

INFLUENCIA DEL CAMPO DE ESTELA EN LA EFICIENCIA DE LAS HÉLICES PENETRANTES DE SUPERFICIE

Borrego Rodríguez, L.¹, Prieto Fernández, A. P.², Marzán Tachel, Z.³, Pérez Amador, G. A.⁴

^{1, 2, 3, 4} Centro de Investigación y Desarrollo Naval

¹e-mail: cid5@reduim.cu

RESUMEN

La demanda de vehículos marinos con sistemas de propulsión-gobierno que garanticen regímenes de alta velocidad, responde a las necesidades de los sectores comercial y naval. Los métodos de diseño y técnicas de modelación desarrollados, permiten el análisis del casco, propulsor y medios de gobierno de manera independiente. En el presente trabajo, se analizan los resultados de la investigación sobre la interacción del sistema propulsión-gobierno y el casco. Además se aborda la influencia del campo de estela generado por un casco de planeo sobre un propulsor que trabaja en un medio bifásico aire-agua. El estudio de este tipo de interacción, permite optimizar el diseño hidrodinámico de las embarcaciones de alta velocidad.

Palabras claves: propulsión, planeo, estela

SUMMARY

The demand for marine vehicles with propulsion-steering systems that guarantee high-speed regimes, responds to the needs of the commercial and naval sectors. The design methods and modeling techniques allow the analysis of the hull, propeller and steering means independently. In this work, the investigation results on the propulsion-steering system and the hull interaction are analyzed. Also the influence of the wake field generated by a planing hull on a propeller that works in two-phase air-water medium is addressed. The study of this type interaction makes it possible to optimize the hydrodynamic design of high-speed vessels.

Key words: propulsion, planing, wake

1- INTRODUCCIÓN

La tendencia internacional, en los últimos años, ha sido el desarrollo de vehículos marinos de alta velocidad capaces de alcanzar y superar los 50 nudos. Se destacan dos arquitecturas: los cascos con formas multiescalón con un complejo propulsor-gobierno Andersen con hélices penetrantes de superficie y los cascos monohedrom con propulsores a chorro de agua. Para diseñar cualquier tipo de vehículo marino de alta velocidad [1], todo arquitecto naval debe tener en cuenta las cinco-S (*five-S*): estable (*stable*), abordable (*shipment*), resistente (*strength*), sigilo (*stealth*) y velocidad (*speed*).

Se han realizado múltiples estudios a nivel internacional sobre los vehículos marinos de alta velocidad. En cada uno de ellos se detallan los múltiples factores que definen la alta velocidad que logran alcanzar estas embarcaciones. Un sistema de propulsión con SPPs (hélices penetrantes de superficies) integrado a un casco de planeo multiescalón, son los dos aspectos fundamentales para lograr alcanzar altas velocidades.

2- MATERIALES Y MÉTODOS

Sistemas de propulsión. Antecedentes

El análisis de las características hidrodinámicas, constituye el punto de partida para el estudio de las embarcaciones de alta velocidad. En el procesamiento de los valores obtenidos de la cualidad inversa (e), se obtiene las ecuaciones de regresión en forma de polinomios, empleando el número de Froude por desplazamiento (F_{rd}), que permite seleccionar cual era el modelo de casco que mejor se adapta a las características de la región de navegación.

