



# POSIBILIDADES EN EL TRANSPORTE MARITIMO DE ALTA VELOCIDAD

Julio Vergara Aimone\*



## Introducción.

*H*asta mediados del siglo 20, prácticamente todo el transporte intercontinental era realizado por mar. A

partir de ese momento, la incipiente aviación comercial comenzó a desarrollar su tecnología al punto de obtener casi todo el transporte de pasajeros y disputar el transporte de aquellas cargas de mayor valor. Esta transición se logró como resultado de una agresiva introducción de nuevos diseños aerodinámicos de alas y estructuras de sustentación, nuevos materiales estructurales y mecanismos para presurizar las cabinas, permitiendo de este modo buscar alturas en el espacio donde la resistencia al avance fuese mínima y a la vez aprovechar los nuevos propulsores, en particular el motor de reacción de Whittle y von Ohain, en su versión turboventilador.

La industria marítima, más conservadora, no asumió el reto de la aviación, con lo cual quedó relegada al transporte de productos indiferenciados de alto volumen, equivalente a más del 90% de toda la carga, y de aquellos cuyo costo, por avión, era limitante o prohibitivo. Esto se mantuvo por varias décadas, y sólo recientemente se aprecia una tímida tendencia a

explorar nuevas formas y diseños que permiten recuperar una parte del terreno perdido. Es probable que la razón de esta demora haya sido por un lado la falta de interés de las empresas navieras debido a la profundización de la industria aeronáutica, por otro lado al riesgo comercial dado el nivel de complejidad para modelar la hidrodinámica de diseños avanzados y, finalmente, a la escasez de sistemas de propulsión lo suficientemente innovadores, equivalente a lo que fue en su época el propulsor turbojet en la aviación.

El propósito de esta somera investigación es revisar las razones del estado actual del transporte marítimo y explorar las tendencias previsibles en la arquitectura naval y propulsión que permitirían su revitalización frente al medio aeronáutico, el posible efecto en diversas industrias y servicios afines a este transporte, como la construcción naval, la producción de nuevos motores y propulsores, etc., y finalmente especular sobre su efecto en el desarrollo de los intereses marítimos y del poder naval de los países que lideren en esta tendencia.

## Estado Actual del Transporte Marítimo.

Hoy nos encontramos con una industria de transporte marítimo caracterizada, en forma muy resumida, por los atributos que

\* Capitán de Fragata, Licenciado en Ciencias Navales e Ingeniero Naval Mecánico (A.P.N.). M.B.A. de la Universidad Adolfo Ibáñez. Ph.D. en Nuclear Materials Engineering, M.Sc. en Naval Architecture and Marine Engineering, M.Sc. en Materials Engineering, y M.Sc. en Nuclear Engineering del Massachusetts Institute of Technology. Profesor de Postgrado de Arquitectura, Construcción e Ingeniería Naval de la A.P.N.

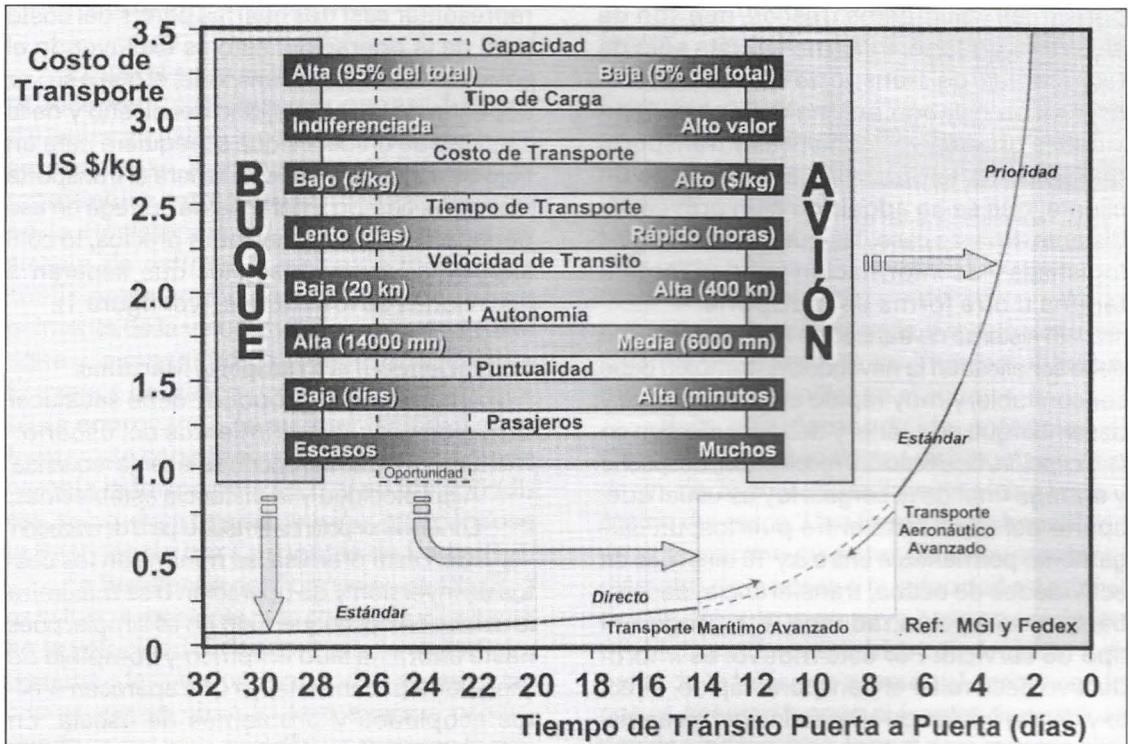


Figura 1. Atributos y costos de los vehículos de transporte transatlántico.

se señalan en el recuadro de la Figura 1, los que se comparan con la industria de transporte aeronáutico.

