



ESTUDIO DEL DESEMPEÑO HIDRODINÁMICO Y ENERGÉTICO DE UNA EMBARCACIÓN SOLAR DEMOSTRATIVA

David Gudiño Ayala y Juan-Jorge Hermsillo Villalobos

Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO),
Periférico Sur Manuel Gómez Morán # 8585, Tlaquepaque, Jalisco, CP 45604, México,
*Teléfono: 3669-3506, Fax: 3669-3505, dgudino@iteso.mx.

RESUMEN

Se presentan los resultados obtenidos del estudio de caracterización hidrodinámica y energética de una embarcación solar demostrativa con la que se ha participado en dos regatas de embarcaciones solares organizados por la ANES.

Mediante pruebas de remolcado, se midió la fuerza necesaria para mover la embarcación a diversas velocidades y, con ello, se calculó la potencia efectiva como función de la velocidad. Además, se comparó con el desempeño del casco de dos kayaks comerciales de dimensiones similares y con una carga similar.

Se encontró que la ecuación que relaciona la fuerza con la velocidad al cuadrado para la embarcación solar fue $F=0.47v^2$. El coeficiente total de arrastre (0.47) resultó menor que el de dos kayaks comerciales y, por tanto, se logró un diseño más eficiente.

El estudio de desempeño energético se llevó a cabo midiendo la potencia eléctrica consumida para mover la embarcación a diversas velocidades y comparándola contra la potencia efectiva, obtenida de las pruebas de remolcado mencionadas anteriormente. Con esta información se calculó la eficiencia promedio global. Estos datos son útiles para evaluar futuras modificaciones, para el desarrollo de nuevos proyectos y para poder estimar el radio de acción de la embarcación con una carga de baterías y con una radiación solar promedio.

ABSTRACT

The results obtained from the study of hydrodynamics and energy characterization of a demonstration solar boat are presented. This boat was used in two solar boats races organized by ANES.

By means of tow testing, the force needed to move the boat at various speeds was measured, and thus, the effective power as a function of the speed was calculated. In addition, these results were compared with the performance of two commercial kayaks of similar size and displacement.

It was found that the equation relating the force with velocity squared for the solar boat is $F = 0.47v^2$. The total drag coefficient (0.47) is lower for the solar boat than for the two commercial kayaks and therefore a more efficient design was achieved.

The energy performance study was conducted by measuring the electric power consumed to move the boat at various speeds and comparing it against the required power, obtained from towing tests. With this information the global average efficiency was calculated. These data are useful to evaluate future improvements, development of new projects and to estimate the range of the boat with a load of batteries and an average solar radiation.

Palabras claves: embarcación solar, caracterización hidrodinámica, caracterización energética.

INTRODUCCIÓN

Como parte de la XXXIII Semana Nacional de Energía Solar, celebrada en Guadalajara en 2009, la Asociación Nacional de Energía Solar convocó al 1^{er} Concurso ANES de Embarcaciones Impulsadas por Energía Solar a realizarse en el lago de Chapala. Un equipo de alumnos y profesores del ITESO decidió atender esa convocatoria, con tareas que iban desde integrar el equipo humano y conseguir los apoyos económicos necesarios, hasta el diseño y construcción de la embarcación. Tomando en cuenta que se trataba de la primera convocatoria y que en el ITESO no se tenía nada construido ni preparado, el tiempo resultaba extraordinariamente limitado. Aunque el equipo del ITESO resultó ganador, la limitación de tiempo del proyecto original no permitió hacer un estudio del desempeño de la embarcación solar. El presente trabajo contiene la primera parte del proyecto realizado posteriormente para estudiar el desempeño energético de la embarcación.

