	2002	Celosía	Producción	178,6	28,6	10 líneas
Boomvang	Kerr McGee	2002	Celosía	Producción	165,5	27,4	9 líneas
Horn Mountain	BP	2002	Celosía	Producción	169,2	32,2	9 líneas
Holstein	BP	2003	Celosía	Producción	237,7	44,5	16 líneas; Pilotes succión
Gunnison	Kerr McGee	2004	Celosía	Producción	167,3	29,9	9 líneas
Mad Dog	BP	2005	Celosía	Producción	169,2	39	11 líneas
Red Hawk	Anadarko	2004	Cell spar	Produccion gas	170,7	19,5	6 líneas
Constitution	Anadarko	2004	Celosía	Producción	167,4	29,9	-----
Tahiti	Chevron	2007	Celosía	Producción	169,1	39	13 líneas
Perdido	Shell	2008	Celosía	Producción	169,1	36	9 líneas
Kikeh	Murphy	2007	Celosía	Producción	141	32,3	10 líneas
Devil's tower	Williams Energy	2004	Celosía	Produccion	178,6	28,6	9 líneas
Hywind	-----	2009	Aerogenerador	Eólica flotante	100	8,3	3 líneas

Tabla 1.1. Listado de plataformas Spar. (Elaboración propia)

2. Proceso de cálculo de las dimensiones iniciales.

Para comenzar el diseño de una plataforma Spar se puede partir de unas consideraciones muy básicas. La primera de ellas, como en cualquier estructura flotante, es evaluar su estabilidad inicial y determinar la altura metacéntrica GM.

En segundo lugar, existen otras dos restricciones que se relacionan con la operatividad del aerogenerador. En una primera aproximación, se puede suponer que el viento genera una fuerza constante horizontal “thrust” que tenderá a escorar/trimar la plataforma. El diseño se debe realizar de forma que el momento adrizante que genera el empuje E compense el momento escorante producido por la fuerza del viento F.

Además, al tratarse de un objeto flotando libremente y que está sometido a las fuerzas de excitación del oleaje, la Spar tenderá a oscilar en alguno de los seis grados de libertad. Por ello es importante conocer el periodo propio o frecuencia natural de dichas oscilaciones. En el caso que nos ocupa son de especial interés el periodo propio en arfada T_3 y los periodos propios en balance y cabeceo que al tratarse de una estructura con simetría radial serán iguales $T_4 = T_5$. Se tratará que dichos periodos propios se alejen lo más posible de los periodos del oleaje del emplazamiento donde se ubicará la Spar.

Para realizar estos cálculos es necesario parametrizar la plataforma y obtener en función de estos parámetros las características másicas e inerciales. Una vez obtenidas basta con implementar estos resultados en las ecuaciones siguientes para poder definir las dimensiones iniciales.

$$GM = KB + BM - KG \quad \text{Ec. 2.1}$$

$$\theta = \arctang \left(\frac{F \cdot d}{\Delta \cdot GM} \right) \quad \text{Ec. 2.2}$$

$$T_3 = 2\pi \sqrt{\frac{M + A_{33}}{\rho g A_w}} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Tabla 2.1. Restricciones de diseño

2.1 Parametrización. Selección de los parámetros de entrada.

Se ha optado por dividir la plataforma en tres secciones cilíndricas de radios R1, R2, R3 y alturas H1, H2, H3. Las dimensiones de cada uno de estos cilindros se escogen en base a una serie de criterios:

- El flotador (cilindro 1) tiene como misión principal proporcionar una reserva de flotabilidad que garantice la estabilidad. El francobordo (f) de esta sección queda condicionado por la ola extremal de diseño para un periodo de retorno de 50 años. Si dicho francobordo es lo suficientemente grande se consigue que la cubierta principal no sea sobrepasada constantemente por las olas lo cual supondría pérdidas momentáneas de estabilidad al verse reducida la inercia de la flotación. Además un mayor radio R1 supone una mayor inercia del área de flotación lo que significa mayor momento de restauración hidrostática y consecuentemente mayor oposición a trimar/escorar.
- La zona de transición, cilindro 2, sirve para unir el flotador con el soft tank y su función es principalmente estructural. Es por ello que su radio y su altura habrán de ser lo menores posible para reducir al máximo el peso de acero empleado pero sin comprometer su resistencia estructural.
- El soft tank, cilindro 3, tiene como misión principal bajar el centro de gravedad del conjunto de la estructura. De esta forma se consigue reducir el KG y por ende aumentar el GM (ver ecuación 2.1).

Fijados estos parámetros es sencillo deducir el calado D , el puntal total T y otras características geométricas muy útiles como las áreas tanto de la obra viva como de la obra muerta, el desplazamiento, el volumen de carena y la inercia de la flotación.

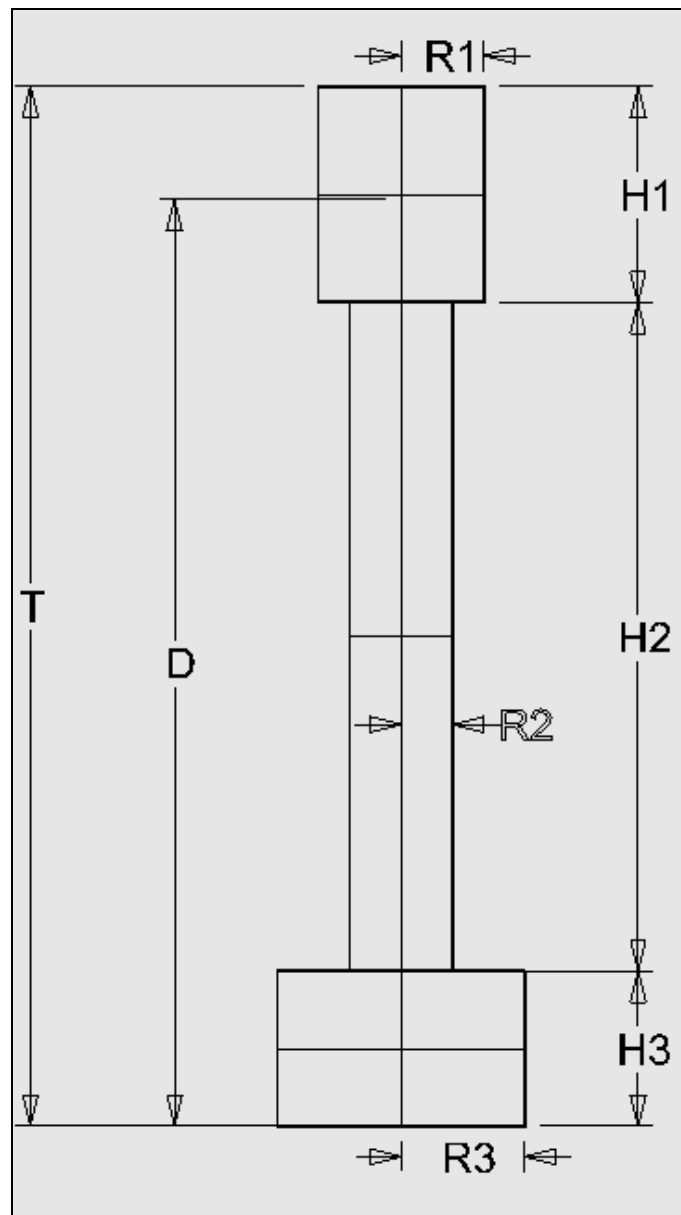


Figura 2.1. Parámetros de entrada

Por otro lado, para realizar el cálculo inicial del peso de acero se puede recurrir a las recomendaciones proporcionadas en la referencia [12] en las que se proporcionan unos ratios de peso por m^2 . Como es sabido, a medida que se aumenta el calado, aumenta el escantillón y con ello el peso. En primera aproximación se opta por un ratio de peso creciente con la profundidad para cada una de las secciones cilíndricas tal y como se puede ver en la Tabla 2.2.

Determinado el área en función de los parámetros de entrada y multiplicando por los ratios de peso, se obtiene la primera aproximación del peso estructural.

Parámetros de entrada		
Francobordo	f	10
Radio flotador	R1	8
Altura flotador	H1	11
Radio zona transición	R2	5
Altura transición	H2	65
Radio soft tank	R3	12
Altura soft tank	H3	15
Calado	D	91
Puntal	T	101
Peso por m2 flotador	ton/m2	0,25
Peso por m2 transición	ton/m2	0,3
Peso por m2 soft tank	ton/m2	0,4

Tabla 2.2. Parámetros de entrada.

Los otros pesos significativos a tener en cuenta son el peso del aerogenerador, sistemas auxiliares, sistemas de acceso a la plataforma, protección catódica, pintura, etc.

Junto con el peso estructural se tiene de esta forma el peso en rosca de la estructura. Para alcanzar el calado de diseño D, será necesario lastrar la estructura.

La distribución del lastre es vital porque será la que reduzca el KG. El hecho de tener todos estos cálculos parametrizados, permite jugar con diversos lastres, tanto sólidos como líquidos. De hecho, si se opta por un lastre sólido en el soft tank, se logra reducir las dimensiones de la plataforma (lo cual es una solución interesante ya que el precio del hormigón es bastante inferior al del acero).