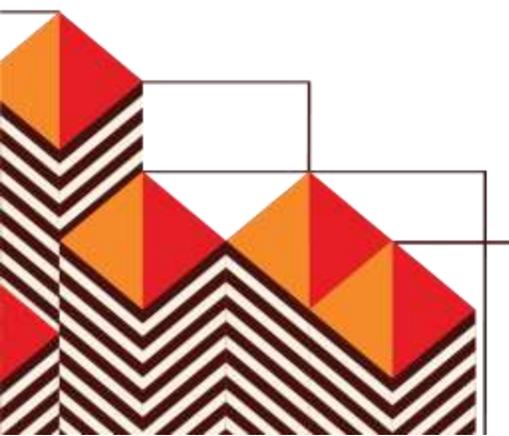
Alcanzar y mantener el régimen de planeo, depende de la posición de trimado dinámico (Ψ). El trimado dinámico está sujeto al equilibrio de las fuerzas de estáticas y dinámicas que actúan sobre la embarcación, y de acuerdo con su comportamiento pueden tener incidencia negativa en las características hidrodinámicas y afectación en el alcance altas velocidades. El trimado dinámico tiene su incidencia principal en la eficiencia de la marcha y ha sido objeto de estudio por varios investigadores, destacándose los trabajadores de Millar G.H(1911), Sottorf W. (1929-

1933), Wagner H. (1925-1932), Sedov L.I.(1933-1950), Perelmutr A.S(1942-1944), Locke F.W.S (1948), Savitsky D (1949-1976), Clement E.P(1957-1967 y Bunkov M.M(1958-1975).

Durante la navegación de alta velocidad, en condiciones de mar atípicas, tiene notable influencia sobre las embarcaciones el tipo de oleaje, régimen de marcha y estado de carga [4]. Los estudios teóricos y experimentales sobre el comportamiento en la mar de un buque tienen entre sus mayores exponentes los trabajos de Krilov A.N. (1898), Jaskins M.D. (1946-1953), Savitsky D. (1949-1976), Pierson W.Jr. y St. Denis M. (1950-1982), Korvin-Kroukovsky B, V (1961), Newman J.N. (1961-1980), Semionov-Tian-Chansky V.V. (1965), Bales N.K., Walden D.A. y Mc. Creight W.R. (1980-1981), López Delgado J.R. y Áviles A. (1983-1985), Brown D.K. (1986-1995) y Alvariño Castro R. (1988-1997).

El Dr. Hassan Ghassemi de la Universidad Tecnológica de Amir Kabir de Teherán (Irán), ha sido uno de los científicos que más aportes ha realizado al estudio de las formas de casco y sistemas de propulsión para vehículos marinos de alta velocidad.

La literatura referente a las características hidrodinámicas de las SPPs es escasa [1]. Varios científicos han trabajado el tema de las SPPs como es el caso de Ferrando M (1997-2006), Pustshny A.V. (*September* 2009), Nozawa y Takayama (*March* 2002) y Young y Kinnas (2003). A pesar de los estudios realizados, no existe un diseño hidrodinámico para los sistemas SPPs [5]. Es característico el empleo de dos tipos de hélices, de tres y seis palas respectivamente (ver figura 1).