Como se aprecia, los factores característicos de estos medios son muy extremos, y en la presencia de un vacío que no está cubierto por estos medios, nos lleva a formular las siguientes preguntas: ¿existe alguna tecnología aeronáutica o un conjunto de ellas que agrave la pérdida de competitividad de la industria marítima frente a la aviación?, o bien ¿existe una oportunidad a partir de un conjunto actual o potencial de tecnologías náuticas que permitan recuperar la competitividad de esa industria?

La respuesta es afirmativa en ambos casos, pues existen renovadas tecnologías aeronáuticas que podrían llegar a erosionar la parte de mayor valor unitario del transporte marítimo, acelerada por la desregulación y la creciente competencia, que ha respondido con mayor frecuencia de aviones de un

poco menor capacidad y mayor autonomía. Pero, también se visualizan tecnologías navales, que aún no han alcanzado un tamaño crítico, que pueden arrebatarle aquella parte de menor valor unitario del transporte aéreo.

Debido a la creciente interdependencia de las distintas economías y mercados, el intercambio comercial de productos elaborados es un fenómeno que se incrementa agresivamente, y potencia los servicios de transporte, los cuales se ven acelerados por otros fenómenos, como la desregulación de algunos servicios, la mayor competitividad y apertura, y la existencia de factores productivos disímiles alrededor del mundo. Este escenario es una oportunidad para el transporte intercontinental, en el cual el transporte marítimo puede asegurarse una parte del beneficio. Para este último, existe un potencial de transporte rápido de productos de demanda justo a tiempo, mercados de oportunidad, e incluso de productos

perecibles y alimentos frescos, que son de alto valor unitario. Pero, no se trata sólo de tecnologías de transporte transoceánico. Este es un eslabón en una cadena de actividades productivas, logísticas y transporte que colocan un producto, en manos de un cliente, que se ha adquirido a un proveedor distante. En este caso, las nuevas tecnologías logísticas y de información pueden fomentar una u otra forma de transporte.

El sistema de transporte moderno no sólo debe ser eficaz en la navegación. También debe ser confiable, y muy rápido en el embarque y desembarque portuario, y debe ser efectivo en la recepción, clasificación, recolección, despacho y entrega final de la carga. Hoy es usual que, aparte del transporte entre puertos, un cargamento permanezca entre 3 y 10 días más en actividades de estiba, transferencia, desembarque, recepción, aduana, etc., según el tipo de servicio. Por este motivo, es improductivo desarrollar el transporte rápido, directo y de alta frecuencia si no se integra en un sistema rápido, confiable y compatible, lo que invita a innovaciones logísticas radicales, pero juiciosas frente a la estructura del mercado del transporte. Conviene recordar el caso del buque portacontenedor SL-7 de Sealand, que fuera parte de una flota de buques rápidos de 55.000 tons. de desplazamiento, proyectada en los años 70, con plantas a vapor de alta potencia, para lograr más de 33 nudos, sin contenedores ISO. Por ello, quedaron fuera del mercado en plena crisis del petróleo, aunque pudieron ser transformados para la Armada de Estados Unidos. Similar consideración es la de los buques tipo LASH y SEA-BEE, que utilizan barcas con una capacidad muy superior al contenedor estándar, para un embarque más rápido y eficiente, pero que han quedado confinados a un mercado reducido por no ser el diseño dominante.

El transporte eficiente obliga a observar todos los costos asociados, ya que el servicio de puerto, los sistemas de manejo de la carga, y el transporte a los terminales puede

representar casi tres cuartas partes del costo total de la operación, esto es excluyendo el costo del vehículo de transporte, el que a su vez depende de la complejidad del diseño y de la cantidad de unidades que se requiere para un flujo de carga. En lo que se refiere al transporte mismo, el tiempo y garantía de entrega en ese período se traducen en sobre precios, lo cual explica las tarifas disímiles que separan a los aviones de los buques. (ver figura 1).

**Limitaciones en el Transporte Marítimo.**

El diseño de un buque,<sup>1</sup> debe satisfacer la misión y los requerimientos del usuario:

- Capacidad de transporte de la carga requerida.
- A la velocidad y la distancia establecidas.
- Con la menor potencia en todo el perfil de utilización.

Con esta premisa, se minimizan los costos de inversión y de operación o se maximiza la utilización del buque. Esto no es simple, pues hasta ahora ha sido empírico y complejo de modelar teóricamente, ya que aparecen efectos acoplados y problemas de escala. En principio se trata de combinar adecuadamente los factores señalados en la figura 2.

El primer factor es la Resistencia al Avance, la cual es la fuerza requerida para mover el buque a una determinada velocidad (se acostumbra referirlo a la fuerza necesaria para remolcarlo, en mar calma y sin interferencia de un remolcador). Para su estudio, ésta se divide en varios componentes de la Resistencia Total ( $R_T$ ):



Figura 2. Factores de diseño de un buque.

1. Cabe notar que esto es válido tanto para buques de guerra como para buques mercantes, teniendo en cuenta que la "carga", la "misión" y el "usuario" son específicos a cada caso.

$$R_T = R_F + R_E + R_O + R_V + R_A + \dots$$

Como el agua es viscosa, ésta se adhiere localmente al casco y genera fuerzas cortantes en capas tangenciales al casco que se desplazan a distintas velocidades. El momentum entregado al medio se traduce en la Resistencia Friccional ( $R_F$ ), que es simple de estimar a partir de modelos y coeficientes conocidos, y depende principalmente de la velocidad, las propiedades del agua y la magnitud de la superficie mojada. El avance del casco produce una estela que se va engrosando en su interacción, y cuya frontera se conoce como capa límite. Donde cambia la forma del casco, y en los apéndices, se produce una separación, agregándose la Resistencia por Corrientes de Eddy ( $R_E$ ).

