

## **Análisis de esfuerzos de una hélice de paso variable utilizando el análisis del elemento finito**

PIERO-ESPINO, Román†\*, LIZÁRRAGA-LIZÁRRAGA, Alejandro, MELLADO-OSUNA, Carlos y DAVIZON-CASTILLO, Yasser

*Universidad Politécnica de Sinaloa. Carretera Municipal Libre Mazatlán Higuera Km 3, 82199 Mazatlán, Sin.*

Recibido 3 de Octubre, 2017; Aceptado 19 de Diciembre, 2017

### **Resumen**

Este trabajo de investigación analiza los esfuerzos y deformaciones de una hélice de paso variable de cuatro palas aplicando el método de elemento elemento finito (FEM), esto mediante el uso del software Autodesk SimulationMechanical. La metodología propuesta consiste en aplicar cargas de empuje y torsión que actúan sobre las palas en dirección radial para cada pala. Ambas, torsión y el empuje son aplicadas como cargas puntuales siguiendo la distribución radial de cada carga. Los esfuerzos alcanzados no alcanzan la deformación del material, de tal forma que la deformación plástica no está presente en las palas. Finalmente, el FEM alcanzado muestra la distribución de los esfuerzos en la hélice de una forma más rápida que aplicar de una forma manual el cual es más complicado dada su geometría. La complejidad de la geometría y sus condiciones de frontera presentes en la hélice no permiten obtener una solución analítica, por lo cual es necesario aplicar soluciones basadas en métodos numéricos.

**Hélice de paso variable, método de elemento finito, análisis de esfuerzos**

### **Abstract**

This research work analyzes the strength and deformations of a variable pitch propeller of four blades applying the Finite Element Method (FEM) using the software Autodesk Simulation Mechanical. The proposed methodology consists to apply thrust loads and torsion acting over the blades in the radial direction of each blade. Both torsion and thrust are applied to the finite element as point loads following the radial distribution of each charge. The strengths achieved do not reach the creep strength of the material, i.e., plastic deformation is not present in the blades. Finally, the FEM allowed for showing the strength distribution in the propeller in a faster way than applying the manual method which it is more complicated because of its geometry. The complexity of the geometry and the boundary conditions present in the propeller, do not allow for obtaining an analytical solution, therefore, it is necessary to apply a numerical method.

**Variable pitch propeller, finite element method, strength analysis**

**Citación:** PIERO-ESPINO, Román, LIZÁRRAGA-LIZÁRRAGA, Alejandro, MELLADO-OSUNA, Carlos y DAVIZON-CASTILLO, Yasser. Análisis de esfuerzos de una hélice de paso variable utilizando el análisis del elemento finito. Revista de Ingeniería Tecnológica 2017. 1-4:13-19

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: pespino@upsin.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Las propelas de hélice pueden considerarse como parte de una superficie helicoidal que, cuando gira, parece “atornillarse” en el agua, con lo cual impulsa el agua hacia atrás y al vehículo al frente (Anderson y Tracy, 2012). Una sola condición es común a todos los sistemas de la propulsión: el empuje producido debe ser igual a la resistencia ofrecida al movimiento hacia adelante, en este punto el objeto está en equilibrio dinámico con sus alrededores, y mantendrá la velocidad, que es la esencia de la propulsión (Ricepropulsión, 2015). El mecanismo más común de propulsión marina es la hélice la cual convierte la mayor parte de la potencia del motor en una fuerza de empuje para propulsar una embarcación. El movimiento de la hélice es una combinación de una rotación con una traslación a lo largo del eje de rotación. La hélice está formado por elementos formados por una serie de dispositivos que se denominan palas o álabes, dispuestos de forma concéntrica sobre un eje y que giran alrededor de éste en un mismo plano.