Características geométricas		
Area cilindro 1	m2	1055,6
Area cilindro 2	m2	2042,0
Area cilindro 3	m2	1131,0
Volumen 1 (parte sumergida)	m3	2211,7
Volumen 2	m3	5105,1
Volumen 3	m3	6785,8
Peso estructural flotador	ton	263,9
Peso estructural transición	ton	612,6
Peso estructural soft tank	ton	452,4
Volumen de carena	m3	14102,6
Inercia de la flotación	m4	3217,0
Area flotación	m2	201,1
Desplazamiento	ton	14455,2
Lastre	ton	12377,5
Volumen lastre	m3	12075,6
Lastre en cil 1	ton	0,0
Lastre en cil 2	ton	0,0
Lastre en cil 3 (hormigón)	ton	12377,5

Tabla 2.3. Principales características geométricas.

2.2 Cálculo de características hidrostáticas.

La estabilidad inicial de una estructura flotante depende de que el valor de la altura metacéntrica GM sea mayor que cero. El cálculo del GM para una flotación recta, con la plataforma flotando libremente en aguas tranquilas se puede evaluar con la ecuación 2.1.

- KB: centro de carena (tomado desde la quilla K).
- KG: centro de gravedad (tomado desde la quilla K).
- $BM=I/V$ donde I es la inercia de la flotación y V el volumen de carena.

Dada la sencillez de la geometría, el cálculo de estos parámetros es simple y se pueden consultar en detalle junto a la condición de carga para la que se han obtenido en el Anexo I.

Parámetros hidrostáticos		
KB	m	34,2
BM	m	0,228
KG	m	16,9
Altura metacéntrica GM		17,5

Tabla 2.4. Parámetros hidrostáticos y altura metacéntrica.

2.3 Cálculo del ángulo estático de escora y periodo propio en arfada.

Atendiendo a la ecuación 2.2 se obtiene que el ángulo de estático de escora para una fuerza horizontal de 90 toneladas que es el que se puede observar en la Tabla 2.4.

Angulo de escora estática		
Thrust F	ton	90,0
Brazo d	m	153,5
Desplazamiento	ton	14455,2
GM	m	17,5
Escora estática	°	3,12

Tabla 2.5. Ángulo estático de escora.

Entrando en la ecuación 2.3 se obtiene el periodo propio en arfada. El coeficiente de masa añadida A_{33} requiere una pequeña mención aparte. Para evaluar dicho coeficiente se recurre normalmente a métodos numéricos que lo determinan. Su valor es variable con la frecuencia angular ω (rad/s).

En la referencia [10] se propone un método para el cálculo analítico del coeficiente de masa añadida de un cilindro vertical.

En este caso se ha recurrido a un método mucho más sencillo fruto de la experiencia en el cálculo de coeficientes de masa añadida de cilindros verticales de estas dimensiones. En una primera aproximación se puede afirmar que la masa añadida de un cilindro vertical flotante es 1,2 veces su desplazamiento.

Periodo propio arfada		
Masa añadida A33	ton	17346,2
Area flotación	m	201,1
Periodo propio	s	24,92

Tabla 2.6. Periodo propio de arfada.

Por lo tanto se han seleccionado unas dimensiones que cumplen con las restricciones de diseño fijadas inicialmente. El ángulo estático de escora es algo elevado y debe tenerse en cuenta que la única forma de restaurar la posición tendrá que hacerse con un sistema de fondeo que proporcione una tensión adecuada.

3. Disposición general.

Tras este primer predimensionamiento se puede mostrar una primera disposición general de la plataforma con las dimensiones calculadas anteriormente

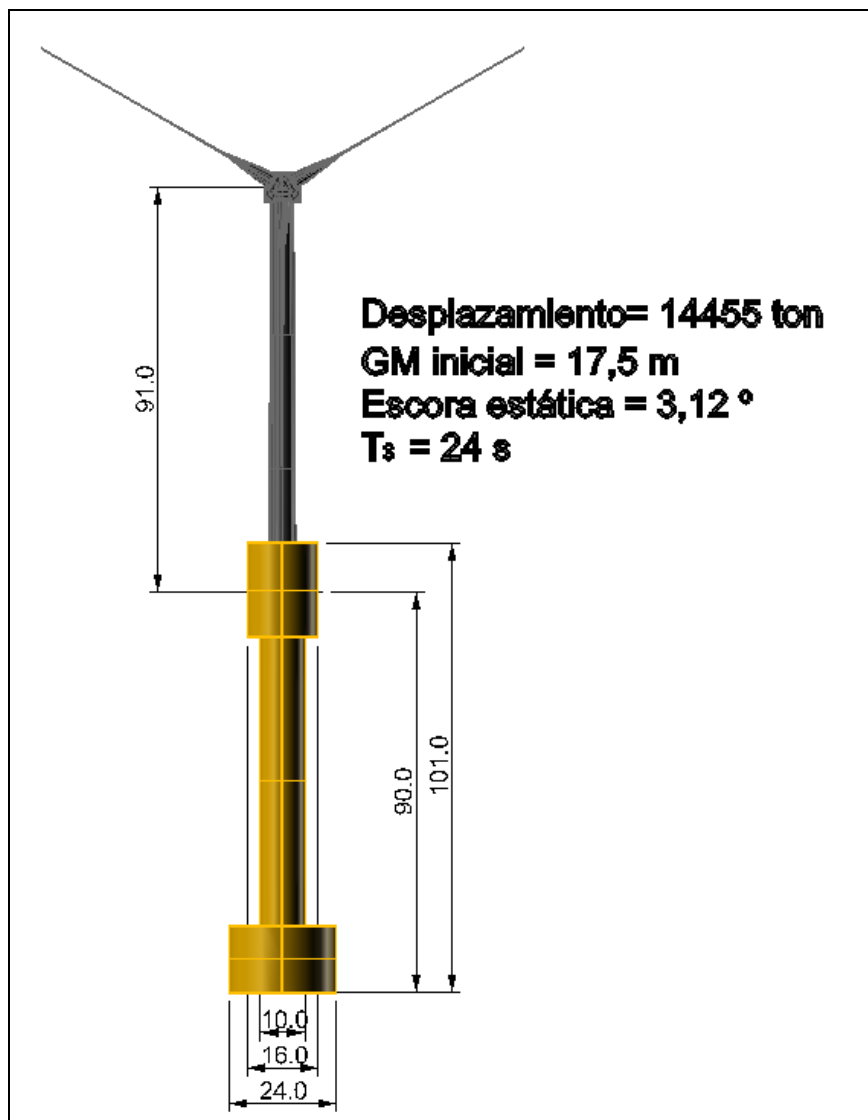


Figura 3.1. Vista general plataforma Spar. Dimensiones.