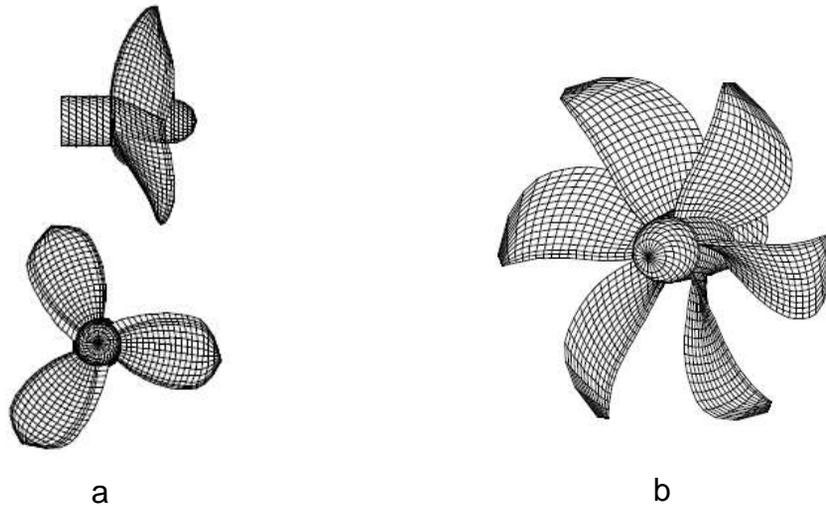


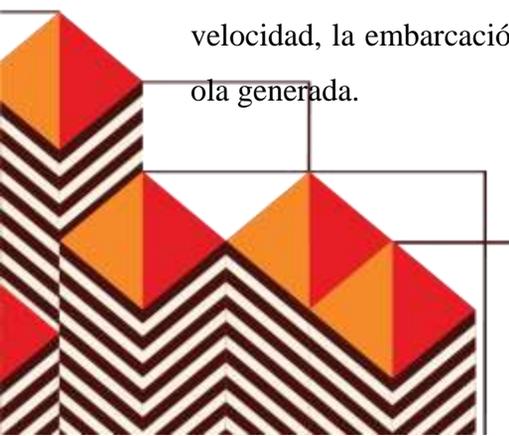
Figura 1. Hélice penetrante de superficie a) SPP-1 de tres palas, b) SPP-2 de seis palas. Hassan Ghassemi (2009).

Cascos de planeo. Antecedentes.

Los vehículos marinos de alta velocidad logran alcanzar el régimen de planeo al surgir la fuerza de sustentación (N) como una de las componentes de la Resistencia total al avance (R_t).

La simulación computacional junto a un método práctico, es la solución que encuentra Ghassemi (2007), para la determinación de la resistencia por la presión inducida en el casco, la resistencia de fricción y la resistencia de spray [4]. En los trabajos de investigación científica del Dr. Ghassemi, presenta el resultado de los estudios de cuatro formas de casco de la Serie 62 Modelo 4666, óptimos para condiciones de planeo.

Uno de los aspectos más importantes en el diseño de los vehículos marinos de alta velocidad, es el incremento de la velocidad y la carga útil de la embarcación. El incremento de la demanda de estos vehículos ha guiado el desarrollo de varias formas de cascos. Con el incremento de la velocidad, la embarcación requiere de una mayor potencia efectiva para vencer la resistencia de ola generada.



La generación de la fuerza de sustentación que contribuye a la reducción de la componente de resistencia de ola comparada con un casco convencional [4], es uno de los resultados significativos de los cascos de planeo (ver figura 2).

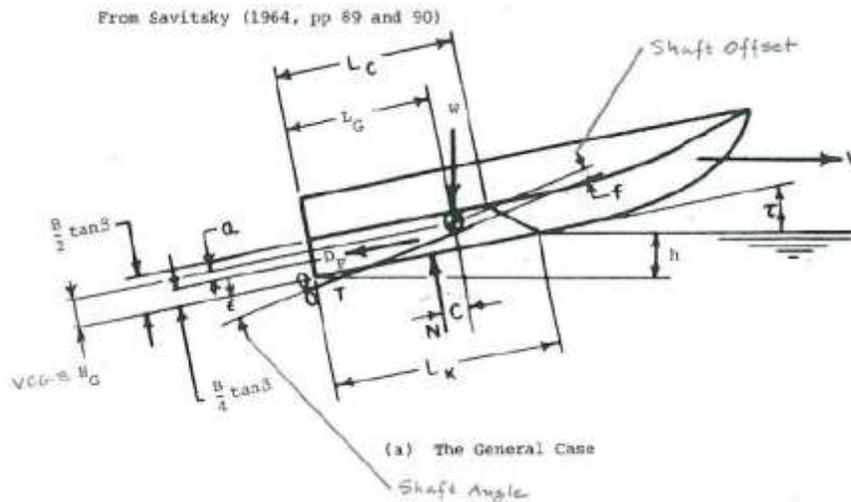


Figura 2. Gráfico de fuerzas hidrodinámicas durante la navegación de alta velocidad.