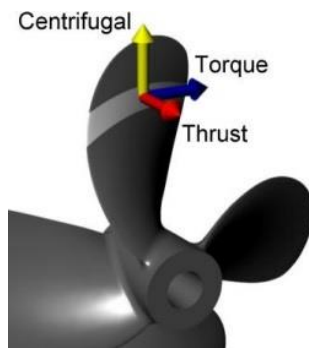
Sepúlveda (2006) señala que para obtener un mejor rendimiento en la hélice frente a problema ocasionado por la cavitación es preciso calcular, para cada sección de la pala, los espesores necesarios para que pueda soportar, sin fracturas ni elongaciones excesivas, los esfuerzos a los que va a estar sometida. Por lo que el objetivo de este trabajo consiste en realizar el cálculo estructural para una hélice ya construida donde se analiza los esfuerzos y deformaciones de una hélice de paso variable de cuatro palas aplicando el análisis por elemento finito. La hélice de paso variable consiste en que cada una de las palas pueden girar con respecto a su propio eje de giro resultando casi perpendicular al eje de la hélice. Las palas se mueven simultáneamente mediante un mecanismo situado en el cubo que es accionado mecánica o hidráulicamente.

A continuación se describen diversos estudios que han evaluado el rendimiento de una hélice aplicando técnicas y análisis por elemento finito: Rao et. al (2012) propone una metodología para diseñar una hélice de material compuesto analiza los esfuerzos y deformaciones usando el software Ansys. Khan et. al (2013) realiza el modelado de la pala de la hélice analizando la respuesta de la frecuencia de vibración de la hélice fabricada de aluminio y otra de material compuesto. Yeo et. al (2014) analiza mediante el análisis por elemento finito la distribución de los esfuerzos en la pala de la hélice debido a la carga hidrodinámica. Sagar et. al (2013) señala que debido a la geometría compleja que tiene una hélice se requiere del uso de software de elemento finito para modelar el comportamiento de la hélice para el análisis de su respuesta dinámica. Suneetha et. al (2013) modela y analiza una hélice fabricada con materiales compuesto, el análisis por elemento finito de lleva a cabo usando Abacus, realizan una comparación entre diferentes materiales, para comparar el de mejor rendimiento.

## Marco Teórico

El cálculo de los esfuerzos en la hélice es muy complicado debido a los siguientes aspectos: las fuerzas fluctúan, su distribución sobre la superficie de la pala de la hélice es difícil de calcular por la geometría de la hélice debido a que es muy compleja. Por tanto, es habitual el uso de métodos simplificados para calcular los esfuerzos en la pala de la hélice. (HydroComp, 2004), proporciona un modelo simple para la estimación de las fuerzas propulsivas que son adecuadas para el análisis por elemento finito:

a) las fuerzas pueden ser modeladas más bien por un conjunto de cargas puntuales que por una distribución de presiones, y b) las magnitudes de esas cargas puntuales pueden ser estimadas usando una distribución representativa para hélices libres. En la Fig. 1, se muestra como las tres fuerzas principales, empuje, torque y centrífuga, son aplicadas como cargas puntuales actuando en un segmento radial de la pala.



**Figura 1** Diagrama de fuerzas. Las fuerzas de empuje son siempre axiales en su dirección, las fuerzas de torque es tangente al arco del radio y la fuerza centrífuga es normal al eje de rotación. Fuente: HydroComp (2004)

El empuje y torque es desarrollado a partir de las fuerzas de sustentación y arrastre locales en las secciones laminares de la pala definidas por su posición radial. La distribución de cargas para hélices es determinada mediante lo publicado por Schoenherr, en el artículo se describe la distribución entregada por la fuerza por unidad radial de distancia versus posición radial. La fuerza de empuje axial  $F_T$  y la fuerza por torque horizontal  $F_Q$  para una sección, se defienden por dos coordenadas radiales (Schoenherr, 1963).

$$F_{T(X_1 \text{ a } X_2)} = 3.5 RK_T [a_T(X_2) - a_T(X_1)] \quad (1)$$

$$F_{Q(X_1 \text{ a } X_2)} = 3.5 RK_Q [a_Q(X_2) - a_Q(X_1)] \quad (2)$$

Dónde:

$R$  = Radio de la hélice.

$$K_T = \frac{T}{(Z \cdot R \cdot C_H)}$$

$$K_Q = \frac{T}{(Z \cdot R^2 \cdot C_H)}$$

$X_2$  = Coordenada radial externa.

$X_1$  = Coordenada radial interna.

$a_T(X)$  = Expresión de integración de empuje en  $X$ .