La convocatoria incluía dos regatas diferentes: una de velocidad y otra de resistencia. Desde los puntos de vista de diseño náutico y de diseño solar, optimizar para velocidad o para resistencia lleva a conclusiones diferentes. Al mismo tiempo, se especificaban diversos parámetros, unos con valores dados y otros como límites máximos o mínimos [ANES, 2009]. La geometría supuesta en estos parámetros no parecía atender a una lógica de embarcación solar, sino más bien de adaptar una embarcación ligera, tipo kayak o canoa, a este tipo de energía. Por eso, la embarcación que se muestra y estudia en este trabajo tiene ciertas características diferentes a las que podrían concebirse sin ese conjunto de especificaciones. Si los autores del presente trabajo hubiesen tenido menos restricciones específicas, habrían diseñado y construido una embarcación diferente a la presentada aquí, aun dentro del mismo alcance y dimensión general del proyecto. La convocatoria original mostraba una gran similitud con la de la competencia que se celebra anualmente en California, entre escuelas de nivel bachillerato [Solar Cup, 2015].

Con base en los principios conocidos para un buen diseño náutico para un casco que navega por desplazamiento [Larsson and Eliasson, 2000; Gutelle, 1984, pp. 97-107], y con el objeto de maximizar la velocidad del casco y la eficiencia global de la embarcación, se diseñó y construyó una embarcación específica, que los alumnos participantes denominaron "ITESOL". De acuerdo con la convocatoria, se diseñó una embarcación ligera, esbelta, monocasco y monoplaza, con las características que se mencionan en la sección de métodos y materiales.

Una vez construido el ITESOL, y habiendo mostrado sus cualidades en las regatas de velocidad y resistencia de 2009 y 2010, se vio la conveniencia de realizar el estudio que se reporta en el presente trabajo, con objeto de tener bases para mejoras posteriores y para realizar travesías de mayor alcance a las establecidas en las regatas.

La primera etapa del estudio consistió en comparar el diseño del casco del ITESOL con los de dos kayaks comerciales, para cuantificar la fuerza necesaria para moverlo como función de la velocidad, lo cual a su vez da base para cálculos de la potencia requerida como función de la velocidad.

La segunda etapa consistió en cuantificar la potencia eléctrica consumida a diferentes velocidades, con objeto de comparar este consumo con los resultados de la primera etapa, y con ello obtener un tipo de “eficiencia global”. Como la configuración geométrica de la hélice es determinante en la fuerza y potencia efectiva entregada, esta etapa se realizó con dos hélices diferentes.

MÉTODOS Y MATERIALES

El estudio sobre caracterización del comportamiento hidrodinámico y energético de la embarcación solar ITESOL se llevó a cabo en el lago de Chapala, en las inmediaciones de Ajijic, Jalisco, procurando encontrar condiciones meteorológicas y del lago, con el mínimo viento y oleaje posible.

Características del ITESOL

El ITESOL es una embarcación impulsada con energía solar que es colectada a través de módulos fotovoltaicos y almacenada en baterías para su posterior utilización. Los datos básicos considerados para el diseño y construcción de esta embarcación son: eslora 4590 mm, manga 720 mm, calado 110 mm y desplazamiento 192 kg a ese calado. Este desplazamiento de diseño incluye el peso del motor, las baterías, las fotoceldas, el tripulante (80 kg) y otros accesorios. Se dotó a la embarcación de dos cubiertas, de tipo portaaviones, con el objeto de dar acomodo a los paneles solares; una cubierta de proa para un panel solar de 135 W (sin marca) y otra de popa, con dos paneles de 65 W cada uno (marca *Kyocera*), con una separación entre ellos que permite ubicar el motor. Los paneles solares se conectaron de modo que se formó un sistema eléctrico con una tensión total de 24V, mismos que fueron conectados a un sistema de almacenamiento de energía eléctrica que consta de 2 baterías de 12 V conectadas en serie para que también el voltaje total sea de 24 V, y se puede alimentar al motor eléctrico de la misma capacidad.

Se utilizó un motor marino de corriente directa, de 24 V, de la marca Minn Kota, que se incorporó al centro del casco, en sentido transversal en una posición equivalente a un “dentro de borda” (sin embargo, este tipo de motores eléctricos operan sumergidos en el agua, por debajo del casco, por lo que propiamente no pueden denominarse así). El casco del ITESOL fue construido con resina epóxica reforzada con fibra de vidrio, con elementos estructurales de madera.

