

Diseño de una hélice supercavitante

Fabián A. Osorio
Antonio J. Bula
Néstor N. Durango

Resumen

Dada la importancia del aprovechamiento de la energía en equipos de propulsión, los autores diseñaron una hélice de supercavitación siguiendo la propuesta de Kudo et al. (2001) de estimular la cavitación practicando una ranura en el lado de más baja presión de la pala. Para establecer el lugar de la ranura o cavitador y lograr el objetivo previsto, se hicieron simulaciones computacionales de la distribución de la presión en los perfiles hidrodinámicos a lo largo de la pala. Una vez identificada la zona se construyeron dos hélices, una convencional y otra ranurada, para su posterior experimentación, con el objeto de conocer la diferencia en el funcionamiento hidrodinámico de ellas. Las pruebas demostraron que la hélice ranurada presentó un aumento en la eficiencia, y por ende en la velocidad de avance, con un notorio corrimiento de la máxima eficiencia hacia velocidades angulares mayores que la del diseño.

Palabras clave: Cavitación, modelación computacional, cavitador.

Abstract

For the design of the propeller of super-cavitations, we proceeded according to the proposal developed by Kudo et al. (2001), which was to stimulate the cavitations by making a groove on the side of the blade with the lowest pressure. To establish the location of the groove or cavitator and achieve the predetermined objective, computational simulations were carried out of the pressure distribution in the hydro-dynamic profiles along the blade. Once the zone was identified, two propellers were built, a conventional one and another with grooves for its later testing which would allow us to know the difference in behavior between them. The tests proved that the propeller with grooves presented an increase in efficiency, and therefore, in the thrust speed, with a noticeable shifting of the maximum efficiency towards higher angular velocities than those of the design.

Key words: Cavitation, Computational Shaping, Cavitator.

Fecha de recepción: 26 de marzo de 2007

Fecha de aceptación: 8 de abril de 2007

Los autores pertenecen al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia
Autor correspondiente: ndurango@uninorte.edu.co

Introducción

Es necesario disminuir la relación arrastre/impulsión en las hélices con el fin de tener un mejor aprovechamiento de la energía en equipos de propulsión rotatorios de alta velocidad, de gran demanda en embarcaciones militares, comerciales y de transporte de pasajeros. La fuerza de arrastre, que se opone al movimiento de un cuerpo sumergido en un flujo, se debe tanto al gradiente de presión como a las fuerzas viscosas sobre el cuerpo. En cuerpos delgados (como las palas de la hélice), el efecto de las fuerzas viscosas es más grande que el de las fuerzas de presión, pero es posible reducirlo disminuyendo la viscosidad. Para lograrlo, se hace uso específicamente de una técnica de reducción del arrastre que adiciona un elemento generador de cavitación en forma controlada a una hélice construida por métodos convencionales. El vapor producido en la superficie de la pala es de menor viscosidad, con lo cual la hélice puede avanzar más rápido.

Una hélice supercavitante es, entonces, aquella que tiene una alta eficiencia en condiciones de cavitación, lo cual permite a las embarcaciones desplazarse a mayor velocidad o mejorar su desempeño energético (Kudo et al., 2001). La cavitación ocurre cuando la presión en alguna parte de un líquido cae por debajo de la presión de vapor, lo que lleva a la formación de cavidades de vapor (Batchelor, 1976), pero la dinámica de la interfase vapor-líquido es compleja y aún no se ha terminado de entender porque no está bien definida y el flujo cercano a ella es inestable.

En consecuencia podemos decir que una hélice supercavitante es capaz de mantener una cavitación laminar desde el borde de ataque hacia la estela para incrementar la eficiencia mediante la reducción de las fuerzas de arrastre provocadas por los esfuerzos viscosos. Esto es posible gracias al vapor que está en contacto con la pala de la hélice, el cual tiene menor viscosidad (Senocak, 2002). Se busca, con estos diseños, una hélice de impulsión supercavitante, la cual debe cumplir con:

- Obtener una burbuja estable en el lado de baja presión del spa de la hélice.
- Disminuir el arrastre friccional.
- Aumentar la velocidad de desplazamiento y la eficiencia de la hélice.
- Reducir el fenómeno de picadura de la misma.