D. Savitsky (1964).

3- RESULTADOS

Características de los sistemas de propulsión

Las hélices penetrantes de superficies son más eficientes para vehículos marinos de alta velocidad debido a que:

- Disminuye la demanda de potencia por la reducción de apéndices.
- El dimensionamiento de las hélices no están limitadas por la clara existente entre la pala de esta y el fondo el casco o por el calado de la embarcación.
- Reduce la fricción y erosión en la superficie de la pala, la cavitación es remplazada por la ventilación.
- Genera la fuerza de sustentación obtenida a partir del trimado óptimo para el planeo.



Sin embargo, debe existir un incremento significativo de la eficiencia de empuje, que constituye objeto de análisis durante el incremento de la velocidad. En esta etapa de transición, la embarcación debe elevarse sobre la superficie, hasta alcanzar el régimen de planeo.

Resumen de estudios [2], muestran cuáles son los sistemas de propulsión para embarcaciones de alta velocidad (ver Tabla 1).

Tabla 1. Limitaciones de tres tipos de sistemas de propulsión. Hassan Ghassemi (2009).

Tipo de Propulsor	Propulsor sumergido	Propulsor en superficie	Water jet
Desplazamiento (Ton)	$0 \leq \Delta \leq 1000$ ~ más	$0 \leq \Delta \leq 40$ Para embarcaciones ligeras	$0 \leq \Delta \leq 1000$ Para embarcaciones desplazantes r
Velocidad (Nudos)	$V_s \leq 30$	$50 \leq V_s \leq 100$	$25 \leq V_s \leq 80$

Los vehículos marinos de alta velocidad alcanzan el régimen de planeo para números de Froude volumétricos superior a 3.5 (ver figura 3).

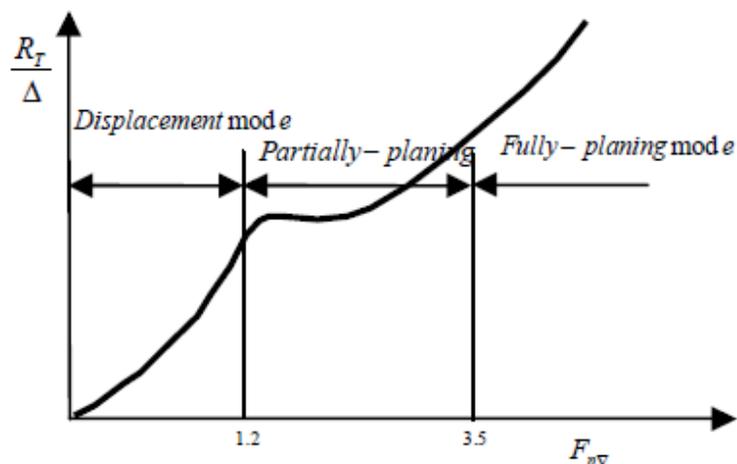
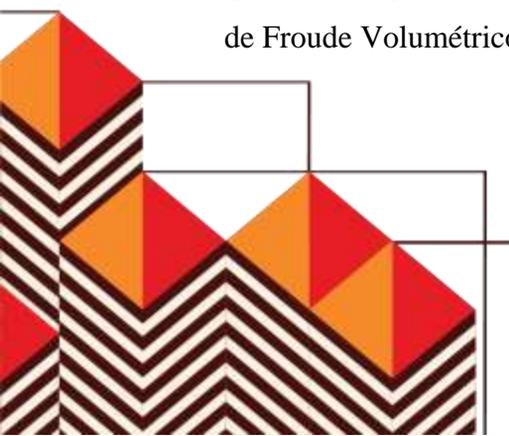


Figura 3. Comportamiento de la Resistencia total/Desplazamiento contra el Número de Froude Volumétrico para embarcaciones de planeo. Hassan Ghassemi (2009).