La Resistencia por Formación de Ola ( $R_O$ ) es la fuerza resistente más compleja y limitante en la velocidad de los buques de superficie. Se debe a las presiones normales al casco, las cuales varían cuando éste avanza, produciendo ondas en la superficie que alteran la presión sobre el casco, y que crean con la velocidad un tren de olas compuesto por olas transversales y divergentes. En la práctica, hay interferencias entre los frentes de ola y efectos dimensionales que dificultan su predicción, a lo cual se le suma el oleaje natural. También se desarrolla una Resistencia por Viento ( $R_V$ ), que interesa en buques de gran obra muerta y superestructura, y la Resistencia por Aceleración ( $R_A$ ), que interesa al diseñador para dimensionar el margen de potencia, entre otras formas de resistencia.

Así como  $R_F$  aumenta con casi el cuadrado de la velocidad,  $R_O$  puede aumentar en ciertas condiciones hasta con el séxtuplo de la velocidad. Se ha demostrado que esta resistencia es máxima cuando la distancia entre crestas de dos olas transversales sucesivas es igual a la eslora del buque, la cual se constituye en una "barrera económica", que es difícil de cruzar, y que para sobrepasarla, exige contar con alta potencia instalada o un casco más afinado.

El segundo factor es la Eficiencia del Propulsor, que es el mecanismo encargado de transmitir el empuje. El propulsor más común es la hélice de tornillo, el



*"La barrera económica" exige contar con alta potencia instalada o un casco más afinado.*

que semejando una helicoides, y con un cierto resbalamiento, transmite su impulso al buque mientras se "atornilla" en el agua.

Para alta demanda de potencia,<sup>2</sup> el diseñador debe considerar distribuirla en más de un eje, lo cual generalmente afecta la geometría del casco. Una forma complementaria de entregar mayor potencia es aumentar el diámetro de la hélice o la velocidad rotacional del eje propulsor, en cuyo caso se producen problemas físicos e hidrodinámicos. Las palas de la hélice se acercan al casco, con lo que se generan fuerzas pulsantes destructivas y ruidos indeseables, lo cual para evitarse obliga a inclinar el eje propulsor, con una pérdida neta de empuje. Por otro lado, una hélice más grande o rápida tiene una mayor velocidad tangencial en los extremos de las palas, lo que produce la cavitación, fenómeno responsable de la erosión de las palas, de una pérdida abrupta de eficiencia, y de generación de ruido. Por estas razones, existe una limitación en la adición de potencia.

Los aviones modernos tienen ventajas en todos estos aspectos, pues se han diseñado para operar en alturas donde la viscosidad es muy baja, y por ello experimentan una mínima resistencia friccional (resistencia análoga a  $R_F$ ), una baja resistencia de vórtice (análoga a  $R_E$ ), y mientras vuelen a velocidades subsónicas, no observarán resistencia por formación de ondas de presión (análoga a  $R_O$ ), y en general pueden sortear mejor los efectos del clima. Por otro lado, sus turboventiladores no sufren los inconvenientes de las hélices tradicionales, ya que éstos pueden manejar mejor los fluidos poco densos.

2. Hidrodinámicamente, la potencia es igual al producto de la resistencia, o el empuje, por la velocidad.

**Tendencias en el Transporte Marítimo.**

En los últimos años, han aparecido muchos diseños de buques avanzados para transporte rápido, y se han materializado varios de ellos como respuesta a la demanda de servicios de transporte más rápidos y confiables, pero no tan caros como el transporte aéreo. Estos diseños compiten en rendimiento, comportamiento marino, potencia instalada, consumo de combustible, tamaño unitario, autonomía y velocidad. Para representar mejor sus atributos y compararlos con otros vehículos de transporte, se puede utilizar el concepto de Factor de Transporte (FT), el cual es un factor adimensional que relaciona el peso (W), la velocidad de diseño (V) y la potencia nominal para propulsión y sustentación (P<sub>S</sub>), del siguiente modo:

$$FT = \frac{WV}{P_S}$$

Este factor se asemeja a otros parámetros utilizados en la evaluación de modos

de transporte, como la Eficiencia de Transporte y la Relación de Ascenso versus Resistencia, pero es más útil para comparar formas y fuentes de poder más avanzadas. El peso del vehículo puede subdividirse en tres elementos, el peso de las estructuras y sistemas de propulsión y soporte (W<sub>S</sub>), el peso de la carga (W<sub>C</sub>) y el peso del combustible (W<sub>F</sub>), lo cual permite establecer componentes simples del Factor de Transporte (sistema, carga y combustible):

$$FT = \frac{(W_S + W_C + W_F) \cdot V}{P_S} = \frac{W_S \cdot V}{P_S} + \frac{W_C \cdot V}{P_S} + \frac{W_F \cdot V}{P_S} = \frac{FT_S + FT_C + FT_F}{P_S}$$

La expresión anterior puede ser reacomodada para reflejar mejor los factores de diseño del vehículo y los requerimientos del operador, quedando de la siguiente manera:

$$FT = \frac{W_C}{P_S} \cdot (1 + \frac{W_S}{W_C}) \cdot V + A \cdot CEC$$

Así, los principales factores de diseño del vehículo son el peso de las estructuras y sistemas (W<sub>s</sub>), la potencia nominal (P<sub>s</sub>) y el consumo específico de combustible (CEC),

