

94960 – DISEÑO Y CÁLCULO DE MÁSTIL OFFSHORE PARA AEROGENERADOR

David Capafons Cuberos

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto que se ha desarrollado, es debido a la necesidad que existe en estos momentos de avanzar en los parques eólicos offshore (marinos), por su gran potencial eólico así como una superación de nuevos retos tecnológicos.

Uno de los retos tecnológicos, es poder soportar los mástiles de los aerogeneradores que puedan alcanzar alturas superiores a los 80 metros y otro es el de alcanzar diseños y utilización de materiales compuestos para alcanzar una reducción de peso de las estructuras de los mástiles.

Esta reducción de peso, es necesario, para poder facilitar el alcance de zonas con mayor potencial eólico, pues se suelen encontrar en zonas donde las profundidades hasta el lecho marino superan los 70 metros y es necesario utilizar plataformas flotantes para la instalación de aerogeneradores y toda reducción de peso de los componentes que forman el conjunto, siendo estos palas, aerogenerador, mástil y subestructura facilitarían su transporte y montaje.

Imagen de parque offshore extraída de nosoloingenieria.com



2. OBJETIVOS PLANTEADOS

El objetivo de este proyecto final de grado, es el diseño de un mástil para aerogenerador offshore (marino).

Se pretende alcanzar un diseño simple y que aporte ligereza, siendo sus principales virtudes. Para poder alcanzar dichos objetivos, se pretende realizar un diseño en acero y una vez que se disponga de una estructura segura frente a las solicitaciones que se pueda encontrar en su emplazamiento, se procederá a la sustitución del acero por un material compuesto, en este caso con un compuesto reforzado con fibra de polietileno de ultra alto peso molecular de nombre comercial Dyneema®, en Europa.

Para poder alcanzar esta meta, se ha planteado los siguientes análisis:

- Localización de un emplazamiento en el territorio de España, que no se encuentre conectado a la red general de distribución y que haya tenido un aumento considerable de su potencia eléctrica.
- Consulta de datos eólicos, para seleccionar el emplazamiento más adecuado y poder extraer los datos del entorno para el cálculo de las solicitaciones.
- Elección del material más adecuado y la geometría del mástil, para alcanzar la ligereza y sencillez de diseño.
- Establecer la utilización de un aerogenerador representativo de los previstos para la utilización offshore.
- Definir los estados de cargas a los que se debe afrontar el mástil.
- Realizar los cálculos analíticos de la estructura, para el material seleccionado.
- Realizar la comprobación por elementos finitos.

3. SOLUCIONES ADOPTADAS

La solución adoptada para alcanzar los objetivos del proyecto, siendo estos la simplicidad de diseño y

ligereza, se han intentado conseguir de la siguiente manera:

El acero debe cumplir:

1. Límite Elástico elevado
2. Resistencia a la tracción elevada
3. Que se pueda suministrar con espesores de hasta 150mm.
4. Alargamiento reducido
5. Buena resistencia a la corrosión atmosférica

Aceros preseleccionados:

S355G12+M S460G4+M S355J2W+N

El material compuesto debe cumplir:

- 1- Características físicas:
Baja densidad
- 2- Características mecánicas:
Límite Elástico elevado
Modulo de Young elevado
Resistencia a la tracción elevada
Alargamiento reducido
- 3- Características Químicas:
Resistencia al agua
Resistencia a los rayos UV

Materiales compuestos preseleccionados:

Dyneema® / Fibra de Vidrio / Fibra de Carbono

(UHMWPE) (Advantex®) (UHM)

Siendo los materiales seleccionados finalmente, tras la realización de cálculos analíticos:

-Un acero especial para estructuras offshore, siendo este el S460G4+M.

-Para la sustitución del acero, se ha escogido el Dyneema®, un material compuesto, en este caso con un compuesto reforzado con fibra de polietileno de ultra alto peso molecular, por su baja densidad.

Grafica 3.a. Comparativa Densidades.