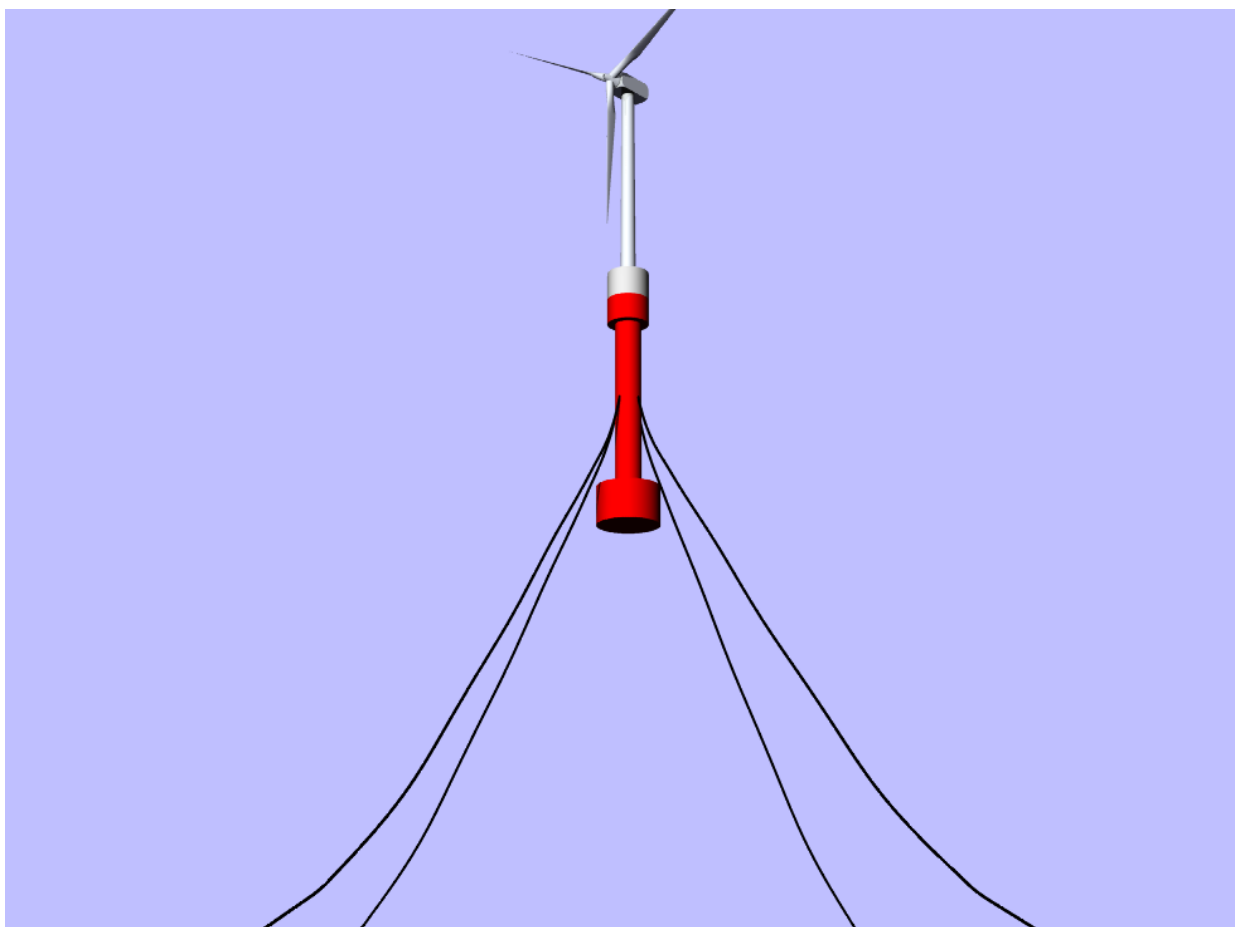
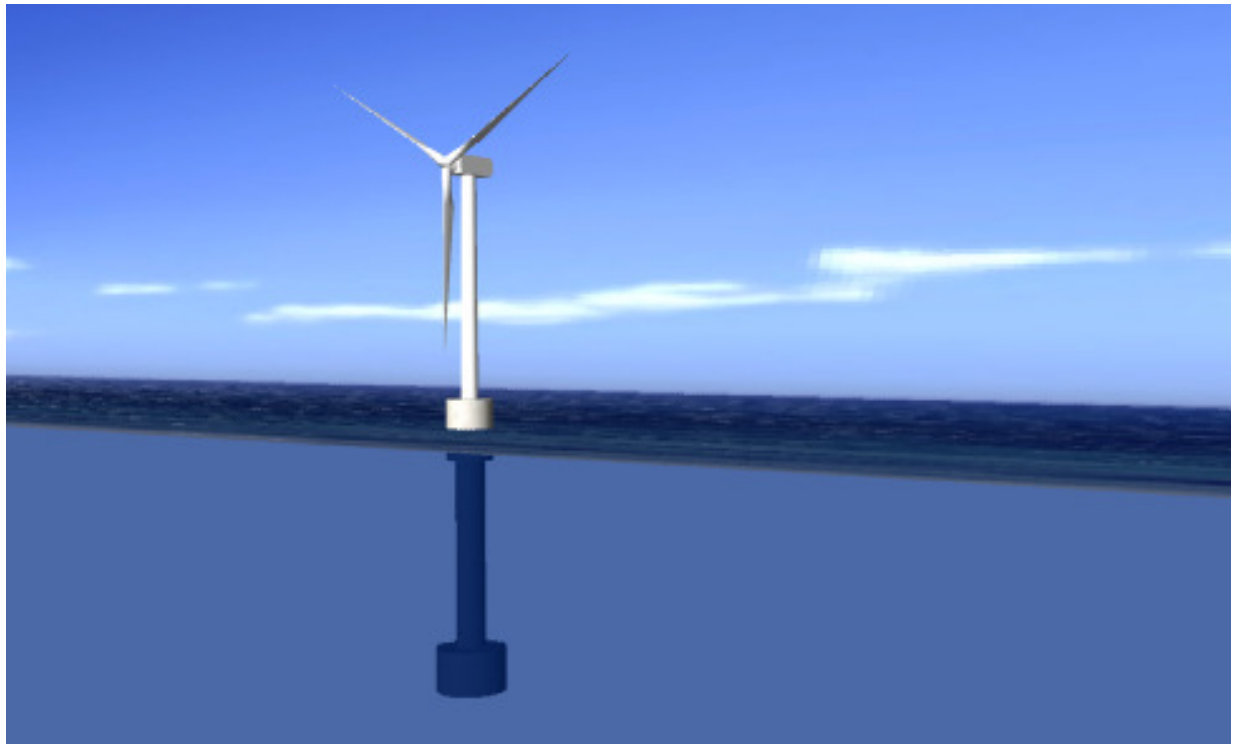


Figura 3.2. Plataforma instalada y flotando en alta mar.

4. Cálculos de estabilidad.

Se hará un estudio de la estabilidad en las distintas situaciones operativas, para verificar que el comportamiento de la plataforma sea el adecuado.

A efectos de estabilidad las líneas de fondeo no se tendrán en cuenta ya que contribuyen favorablemente a esta, como indica la normativa DNV OS C301.

El cálculo de las distintas magnitudes hidrostáticas se realiza con ayuda del módulo Hydromax, perteneciente al programa Maxsurf.

4.1 Condición de peso en rosca.

Se mostrarán en este apartado todos los pesos que contribuyen al peso en rosca de la plataforma así como sus centros de gravedad.

Se definirá en primer lugar la posición del sistema de referencia adoptado, situándose este en el centro de la plataforma y en el fondo de la misma, ya que es simétrica tanto transversal como longitudinalmente. Este sistema de referencia será el empleado de aquí en adelante, a no ser que se indique lo contrario.

El cálculo de los centros de gravedad se realiza considerando la plataforma en su posición de operación, es decir, en vertical.

En la siguiente tabla se muestran los distintos valores que contribuyen al peso en rosca con sus correspondientes coordenadas del centro de gravedad.

Peso en rosca						
Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Long.Arm m	Trans.Arm m	Vert. Arm m
Gondola	1	400	400	0	0	186
Torre	1	300	300	0	0	143,5
Anodos sacrificio	1	14	14	0	0	50,5
Pintura	1	20	20	0	0	50,5
Fairlead	1	3	3	0	0	47,5
Chain Jack	1	3	3	0	0	101
Guías	1	3	3	0	0	101
Escalas exteriores	1	5	5	0	0	96
Otros	1	0,5	0,5	0	0	101
Escotillas de acceso	1	0,3	0,3	4	4	101
Estructura	1	1328,9	1328,9	0	0	42,42
Total Loadcase			2077,7	0,001	0,001	85,117

Tabla 4.1. Condición de peso en rosca

4.2 Disposición de tanques.

Se ha dispuesto finalmente llevar lastre sólido en el soft tank pero en menor cantidad de la que se pretendió llevar en un principio, aunque con ello el KG aumente. Debido a este descenso en el peso de lastre también se llevará lastre líquido. Se decide llevar menos cantidad de lastre sólido para poder optar al traslado de la plataforma remolcada. Con esta nueva disposición del lastre se puede trasladar la plataforma remolcándola para su instalación de forma que cuando esta esté en dicha posición prácticamente no tenga trimado. Para conseguir todo esto, se realiza una compartimentación interna de la plataforma.

La siguiente tabla expone los distintos tanques que lleva la plataforma y muestra el total de lastre que necesita cuando está en posición de operación, así como los centros de gravedad de cada tanque.

Condición de carga en operación						
Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
ST1	100%	5649,424	5649,424	0	0	2,5
ST2	100%	4632,528	4632,528	0	0	10
Transit 1	100%	2087,998	2087,998	0	0	28
Transit 2	0%	1525,844	0	0	0	50,5
Transit 3	0%	1606,494	0	0	0	70
Flot 1	0%	1048,142	0	0	0	82,55
Flot 2	0%	1623,593	0	0	0	89,05
Flot 3	0%	1644,145	0	0	0	97
Total Loadcase			14447,65	0	0	20,471

Tabla 4.2. Condición de carga en operación

Los tanques denominados "ST" son los situados en el soft tank, de los cuales sólo el ST1 lleva lastre sólido (éste será el único tanque de la plataforma que lleve este tipo de lastre) mientras que el tanque ST2 llevará lastre líquido. Los tanques denominados "Transit" van situados en la zona llamada de transición y sólo el situado a continuación del soft tank, Transit 1, lleva lastre. Por último los tanques "Flot", que están situados en zona alta de la plataforma denominada flotador. Estos últimos tanques son con los que se jugará llegado el momento de tener que remolcar la plataforma.

En la siguiente figura se muestra un croquis de la compartimentación escogida.