$a_Q(X)$  = Expresión de integración de torque en  $X$ .

$T$  = Empuje de la hélice.

$Q$  = Torque de la hélice.

$Z$  = Número de palas.

$C_H$  = expresión de integración del eje al borde.

$X_H$  = Posición radial del borde del núcleo.

Y además:

$$a_T(X) = \left( -\frac{2}{105} \right) (8 + 4X + 3X^2 - 15X^3) \sqrt{(1-X)} \quad (3)$$

$$a_Q(X) = \left( -\frac{2}{105} \right) (2 + X + 3X^2) \sqrt{(1-X)} \quad (4)$$

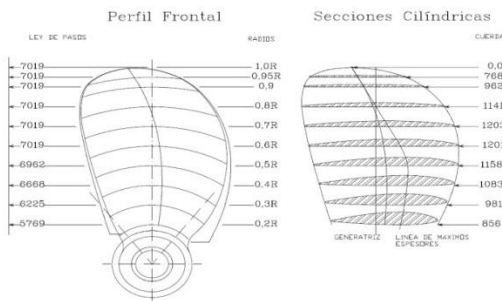
$$C_H = \left( \frac{1}{15} \right) (8 + 4X_H + 3X_H^2 - 15X_H^3) \sqrt{1-X} \quad (5)$$

La hélice presenta las siguientes características (ver tabla 1)

Diámetro	1.65 m
Pasó	1.67 m
Número de palas	4
Radio del núcleo	0.257 m
Posición radial del borde del núcleo	7.89 x 10 <sup>-3</sup> m
Número de revoluciones	1800 rpm
Torque entregado (Q)	12795.21 N.m
Empuje generado (T)	69593.55 N
Relación de transmisión del motor	6 a 1
Potencia del eje	524 Hp

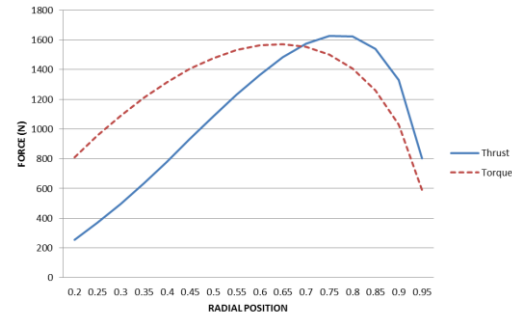
**Tabla 1** Características de la hélice que serán consideradas para el cálculo de esfuerzos y deformaciones

La Fig. 2 se puede observar la geometría principal de la hélice, la cual servirá de referencia para la colocación de las cargas de empuje y torque y posteriormente realizar el modelo por elemento finito.



**Figura 2** Geometría de la hélice

Para este estudio sólo se determina las cargas de empuje y torque, los resultados de la distribución de las cargas en el sentido radial de la pala se muestran la Fig 3.



**Figura 3** Distribución de cargas por empuje y torque con respecto al radio de la hélice

En base al resultado obtenido de las cargas por empuje y torque, se lleva a cabo la simulación de la hélice por el método elemento finito la cual se realizara por medio del programa Autodesk Simulation Mechanical 2015. Una vez establecidas las condiciones de frontera, mallado del modelo y definidas las cargas, se realiza los cálculos de los esfuerzos y deformaciones y usando como material bronce al manganeso, se usa el criterio de falla de Von Mises. En la Fig. 4, se muestran el modelo a analizar, se define el tipo de análisis como Static Stress With Linear Material Models, se realiza el modelo geométrico, es decir la creación del modelo matemático de la hélice y se discretiza generando el mallado, el elemento utilizado es tipo ladrillo (brick), se aplican las condiciones de frontera, se restringe la rotación y translación en el interior del núcleo que está en contacto con el eje de propulsión. Se colocan cargas puntuales en los nodos de acuerdo al sentido radial de la pala. Por último se lleva a cabo el análisis de los resultados (esfuerzos y deformaciones) a partir de los análisis estáticos.