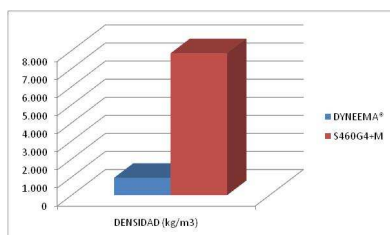


Imagen 03.a Productos realizados con Dyneema®



Para la geometría a escoger, se ha realizado la comparativa entre cilíndrica y troncocónica, para seleccionar la que ofrezca más ligereza.

4. CÁLCULOS ANALÍTICOS

Como punto de partida en el diseño del mástil, se ha realizado un cálculo analítico para poder obtener un pre-dimensionamiento de la estructura.

Los cálculos realizados, han sido:

- a) Momento Flector
- b) Tensión Máxima
- c) Desplazamiento Horizontal
- d) Desplazamiento Vertical
- e) Frecuencia Natural del Mástil.
- f) Pandeo

Realizándose estos cálculos tanto para la geometría cilíndrica como troncocónica y dividiendo la estructura en 3 tramos, para estudiar cada tramo por separado.

Dando como resultado la reducción de peso con la geometría troncocónica frente a la cilíndrica.

Tabla 4.a.Resultados geometrías.

Geometría	Cilíndrica	Troncocónica
Diámetro Exterior Superior	2,5m	2,1m
Diámetro Exterior Inferior	2,5m	2,25
Peso Estructura	11,54Tn	10,62Tn
Tipo de Acero	S460G4+M	S460G4+M

Con el estudio analítico, se ha obtenido también las dimensiones del mástil.

Tabla 3.b.Geometría seleccionada.

Geometría	Troncocónica
Diámetro Exterior Superior	2,1m
Diámetro Exterior Inferior	2,5m
Espesor	5mm
Peso Estructura	10,62Tn
Tipo de Acero	S460G4+M

5. CÁLCULOS POR ELEMENTOS FINITOS

Para el estudio por elementos finitos, se ha realizado una reducción de los estudios utilizados en los cálculos analíticos por solo 3:

Los cálculos realizados, han sido:

- Tensión Máxima (Von Mises)
- Desplazamiento Horizontal
- Frecuencia Natural del Mástil.

Por entender que son los más perjudiciales, pues la superación de los límites establecidos por alguno de ellos, generara un incremento en las dimensiones de la estructura.

Se ha realizado la comprobación de los datos obtenidos analíticamente para su comprobación, dando como resultado la superación de los límites establecidos.

Tabla 5.a. Comportamiento tramo 4.

TRAMO 4	do (m)	e(mm)	Do (m)	CUMPLE LAS CONDICIONES S460G4+M
TENSIÓN MÁXIMA	2,1	5	2,25	NO
DES. HORIZONTAL	2,1	5	2,25	NO
FRECUENCIA	2,1	5	2,25	NO

Tabla 5.b. Comportamiento tramo 3.

TRAMO 3	do (m)	e(mm)	Do (m)	CUMPLE LAS CONDICIONES S460G4+M
TENSIÓN MÁXIMA	2,25	5	2,38	NO
DES. HORIZONTAL	2,25	5	2,38	NO
FRECUENCIA	2,25	5	2,38	NO

Tabla 5.c. Comportamiento tramo 2.

TRAMO 2	do (m)	e(mm)	Do (m)	CUMPLE LAS CONDICIONES S460G4+M
TENSIÓN MÁXIMA	2,38	5	2,5	NO
DES. HORIZONTAL	2,38	5	2,5	NO
FRECUENCIA	2,38	5	2,5	NO

Los datos obtenidos, han dado paso a un rediseño de la estructura, y a una modificación en la manera de realizarlo. Siendo esta, el estudio de todo el mástil en un solo tramo y no dividido, pues la frecuencia se ve afectada por la esbeltez de la estructura y es el estudio que ha dado como incumplimiento de los límites establecidos.

El rediseño de la estructura tanto en acero como en material compuesto ha dado los siguientes resultados:

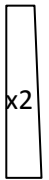
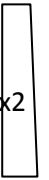
Tabla 5.e. Resultados rediseño y comparativa resultados.