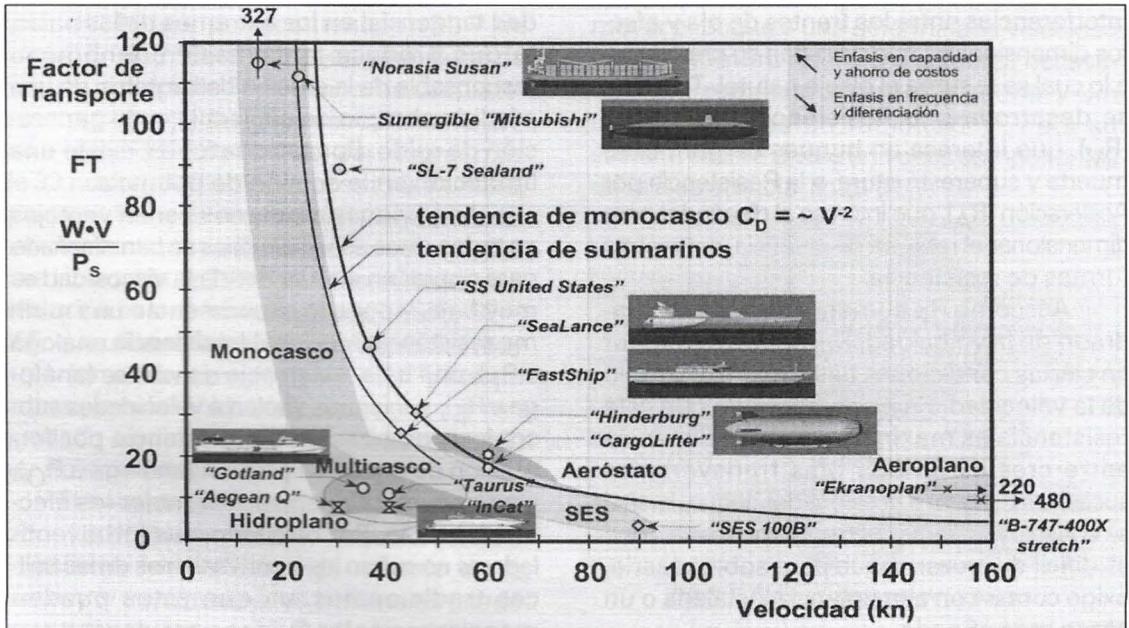


Figura 3. Factor de transporte de vehículos transoceánicos.

siendo los dos primeros elementos más sensibles y en compromiso, afectados por el tipo de vehículo y los materiales, mientras que el CEC es una variable relativamente uniforme, dentro de vehículos similares. Así, se aprecia que el componente de combustible del FT, depende prácticamente de la autonomía (A). En el caso del transporte marítimo, la forma del casco, la potencia de la maquinaria y la eficiencia de los propulsores son críticos en su desempeño. Por otro lado, los requerimientos del operador son la carga (Wc), la velocidad (V) y la autonomía. La figura 3 muestra la relación entre FT y velocidad para diferentes tipos de vehículos.

En general, interesa el mayor FT, lo cual es indicativo de una alta velocidad o alta capacidad de carga, con baja demanda de potencia. De la figura anterior, en la cual se han incluido buques modernos y prototipos bajo estudio, se puede apreciar que el FT tiene una alta dependencia en el tipo de vehículo y la velocidad.

Los buques tipo monocasco de alto coeficiente prismático tienen alto FT, pero son sensibles al estado de mar, ya que en malas condiciones pueden verse obligados a redu-

cir su velocidad en más de un 25%, lo que afecta la confiabilidad de una entrega oportuna. Esta limitación explica la lógica actual del precio del transporte, la cual se asocia principalmente al fenómeno de resistencia (este fue uno de los factores críticos en el abandono del SL-7). Por otro lado, sobre los 60 nudos prácticamente no se observan buques de transporte, sino que lanchas de competición, capaces de planear en el agua. En la figura anterior, se ha superpuesto una curva de referencia, para la cual se ha asumido que los buques no experimentan resistencia por formación de ola ni una degradación de la eficiencia propulsiva, sino que sólo se mantiene una resistencia viscosa bajo los parámetros típicos de baja velocidad.

**Potencial de Alta Velocidad en el Transporte Marítimo.**

El potencial de un transporte marítimo rápido depende de la capacidad para evadir las limitaciones de la tecnología y las prácticas de diseño actuales. Los nuevos diseños, en especial aquellos buques con un FT entre 10 y 40, y una velocidad entre 30 y 60 nudos,