Esta técnica, además de ser aplicada en una hélice, también ha sido empleada en torpedos (Goel, 2002), en desactivación de minas subacuáticas, cascos de buques (Amromin y Mizine, 2003) y botes utilizados en deportes náuticos, por lo tanto, esta investigación se constituye en un valioso aporte para el desarrollo de la industria marítima y fluvial.

Crecimiento de una burbuja. Ecuación Rayleigh-Plesset

El crecimiento de una burbuja está gobernado por la siguiente ecuación (Carey, 1992).

$$\frac{p_v(t) - p_L(t)}{\rho_L} = R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4v_L}{R} \cdot \frac{dR}{dt} + \frac{2\sigma}{\rho_L R} \quad (1)$$

La ecuación de Rayleigh-Plesset permite calcular la transferencia de masa del líquido al gas para una ecuación de transporte que gobierna la fracción de líquido contenida en un fenómeno de cambio de fase (Berntsen, 2001), donde R es el radio de la burbuja de vapor, v_L y σ la viscosidad cinemática del líquido y tensión superficial respectivamente (Senocak, 2002).

Modelos de cavitación

Para la solución de flujos en los que están involucrados cambios de fase como es la cavitación, se han usado las ecuaciones de Navier-Stokes con modelos basados en una ecuación de transporte que dan información de las fronteras de la cavidad. Entre los modelos de cavitación están los empíricos: Singhal, et al., Merkle, et al., Ahuja, et al.; Kunz, et al., y Singhal, et al. (Senocak, 2002). También hay derivaciones de modelos de ecuación dinámico interfacial basados en una ecuación de transporte como se presenta a continuación (Senocak, 2002).

$$\partial \alpha_L + \nabla \cdot (\alpha_L \cdot \vec{u}) = \frac{\rho_L \text{MIN}(P_L - P_v) \cdot \alpha_L}{\rho_v \cdot (V_v^n - V_I^n)^2 \cdot (\rho_L - \rho_v) \cdot t_\infty} + \frac{\text{MAX}(P_L - P_v, 0) \cdot (1 - \alpha_L)}{(V_v^n - V_I^n)^2 \cdot (\rho_L - \rho_v) \cdot t_\infty} \quad (2)$$

El lado derecho de esta ecuación informa de la relación de generación de la fracción de líquido (α_L) donde V_I^n es la velocidad normal de la interfase,

V_v^n es la del vapor, P_v y ρ_v , P_L y ρ_L son las presiones y densidades de la fase de vapor y de líquido respectivamente, y t_∞ , es un tiempo característico. El primer término del lado derecho de la ecuación es responsable de la evaporación y el segundo de la condensación (Senocak, 2002).

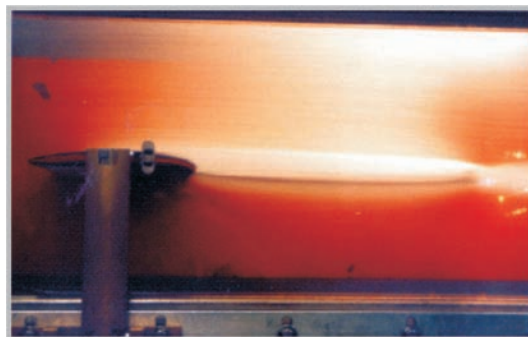
Cavitación estable

La supercavitación es un tipo de cavitación laminar también conocida como una cavidad fija, adherida o cavitación de bolsillo, la cual es estable, casi constante. El fenómeno es mostrado en el Gráfico 1A.

Gráfico 1: Visualización de la cavitación



A. Parcial



B. Supercavitación

Fuente: Kinna (1996).

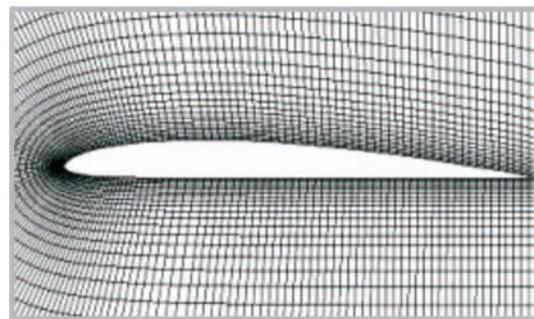
La interfase líquido-vapor puede ser suave y transparente y se hace ondulada y desaparece cerca a la región de cierre de la cavidad. Corriente abajo, hay *eddies* de escala grande dominados por grupos de burbujas. Sin embargo la supercavitación se presenta cuando la cavitación laminar crece de manera que envuelve el cuerpo sólido. Se puede usar ventilación para crear o fortalecer la supercavitación, la cual es deseable para llevar a cabo reducción del arrastre viscoso bajo el agua operando a alta velocidad (Senocak, 2002).