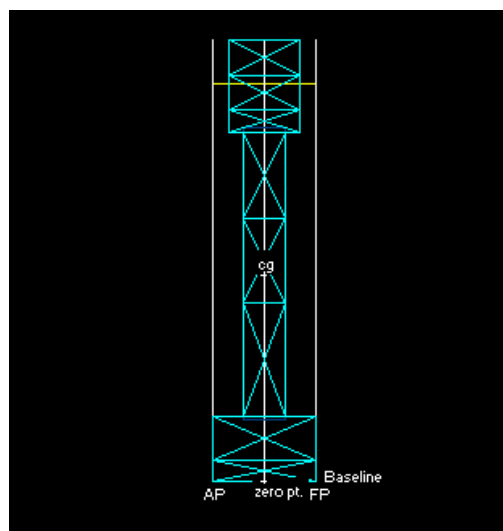


Figura 4.1. Compartimentación de la plataforma

4.3 Normativa aplicable. Criterios de estabilidad intacta.

No existe una normativa específica aplicable para este estudio por lo que podremos usar como referencia la DNV OS C301

Se realiza una verificación de los resultados de dimensionamiento teniendo en cuenta la distribución del lastre anteriormente expuesta.

La siguiente tabla muestra las características geométricas de la plataforma.

Equilibrio en operación	
Draft Amidsh. m	91,041
Displacement tonne	14467
Heel to Starboard degrees	0
Trim (+ve by stern) m	-0,009
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	0
KB m	34,261
KG fluid m	20,474
BMt m	0,228
GMt corrected m	14,015
Trim angle (+ve by stern) deg	0

Tabla 4.3. Condición de equilibrio en operación

Al ser simétrica respecto a crujía, tanto longitudinal como transversalmente, la altura metacéntrica (GM) y el radio metacéntrico (BM), tienen la misma coordenada transversal y longitudinal. En la tabla se puede observar que la distancia de GM real es menor que la calculada, esto es debido a la presencia de lastre líquido en sustitución al lastre sólido; el lastre líquido tiene una menor densidad que el sólido por lo que hace aumentar el KG.

4.3.1 Hidrostáticas rectas.

El cálculo de las curvas hidrostáticas constituye una herramienta muy útil para analizar la estabilidad de la plataforma a distintos calados.

En este caso se variará el calado a intervalos de 10 m, empezando en el punto de calado nulo hasta llegar a un calado teórico de 91 m.

A continuación se muestran los resultados obtenidos, exponiendo las hidrostáticas rectas en el caso de estabilidad inicial y sin trimado.

Hidrostáticas rectas										
Draft Amidships m	91,000	80,889	70,778	60,667	50,556	40,444	30,333	20,222	10,111	0,000
Displacement tonne	14458	12373	11447	10632	9817	9002	8188	7373	4686	0
Waterpl. Area m ²	200,654	200,788	78,615	78,615	78,615	78,615	78,615	78,615	452,172	0
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KB m	34,228	25,513	21,396	17,999	14,877	12,106	9,789	8,077	5,056	7,5
KG m	20,474	20,474	20,474	20,474	20,474	20,474	20,474	20,474	20,474	20,474
BMt m	0,228	0,266	0,044	0,047	0,051	0,056	0,061	0,068	3,562	0
GMt m	13,982	5,306	0,965	-2,428	-5,546	-8,312	-10,624	-12,329	-11,856	-12,974
KMt m	34,456	25,78	21,439	18,046	14,928	12,162	9,85	8,145	8,618	7,5
Immersion (TPc) tonne/cm	2,057	2,058	0,806	0,806	0,806	0,806	0,806	0,806	4,635	0
Trim angle (+ve by stern) deg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 4.4. Tabla de hidrostáticas rectas

El origen del sistema de referencia está ubicado en el centro de la plataforma, de ahí que el centro de flotación LCF aparezca a 0 m del origen. Debido a la simetría de la plataforma sólo se indica la coordenada trasversal, por ser esta igual que la longitudinal. En rojo se indican los resultados que nos interesan al calado fijado.

Resulta obvio que a medida que se disminuye el calado disminuye el valor del GM. Hasta llegado un momento en que se vuelve inestable a un calado entre 60 y 70 metros.

4.3.2 Ángulo estático de escora.

Para el cálculo del ángulo estático de escora se aplica a la plataforma una fuerza de 90 toneladas. Dicha fuerza se supone longitudinal por lo que en los resultados se obtiene un valor de trimado y no de escora. No obstante, por la simetría de la plataforma ambos resultados coinciden.

A continuación se muestran las características de la plataforma, como resultado de la aplicación de la fuerza del viento.

Equilibrio en operación con viento	
Draft Amidsh. m	91,046
Displacement tonne	14468
Heel to Starboard degrees	0
Trim (+ve by stern) m	-1,642
GMt corrected m	14,069
Trim angle (+ve by stern) deg	-3,9

Tabla 4.5. Condición de equilibrio en operación con viento

Como resultado se obtiene un ángulo de escora estática de 3,9°. Este valor es mayor que el calculado de manera teórica como consecuencia de la disminución de GM. No obstante los resultados son muy parecidos.

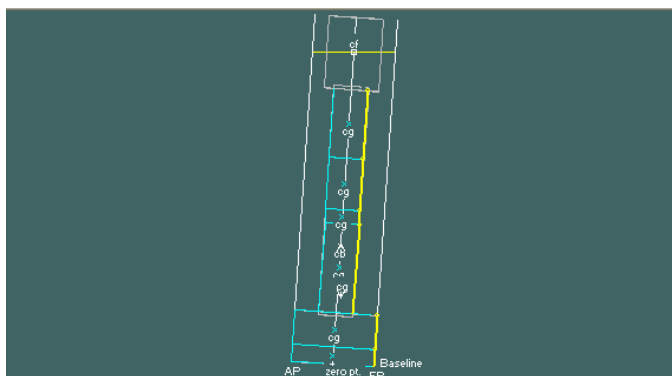


Figura 4.2. Situación de equilibrio con viento de operación de 11,5 m/s.

4.4 Estabilidad a grandes ángulos. Criterios de estabilidad intacta.

Hasta ahora se han definido las condiciones de equilibrio básicas que han permitido conocer el comportamiento estático de la plataforma. Para completar este análisis de estabilidad se realiza un estudio de curva de brazos adrizantes y brazos escorantes, y se establecen una serie de criterios que surgen de la normativa actual.

Los criterios de estabilidad intacta que indica la normativa para una plataforma Spar son los siguientes:

- El área bajo la curva de momentos adrizantes hasta la segunda intersección con la curva de momentos escorantes o hasta el ángulo de escora, lo que sea menor, no debe exceder el 30% del área bajo la curva de momentos escorantes hasta el mismo ángulo límite.
- La curva de momentos adrizantes será positiva para el rango de ángulos hasta la segunda intersección.
- 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, instalación o supervivencia.

Con lo cual se puede resumir que los criterios de estabilidad intacta se basan en comparar la curva de brazos adrizantes con la curva de brazos escorantes, generalmente debidas al viento.

Con la ayuda del programa Hydromax se verá si se verifican las condiciones anteriores para la plataforma. Se toma como velocidad de viento extrema la recomendada por la norma.

A continuación se transcribe directamente la información sobre el criterio de estabilidad.

Combined criteria (ratio of areas type 2) - wind heeling arm

This criterion is exactly the same as “Combined criteria (ratio of areas type 2) - general wind heeling arm” except that the magnitude of the heeling arm is automatically calculated from the wind pressure (or velocity), projected area and area lever information.

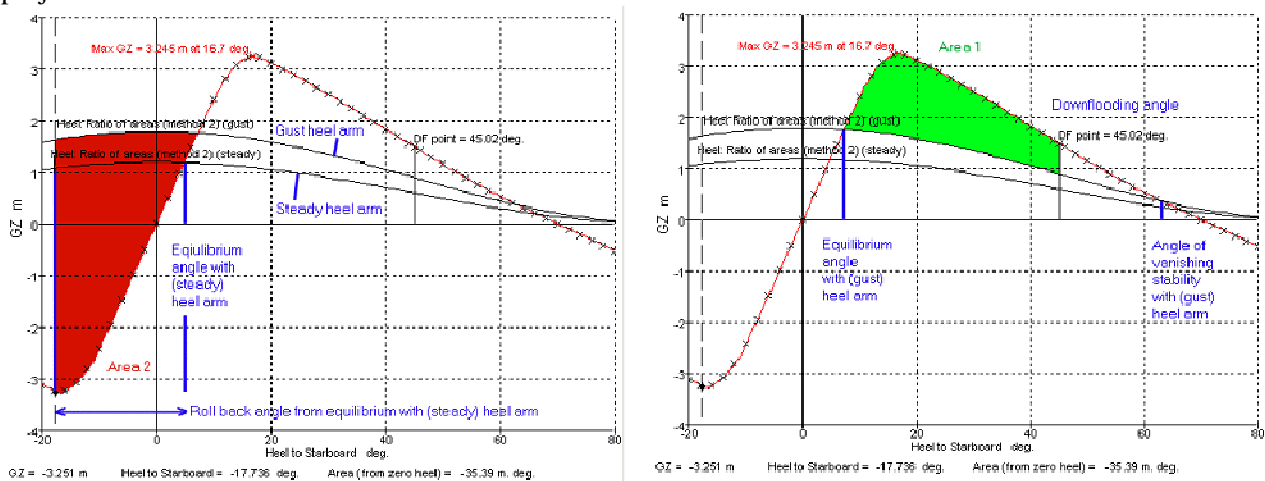


Figura 4.3. Parámetros característicos para aplicar el criterio de estabilidad

La plataforma diseñada durante todo este proceso tiene como principal característica una gran estabilidad, que queda patente en el siguiente gráfico en el que se muestra la curva de brazos adrizantes y escorantes.