Caracterización hidrodinámica

La caracterización hidrodinámica fue equivalente a algunos de los estudios que se hacen en los tanques de pruebas para embarcaciones [Killing and Hunter, 1998, pp. 183-200], aunque realizado en un lago, cuidando la presencia de condiciones de calma extrema. Este estudio consistió en evaluar las propiedades del casco para compararlo con diversos kayaks cuyas características se encuentran publicadas [Ocean Kayaks, 2015]. Para la caracterización del comportamiento hidrodinámico del casco del ITESOL se realizó una serie de pruebas de remolcado a diferentes velocidades, donde se midió la fuerza de arrastre requerida para moverlo y la velocidad correspondiente. En estas pruebas el ITESOL se remolcó sin el motor instalado, para poder evaluar sólo el casco. Esta información también se utilizó para calcular la potencia efectiva que posteriormente se utilizó para realizar su evaluación energética.

La potencia requerida para mover cualquier cuerpo puede calcularse mediante el producto de la fuerza necesaria para moverlo, F , por la velocidad a la que se mueve, v , cuando ésta es constante. En el contexto de ingeniería naval, cuando se refiere a la potencia necesaria para remolcar la embarcación, se denomina “potencia efectiva”, P_E [Gerr, 2001, p.1]. Es decir,

$$P_E = Fv \quad (1)$$

En el caso del presente proyecto la fuerza, F , es una fuerza de arrastre compuesta por la fricción entre el casco y el agua, más la fuerza parásita que está implícita en la generación de olas. La magnitud de la suma de estas dos componentes puede describirse aproximadamente como proporcional al cuadrado de la velocidad [Gutelle, 1984, p.112], con el factor C , que llamaremos coeficiente total de arrastre, por no estar expresado por unidad de área, como es usual en mecánica de fluidos. Entonces,

$$F = Cv^2 \quad (2)$$

Y, por tanto,

$$P_E = Cv^3 \quad (3)$$

El objeto de esta caracterización consistió en determinar el coeficiente global de arrastre, C , para cada embarcación, a partir de datos de medición de la velocidad y la fuerza de remolque implicadas en diferentes condiciones, y despejando C de la ecuación (2). La medición de la fuerza se realizó con diversos dinamómetros de resorte (analógicos) y la velocidad con un GPS Garmin 76C, mismos que se observan en la figura 1 (a), y que están colocados sobre el pescante que se menciona en el diagrama de la derecha. Como remolcador se utilizó una embarcación motorizada de 4.2 m de eslora y con un motor a gasolina de 25 hp de potencia nominal. Esta contó con la adaptación del pescante mencionado, desde donde se tiraba del ITESOL mediante una cuerda, y que además sirvió para mantenerlo fuera de la zona de olas causadas por el propio remolcador, como se muestra en la figura 1 (b).

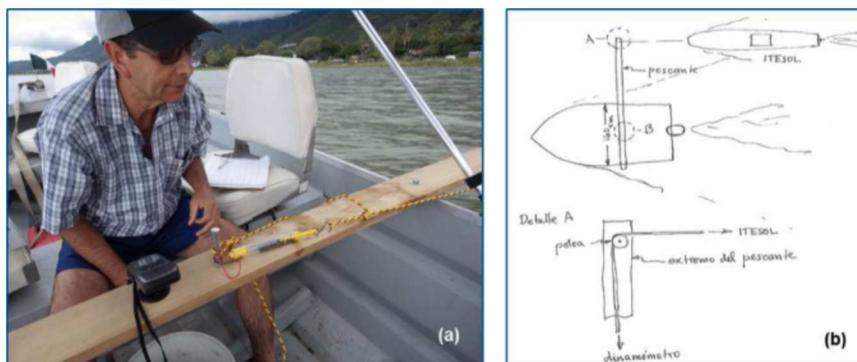


Figura 1. (a) Medición de velocidad y fuerza de arrastre; (b) Diagrama que muestra el arreglo usado para remolcar al ITESOL.