Para que la supercavitación sea estable en la hélice (Kudo et al., 2001), se usó un cavitador ranurado en forma de “V” colocado a lo largo de la pala de la hélice, donde comienza el desprendimiento de la capa límite. Para ubicar con precisión la ranura en la hélice, se simuló por separado el flujo en cada uno de los perfiles que conforman la pala, obteniéndose la distribución de presiones sobre este, en busca del punto de inflexión (MIN) cerca del borde de ataque donde se posicionará la ranura para todos los perfiles que forman la pala.

Modelo computacional

Se observa en el Gráfico 2 un mallado ortogonal con 14245 nodos y 13950 celdas. Todos los bordes del dominio tienen condición de frontera de velocidad 50m/s, menos la posterior y la superficie del perfil que tienen como condición de borde presión de referencia (101.325 kPa) y no deslizamiento respectivamente. Se escogió un modelo isotérmico turbulento κ - ϵ , para las ecuaciones de gobierno, de una sola fase. Este modelo fue desarrollado mediante el paquete computacional Fluent 6.0 por Fluent Inc.

Gráfico 2: Malla tipo capa límite



Celdas 13950, nodos 14245.

Fuente: Resultado de la investigación.

El Gráfico 3 muestra la distribución del coeficiente de presión (C_p) para diferentes ángulos de ataque del perfil Gottingen 622 con la cual se generó la pala de la hélice o propela. Los coeficientes de presión son iguales para cualquier longitud de cuerda manteniendo los mismos ángulos de ataque cuando el número de Reynolds es > 4.105 , con lo cual los perfiles no dependen de este número (Fuchslocher, 1964).

Se llevaron a cabo las simulaciones con una velocidad relativa al perfil de 50 m/s, longitud de cuerda 1 m, con sus respectivos ángulos de ataque,

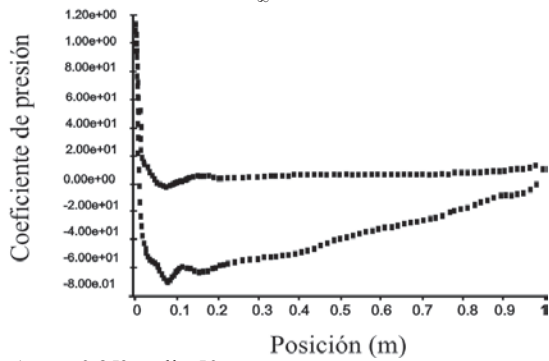
con lo cual se aseguró que en la simulación el perfil tuviera un número de Reynolds superior al crítico y la distribución del coeficiente de presión del perfil concordara con la de los perfiles seleccionados para el diseño de la hélice.

Los resultados arrojados por los modelos numéricos muestran que el coeficiente de presión más bajo está alrededor de -0.75 , cerca de la posición 10% de la cuerda, debido a la poca diferencia entre los ángulos de ataque de los perfiles ubicados entre los radios 35 mm y 50 mm, lo cual no provoca mucha

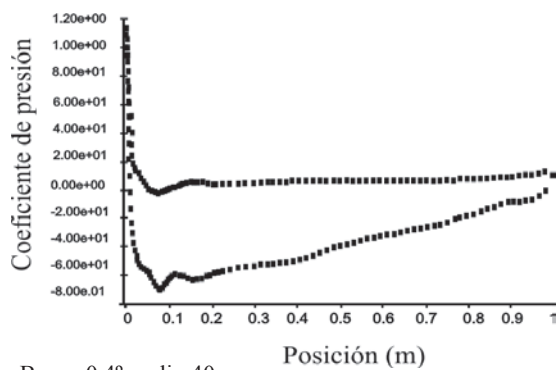
diferencia en la forma de los flujos de cada perfil y de la distribución de presiones.

Este modelo de distribución del coeficiente de presión sobre el perfil fue validado cualitativamente con otros modelos de perfiles en la literatura (Houghton. et al., 1960 ; Anderson, 1984). Con el fin de garantizar que la solución sea independiente del tamaño de la malla, se analizaron resultados del coeficiente de presión para diferentes mallados. El número de nodos mínimo usado fue 14245 para el análisis numérico.

