

Diseño óptimo de pala de generador submarino

M. Rodríguez.

ACERINOX. España.

P. Castillo

CEPSA. España

A. Corz

Grupo de investigación TEP-157 “Materiales Compuestos” U. de Cádiz. España.

RESUMEN

En el presente Trabajo se aborda el diseño de una pala para un generador submarino de corriente, mediante la utilización del MEF. Se ha realizado el modelo, y a continuación, se ha optimizado el volumen de material empleado en la fabricación. Se han tenido en cuenta cada dirección de los diferentes laminados utilizados, así como el espesor de cada uno de ellos. Se ha impuesto como criterio de fallo el de Tsai-Wu, y un desplazamiento máximo admisible en punta de pala. Las cargas consideradas son las de tipo hidrodinámico, obtenidas mediante simulación de una zona alrededor de la pala. Se obtiene una pala muy ligera y con un gran aprovechamiento del material.

PALABRAS CLAVE: Composite, energías marinas, Elementos finitos, optimización.

1. INTRODUCCIÓN

Los océanos cubren más del 70% de la superficie terrestre, almacenando en su interior energía cinética en forma de mareas, corrientes y olas. Esta energía puede desempeñar un papel importante en el actual mercado energético, proporcionando energía sostenible y fiable. Uno de los mayores atractivos de este tipo de energía es su carácter altamente predecible, y con un bajo impacto ambiental.

Los generadores submarinos se mueven a pocas revoluciones, pero como la densidad del agua es unas 800 veces superior a la del aire, una velocidad de sólo 2 m/s en la corriente marina equivale a una velocidad de viento cercana a los 20 m/s. Una gran ventaja es que mientras que los aerogeneradores de la incidencia del viento, los generadores submarinos tienen la capacidad de aprovechar un recurso en continuo movimiento.

Estados Unidos, a primeros de 2.012 aprobó la primera licencia para un proyecto piloto que consiste en la instalación de 1 MW de generadores submarinos en Nueva York (East River). En Reino Unido ya se han adjudicado proyectos para la instalación de 600 MW pendientes de instalación. Para el año 2.020, España se ha marcado el objetivo de instalar unos 100 MW, Portugal unos 250 MW, Francia 380 MW, etc.

2. RELACIÓN CON LA ENERGÍA EÓLICA

El diseño y la tecnología que se emplea para los generadores submarinos es muy similar a la que se emplea en otro campo mucho más experimentado y del que se dispone de más información: la energía eólica.

Por las características del movimiento del agua en los océanos, la velocidad del fluido para la que se diseñan los generadores es inferior a la de los aerogeneradores. Típicamente se puede hablar de que los aerogeneradores pueden trabajar entre 3 y 25 m/s de viento, mientras que bajo el agua la máxima velocidad que cabe esperar en pocas ocasiones superará los 5 m/s.

Debido a la diferencia de densidades entre el agua y el aire, del orden de unas 800 veces superior, se requiere de palas de mucho menor tamaño en generadores submarinos que en aerogeneradores para obtener la misma potencia, ver relación de tamaños en figura 1.



Fig. 1.- Tamaño comparativo de una eólica y una marina

Existe una amplia variedad de diseños que han sido utilizados para este fin, teniendo la mayoría de ellos el eje de la turbina en posición horizontal [1].

El diseño de los aerogeneradores y los generadores submarinos tienen unos fundamentos similares, pero hay algunas diferencias importantes entre ellos, tabla 1:

| | Aerogenerador | Generador submarino |
|---|---|---|
| Tamaño del rotor (m.) | 0.5 – 145 | 15 – 30 |
| Velocidad de giro (r.p.m.) | 7 – 2.000 | 5 – 30 |
| Número de palas | 3 | 2 – 5 |
| Potencia (kW) | 0.03 – 10.000 | 1.000 |
| Variación de la velocidad del fluido | No determinado (aunque conocido en términos estadísticos) | Predecible en magnitud y dirección en una ubicación para largos períodos (años) |
| Velocidades máximas de funcionamiento (m/s) | 9 - 25 | 2 - 5 |

Tabla 1. Diferencias entre los dos tipos de generadores.

Además, la dirección en la que se tienen que orientar los generadores submarinos son sólo dos, normalmente desfasadas 180° . Sin embargo, los aerogeneradores recibirán el viento prácticamente de cualquier dirección.

3. MODELADO DE LAS PALAS DEL GENERADOR

Una de las piezas más importantes son las palas del generador, los diseños más frecuentes son similares al que se muestra en la figura 2, en la que aparecen dos refuerzos longitudinales en la sección de la pala, de forma que se crea un cajón central a lo largo de la propia pala.