A la par de las pruebas mencionadas, y con el fin de que la comparación no fuera sólo respecto de datos publicados, sino de kayaks evaluados con la misma metodología, también se realizaron pruebas a dos kayaks que se comercializan en México: el modelo Tarpon 130T de la marca Wilderness Systems y el modelo Zest Two de la marca Ocean Kayak, similares al ITESOL, y cuyas características generales se muestran en la tabla 1. Se buscó que el desplazamiento de las embarcaciones, incluyendo la masa de los pilotos, fuera similar en todas para poder garantizar la validez de la comparación.

También se hicieron pruebas de arrastre del ITESOL, con y sin el motor instalado, para determinar el coeficiente de arrastre debido sólo al motor, que constituye una protuberancia por debajo del casco; y pruebas de remolcado a diferentes desplazamientos para estudiar el desempeño hidrodinámico en función de esta variable.

Tabla 1. Características generales de las embarcaciones utilizadas en la caracterización hidrodinámica.

Embarcación kayak	Cantidad de Tripulantes	Masa sin pilotos (kg)	Masa con pilotos (kg)	Eslora (m)	Manga (m)
ITESOL	1	117.3	181.3	4.59	0.72
Zest Two	2	39.2	189.2	5.00	0.78
Tarpon 130T	2	31.4	181.4	3.96	0.86

Caracterización energética

Las pruebas de caracterización del comportamiento energético del ITESOL se realizaron con su motor trabajando para desplazarse, como se muestra en la figura 2, en la que se pueden apreciar algunos de los elementos que lo conforman como las celdas solares, el timón y el soporte del motor por donde corren los cables que le alimentan la corriente eléctrica para su funcionamiento. La figura muestra también las condiciones meteorológicas y de oleaje, extraordinariamente calmadas, que se escogieron para estas evaluaciones.



Figura 2. ITESOL desplazándose de manera autónoma con su motor.

La eficiencia de un sistema como el de este trabajo está sujeta a ciertas propiedades de la hélice, que es el elemento que convierte la potencia entregada por el motor en un impulso de la embarcación. Tres propiedades muy importantes son particularmente el *área* de las

aspas, el *paso* y el *deslizamiento* [Gerr, 2001, pp. 46-65]. Las pruebas del ITESOL se realizaron con dos hélices con propiedades diferentes, y consistieron en hacer mediciones del potencial de las baterías y la corriente consumida por el motor del ITESOL para 5 diferentes condiciones de operación, para luego determinar la potencia consumida en esas cinco condiciones (cinco velocidades). El cociente entre la potencia efectiva, P_E , y la potencia eléctrica consumida, P_C , es la eficiencia global del ITESOL para las diferentes velocidades.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización hidrodinámica del ITESOL y kayaks

Los resultados del estudio del comportamiento hidrodinámico del ITESOL, en conjunto con los de los kayaks estudiados, se muestran en la figura 3. Se grafica la velocidad al cuadrado contra la fuerza de arrastre requerida para mover cada embarcación, de acuerdo con lo expresado en la ecuación (2). También se muestran en la misma figura 3 las ecuaciones de ajuste con sus respectivos coeficientes de correlación (R^2).

Todas las embarcaciones tuvieron desplazamientos similares (ver “masa con pilotos” en la tabla 1) y operaron en condiciones similares de velocidad de viento nula. Los resultados muestran que el ITESOL, sin el motor instalado, es el que tiene el mejor comportamiento dado que su ecuación muestra el menor coeficiente total de arrastre (0.47), lo que significa que es el que requiere la menor fuerza para moverlo a diferentes velocidades. También se observa que el kayak Tarpon 130T es el que tiene el mayor coeficiente total de arrastre (0.63), mientras que el Zest Two se asemeja más al ITESOL (0.51); lo que sugiere que el diseño del casco del ITESOL fue bien hecho y cumple con las características necesarias para oponer una menor resistencia al movimiento en comparación con los productos comerciales estudiados.