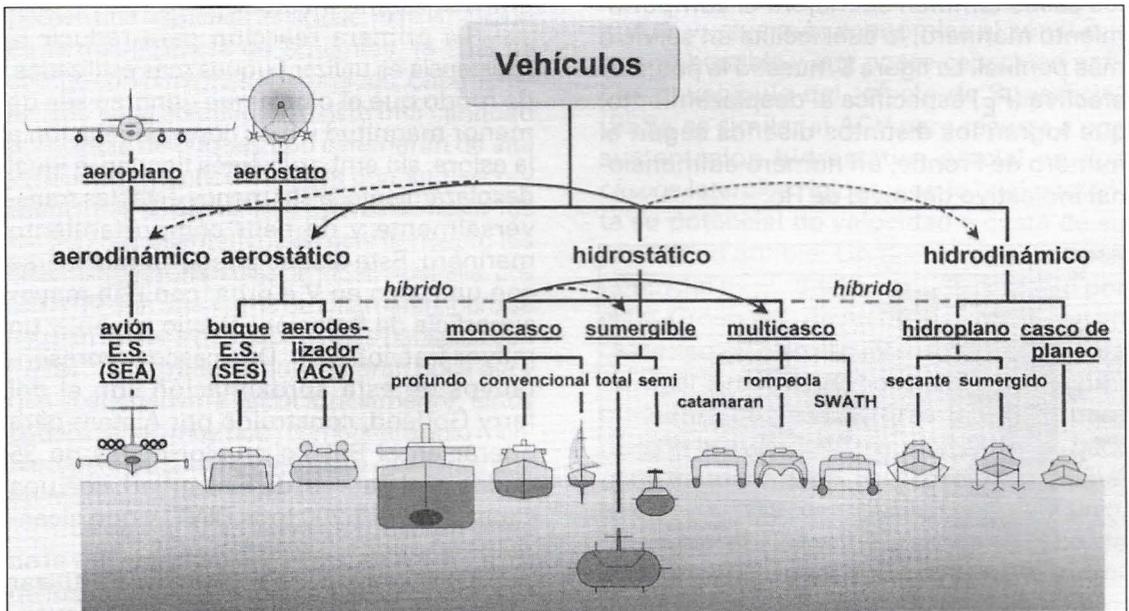


Figura 4. Vehículos aptos para transporte transoceánico y tendencia evolutiva.

son opciones válidas si tienen éxito en:

- i) Reducir la resistencia al avance que limita al transporte marítimo tradicional,
- ii) Utilizar propulsores cuyo rendimiento y eficiencia no se degraden a alta velocidad, como sucede en los propulsores clásicos,
- iii) Disponer de mayor potencia propulsiva, que permita sobrepasar los límites impuestos por la resistencia de ola.
- iv) Incorporar nuevos materiales.

**Reducción de la Resistencia.**

La reducción de la resistencia al avance se logra mediante el alejamiento de los modos de sustentación vigentes, hacia diseños menos resistentes, como se aprecia en la figura 4.

En esta figura se ha representado una variedad de vehículos para el transporte transoceánico arreglados según el modo de sustentación, que van desde los aerodinámicos, pasando por los aerostáticos e hidrostáticos, hasta los hidrodinámicos. Al substituir parte de la sustentación hidrostática, se permite mayor velocidad y en la mayoría de los casos también se mejora el comportamiento marinerero, lo cual facilita un servicio más puntual. La figura 5 muestra la potencia efectiva ( $P_E$ ) específica al desplazamiento, que logran los distintos diseños según el número de Fronde, un número adimensional indicativo del nivel de  $R_o$ .

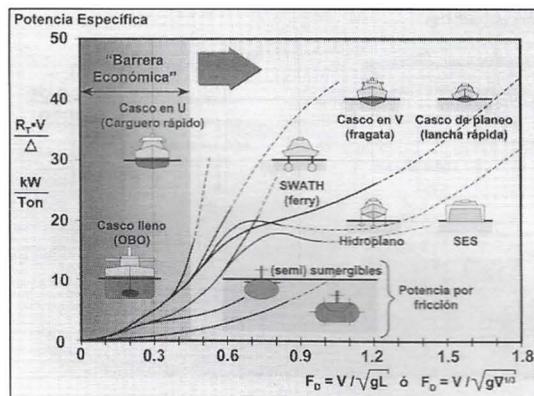


Figura 5. Tendencia en la relación de potencia a velocidad.

A continuación, se enuncian algunos buques cuyos diseños tienen mayor potencial de evolución comercial en el mediano plazo. A modo de referencia, compitiendo con el transporte marítimo, se encuentran los nuevos gigantes de la aviación (por ejemplo, las versiones de carga de los futuros aviones Boeing 747-400X Stretch, el Airbus A3XX-100, o el Sukhoi KR-860). Otro vehículo aéreo con un buen potencial es el aeróstato rígido (por ejemplo, el nuevo CargoLifter alemán), resurgimiento del "Luftschiff Zeppelin", cuya principal ventaja es la independencia de los terminales marítimos. Por último, entre aviones y buques están los vehículos tipo "avión de efecto superficie", como los antiguos "Ekranoplan" de origen ruso, hidroaviones gigantes que se sustentan a no más de 5 mts. sobre el nivel del mar. La dificultad principal de este último es la incompatibilidad con los terminales, y su degradación estructural por corrosión. No obstante, los FT de todos estos vehículos son limitados, con un bajo valor relativo de su FTs, y por ende son opciones de alto precio de transporte, además que sus contenedores son distintos al estándar actual.

La primera reacción para reducir la resistencia es utilizar buques más estilizados, de modo que el oleaje que generan sea de menor magnitud y más corto en relación a la eslora, sin embargo éstos tienden, a igual desplazamiento, a ser menos estables transversalmente y de peor comportamiento marinerero. Este diseño puede compensarse con un casco en V a proa, con una mayor superficie de flotación, espejo ancho, y un mayor francobordo. Dos cascos representativos de esta aproximación son el del ferry Gotland, construido por Alstom para operar en el Báltico a velocidades de 35 nudos, y el Taurus, de Fincantieri, con una capacidad de 1.200 tons DWT, y que alcanza los 40 nudos.

Otra opción es evitar  $R_o$ , y utilizar sumergibles y semisumergibles. Aún cuando es una alternativa técnicamente posible, requieren estructuras cilíndricas resistentes

a una presión cercana a 1.2 MPa, que los hace pesados y caros. Sin embargo, lo más complejo es su incompatibilidad con los puertos existentes y probablemente la necesidad de otra geometría en sus contenedores, por ejemplo una forma hexagonal compacta.