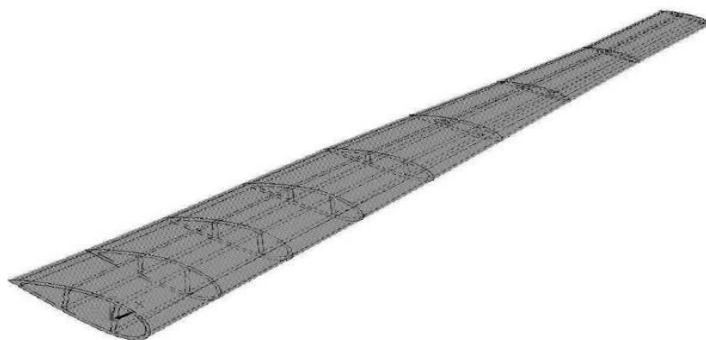


Fig. 2. Ejemplo de sección de pala de generador submarino.

Esta configuración de refuerzos internos le confieren a la pala mayor rigidez y son más efectivos que aumentar el espesor de la piel de la propia pala [2].

3.1. Materiales empleados en la pala

Los valores del material, carbono-epoxy, que emplearemos en este trabajo serán:

$$E_1 = 1,354 \times 10^{11} \text{ Pa}, E_2 = 6,147 \times 10^9 \text{ Pa}, G_{12} = 2,315 \times 10^9 \text{ Pa}, \nu_{12} = 0,252, \rho = 1.602 \text{ kg/m}^3$$

Como criterio de fallo utilizaremos el de Tsai-Wu, con los siguientes valores de tensión de rotura:

$$X_t = 2.280 \times 10^9 \text{ Pa}, X_c = 1.440 \times 10^9 \text{ Pa}, Y_t = 57 \times 10^9 \text{ Pa}, Y_c = 228 \times 10^9 \text{ Pa}, S = 71 \times 10^9 \text{ Pa}$$

3.2. Geometría de la pala

Como punto de partida de nuestros trabajos, hemos tomado la longitud de pala de un generador existente como es el modelo HS-300 del proyecto E-Tyde, con una longitud de pala de 8.5 m.

En cuanto a la sección se ha tomado un perfil NACA 63-418 para la parte activa de la pala, y una sección elíptica para la zona de entronque con el buje.

Se ha organizado la geometría en 8 zonas diferentes, que aunque inicialmente tienen el mismo material, se ha preparado para utilizar la posibilidad de combinación de materiales. En la figura 3 se puede ver una vista de la geometría de la pala

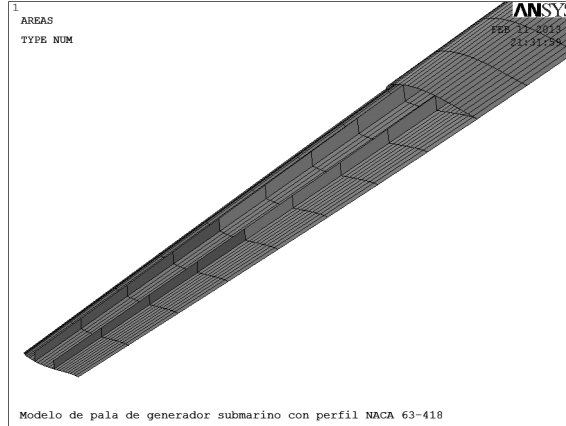


Fig. 3. Vista general de la geometría de la pala.

3.3. Tipo de elemento utilizado

El tipo de elemento que se ha empleado para el desarrollo de este modelo es el 'Shell 281'. [3]

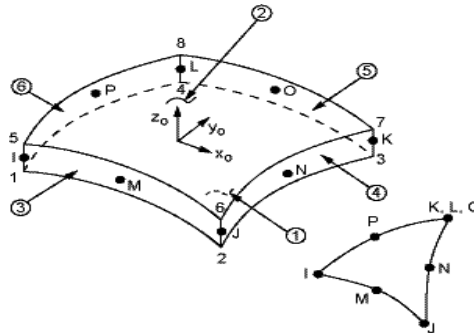


Fig. 4. Elemento tipo 'Shell 281'.

Este elemento presenta ocho nodos por elemento, teniendo cada uno de ellos seis grados de libertad: los desplazamientos en dirección X, Y y Z, y los giros respecto a los ejes X, Y y Z. Este tipo de elemento resulta muy apropiado para aplicaciones de materiales compuestos, ya que permite definir diferentes capas de material con una orientación específica para cada una de ellas.

3.4. Acciones y condiciones de contorno

En primer lugar, para llegar al diseño óptimo de la geometría de la pala [4], es necesario caracterizar el campo de velocidades en la ubicación exacta donde va a ser instalado el generador, y a partir de cuyos valores se puede conocer la presión aplicada sobre el perfil de la pala. Para ello se definen los siguientes parámetros: coeficiente de

sustentación de la pala, y densidad y velocidad máxima del fluido. En este trabajo se ha considerado la aplicación de una presión uniforme sobre una de las caras de la pala, mientras que en la otra es nula, para realizar el análisis estático de la misma.