Se observa un muy buen comportamiento estático de la plataforma Spar. Esto, unido a que su centro de gravedad es muy bajo, hace que este tipo de plataformas sea muy estable.

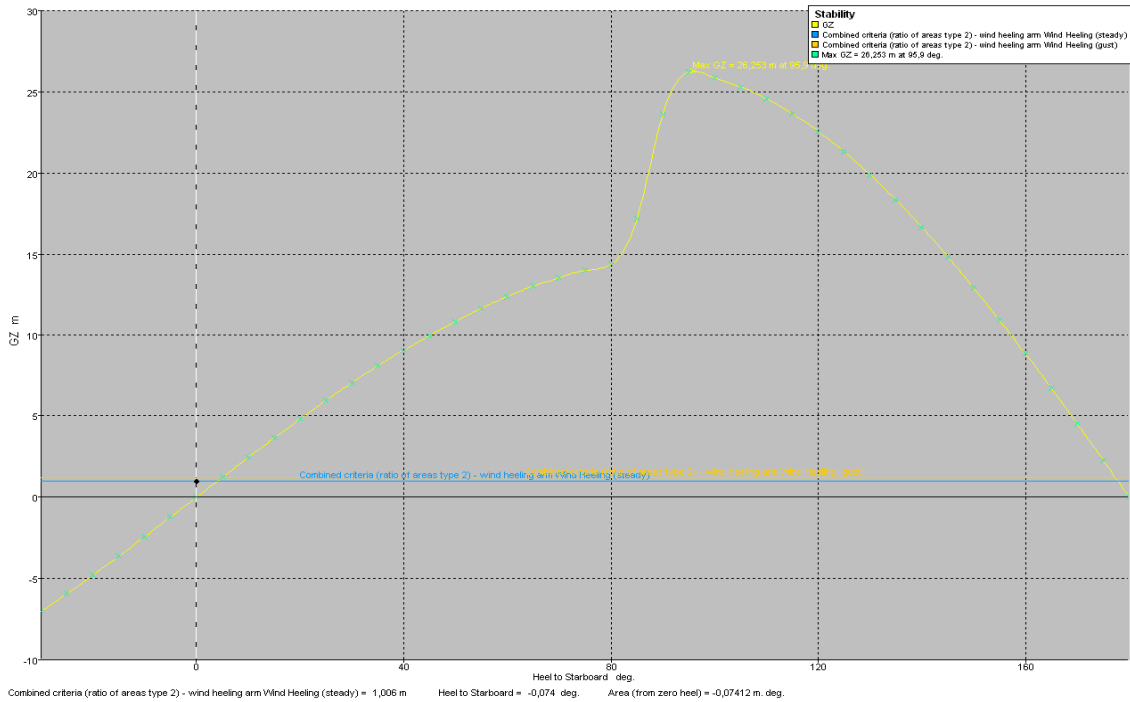


Figura 4.4. Curva de brazos adrizantes y de brazo escorante. Condición de viento severo.

A continuación se muestra una tabla con los criterios empleados en estos cálculos.

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_air Cd) = wind velocity: v = area centroid height (from zero point): h = total area: A = H = vert. centre of projected lat. u'water area cosine power: n = gust ratio	0,001 45 148,13 666,8 42,477 0 1,2	tonne/m ³ m/s m m ² m m			
Área bajo curvas	Area2 integrated to the lesser of roll back angle from equilibrium (with steady heel arm) Area 1 upper integration range, to the lesser of: spec. heel angle first downflooding angle angle of max. GZ above gust heel arm Angle for GZ(max) in GZ ratio, the lesser of: angle of max. GZ	10,0 (-5,9) 70 95,9 95,9	deg deg deg deg	-5,9 70		
Criterio	Criteria: Angle of steady heel shall be less than (<) Area1 / Area2 shall be greater than (>)	15 130	deg %	4,1 3167,229	Pass Pass Pass	72,56 2336,33

Valores intermedios	Intermediate values				
	Heel arm amplitude	m	1,006		
	Equilibrium angle with steady heel arm	deg	4,1		
	Equilibrium angle with gust heel arm	deg	4,9		
	Area1 (under GZ), from 4,9 to 70,0 deg.	m.deg	531,7901		
	Area1 (under HA), from 4,9 to 70,0 deg.	m.deg	78,5104		
	Area1, from 4,9 to 70,0 deg.	m.deg	453,2797		
	Area2 (under GZ), from -5,9 to 4,9 deg.	m.deg	-1,2487		
	Area2 (under HA), from -5,9 to 4,9 deg.	m.deg	13,0628		
Area2, from -5,9 to 4,9 deg.	m.deg	14,3116			

Tabla 4.6. Resultados del análisis de los criterios de estabilidad en operación

Esta tabla evidencia cómo la plataforma cumple con todos los criterios.

5. Comportamiento en la mar.

Ya se ha hecho un estudio de estabilidad de la plataforma pero se desconoce cuáles son sus características dinámicas. Los efectos generales más significativos y a tener en cuenta son los que se comentan a continuación y pueden ser consultados en la bibliografía recomendada. No obstante, la presencia del aerogenerador añade unos efectos dinámicos que a día de hoy son difíciles de predecir.

Las plataformas de gran calado (Deep Draught Floater, DDF) como las Spar se caracterizan por pequeños movimientos en arfada. Sin embargo, las Spar tienen un gran calado y una gran área expuesta a las corrientes, siendo éstas en muchas ocasiones las causantes de las cargas medioambientales más significativas [5] lo que se traduce en grandes fuerzas de arrastre que, si no se controla el movimiento con un sistema de fondeo tenso, originarán amplias excursiones en el plano horizontal (largada y/o deriva)

Existe otro fenómeno característico conocido como movimiento inducido por la vorticidad (VIM: Vortex Induced Motions). Este efecto se corrige con la presencia de planchas de acero formando un helicoide que recorre la cara externa del casco de la Spar (strakes).

Ya que los movimientos debidos a las olas WF son bajos, la Spar no está sometida a grandes cargas dinámicas debidas a las líneas de fondeo.

Las líneas de fondeo con configuración en catenaria dependen de una serie de factores como son el peso de la parte sumergida de las líneas de fondeo, las cargas horizontales en las líneas, la pretensión y la pendiente de las mismas a la salida del fairlead.

	FPSO	SEMI	DDF	TLP
Wave frequency loads	X	X	X	X
Low frequency loads	X	X	X	X
Loads in moonpool	X		X	
Mathieu instability			X	
Hull vortex shedding			X	
Wave in deck loads		X	X	X
Slamming loads	X	X		X
Green water loads	X			
High frequency loads				X

5.1 Análisis en el dominio de la frecuencia.

El análisis dinámico se realiza 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 con un coste computacional razonable.

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

$$(M + A)\ddot{\eta} + B\dot{\eta} + C\eta = F_{oleaje} \quad \text{Ec. 5.1}$$

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

5.1.1 Características del programa Ansys AQWA LINE.

Existen diversos software comerciales que cubren este tipo de análisis. En este caso el programa empleado será ANSYS AQWA LINE®.

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. Normalmente se asume que las líneas de fondeo no interfieren en los movimientos primarios de la estructura. 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 [13] pag 58)

Si fuese muy significativa esta influencia se deberían considerar dichos efectos en la matriz de coeficientes de restauración y añadirlos a la restauración hidrostática.

Los efectos del viento y de las corrientes tampoco están incluidos en los fundamentos teóricos del programa.

5.1.1.1 Matriz de masas [M].

La definición más genérica de la matriz de masas es: ([11] pag 149)

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

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} e I_{56} también serían nulos.

5.1.1.2 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:

$$C_{33} = \rho g A_w \text{ proporcional a las toneladas por centímetro de inmersión.}$$

$$C_{44} = \rho g \int_A y^2 dA + \rho g \nabla (z_B - z_G) \approx \rho g \nabla GM_T \text{ proporcional al momento para escorar } 1^\circ.$$

$$C_{55} = \rho g \int_A x^2 dA + \rho g \nabla (z_B - z_G) \approx \rho g \nabla GM_L \text{ proporcional al momento para trimar } 1^\circ.$$

$$C_{35} = C_{53} = -\rho g \int_A x dA$$

$$C_{34} = C_{43} = \rho g \int_A y dA$$

$$C_{46} = -(x_B - x_G) \nabla$$

$$C_{56} = -(y_B - y_G) \nabla$$

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 $C_{46}=C_{56}=0$.

5.1.1.3 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:

$$A_{jk} = A_{kj},$$

$$B_{jk} = B_{kj}$$

Los coeficientes de masa añadida y amortiguamiento van variando según la frecuencia/período de la ola.

La obtención de estos coeficientes para una geometría de cierta complejidad en un intervalo de frecuencias/períodos determinado requiere el empleo de programas específicos como WAMIT, SESAM, ANSYS-AQWA, SEAKEEPER, etc.