También es posible usar modificadores de ola (ej. el típico bulbo de proa). En este caso, puede emplearse una proa de entrada invertida, común por otras razones en buques antiguos y que se ha propuesto para reducir la ola del BathMax 1500, como también del DD21, aunque puede degradar el comportamiento marinerio si posee poco francobordo.

Otra alternativa es el uso de multicascos (catamaranes, trimaranes, etc.), lo cual equivale a utilizar "varios buques" delgados, unidos por una "plataforma común", con lo que se obtiene un buen comportamiento marinerio sin una pérdida de estabilidad transversal. Una de las limitaciones de estos diseños es la resistencia estructural de la plataforma, la que se compensa utilizando materiales con una menor razón de resistencia a densidad, como el aluminio o el plástico reforzado, y que poseen una adecuada tenacidad. Otra limitación es la insuficiencia de boyantés, la cual se corrige con pontones sumergidos. Cabe señalar que en la actualidad, existe una cantidad apreciable de buques tipo catamarán de alta velocidad, muchos de ellos con su casco y estructuras de aluminio, y esloras de hasta 100 m. Son representativos de este concepto los catamaranes rompeolas de InCat, Australia. Los SWATH<sup>3</sup> son una forma de catamarán, pero se asocian mejor a dos submarinos paralelos con "velas" más grandes, que generan poca ola y que sostienen una estructura superior. Estos buques tienen muy buen comportamiento marinerio, pero no son muy veloces y calan más que un monocasco.

La quinta alternativa es substituir parte de la sustentación hidrostática, característica de los buques convencionales, por empuje ascendente, lo cual se logra mediante efectos estáticos y dinámicos. En esta opción exis-

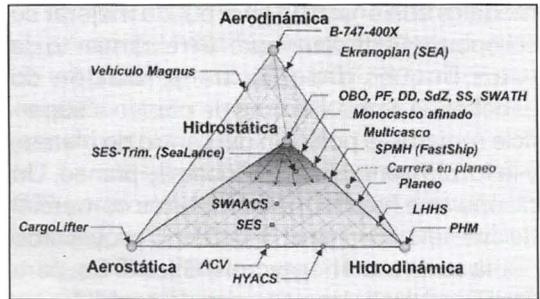


Figura 6. Modos de sustentación de vehículos de transporte.

ten varias formas y combinaciones posibles, que se aprecian conceptualmente en la figura 6.

Una de ellas es el uso del "hidroplano", en que el buque despegga a medida que adquiere velocidad para luego sustentarse hidrodinámicamente. En general, estos vehículos no se han establecido con un buen potencial de FT, y por ahora se limitan al transporte de pasajeros.

Otra posibilidad es el vehículo de colchón de aire (ACV), en que éste se levanta, y por ende se vuelve menos resistente, al inyectar aire a una cavidad de paredes flexibles bajo el vehículo, con las ventajas que se vuelve más económico al consumir su combustible y que posee capacidad anfibia. El vehículo del "efecto de Superficie" (SES), es similar al ACV pero recurre a una sustentación hidrostática parcial en dos cascos laterales rígidos, con lo cual aumenta su potencial de velocidad a costa de su capacidad anfibia. Un diseño con un buen potencial es el "SeaLance", proyectado por el DK Group Inc., de Alemania, que posee un casco central bajo el cual se inyecta aire, para navegar a más de 42 nudos, el cual se complementa con estructuras laterales para mejorar la estabilidad transversal, que lo hace parecer un trimarán. Su capacidad nominal es de 1.200 TEU (Twenty-foot Equivalent Unit).

Otra opción es el uso del "casco de planeo", en que el buque se levanta hidrodinámicamente, mediante un fondo plano, más común en lanchas rápidas, el cual si se

3 Acrónimo inglés que significa doble casco de baja superficie en el plano de flotación.

modifica con una proa en V puede mejorar su comportamiento marino. El rendimiento de estos buques depende de la relación de esbeltez, la razón del área de planeo a superficie mojada, la posición del centro de planeo, y la forma general de las líneas de planeo. Un diseño que ha encontrado interés comercial de alta velocidad es el "FastShip", proyectado por la empresa Thornycroft, Giles & Co. para FastShip Atlantic Inc., y asesorado por MIT, para el transporte entre Filadelfia y Cherburgo. Sus dimensiones generales son similares al SL-7, pero es más veloz y de mayor manga. Posee un casco en V profundo a proa para buen comportamiento marino y un casco de planeo posterior, para su ascenso, arreglo que se conoce como monocasco de semiplano (SPMH). La capacidad nominal del FastShip es de 1.432 TEU, y se complementa con un sistema logístico que incluye un embarque muy rápido. Estos poseen algunas limitaciones que pueden vulnerar su masificación, que dependen de la compatibilidad con el mercado de transporte más que de sus atributos tecnológicos, y que son: una manga superior al ancho del canal de Panamá, y el requisito de puertos especiales y dedicados. De hecho, cada terminal invertirá entre US\$ 70 y 100 millones para atender a estos buques.

Así como el SeaLance y el FastShip, existen otros cascos de sustentación combinada, que compensan los inconvenientes de un tipo de casco con los beneficios de otro.