En el cálculo para hélice convencional [10], depende de las siguientes variables:

$$K_{inmersión\ completa} = f(Z, P/D, EAR, J, F_n, R_n, \sigma, \psi) \quad (1)$$

Donde:

Z – número de palas

P/D – relación paso-diámetro

EAR – relación de disco

J – avance relativo

F_n – número de Froude

R_n – número de Reynold

σ – número de cavitación

ψ – inclinación de la línea de eje

Sin embargo, para hélices que operan en la interface aire-agua, deben ser añadidos dos parámetros: el coeficiente de Inmersión I_T y el número de Weber W_n .

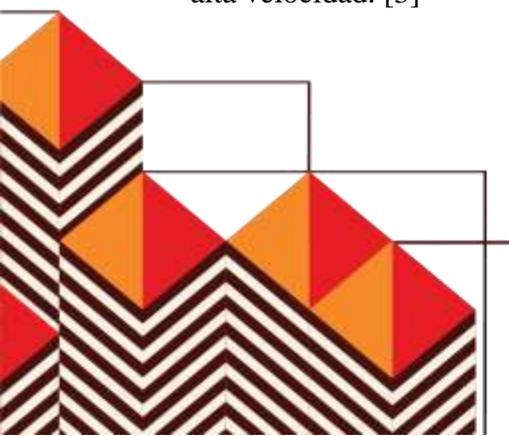
$$K_{inmersión\ parcial} = f(Z, P/D, EAR, J, F_n, R_n, \sigma, \psi, I_T, W_n) \quad (2)$$

El coeficiente de inmersión es uno de los parámetros más efectivos en el diseño de las SPPs.

En su trabajo destaca la influencia que tiene el avance relativo ($J\psi$) sobre el avance relativo crítico ($J\psi_{CR}$) y la influencia de las superficies libres sobre la popa al variar el número de palas.

Las características hidrodinámicas de la SPP presentan un comportamiento muy favorable para la navegación de alta velocidad cuando trabaja parcialmente sumergida. El efecto del número de Weber es muy importante para determinar y estudiar los modos de ventilación, transición y no ventilación de la hélice.

Los métodos de predicción y diseño aún se encuentran en desarrollo y sobre la base de estos se cometen muchos errores que se ven reflejado durante la explotación de los vehículos marinos de alta velocidad. [3]



Se han realizado varios estudios sobre la ventilación forzada (ver figura 4) en la región de popa con el objetivo de aumentar la eficiencia de las hélices penetrantes de superficie según Ghassemi (2015). Entre los autores más destacados los investigadores Shiba (1953), Wang (1977), Olofsson (1996), Rose y Kruppa (1991), Uhlman (1987), Young y Kinnas (2002), Ghassemi (2009), Vinayan y Kinnas (2008, 2009) y Himeji (2013).

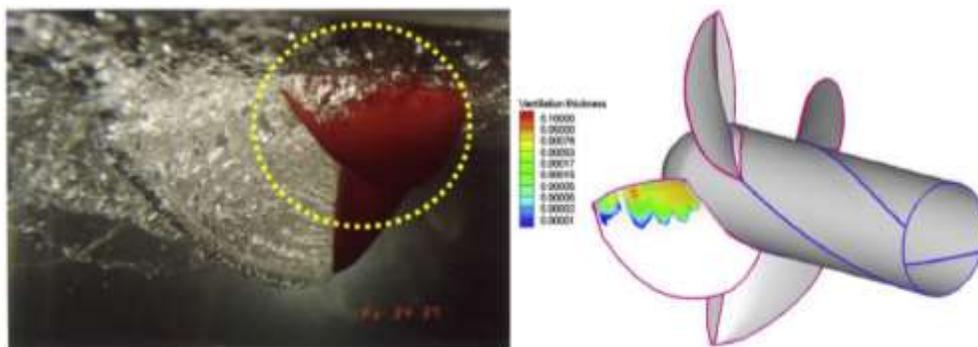


Figura 4. Observación y simulación del patrón de ventilación forzada $J=1.2$, $F_n=2$.
Hassan Ghassemi (2015).