MATERIAL	VON MISSES (MPa)	DESP. H. (mm)	FREC. NATURAL (Hz)	PESO (Tn)
ACERO	Máxima: 11,38MPa Mínimo: 0,0149MPa	Máximo: $9,585 \cdot 10^{-5}$ mm Mínimo: $-1,958 \cdot 10^{-4}$ mm.	0,624	196,98
DYNEEMA®	Máxima: 5,885MPa Mínimo: 0,0339MPa	Máximo: $3 \cdot 10^{-3}$ mm Mínimo: $-1,983 \cdot 10^{-3}$ mm.	2,541	631,7

Tabla 5.e. Dimensiones redimensionamiento.

MATERIAL	Diámetro superior (m)	Diámetro base (m)	Espesor (mm)
ACERO	2.53	2.875	40
DYNEEMA®	3	6	550

Tabla 5.f. Refuerzos redimensionamiento.

MATERIAL	Nº refuerzos	Dimensiones refuerzos Ancho x Grosor (mm) Alto (mm)	
ACERO	ninguno		
DYNEEMA®	4	 461x400 x2 1975x400	 729x400 x2 2242x400

6. PRESUPUESTO

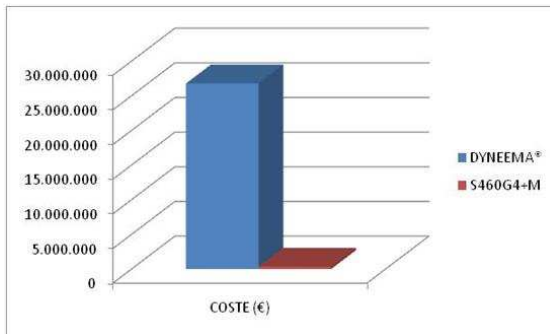
Como se ha podido extraer de la comparativa de resultados, el peso de la estructura utilizando diferentes materiales, ha producido un incremento de peso de la misma. Dicho efecto, el aumento de peso, es el que produce que una estructura sea más asequible que otra.

Para la realización del presupuesto, solo se ha tenido en cuenta el peso de los materiales utilizados y no su transporte, montaje, etc.

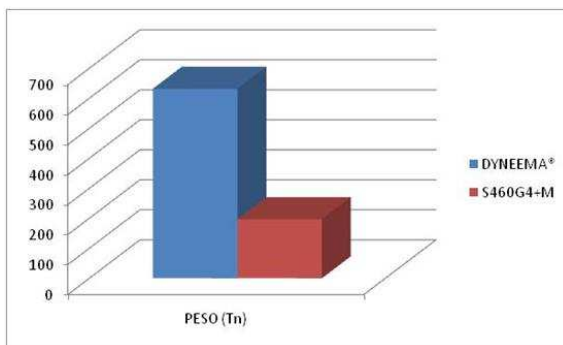
Tabla 4.a. Comparativa resultados.

Material	Precio	Cantidad	Total
Acero S460G4+M	1.800 €/Tn	196,98Tn	345.564€
Dyneema®	45€/kg	631.700kg	26.771.446€

Grafica 4.a. Comparativa Costes.



Grafica 4.b. Comparativa Pesos.



7. CONCLUSIONES

Una vez finalizado el estudio y tras los datos obtenidos y el presupuesto generador, se puede confirmar que las premisas de un diseño simple y ligero se han alcanzado con la utilización del Acero S460G4+M, pero no ha sido el mismo caso con el material compuesto Dyneema®.

Las características mecánicas del material compuesto, han generado un aumento no deseado de la geometría obtenida con el acero, produciendo un alejamiento del objetivo de ligereza deseado.

El otro objetivo que se buscaba, sencillez de diseño no se ha podido alcanzar con el material compuesto, debido a la necesidad de reforzar la estructura para que soportara las solicitaciones. Siendo otro objetivo no alcanzado.

De los objetivos previstos, se han podido alcanzar gracias a la utilización de la geometría troncocónica, por ser la más ligera y la utilización del material que ofrezca una reducción del peso, siendo este el acero S460G4+M. El acero, pese a tener una mayor densidad que el material compuesto, ofrece unas mejores características mecánicas frente al Dyneema®.

Pese a no conseguir los objetivos marcados, con la sustitución del acero por un material compuesto, se puede afirmar que es un camino que se debe seguir estudiando pues la utilización de nuevos materiales, son necesarios para superar estos nuevos retos que presentan los parques offshore flotantes.