5.1.2 Resultados significativos.

En las siguientes gráficas se muestran los operadores de respuesta RAO's (Response Amplitude Operator). Las RAO's se pueden obtener para diversas direcciones de incidencia del oleaje y para cada uno de los grados de libertad.

En este caso debido a la simetría radial de la plataforma no es necesario analizar todas las direcciones por razones obvias de simetría.

Se muestran los valores para un mar de proa. Para esta dirección los movimientos en balance y en deriva son nulos. Como el estudio supone flotando la plataforma libremente y está tiene el centro de gravedad en su eje de simetría vertical no tiene razón de ser el estudio de la RAO en guiñada.

Es por ello que tan sólo se muestran los tres grados de libertad restantes.

En la dirección de largada, como era de esperar, a medida que el periodo de la ola es mayor la plataforma oscilará más adelante y atrás. No obstante los valores son muy bajos. No serán las olas, sino las corrientes las responsables de los principales movimientos en esta dirección.

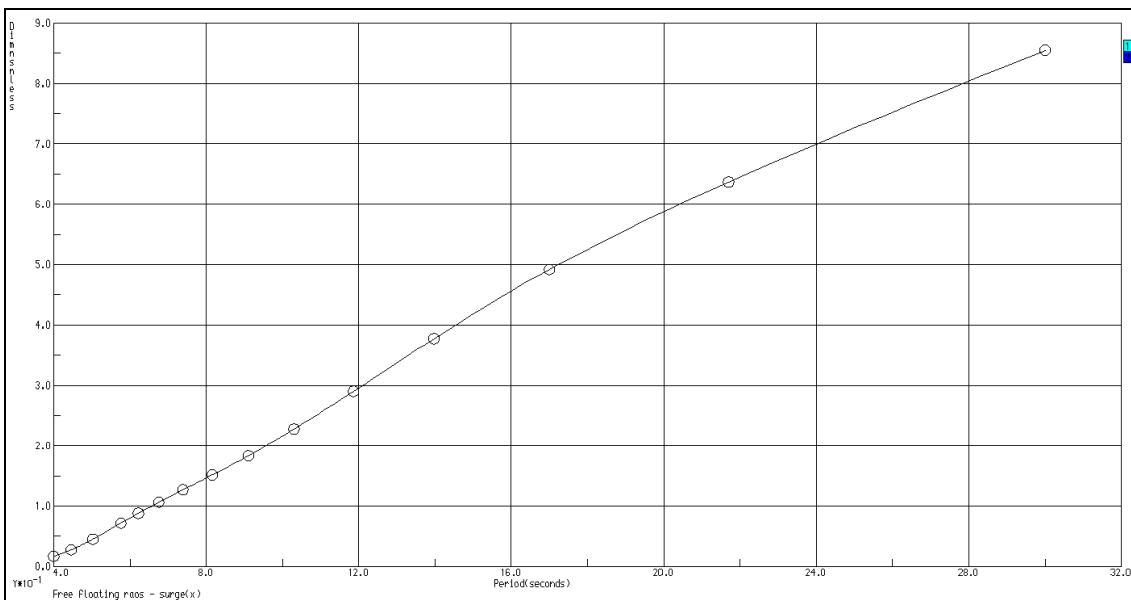


Figura 5.1. RAO de largada.

En el caso del cabeceo también la respuesta ante las olas es francamente positiva y nuevamente serán otros los factores que induzcan el giro según esta dirección. En este caso será el viento el que haga trimar a la plataforma, pero, como ya se ha comentado, este efecto queda fuera del modelo numérico que se ha planteado.

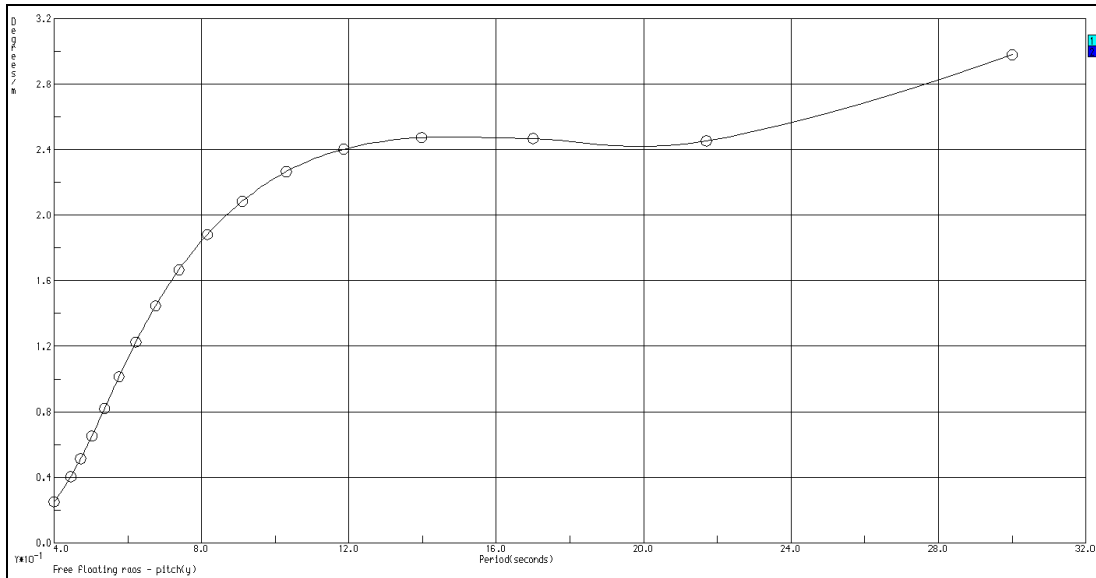


Figura 5.2. RAO de cabeceo.

Por último, los movimientos en arfada son los que contienen resultados con cierto interés. Como se puede ver las olas de hasta 16 segundos apenas originan movimientos significativos en la plataforma.

El pico de resonancia se encuentra en 22 segundos y a periodos mayores la plataforma se movería al unísono con la ola arriba y abajo.

A efectos prácticos se puede decir, por ejemplo, que esta plataforma en el mar Mediterráneo tendría un comportamiento excelente ya que no existen olas de periodos tan grandes.

En la zona del golfo de Cádiz, a pesar de estar en el Océano Atlántico, la altura significativa de la ola (periodo de retorno de 50 años) es de 7 metros y un periodo de pico esperado de 12 segundos. Es decir, el mar tampoco es muy severo en comparación con la costa gallega o el mar del Norte por lo que también sería una zona apta.

En la costa cantábrica los periodos son mayores ya que esta zona recibe el mar de fondo proveniente del Norte de Europa. Es raro alcanzar periodos de ola tan grandes incluso en las grandes tormentas no obstante, para estas zonas habría que estudiar la resistencia del sistema de mantenimiento de la posición (cadenas y anclajes) en las grandes tormentas.

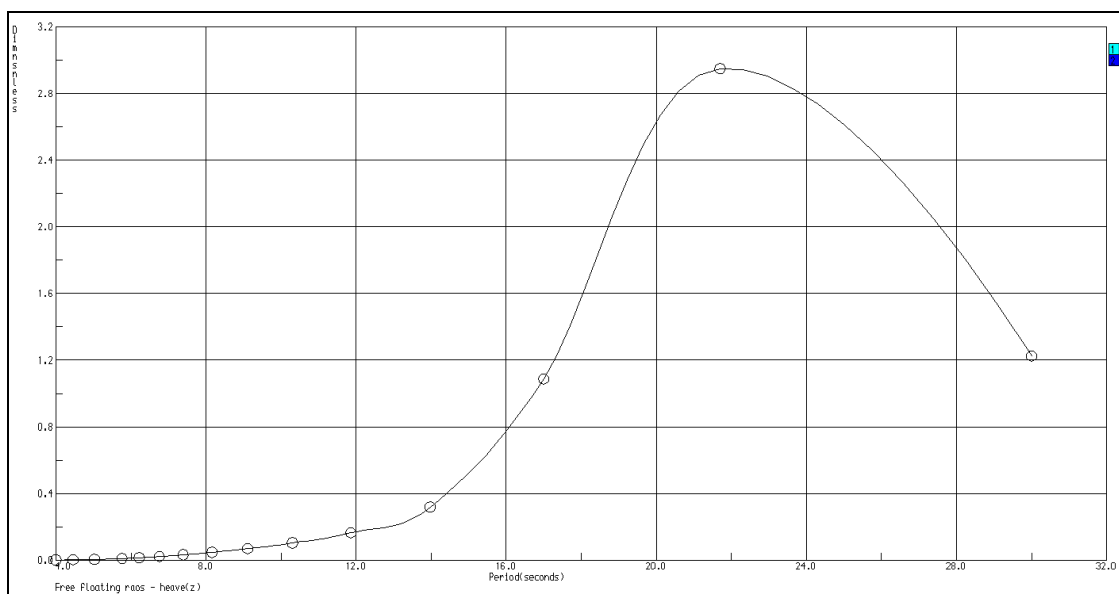


Figura 5.3. RAO de arfada.