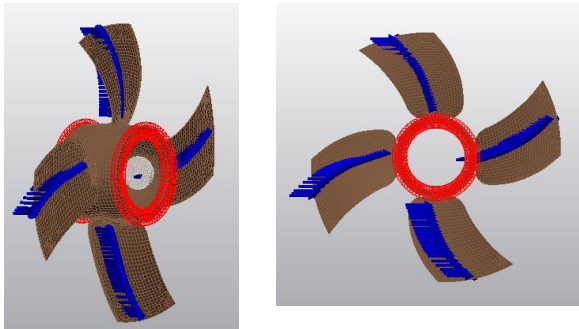


Figura 4 Condiciones de frontera

### Resultados

En esta sección se presentan los resultados del modelado por elemento finito de la hélice. La distribución de los esfuerzos Von Mises obtenidos en la pala se indican en la Fig.5. En ella, se observan que existe concentración de esfuerzos en la base de la pala, alcanzando un esfuerzo máximo de 188 MPa, este esfuerzo no supera el esfuerzo de fluencia del material, por lo que bajo estas condiciones de carga no se producirá fallas en el material.

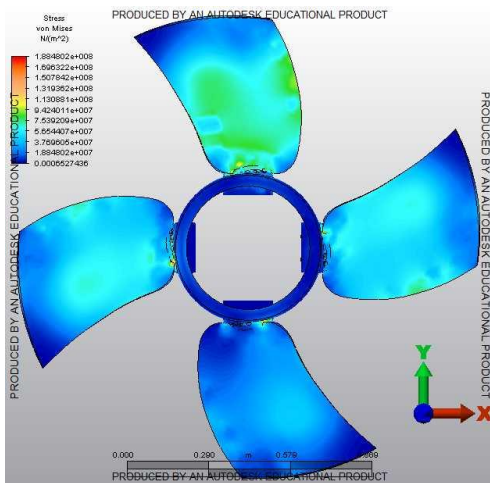


Figura 5 Análisis de esfuerzos, el esfuerzo máximo de 188 MPa, se encuentra localizado en la base de la pala

En la Fig. 6, se muestra la hélice sometida a las cargas de empuje y torsión.

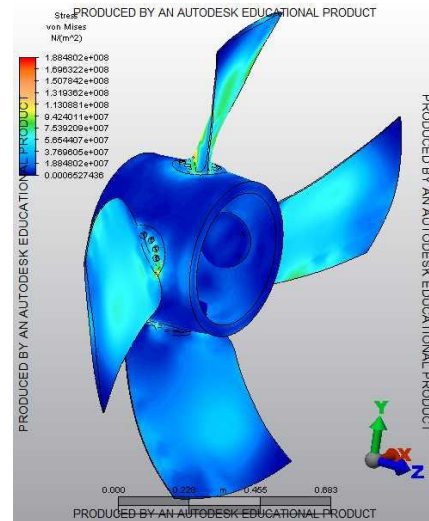


Figura 6 Esfuerzos máximos y mínimos

En la Fig.7 se observa los desplazamientos en la pala de la hélice, el análisis muestra la magnitud de desplazamiento de 0.00475 m. Se encuentra localizado en la parte superior de la pala en el lado opuesto de la zona de mayor esfuerzo.

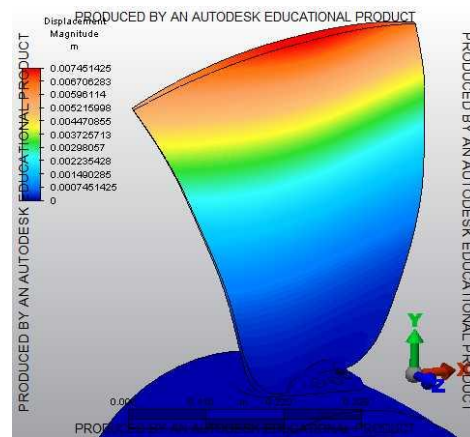
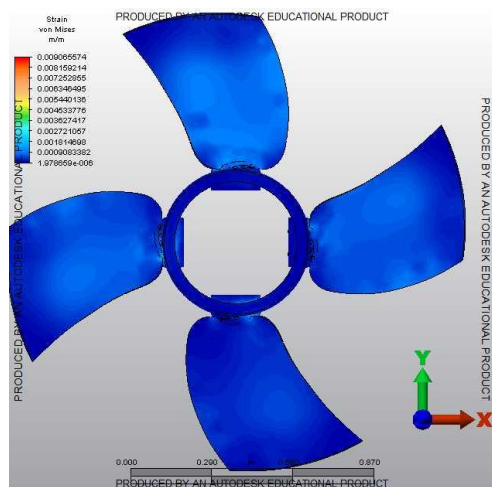