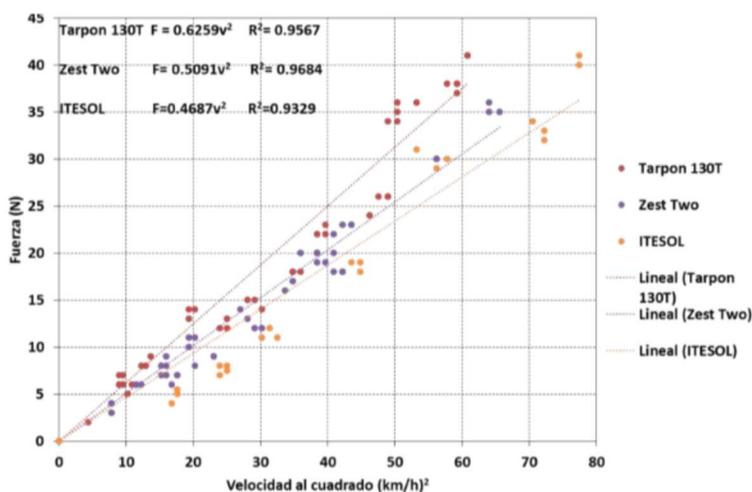


Figura 3. Fuerza de arrastre *versus* velocidad al cuadrado, para las embarcaciones estudiadas.

Los resultados de las pruebas de arrastre, con y sin el motor instalado, para determinar el coeficiente de arrastre debido sólo al motor; y de las pruebas de remolcado con diferentes masas para estudiar cómo éstas afectan su desempeño hidrodinámico, se muestran en las figuras 4 y 5 respectivamente.

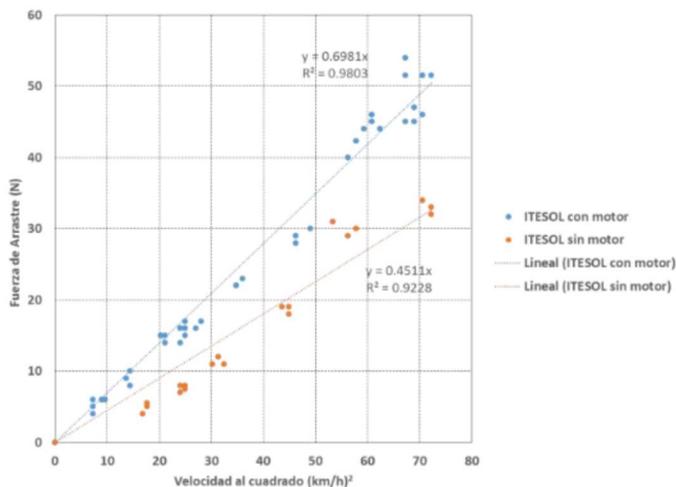


Figura 4. Curvas de arrastre del ITESOL, con y sin su motor instalado.

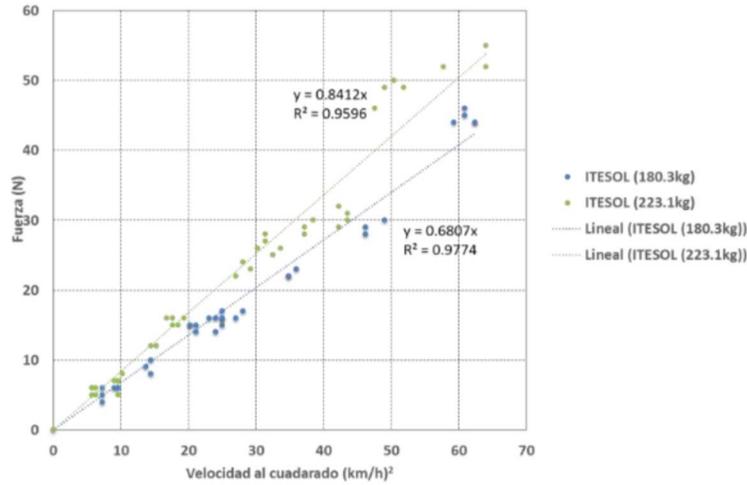


Figura 5. Curvas de arrastre del ITESOL a dos desplazamientos.