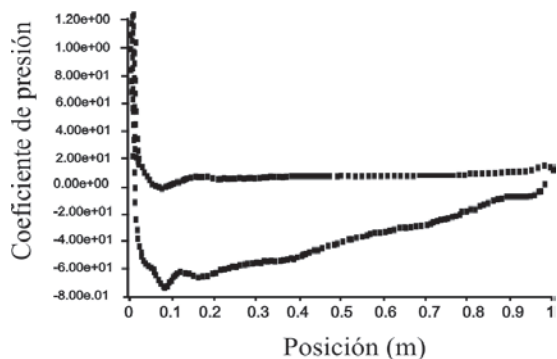
Gráfico 3. Distribución del Cp para el Goe 622. Longitud de cuerda = 1m, $V_{\infty} = 50$ m/s. $Re = 58.2 \cdot 10^5$



A. $\alpha = 0.35^\circ$, radio 50mm



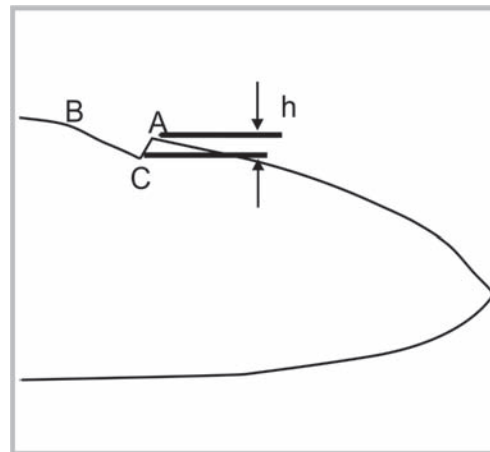
B. $\alpha = 0.4^\circ$, radio 40mm



C. $\alpha = 0.5^\circ$, radio 35mm

Fuente: Resultado de la investigación.

Gráfico 4. Ranuras, detalles y hélices



A. Ranura en V del perfil Gottingen 622.



B. Detalle de la ranura.



C. Hélices con y sin ranura. Construidas mediante prototipado rápido con tecnología FDM (*Fused Deposition Modeling*) y recubiertas con una masilla plástica de poliéster.

Fuente: *Archivo de los autores.*

Construcción de la hélice ranurada

El diseño de la ranura contempló la propuesta hecha por Kudo et al. (2001), donde se usó 2 mm de profundidad para la ranura a lo largo de la pala. En el proyecto se le asignó esta profundidad a la sección más grande de la pala de la hélice y para el resto de las secciones, la profundidad se hizo proporcional al tamaño de la cuerda del perfil. Se mantuvo la especificación de que el borde de ataque de la ranura (punto A, Gráfico 4) formara aproximadamente ángulo recto con la superficie del perfil, mientras que el borde de fuga (punto B, Gráfico 4) se une suavemente con la superficie del mismo.

Resultados experimentales y análisis

Las hélices con y sin ranura se probaron experimentalmente en un banco de pruebas como el que se muestra en el Gráfico 5. En este experimento se midieron la corriente y el voltaje suministrados al motor DC para conocer la potencia de entrada (consumida), la cabeza estática con sensores de presión y caudal con el tubo de Pitot para determinar la potencia de trabajo. Con estos datos recolectados se halló la eficiencia global para cada una de las hélices a distintas velocidades de giro y se desarrollaron ecuaciones de regresión.

La eficiencia fue calculada de la siguiente forma:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}} \quad (3)$$

$$\text{Potencia de salida} = \text{voltaje} \times \text{corriente}$$

$$\text{Potencia de entrada} = \text{caudal} \times \Delta p_{\text{Hélice}}$$

$$\text{Caudal} = \cos(45^\circ) \cdot \sqrt{\frac{2g\Delta P_{\text{pitot}}}{\gamma}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{Hélice}}^2 - d_{\text{Hélice}}^2)$$

$\Delta p_{\text{Hélice}}$ es igual a incremento de presión producida por la hélice, medida a través de los agujeros 1 y 3 de los tubos de Pitot colocados arriba y abajo de la hélice (Gráfico 6). El caudal se determina a partir de la diferencia entre la presión total y la presión estática en los agujeros 1 y 2 del Pitot. En el cálculo del caudal se tiene en cuenta el ángulo de 45° formado por la dirección del vector velocidad absoluta del flujo con el vector área, correspondiente a la dirección axial de la hélice.