Alrededor de este tema, Ghassemi (2015) plantea que no existe un método que permita realizar la predicción de la eficiencia propulsiva a través de los métodos numéricos valiéndose del método de elemento de frontera (*BEM*, por sus siglas en inglés).

Mediante la simulación a través del método de elementos de fronteras, se muestra un camino hacia la predicción de la eficiencia propulsiva, pero que aún continúa con áreas del conocimiento sin explorar porque se analiza de manera independiente el propulsor.

3.2 Características de los cascos de planeo.

Savitsky (2007) ha investigado las características del área mojada del fondo y el área de spray de las embarcaciones de planeo (ver figura 5), especificando los detalles de esta última para la determinación de resistencia al avance por spray.



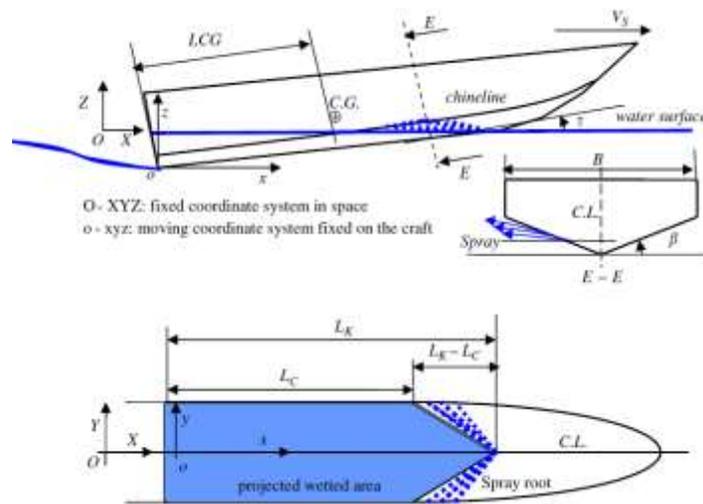


Figura 5. Área mojada y de spray durante la navegación de alta velocidad. Hassan Ghassemi (2007).

La fuerza más importante que actúa en la embarcación de planeo es la sumatoria de las fuerzas hidrodinámicas generadas por las presiones hidrodinámicas producidas en el fondo de la embarcación. Esta fuerza se divide en la resistencia inducida al casco y la fuerza de sustentación [12]. La resistencia total y la potencia efectiva de las embarcaciones de planeo se determinan mediante las siguientes fórmulas:

$$R_T = R_F + R_i + R_{spray} \quad (3)$$

Donde:

R_T – resistencia total

R_F – resistencia de fricción

R_i – resistencia inducida al casco

R_{spray} – resistencia de spray

$$P_E = R_T * V_S \quad (4)$$

Donde:

P_E – potencia efectiva

V_S – velocidad del buque

Un modelo de casco de planeo cóncavo puede generar una mayor fuerza de sustentación durante la navegación de alta velocidad. En esta condición de planeo, la fuerza de sustentación puede llegar a representar, respecto al peso de la embarcación, cerca del 65% y 85% para números de Froude volumétrico de 3.35 y 5 respectivamente [7].

4- DISCUSIÓN

En la literatura consultada, se ha estudiado e identificado que cada uno de los documentos científicos, analiza el portador naval y el sistema de propulsión de manera independiente.

En nuestro país se ha logrado obtener un casco multiescalón (ver figura 6) con altas prestaciones para obtener velocidades superiores a los 50 nudos. No se ha analizado el efecto de este sobre un sistema de propulsión que permite alcanzar el régimen de planeo.