Analizando las ecuaciones de ajuste de las curvas de fuerza contra velocidad al cuadrado de la figura 4, se puede conocer el coeficiente total de arrastre debido al motor (C_m) cuando el arrastre se hizo con él instalado. Lo anterior pudo ser inferido teniendo en cuenta que la fuerza total (F_{total}) por arrastre es la fuerza requerida para mover al ITESOL cuando este tiene su motor instalado, que puede considerarse como la suma de la fuerza necesaria para mover el casco (F_{casco}) más la fuerza para mover el motor (F_{motor}), que se expresa en la siguiente ecuación:

$$F_{total} = F_{casco} + F_{motor} \quad (4)$$

Sustituyendo cada fuerza con su respectiva ecuación (ver figura 4), se obtiene la siguiente ecuación:

$$C_{total}v^2 = C_{casco}v^2 + C_{motor}v^2 \quad 0.70v^2 = 0.45v^2 + C_{motor}v^2 \quad (5)$$

Dividiendo entre v^2 se puede despejar el valor del coeficiente de arrastre para el motor:

$$C_{motor} = C_{total} - C_{casco} \quad C_{motor} = 0.70 - 0.45 = 0.25 \quad (6)$$

El valor del coeficiente total de arrastre en este proyecto es considerable ($C_{motor} = 0.25$), pues corresponde al 35% del coeficiente total de arrastre (0.70) de la embarcación con motor, lo que se puede interpretar como el porcentaje de frenado debido al motor del ITESOL, que sobresale por debajo del casco y que es un problema característico de este tipo de motores eléctricos marinos.

De las ecuaciones de ajuste de la figura 5, cuando el ITESOL fue remolcado a diferentes desplazamientos (181.3kg y 223.1kg), se observa que a mayor desplazamiento se obtuvo un coeficiente total de arrastre (0.84 para el desplazamiento mayor y 0.68 para el menor). El porcentaje de incremento del desplazamiento fue de 23.1% y prácticamente coincide con el incremento del coeficiente total de arrastre, que fue del 23.6%. Haría falta un estudio más amplio, pero la relación entre estos dos factores (desplazamiento y coeficiente total de arrastre) parece directamente proporcional (esta relación depende de la geometría del casco). El conocimiento de este dato permite estimar los resultados que podrían obtenerse con baterías más ligeras (más pequeñas o de otro tipo) y con diferentes fotoceldas.

En general se observa que los coeficientes de correlación de todas las curvas de ajuste en esta parte de la caracterización del comportamiento hidrodinámico del ITESOL y demás kayaks son muy buenos (entre 0.9228 y 0.9803), lo que significa que la relación entre los parámetros estudiados es buena y que los fenómenos estudiados quedan bien representados por las ecuaciones obtenidas.

Caracterización energética del ITESOL

Los resultados de las pruebas de caracterización del comportamiento energético del ITESOL se presentan en la figura 6, donde se muestran curvas de velocidad al cubo contra la potencia consumida, P_C , que se define como la potencia total obtenida de las baterías, para mover la embarcación. Este estudio se hizo a 5 velocidades y con dos hélices diferentes. Se observa que la hélice 2 permite lograr mayores velocidades (de hasta 9.5 km/h), pero implica un mayor consumo, lo que hace que sea menos eficiente, como se muestra más adelante.

En la misma figura 6 también se incluye una curva de velocidad al cubo contra la potencia efectiva, P_E , con el ITESOL remolcado con su motor instalado, pero sin hélice. En estas gráficas de potencia se usa la velocidad al cubo, de acuerdo con la expresión de la ecuación (3). En todas estas pruebas de comportamiento energético se usó el menor desplazamiento del ITESOL (181.3 kg) reportado en la tabla 1.