No se ha profundizado más en cuanto al comportamiento en la mar de esta plataforma. Por lo que hemos visto el modelo inicial es apto para continuar realizando estudios posteriores en los que se debe profundizar más en los efectos no lineales como son las cargas por deriva y los movimientos debidos a la formación de vórtices (VIM). Además se debe estudiar el diseño del sistema de fondeo que posiblemente requeriría de cierta pretensión para controlar las excursiones horizontales.

Una vez planteado el sistema completo, se procedería a estudiar la respuesta de la plataforma en mares irregulares. Para ello se cruzan las RAO's con un espectro de mar determinado que varía de un emplazamiento a otro. Este estudio se realiza en el dominio del tiempo e incluye los efectos de las líneas de fondeo. Permitiría conocer con más exactitud los movimientos de la plataforma. En un mar irregular los movimientos dejan de ser periódicos o cuasi-periódicos y el desfase existente entre el movimiento de la plataforma y el oleaje incidente puede originar movimientos en la plataforma que el análisis en el dominio de la frecuencia no permite predecir.

En cuanto a los efectos aerodinámicos ya se ha visto que la plataforma escora/trima menos de 4 grados flotando libremente debido al efecto del "thrust" horizontal debido al viento, lo cual es un resultado bastante bueno y que se podría ver mejorado una vez incluido el efecto de las líneas de fondeo.

Otro tipo de efectos debidos a cargas aerodinámicas son difíciles de predecir sin el software adecuado. Por ejemplo, existe cierto efecto giroscópico que genera un momento según el eje Z que tiende a hacer guiñar la plataforma. La plataforma no dispone de ningún sistema que permita corregir la guiñada y son, en última instancia, las líneas de fondeo quienes deben añadir el momento restaurador que evite el giro en esta dirección.

Las fuerzas inerciales de las palas al arrancar y al frenar también pueden provocar fuerzas que induzcan un movimiento en la plataforma.

A opinión de los autores dichas fuerzas, aunque significativas, son de menor orden que las originadas por el oleaje y las corrientes y no harán peligrar la supervivencia de la plataforma. Pero sí que es cierto que deben ser investigadas en mayor profundidad para determinar la correcta operatividad del aerogenerador.

6. Proceso de transporte e instalación.

En este apartado del presente trabajo se pretende realizar un repaso de las distintas posibilidades que se presentan para el transporte y la instalación de la Spar en el parque eólico. Ambos procesos, transporte e instalación, están íntimamente relacionados y en función de cómo sea el uno así será el otro. Los criterios para la elección de una u otra alternativa son variados: técnicos, económicos, geográficos (la localización del parque eólico es un factor muy importante), meteorológicos, logísticos (la empresa que realice el trabajo dispondrá de recursos que la empujen a decantarse por uno u otro)... por lo tanto se puede decir que no existe una solución óptima general sino que cada solución puede ser óptima para determinados casos.

Para el transporte de la Spar se distinguen claramente dos alternativas:

- Transportar la Spar montada en su totalidad.
- Transportar la Spar en partes y unirlas en el parque eólico.

6.1 Transporte de la Spar completa.

En el caso de transportar la Spar montada en toda su longitud se presentan dos alternativas: llevar la estructura estibada a bordo de un buque o llevarla remolcada.

En el caso de decantarse por la opción de transportar la Spar a bordo de un buque la mayor dificultad viene dada por la gran eslora de la Spar (en torno a los cien metros) lo que obliga a que el buque que la transporte sea de dimensiones considerables. El transporte propiamente dicho de la estructura en la cubierta del buque no presentaría mayores inconvenientes y permitiría alcanzar el parque eólico en un espacio de tiempo bastante corto. Ahora bien, la operación de instalación la Spar sí entraña dificultades: habrá de pasar de la posición horizontal inicial a una posición con un ángulo de inclinación tal que permita trasladar la Spar desde la cubierta hasta el agua. En esta operación la estructura sufrirá grandes esfuerzos estructurales para los que habrá de estar preparada.

Para la opción de remolcar la Spar hasta el parque eólico el abanico de buques capaces de llevar a cabo la operación se amplía debido a la gran variedad y cantidad de remolcadores existentes. El tiempo necesario para alcanzar el parque será mayor que en el caso anterior y a su vez estará más expuesto a las condiciones de la mar durante el traslado. Será necesario la realización de un estudio para decidir el lastrado y el ángulo de inclinación óptimo para el remolque de la Spar. La gran ventaja de esta opción estriba en que desaparece la necesidad de botar la estructura. Una vez alcanzado el parque para tener la Spar lista únicamente se precisará lastrarla o deslastrarla hasta alcanzar el calado necesario.

La opción de llevar la Spar montada desde el puerto presenta una posible dificultad añadida que, si bien no está relacionada ni con el transporte por mar ni con la instalación en sí, debe ser tenida en cuenta: la capacidad que ha de tener la instalación portuaria para el manejo de una estructura del tamaño de la aquí presentada. Se está tratando con un elemento del orden de los cien metros de longitud y 14460 toneladas de peso lo que hace que no pueda ser operada desde cualquier puerto sino que habrá de ser uno que cumpla ciertas condiciones en cuanto a tamaño, accesos por carretera...

6.2 Transporte de la Spar en partes.

En el caso de optar por el traslado de la Spar separándola en varias partes la primera observación que cabría hacer es que, evidentemente, desaparece la posibilidad de que este traslado se realice mediante el remolcado de la unidad. Así pues, el traslado habrá de hacerse a bordo de un buque.

El siguiente paso consiste en decidir en cuántas partes ha de dividirse la Spar: un mayor número de divisiones facilitará el transporte (al manejar elementos de menor tamaño) pero a su vez complica el proceso de instalación al aumentar el número de ensamblajes a realizar a la llegada al parque eólico.

Si bien el número de divisiones es variable, la longitud de, al menos, una de ellas no lo es tanto. La parte que contenga el soft tank habrá de tener un tramo de cilindro de transición con una longitud suficiente para que cuando se realice su botadura el conjunto flote. El resto de estructura podrá dividirse en las partes que se estimen convenientes.

Otro aspecto a tener en cuenta es la posición en que se realizará el transporte de las partes: en vertical o en horizontal. La posición vertical ofrece la ventaja de una mayor facilidad de movimientos en la fase de montaje al no tener que realizar el giro de la estructura. Como desventajas presentan que su estiba a bordo es más complicada y que se eleva el centro de gravedad del buque de transporte. La posición horizontal es el anverso de la moneda de la vertical: su estiba a bordo es mucho más sencilla, el centro de gravedad se sitúa a menor altura pero como contrapartida las operaciones a realizar para el montaje de la Spar se complican enormemente al tener que efectuar el giro que coloque cada una de las partes en posición vertical.

6.3 Instalación de la Spar en el parque eólico.

Si bien en los dos apartados precedentes se han realizado comentarios acerca de la instalación de la Spar en el parque eólico se procederá a continuación a completar esa información. Como ya se ha indicado, el proceso de instalación varía en función de cuál haya sido el método de transporte elegido.

Si el transporte se realiza con la Spar remolcada, la instalación se reduce a posicionar la estructura en el lugar correspondiente y lastrarla o deslastrarla, según la posición y la estrategia de remolcado elegida, gradualmente para que vaya adoptando la posición vertical y el calado para el que se haya diseñado. Las bombas que habrán de usarse para el lastrado/deslastrado pueden ir montadas en el propio buque remolcador con lo que no se necesitarían otros buques específicos para ayudar en la operación.

Si el transporte elegido ha sido el de la Spar completa en posición horizontal en la cubierta de un buque, para su instalación será necesario la utilización de una (o varias) grúas para realizar el giro y la botadura de la estructura. En caso de utilizar una única grúa esta podría pertenecer al propio buque que realiza el transporte. Una vez botada la Spar, se procedería a su lastrado y posicionamiento en el lugar adecuado dentro del parque eólico.

Estos dos procesos de instalación presentan la gran ventaja de no necesitar ninguna operación de ensamblaje en el parque eólico, a diferencia de los que se comentarán a continuación.

El otro grupo de alternativas para el transporte de la Spar consiste en realizarlo con la estructura dividida en varias partes que habrán de ser ensambladas a su llegada al parque eólico. Independientemente del número de partes en el que haya sido transportada la Spar el proceso es similar: en primer lugar se botará el tramo que comprende el soft tank más parte del cilindro de transición. Una vez esté a flote se izará el siguiente tramo de Spar, se colocará en la vertical del anterior y se procederá al ensamblaje de ambos. Una vez unidos se continuará de una manera similar con el resto de partes. Si el transporte se ha realizado con los cilindros en posición horizontal sobre la cubierta del buque hay que añadir la dificultad de tener que realizar el giro de las piezas para colocarlas en posición vertical. La mayor dificultad de este proceso se encuentra en las operaciones de ensamblaje al tener que manejar grandes cargas (tanto en peso como en dimensiones), necesitar de una gran precisión para que estas cargas se coloquen en la posición adecuada la una respecto de la otra y además tener que realizar todo ello en un medio hostil como es la superficie del mar: el buque, y con él su carga, flotan libremente y se ven afectadas tanto por el viento como por las olas y las corrientes, es por ello que el mantenimiento de la posición es clave en todo este proceso. Los buques habrán de estar dotados de métodos de posicionamiento dinámico y métodos de estabilidad que minimicen en lo posible los movimientos. El sistema de ensamblaje de las distintas partes no se realizará mediante soldadura, debiéndose buscar otros métodos como pueden ser la unión con bridas. Para llevar a cabo todas estas operaciones se hace necesario el uso de grandes grúas con lo que se requerirá la participación de más buques además del utilizado para el transporte de la Spar.