Figura 7 Se muestra el máximo desplazamiento de la pala de 0.00745 m

En hélice se puede apreciar como la pala ha sufrido una deformación por el esfuerzo aplicado. El valor de la deformación máxima correspondió a 0,00179 in/in.

En Fig. 8 se puede apreciar las deformaciones que sufre la hélice cuando es sometida a las cargas de empuje y torque.



**Figura 8** Se observa la máxima deformación en la pala de 0.00906 m

En la tabla 2, se muestran los resultados obtenidos mediante la simulación el método del elemento finito utilizado el programa Autodesk SimulationMechanical 2015.

Resultados	
Desplazamientos (m)	
X	0.0033
Y	0.0020
Z	0.0060
Esfuerzos (MPa)	
1er Esfuerzo principal	229
2do Esfuerzo principal	118
3er Esfuerzo principal	101
Esfuerzos Von Mises (MPa)	188

**Tabla 2** Resultados obtenidos a través del método del elemento finito

## Conclusiones

Basándose en los resultados obtenidos en la simulación numérica se concluye que:

El análisis por elemento finito permitió mostrar la distribución de los esfuerzos en la hélice de un modo más rápido que utilizando algún método manual el cual resulta más complicado debido a su geometría. Mediante esfuerzos equivalentes de Von Mises se determinaron las zonas de mayor concentración de esfuerzos. La mayor concentración se registró en la parte inferior de la pala. Aplicando los términos de esfuerzos permisibles, los esfuerzos no superaron el esfuerzo de fluencia del material, por lo que no se presentó deformación plástica en la pala de la hélice. Se tendría que verificar de nuevo el modelo por lo que propone lo siguiente: Realizar un análisis con diferentes materiales en la hélice ya que solo se analizó bronce manganeso. Se sugiere verificar los resultados ya sea con una prueba de laboratorio y realizar un estudio por medio de Computational Fluid Dynamics.

## Referencias

- Anderson, A.T. & Tracy M.C. (2012) Ingeniería Naval, En Avallone E.A. & Baumeister, T. (Eds.), Manual del ingeniero mecánico, 11-65: México. Editorial McGraw-Hill.
- Khan, M. A., Uddin K. S. & Ahmed B. (2013). Design and Dynamic analysis on composite propeller of ship using FEA. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. 2 (1). 310-315.
- Yeo, K.B., Choong, W. H. & Hau W. Y. (2014). Prediction of propeller blade stress distribution through FEA. Journal of applied sciences. 14 (12), 3046-3054. doi:10.3923/jas.2014.3046.3054

Propeller Forces for Blade Strength Analysis. (06 de mayo de 2004). Recuperado de <http://hydrocompinc.com/wp-content/uploads/documents/HC140-PropForcesForFEA.pdf>

Rao, Y.S., Rao k. M. & Reddy B.S. (2012). Stress analysis of composite propeller by using finite element analysis. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 4 (8). 3866-3875.

Ricepropulsión. ¿Qué es la propulsión? Introducción a la propulsión (06 de mayo de 2015) recuperado de <http://www.ricepropulsion.com/esp/cartas.php?v=1#Ancla>

Sagar, M. V., Venkaiah, M. & Sunil D. (2013). Static and dynamic analysis of composite propeller of ship using FEA. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2 (7). 2587-2594.

Schoenherr, K.E.(1963). Formulation of Propeller Blade Strength, SNAME Spring Meeting.

Sepúlveda, R. A. (2006). Correlación de tensiones y deformaciones entre hélices de distintos materiales a través del método de elementos finitos [Tesis doctoral], Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.

Suneetha, M., Rao R. S., Vardhan V. V. & Gowd G. H. (2013). Design & Analysis of a surface propeller using FEM. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 3 (9). 198-204.