Se define la eficiencia global como el cociente entre la potencia efectiva, P_E , y la potencia consumida, P_C :

$$\eta = \frac{P_E}{P_C} \quad (7)$$

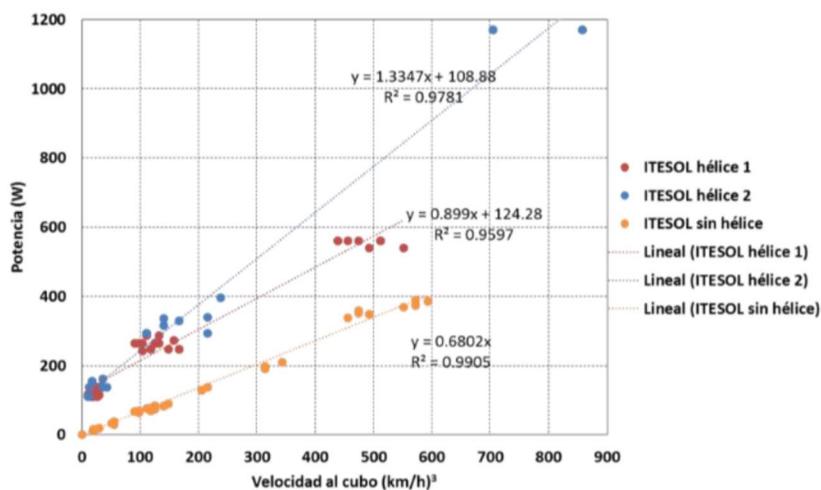


Figura 6. Curvas de comparación de potencias del ITESOL, con movimiento autónomo y remolcado.

A partir de las ecuaciones de ajuste generadas en la figura 6 y usando la ecuación (7), se realizaron los cálculos de la eficiencia para las dos hélices estudiadas a diferentes velocidades. Estos resultados se muestran en la tabla 2. Los cálculos se hicieron hasta una velocidad de 9 km/h, que aproximadamente cubre todo el intervalo de velocidades desarrolladas por el ITESOL con sus diferentes hélices.

Tabla 2. Cálculo de eficiencias del ITESOL, para las dos hélices estudiadas.

Velocidad ITESOL (km/h)	Potencia consumida, hélice 1 (W)	Potencia consumida, hélice 2 (W)	Potencia efectiva, sin hélice (W)	Eficiencia ITESOL, hélice 1 (%)	Eficiencia ITESOL, hélice 2 (%)
1	125.2	110.2	0.7	0.5	0.6
2	131.5	119.6	5.4	4.1	4.6
3	148.6	144.9	18.4	12.4	12.7
4	181.8	194.3	43.5	23.9	22.4
5	236.7	275.7	85.0	35.9	30.8
6	318.5	397.2	146.9	46.1	37.0
7	432.6	566.7	233.3	53.9	41.2
8	584.6	792.2	348.3	59.6	44.0
9	779.7	1081.9	495.9	63.6	45.8

Estos mismos datos de eficiencia del ITESOL se encuentran graficados contra la velocidad en la figura 7, donde se puede apreciar mejor la diferencia obtenida entre las dos hélices utilizadas.

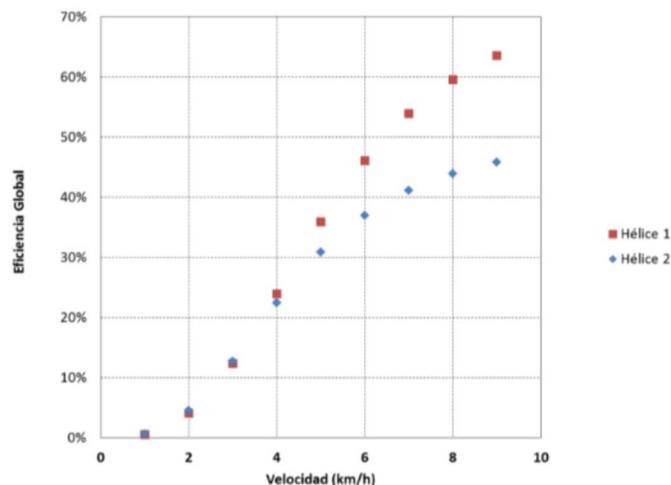


Figura 7. Eficiencia global del ITESOL en función de la velocidad, para las dos hélices estudiadas.