### **Propulsores de Alto Rendimiento.**

Aunque se obtengan cascos de baja resistencia, aptos para altas velocidades, la utilización de propulsores clásicos (hélices de tornillo) no es posible, ya que el tamaño de éstos los hace poco prácticos, pues los esfuerzos mecánicos en las palas obligan a utilizar mayores espesores. Por otro lado, el rendimiento de empuje y su eficiencia propulsiva se ven degradados por la cavitación, debido a la mayor velocidad tangencial de las palas. Para ciertas aplicaciones, es posible

el uso de hélices supercavitantes,<sup>4</sup> pero tienen limitaciones debido a la alta velocidad rotacional que se requiere, y a ciertas características de inestabilidad fluidodinámica de este sistema. La alternativa en este caso es utilizar un propulsor compacto que trabaje en un rango que escape a este fenómeno

Lo anterior es posible, utilizando propulsores tipo chorro de agua (waterjets), que operan bajo el principio de impulso, es decir que hidrodinámicamente éstos se asemejan más a una bomba centrífuga de flujo semiaxial que a una hélice, a pesar que geoméricamente son hélices entubadas, con las puntas de las palas más anchas para evitar pérdidas por circulación y estatores para alinear la vena de agua, que aspiran el agua desde el fondo del casco, y la expulsan cerca del espejo de popa del buque. Como el flujo está a sobrepresión, no experimenta cavitación y por ende no se ve limitada a alta potencia.

Aparte de lanchas menores, en la actualidad existen cerca de 1.000 buques rápidos con este tipo de propulsor, montados en diferentes tipos de cascos, con desplazamientos de hasta 4.000 toneladas, algunos de los cuales poseen unidades de hasta 25 MW, con impulsores de más de 2 mts. de diámetro. En el ámbito naval, estos propulsores ya son comunes en lanchas, misileras y pequeñas corbetas, y pronto se masificarán en corbetas y fragatas, principalmente por su efecto en la furtividad. Un arreglo propulsivo representativo del ámbito marítimo es la planta DAG-HD del ferry tipo Ro-Ro Taurus, que posee 2 waterjets centrales de 22 MW, cada uno alimentado por una turbogás LM 2500, y 2 waterjets externos con capacidad de gobierno, de 13.000 kW, movidos por dos motores Diesel cada uno, totalizando 70 MW.

Dada su asociación con impulsores hidráulicos, con experiencias en el rango de los cientos de miles de kW por unidad, no se aprecian inconvenientes de escalamiento de estos propulsores. De hecho, recientemente, la empresa KaMeWa autorizó el desarrollo de nuevos waterjets con impulsores de

4 Estas son hélices diseñadas para obtener un mayor empuje gracias a la pseudo curvatura del manto cavitante que se crea artificialmente, con una sección geométrica especial.

más de 3 m. de diámetro, con una potencia de 50.000 kW girando a 200 rpm, para ser instalados, en conjuntos de cinco unidades, en los buques de FastShip Inc.

### Mayor Potencia Propulsiva.

La mayor potencia propulsiva, necesaria para la navegación de alta velocidad, debe ser entregada manteniendo el control de la densidad de potencia, tanto en peso como en volumen, para evitar plantas muy voluminosas o pesadas que reduzcan el potencial de transporte. Es comprensible que la popular propulsión con motores Diesel, una opción de alta eficiencia a distintas velocidades rotacionales, sea descartada como fuente de poder en este tipo de aplicaciones. Por otro lado, aunque la propulsión a vapor no tiene límite superior en potencia, es muy cara de operar. Con la tecnología actualmente disponible, la mayor potencia sólo se puede obtener de las turbinas a gas aeroderivativas.

La turbogas naval más poderosa en la actualidad es la LM 6000, de General Electric, que posee una potencia al eje nominal de alrededor de 42 MW a 3.600 rpm, y que corresponde a la versión naval de la turbina CF6 para aviones Boeing 747 y 767, con 270 kN de empuje. Para el desarrollo del Boeing 777, se ha construido la serie 800 del modelo Trent (Rolls Royce), la GE90B (General Electric) y la PW4000 (Pratt&Whitney). Estas turbogas logran empujes de unos 400 kN, lo que equivale a anticipar turbogas navales aeroderivativas, con más de 60 MW por unidad.

En este caso, el alto consumo específico de combustible a potencia fraccionada no es tan relevante, pues estas turbogas funcionarán a velocidad nominal, con un CEC del orden de 0.2 kg/kW-h, sin embargo el consumo absoluto será considerable. Por ejemplo, cada una de las cinco plantas propulsoras del FastShip consumirá 240 toneladas diarias de combustible. Por esta razón, el combustible representará un tercio del costo de operación, muy similar a la proporción de costos de los aviones, que en este caso sería de casi US\$ 900 mil por viaje.

Se estima que el peso de la planta propulsora del FastShip, es de 1000 toneladas con un costo estimado de US\$ 130 millones, pero deberá tener una capacidad de 5000 tons. de combustible.

La energía nuclear, en una versión GT-MHR (reactor modular acoplado a una turbina de helio), es una opción esperable a mediano plazo. Este reactor, que ha despertado el interés de varios países para generar electricidad, por su eficiencia térmica, simplicidad y seguridad, es apropiado para alta potencia propulsiva, y compensaría algunas desventajas de las turbogas.

Estos reactores funcionan con helio en ciclo cerrado, y no emiten productos de combustión a la atmósfera, por lo que se puede considerar una alternativa comparativamente ecológica, y tiene la capacidad para tolerar la pérdida del refrigerante sin destruir su corazón, argumento crítico para obtener licencia de construcción y operación. El gas helio se expande en una turbina ad-hoc, pudiendo impulsar directamente a un waterjet, con un peso específico estimado cercano a 10 kg/kW. Con una mayor capacidad de carga de unas 2.600 toneladas, equivalente a una ganancia en FTC de 25% respecto a una planta a turbogas, presenta ventajas desde el punto de vista del control de planeo, ya que el buque no experimentaría variaciones de peso ni de posición del centro de planeo al consumir su combustible. Este buque sería más caro que uno con la versión turbogas, pero tendría una economía neta por el bajo costo de su combustible, cuyo precio además es poco volátil.