Gráfico 5: Fotografías del banco de pruebas



En la fotografía aparecen fuente trifásica (220V, 5A) motor DC, trípode y tanque.

Fuente: *Archivo de los autores.*

Una vez desarrollados los experimentos y de haber llevado a cabo un proceso estadístico para garantizar que los datos resultantes fueran reales, se obtuvieron las regresiones de eficiencia para cada una de ellas:

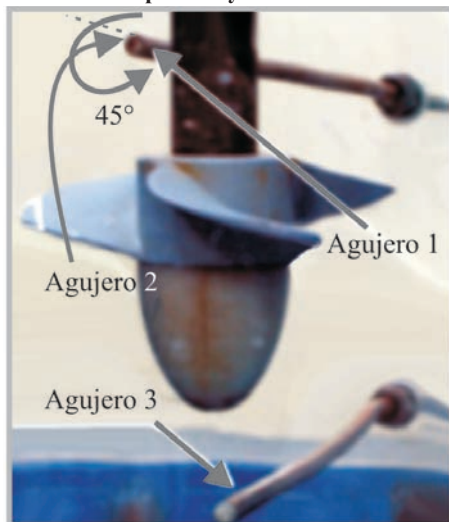
Para la hélice sin ranura:

$$\eta = (-1,4 + 5,1 \times 10^{-3} \omega - 7,5 \times 10^{-7} \omega^2)^2 \quad (4)$$

Para la hélice con ranura:

$$\eta = (-5,9 + 1,1 \times 10^{-2} \omega - 3,1 \times 10^{-6} \omega^2 + 3,0 \times 10^{-10} \omega^3)^2 \quad (5)$$

Gráfico 6: Tubos de Pitot para medir el incremento de presión y caudal



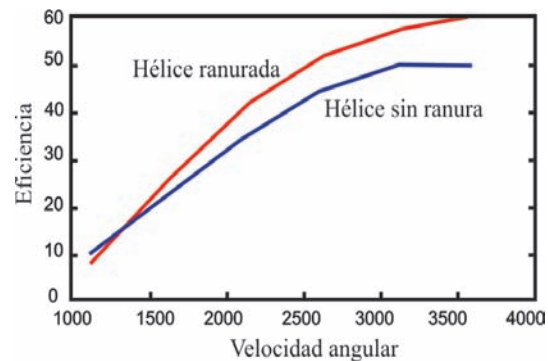
Fuente: Archivo de los autores.

El Gráfico 7 muestra que mientras la hélice sin ranura alcanza su máxima eficiencia cerca a la velocidad de diseño, 3600 rpm (pendiente igual a cero), la hélice con ranura presenta un funcionamiento creciente de la eficiencia y mayor a la de la hélice sin ranura a la misma velocidad.

El Gráfico 8 muestra la hélice sin ranura en funcionamiento. Se observa que no hay signos de cavitación, solo algunos burbujeos a velocidades superiores a 2600 rpm propios del ingreso de aire por el vórtice superior en el tanque de pruebas.

El Gráfico 9 muestra la hélice con ranura en operación, la cual presenta una estela helicoidal de vapor o cavitación provocada por la ranura hecha en la hélice, estimulando la cavitación. Este vapor se produce localmente cerca al extremo de la pala

Gráfico 7. Ecuaciones de regresión eficiencia-velocidad angular para las hélices con y sin ranura



Fuente: Resultado de la investigación.

Gráfico 8. Imágenes de la hélice sin cavitador a velocidad angular de 3100 rpm



Fuente: Archivo de los autores.

y alejándose de la hélice en forma helicoidal como muestra en el Gráfico 9C. El fenómeno provoca una reducción en el arrastre debido a que el fluido en contacto con la superficie (vapor) es de menor viscosidad; esto se traduce en una disminución de los esfuerzos cortantes. Sin embargo, las imágenes tomadas a la hélice ranurada no muestran una clara presencia de cavitación distribuida a lo largo de la ranura, ni extendida a través de las palas de la hélice. Por lo tanto, no se puede asegurar que la hélice ranurada sea supercavitante, por no tener una evidencia completa de alta eficiencia y supercavitación simultáneas. No obstante, el Gráfico 7 muestra que la hélice con ranura presenta una mayor eficiencia. Esto se puede explicar a partir de la disminución de los esfuerzos de corte.