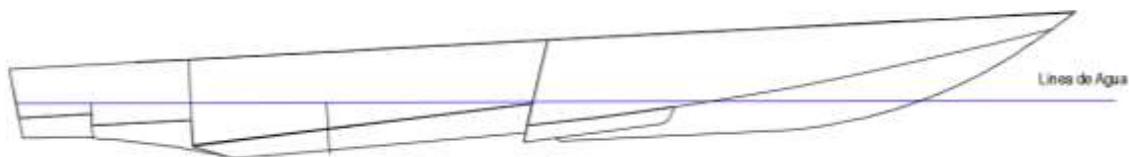


Figura 6. Casco multiescalón. Cuba 2015

Teniendo en cuenta el comportamiento del casco durante el régimen de planeo, este genera un movimiento ordenado del flujo alrededor del plano diametral. Cercano al extremo de las bandas, el flujo se torna caótico y desordenado, caracterizados por los coeficientes de estela ω y de succión i_t . Este movimiento del flujo que no es uniforme, llega al disco de la hélice. Sin embargo, este comportamiento no se analiza integrado al sistema de propulsión (interacción casco-hélice).

¿Cómo desarrollar y obtener un flujo de cálculo que permita obtener las características hidrodinámicas del casco y la hélice para los vehículos marinos de alta velocidad y con ello el aumento de la eficiencia propulsiva?

Para el diseño de hélices penetrantes de superficie teniendo en cuenta la influencia del campo de estela, se propone el siguiente diagrama de flujo de cálculo (ver figura 7).



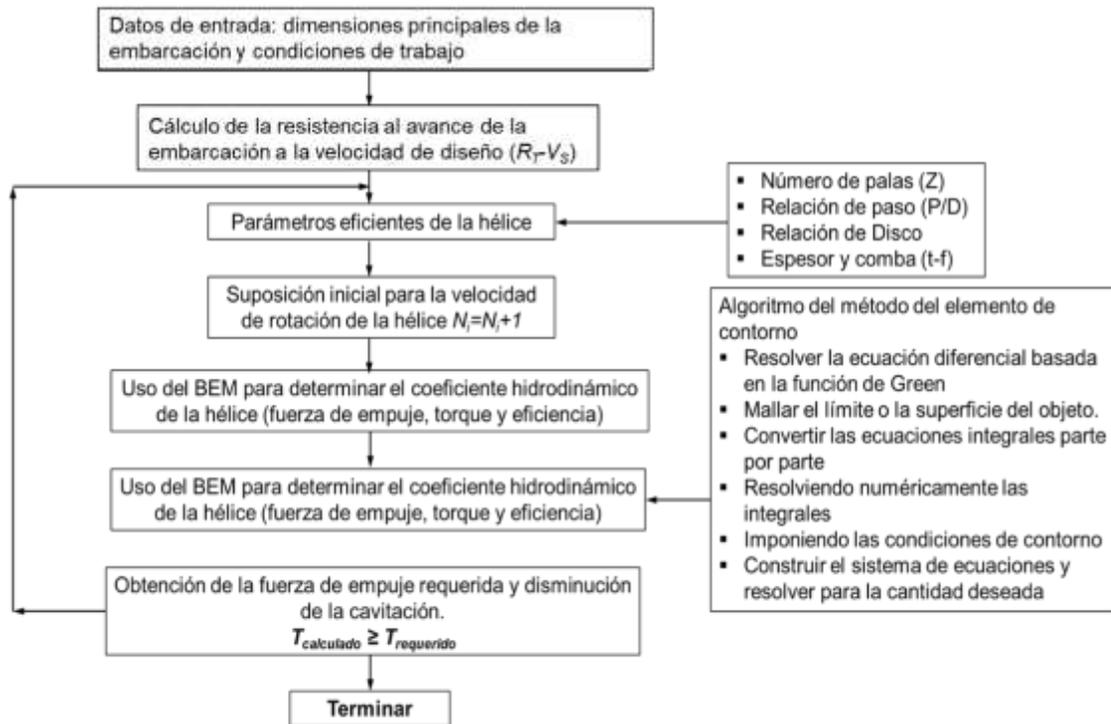


Figura 7. Diagrama de flujo de cálculo para el diseño de hélices penetrantes de superficie.