El valor de la presión se calcula con la siguiente expresión:

$$P = \frac{1}{2} C_L \rho_w v^2 \quad (\text{xxx})$$

siendo:

C_L : coeficiente de sustentación

ρ_w : densidad del fluido

v : velocidad máxima del fluido

Aunque los valores máximos de la velocidad normalmente oscilarán entre 2 y 4 m/s, se ha fijado un valor de 5 m/s para los cálculos realizados.

Respecto a las condiciones de contorno, se ha impuesto que la zona de la base de la pala tiene todos sus desplazamientos y giros impedidos, es decir, un empotramiento perfecto de la pala al buje del generador.

4. OPTIMIZACIÓN

La función objetivo que se desea optimizar en este caso es el volumen de material a emplear. Por ello, cuanto menores sean los espesores de los diferentes elementos, más cerca se estará de alcanzar el óptimo, siempre que se cumplan con todas las condiciones que se indican a continuación:

- Criterio de fallo: ninguno de los elementos puede alcanzar los valores de rotura que predice el criterio de fallo de Tsai-Wu, por lo que deberá ser menor que la unidad.
- Desplazamiento máximo: para limitar la flecha de la pala se ha fijado un valor límite de 0,5 m., que representa algo más de un 5%.
- Espesores: todos los espesores se encontrarán en el rango comprendido entre 0,1 mm. y 50 mm. Se utilizarán 8 variables asociadas a cada una de las zonas.
- Laminado: Constituido por $[0^\circ/+45^\circ/+90^\circ/-45^\circ]_s$, de forma que tendremos 8 capas.

El proceso de optimización se realiza en dos etapas, la primera dedicada a obtener ocho apilados que constituyen ocho materiales con sus propiedades correspondientes y la segunda a obtener los espesores para cada uno de las zonas en las que se divide la pala donde se aplican estos materiales.

5. RESULTADOS

En la figura 5, podemos ver la evolución de las variables globales en el proceso de optimización, y en la figura 6 los valores del criterio de Tsai-Wu en el diseño optimizado.

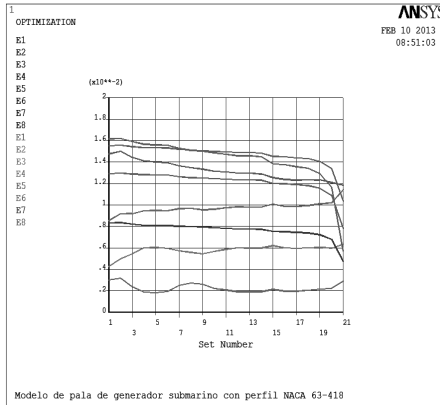


Fig 5. Evolución de los espesores

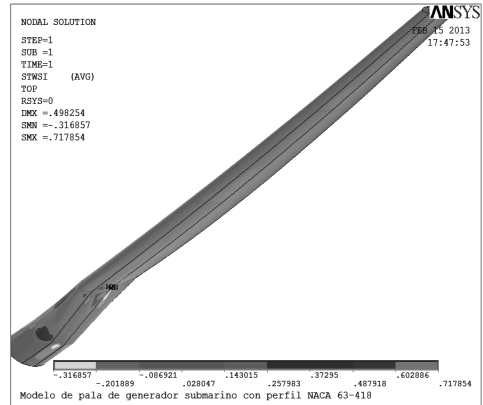


Fig 6. Valores del criterio de Tsai-Wu

El volumen de material obtenido es de 0.08018 m^3 por cada pala, la deflexión máxima en punta de pala 0.498254 m , y el criterio de fallo queda en 0.717854 , o sea un coeficiente de seguridad de 1.393

3. CONCLUSIONES

Las centrales de corriente tal como la que se está diseñando tienen un futuro esperanzador con una relación $\text{kW-h}/\text{€}$ muy favorable, y los materiales compuestos son una solución viable para este tipo de palas y creemos que tendremos un desarrollo acelerado en este campo.

Es necesario por lo tanto implementar nuevas herramientas de optimización aplicadas a materiales compuestos que permitan obtener diseños más económicos y mejorar la rentabilidad de la instalación, teniendo además en cuenta los problemas de pandeo y dinámico.

Hay que integrar en el análisis la influencia de las deformaciones en el comportamiento hidrodinámico de la pala, o sea la interacción fluido estructura de una forma acoplada.

REFERENCIAS

1. LEE, J. H.; KIM, D. H.; RHEE, S. H. (2011), 'Computational and Experimental Analysis for Horizontal Axis Marine Current Turbine Design'. *Second International Symposium on Marine Propulsors smp'11*, Hamburgo, Alemania.
2. ASSEFF, N. S.; MAHFUZ, H. (2009), 'Design and Finite Element Analysis of an Ocean Current Turbine Blade', 0-933957-38-1 ©2009 MTS.
3. ANSYS, Inc. Release 12.1 "Element Reference", Part 1, Element Library 2.007.
4. NICHOLLS-LEE, R. F.; TURNOCK, S. R.; BOYD, S. W. (2008), 'Simulation Based Optimisation of Marine Current Turbine Blades', University of Southampton, UK.