La hélice 2 mostró capacidad para lograr mayor velocidad, pero la eficiencia global es menor que con la hélice 1. A velocidades que pueden considerarse como de crucero, alrededor de 5 km/h, (para el área de fotoceldas que se tiene), la eficiencia global con las hélices estudiadas está alrededor del 31 y el 36%. A velocidades máximas, alrededor de 9 km/h, estas eficiencias suben a 46 y 64%. Hace falta un estudio más detallado de las hélices, pero la figura 7 permite intuir que se puede diseñar una hélice mucho más eficiente para operar a la velocidad de crucero. Los balances energéticos (no mostrados en este trabajo) permiten establecer que, con el área de fotoceldas disponible, el ITESOL no puede mantener su velocidad máxima durante un trayecto largo, por lo que la alta eficiencia global mostrada en la región derecha de la figura 7 no puede usarse para cálculos energéticos de viajes largos.

CONCLUSIONES

El desempeño hidrodinámico del ITESOL fue el mejor de las embarcaciones estudiadas. Su coeficiente total de arrastre es menor que el de los kayaks comerciales, lo que significa que requiere de una menor fuerza para su movimiento, en condiciones similares. Este coeficiente es clave para una embarcación deportiva; en una embarcación de trabajo otros parámetros son más importantes.

El coeficiente total de arrastre debido al motor de tipo marino es considerable. Tiene un valor de 0.25, que corresponde a un 35% del coeficiente total de arrastre de la embarcación (0.70). Esto da pie para considerar otro tipo de motores y transmisiones en proyectos futuros de embarcaciones solares.

El coeficiente total de arrastre de la embarcación es directamente proporcional al desplazamiento, en los alrededores de los valores observados. Este dato permite calcular con precisión el efecto de usar elementos más ligeros (baterías y fotoceldas), más allá de la intuición de que mientras más ligero mejor.

El diseño de la hélice es esencial para el buen desempeño de una embarcación. La eficiencia global obtenida a velocidades máximas (9 km/h) es consistente con lo reportado [Gerr, 2001], pero para la velocidad de crucero (5 km/h), hay oportunidad de mejora en el diseño de la hélice.

REFERENCIAS

- ANES, 2009. 1er Concurso ANES de Embarcaciones Impulsadas por Energía Solar (bases para el concurso).
- Gerr, Dave, 2001. *Propeller Handbook*. International Marine. Maine.
- Gutelle, Pierre, 1984. *The Design of Sailing Yachts*. International Marine Publishing Company. Maine.
- Killing, Steve and Hunter, Douglas, 1998. *Yacht Design Explained*. W.W. Norton & Company, New York. London.
- Larsson and Eliasson, 2000. *Principles of Yacht Design*, 2nd Edition. Adlard Coles Nautical, London.
- Ocean Kayaks, 2015 <http://www.oneoceankayaks.com/kayakpro/kayakgrid.htm>, consultado el 12/jun/15.
- Solar Cup, 2015. http://www.mwdh2o.com/mwdh2o/pages/education/solar_cup/solar_cup_01.html, consultado el 12/jun/15.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los alumnos (algunos ya exalumnos): Juan Bosco Lancaster-Jones Solís, César Emilio Salgado de Anda, Alejandro Águila Sáinz, Adriel Conde Almada, José David Calderón Peña y Elizabeth Bravo Bribiesca, por su participación en el acabado y toma de datos de caracterización del ITESOL.

También se agradece al Técnico Russell Segovia Ley por su valiosa colaboración durante todo el desarrollo y acabado del ITESOL, así como al Lic. Carlos Villalobos Zalapa por el préstamo de la lancha remolcadora con su motor, y al Club Deportivo La Floresta, de Ajijic, Jal., por la infraestructura de acceso al lago de Chapala, en horarios y condiciones especiales.