En todos los casos comentados hasta ahora se ha considerado la operación hasta el momento en el que buque utilizado para el transporte finaliza su cometido y la Spar se encuentra a flote en el agua. A partir de aquí lo que resta del proceso de instalación es independiente del método de transporte utilizado y consiste en el enganche de la estructura a las líneas de fondeo.

6.4 Cálculos estabilidad. Plataforma en instalación.

Para concluir, se hace un estudio de la estabilidad de la plataforma en posición horizontal para que pueda ser remolcada. De esta forma se podrá trasladar hasta su lugar de operación donde se posicionará y donde pasará el resto de su vida útil.

Para que se pueda optar al traslado a remolque de la plataforma, se disminuye la cantidad de lastre sólido en ella y se compartimenta la zona del flotador en diversos tanques para compensar con lastre líquido el peso del lastre sólido.

Se define de nuevo la posición del sistema de referencia adoptado, situándolo ahora en el plano de crujía de la plataforma, en la línea de base y en el extremo exterior del soft tank.

La siguiente tabla muestra, en la distribución de tanques escogida, el total del lastre que necesita la plataforma cuando está siendo remolcada. También proporciona los centros de gravedad de cada tanque.

Condición de carga en instalación						
Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
HT1	100%	5654,116	5654,116	2,5	0	12
HT2	0%	4499,434	0	9,855	0	12
Transit 1	0%	2092,944	0	28	0	12
Transit 2	0%	1529,459	0	50,5	0	12
Transit 3	0%	1609,957	0	70	0	12
Flot 1	0%	1044,521	0	82,566	0	12
Flot 3	100%	1628,031	1628,031	89,05	0	12
Flot 2	100%	1648,535	1648,535	97	0	12
Total Loadcase			10308,382	43,459	0	10,396

Tabla 6.1. Condición de carga en instalación

En esta posición la plataforma lleva lastrados el tanque HT1 con lastre sólido y los tanques Flot 1 y Flot 2.

Con la plataforma en posición horizontal y con esta nueva distribución del lastre se hará un nuevo estudio de dimensionamiento.

La siguiente tabla muestra las características geométricas de la plataforma.

Equilibrio en instalación	
Draft Amidsh. m	13,562
Displacement tonne	10329
Heel to Starboard degrees	0
Draft at FP m	13,701
Draft at AP m	13,423
Trim (+ve by stern) m	-0,278
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	43,547
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	47,4
GMt corrected m	1,6
GML corrected m	138,918
Trim angle (+ve by stern) deg	-0,2

Tabla 6.2. Condición de equilibrio en instalación

Se puede observar que para esta nueva posición y distribución de pesos, la plataforma apenas tiene trimado lo cual será positivo a la hora de remolcarla.

Obtenemos un valor de GM de 1.6 que se considera aceptable. El hecho de que este resultado, aunque válido, no sea muy elevado, no supone ningún problema ya que la plataforma tan sólo estará en esta posición en el momento del traslado.

A continuación se muestra una figura con la plataforma en horizontal y con la respectiva distribución de los tanques.

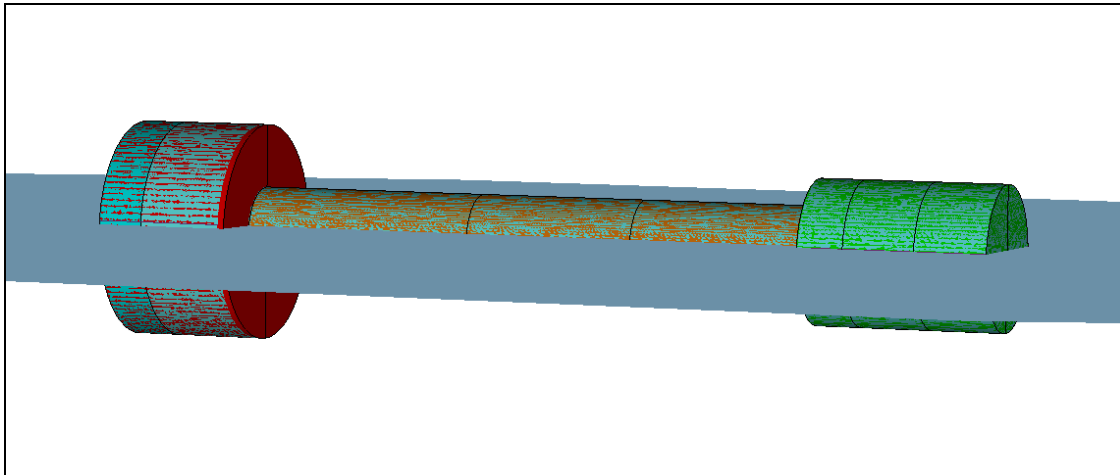


Figura 6.1 Plataforma flotando en posición horizontal.

7. Resumen de características generales.

Se ha diseñado una posible solución de plataforma Spar para un aerogenerador de 5 MW, estudiando aquellos aspectos más importantes desde el punto de vista de la ingeniería naval.

Han quedado fuera del estudio el análisis estructural, el estudio del sistema de fondeo, así como otros aspectos como el estudio de sistemas y equipos a bordo, el cable eléctrico etc.

Las principales ventajas técnicas de la plataforma Spar son:

- Es una plataforma sencilla. El diseño no es complejo.
- Es un dispositivo muy estable. Cumple sobradamente los criterios de estabilidad fijados.
- Su comportamiento en la mar es muy apropiado para garantizar la operatividad del aerogenerador. Los fenómenos de resonancia son de difícil ocurrencia en la mayoría de emplazamientos en España.
- Su construcción podría ser ejecutable en la mayoría de diques y gradas de los astilleros españoles lo cual evitaría la necesidad de grandes traslados desde el astillero al parque eólico.

Las principales desventajas son:

- Es una plataforma de gran desplazamiento y bastante peso de acero, lo cual incrementa los costes.
- El proceso de instalación es relativamente complejo y costoso.
- No es posible la instalación del aerogenerador en tierra. Lo que obliga a instalarlo en alta mar con buques muy específicos. En la actualidad no existe ningún buque diseñado específicamente para esta finalidad por lo que en una hipotética instalación masiva de aerogeneradores la carencia de buques podría suponer un cuello de botella para la globalidad del proyecto de un parque eólico marino flotante.

Bibliografía.

- [1] Red de puertos del Estado. *Clima medio del oleaje y extremos del oleaje*. Red de boyas exteriores.
- [2] Álvarez Campana, J.M. *Comportamiento del buque en la mar*. ETSIN. (Oct 2009).
- [3] Ben C. Gerwick. *Construction of marine and offshore structures*. (1999)
- [4] Cermelli, C; Roddier, D y Aubault, A. *Windfloat: A floating foundation for offshore wind turbines Part II: Hydrodynamics analysis*. OMAE. (2009).
- [5] Det Norske Veritas. DNV RP F205. *Global Performance Analysis of Deepwater Floating Structures*. (Octubre 2004).
- [6] Det Norske Veritas DNV-OS-E301. *Position Mooring*. (Octubre 2008).
- [7] Det Norske Veritas DNV-RP-C205. **Environmental condition and environmental loads. (April 2007).**
- [8] Jonkman, J.; Butterfield, S.; Musial, W. y Scott, G. *Definition of a 5MW reference wind turbine for offshore system development*. NRE. (2009).
- [9] Journée, J.M.J. y Massie, W.W. *Offshore Hydromechanics*. TU Delft. (2001).
- [10] McCormick M.E. y Kremer, D.R.B. *Long wave approximations of the added mass and radiation damping of a heaving, vertical, circular, cylindrical in waters of finite depth*. The Journal of ocean technology.
- [11] Newman, J.N. *Marine hydrodynamics*. The MIT Press. (1977).
- [12] Chakrabarti, S. *Handbook of offshore engineering*. (2006).
- [13] Faltinsen, O.M. *Sea loads on ships and offshore structures*. (1990).
- [14] Wayman, E.N.; Sclavounos, P.D.; Butterfield, S.; Jonkman, J. y Musial, W. *Coupled dynamic modeling of floating wind turbine system*. MIT & NREL. (Marzo 2006)
- [15] Haritos, N. *Introduction to the Analysis and Design of Offshore Structures*. The University of Melbourne, Australia (2007).
- [16] Faltinsen, O.M. *Sea loads on ships and offshore structures*. (1990)