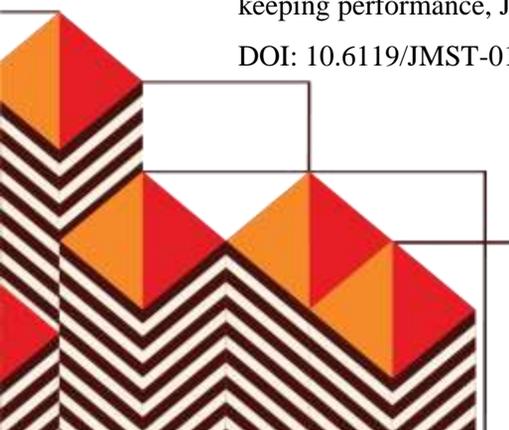
5- CONCLUSIONES

- Los trabajos científicos en Cuba se han realizado solamente sobre portadores navales monohedrom.
- Se han realizado notables estudios científicos de los sistemas de propulsión y de los cascos de planeo de forma independiente cada uno de ellos.
- No existe un método combinado que permita obtener las características hidrodinámicas del sistema de propulsión y casco de planeo de forma integrada.
- Se propone un diagrama de flujo de cálculo para el diseño de hélices penetrantes de superficie.



6- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Hassan Ghassemi, Roya Shademani, Abdollah Ardeshir (2009): Hydrodynamic characteristics of the surface-piercing propeller for the planing craft, Proceedings of the ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE 2009
2. Ghassemi, Mahmoud Ghiasi (2009): Hydrodynamic Characteristics of the Surface Piercing Propeller (SPP) by Using Special Practical and Numerical Approach. Department of Marine Technology, Amirkabir University of Technology, Hafez Ave., 15875-4413, Theran, Iran. gasemi@aut.ac.ir
3. Ehsan Yari, Hassan Ghassemi (2015): Hydrodynamic analysis of the surface-piercing propeller in unsteady open water condition using boundary element method, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 8 (2016) 22-37.
4. Hassan Ghassemi, Mahmoud Ghiasi (2007): A combined method for the hydrodynamic characteristics of planing crafts, Ocean Engineering 35 (2008) 310-32, Vol. 35 Nos. 3-4, March 2008, ISSN 0029-8018. Ocean Engineering an International Journal of Research and Development.
5. Oscar Gil López: Perspectiva General de las embarcaciones híbridas de alta velocidad en el sector comercial y sus fundamentos hidrodinámicos. Facultat Náutica de Barcelona.
6. Hassan Ghassemi, Parviz Ghadimi (2011): Hydrodynamic Efficiency Improvement of the High Skew Propeller for the Underwater Vehicle Under Surface and Submerged Conditions. Journal Ocean University of China (Oceanic and Coastal Sea Research) ISSN 1672-5182, 2011 10 (4): 314-324.
7. Ehsan Yari, Hassan Ghassemi (2015): The unsteady hydrodynamic characteristics of partial submerged propeller via a RANS solver, Journal of Marine Engineering & Technology, 2015. Vol. 14, No. 3, 111-123.
8. Hadi Nourghasemi, Mohammad Bakhtiari, Hassan Ghassemi (2017): Numerical study of the step forward swept angle effects on the hydrodynamic performance of planing hull, Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin. 2017, 51 (123), 35-42. ISSN 1733-8670 (Printed), ISSN 2392-0378 (Online), DOI: 10.17402/228.
9. Mohsen Khosravi Babadi, Hassan Ghassemi (2013): Effect of hull form coefficients on the vessel sea-keeping performance, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 21, No. 5, pp. 594-604 (2013). DOI: 10.6119/JMST-013-0117-2.





10. Ghang-Sup Lee, Young-Dal Choi, Byoung-Kwon Ahn, Myoung-Sup Shin, Hyun-Gil Jang (2010):
Performance optimization of marine propellers, International Journal of Naval Architecture and Ocean
Engineering (2010) 2:211-216