**Gráfico 9. Imágenes de la hélice con cavitador a 3100 rpm.
Estela helicoidal de vapor en las tres imágenes**

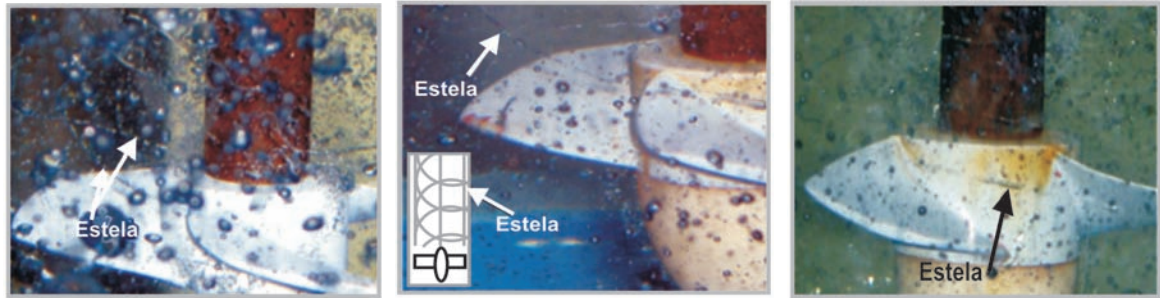


Gráfico 9A.

Gráfico 9B.

Gráfico 9C.

Fuente: Archivo de los autores.

Cuando un flujo cruza un cuerpo, aparece una distribución de presión y esfuerzos cortantes produciéndose fuerzas resultantes sobre este cuerpo. El arrastre debido a la presión es una fuerza en la dirección del flujo principal, la cual es la sumatoria de las fuerzas de presión frontal y posterior sobre el cuerpo en la dirección del flujo. Cuando hay separación de capa límite en el área posterior del cuerpo, la presión en esta zona es menor comparada con un flujo adherido, aumentándose así la fuerza de arrastre. En un flujo turbulento las capas de fluido se mezclan, reenergizando las que están pegadas a la superficie, lo cual hace que el flujo no se separe tan tempranamente (como si sucede en un flujo laminar) y que la presión en el área posterior aumente, con lo cual se reduce el arrastre. Con frecuencia se han usado técnicas para transformar el flujo laminar en turbulento para reducir el arrastre debido a las fuerzas de presión, como generar rugosidades cerca del borde de ataque o también hoyuelos en la superficie de una bola de golf. (Houghton y Carpenter, 2003, Anderson, 1984 y Somers, 2005). Es posible que la ranura haga las veces de hoyuelo como en la bola de golf e incremente el flujo turbulento, con lo cual se disminuye la fuerza de arrastre y aumente la eficiencia de la hélice.

Inestabilidades del experimento

Las pruebas de funcionamiento de las hélices se hicieron en un tanque con visores de acrílico como se muestra en el Gráfico 5. El flujo en el tanque es distinto al supuesto de un flujo de entrada a la hélice ordenado y diseccionado. Esto causa modificaciones en el ángulo de ataque entre el flujo y la pala llevando a una disminución en la eficiencia de la hélice distinta a la de diseño. La cavitación es sensible a estas inestabilidades extrínsecas, lo cual provoca que la hélice tenga fluctuaciones en la

Gráfico 10. Flujo caótico en el tanque del banco de pruebas.



Gráfico 10A.

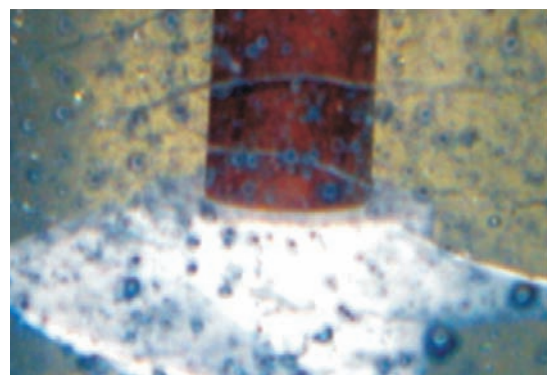


Gráfico 10B.

Fuente: Archivo de los autores.

potencia y en la eficiencia. El Gráfico 10A muestra grupos de burbujas de aire que entran por el vórtice superior en el tanque.

Conclusiones

A pesar de que el diseño se hizo para obtener supercavitación de manera intencional, la cavitación observada no se pudo estabilizar. El proceso metodológico se basó en la fabricación de un modelo computacional de una sola fase, con el fin de determinar así la distribución de presiones sobre las secciones del álabe, identificándose de este modo los puntos de mínima presión donde entallar el cavitador.

El modelo experimental muestra que la ranura permite un importante aumento en la eficiencia (y por ende en la velocidad de avance de la hélice), con un notorio corrimiento hacia velocidades angulares mayores que la del diseño. El aumento de la eficiencia es signo de un mejor aprovechamiento de la energía por la reducción en el arrastre para cada una de las secciones de álabe, reflejándose en una disminución de la potencia suministrada comparada con la potencia de trabajo.

Basado en los resultados y análisis, hay una reducción en el arrastre por fuerzas de presión al retardar el desprendimiento de la capa límite por la turbulencia inducida.

El uso de un tanque para las pruebas afecta notoriamente la eficiencia de las hélices (siendo distinta la potencia de diseño a la tomada experimentalmente), esto se debe a la recirculación del flujo, los efectos de frontera de las paredes del

recipiente, del vórtice superior, y a las pérdidas en el motor y el rodamiento.

No se observó fenómeno de picadura en las hélices durante las más de 40 horas en las que se llevaron a cabo las pruebas.

Recomendaciones

Para futuros trabajos se recomienda la construcción de un modelo computacional que incluya la interacción en la interfase líquido-vapor para verificar la efectividad de la cavitación como un fenómeno favorable en la eficiencia de las hélices.

Igualmente se recomienda estudiar computacional y experimentalmente la cavitación en 2D sobre láminas y perfiles, para obtención de modelos empíricos que expliquen el funcionamiento de la cavitación en distintas condiciones de flujo.

Por otra parte, sería interesante realizar la experiencia en túnel de cavitación para que los efectos de frontera no interaccionen fuertemente con la cavitación y la vuelvan inestable.

De la misma manera se recomienda construir una hélice de mayor tamaño para que la cavitación se inicie con altas velocidades periféricas a velocidades angulares bajas. Esto permite también tener una descripción completa de la curva eficiencia-velocidad angular de las hélices.

Finalmente será interesante implementar otras técnicas de observación de flujos para una mejor caracterización de la cavitación como el estroboscopio, la iluminación, y el contraste.

Referencias

- Amromin, E. y Mizine, I. (2003, 1-4 de noviembre). "Partial Cavitation as Drag Reduction. Technique and Problem of Active Flow Control". CAV2003, [simposio] Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka.
- Anderson, J. (1984) *Fundamentals of Aerodynamics*, New York, McGraw-Hill, pp. 247 – 314.
- Batchelor, G. K. (2001) *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge, (s. e.), pp. 55, 481-506.
- Berntsen, G., (2001 20-23 de junio). "Numerical Modeling of Sheet and Tip Vortex Cavitation With Fluent 5". CAV 2001, [simposio] Fourth International Symposium on Cavitation, Pasadena.
- Carey, V. P., (1992). *Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena*, Bristol, Taylor & Francis, pp. 35, cap. 2.
- Fuchslocher, S. (1964) *Bombas*. Madrid, Labor S. A., pp. 89 – 112.

- Kinnas, S. (s. d.) "Photographs of Different Types of Cavitation", [en línea], disponible en: <http://cavity.ce.utexas.edu/kinnas/cavphotos.html>, recuperado el 4 de octubre de 2005.
- Kudo, T., Ukon, Y., y Sumino, Y. (2001, 20-23 de junio) "Proposal of a Groove Cavitator on a Supercavitation Propeller", [simposio] Fourth International Symposium on Cavitation, CAV 2001, Pasadena.
- Goel, A. (2002) *Control Strategies for Supercavitating Vehicles*, [tesis de maestría], Florida, University of Florida, Mechanical and Aerospace Engineering Department.
- Houghton, E., Carpenter, P., (2003) *Aerodynamics for Engineering Students*, Oxford, Butterworth-Heinemann, pp. 200-209.
- Senocak, I., (2002, s. d.). "Computational Methodology for the Simulation of Turbulent Cavitating Flows". [conferencia], University of Florida, Florida.
- Somers, D. M. (2005) "Effects of Airfoil Thickness and Maximum Lift Coefficient on Roughness Sensitivity". Contrato DE-AC36-99-GO 10337. National Renewable Energy Laboratory, Pennsylvania State University.