El principal problema de la energía nuclear es su estigma, ya que se ha atribuido una mala percepción de la opinión pública, que ha costado revertir, aunque la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar permite esta propulsión en el Mar Territorial con las previsiones citadas en los Acuerdos Internacionales. Una posibilidad para construir la imagen de seguridad de la propulsión nuclear comercial, evitando un aborto temprano, es utilizar al comienzo el reactor sólo en Alta Mar y motores eléc-

tricos acoplados a los waterjets externos, alimentados desde la planta de poder eléctrico, para maniobra en puerto.

**Nuevos materiales.**

Es posible utilizar materiales resistentes de menor densidad, como el aluminio y a futuro el titanio, para substituir  $W_S$  por  $W_C$ . El aluminio se utiliza ampliamente en ferries rápidos.

En resumen, las innovaciones en los buques rápidos (ver tabla 1) permitirán compensar los efectos que, en los años 50, situaron a la industria aeronáutica en su posición actual.

**Impacto de la Industria Marítima de Alta Velocidad.**

La tabla 2 permite apreciar las diferencias y capacidades más relevantes de cada vehículo. Se puede observar que, a pesar que la empresa FastShip tiene la intención de entrar primero al mercado, no es muy claro que ésta sea una opción masificable. Se

	Avión	Buque Rápido
Fluido-dinámica	Borde de Ataque de Ala, en V.	Multicasco, SMPH, planeo, levante, ...
Propulsor	Ventiladores o UDF.	Waterjet, y azipod para maniobra.
Motores	Turbogas (¿ICR?)	Turbogas ICR (¿GT-MHR?)
Materiales	Aleaciones Aluminio, y compositos.	HTS y Aleaciones de Aluminio.

Tabla 1. Principales innovaciones de la industria de transporte rápido.

aprecia mayor potencial de FT en el SeaLance, por su mayor velocidad con menor potencia propulsiva, que puede ofrecer mayor frecuencia con menor capacidad, aunque debe resolver una forma de inyección de aire al casco, que evite su ingestión en los waterjets.

En la actualidad, ya existe el transporte marítimo de alta velocidad, caracterizado por ferries y catamaranes, varios de los cuales

Vehículo		SeaLance	FastShip	Taurus	Catalonia	Aegean	Gotland	Susan	Artico	CargoLifter	747-400XS
Parámetro		DK Group	Thornycr.	Fincantieri	InCat	NTUA	Alstom	Norasia	Mitsubishi	C.LifterAG	Boeing
Tipo de Casco	Unidad	SES-trim.	SMPH	Mono V	Catam.	SWATH	Mono V	Mono U	Sumerg.	Aeróstato	Aeroplano
Eslora Total	m	200	262	136	91	52	112.5	174	180	260	81
Manga Máxima	m	32 (57)	40	22	26	32	15.7	28.4	25	65	6.5 (70)
Calado Nominal	m	10.5	10	4	3.6	5	2.6	11.2	22	-	-
Calado Dinámico	m	6.5	8	4	3.6	5	2.6	11.2	-	-	-
Inversión	MM \$	\$150	\$230	\$50	\$60	\$30	\$25	\$95	\$300	\$144	\$90
Capacidad	TEU	1250	1432	191	70	23	60	1550	1500	72	25
Peso Liviano	ton	8163	15750	2700	900	850	1500	9800	15000	330	125
Capacidad carga	ton	10000	10000	1200	440	145	380	23700	26000	160	100
Combustible	ton	2828	5000	120	60	55	70	3000	-	65	200
Peso Muerto	ton	12828	15000	1320	500	200	450	26700	26000	225	300
Desplazamiento	ton	20991	30750	4020	1400	1050	1950	36500	41000	555	470
Precio / T. carga	\$/ton	0.02	0.02	0.04	0.14	0.21	0.07	0.004	0.01	0.90	0.90
Precio por TEU	M\$/TEU	\$120	\$161	\$262	\$857	\$1300	\$414	\$61	\$200	\$2,000	\$3,600
Consumo diario	ton/día	763	1230	353	144	101	144	40	0.003	47	468
Costo combusti.	\$/ton	\$200	\$200	\$190	\$190	\$190	\$190	\$190	\$2 MM	\$190	\$220
CEC	kg/kWh	0.20	0.20	0.21	0.21	0.21	0.21	0.17	0.000003	0.21	0.19
Costo comb/día	M\$/día	\$153	\$246	\$67	\$27	\$19	\$27	\$8	\$6	\$9	\$103
Material Casco		Acero	Acero	Acero	Alum.	Acero	Acero	Acero	Acero	Alum.	Alum.
Potencia	MW	155	250	70	28	20	28	9.5	40	9.3	100
Velocidad	kn	45	42	40	40	30	35	17	22	60	480
Ciclo de carga	h	10	6	2	2	2	2	24	48	4	4
Maquinaria		GAG-HD	GAG-HD	DAG-HD	DAD-HD	Diesel	DAD-HD	Diesel	Nuclear	Diesel	Turbogas
Sustentación		20% aero	semiplan.	hidrost.	hidrost.	hidrost.	hidrost.	hidrost.	hidrost.	aerost.	aerodin.
Propulsores		5.25 MW	5.50 MW	2.22 MW	4.7 MW	2.10 MW	4.7 MW	1.18 MW	2.20 MW	2.5.7 MW	4.325 kN
Tipo Propulsor		5 WJ	5 WJ	4 WJ	4 WJ	2 FPP	4 WJ	1 FPP	2 FPP	2 Hélices	4 Vent.
Autonomía	mn	3500	3500	340	1100	350	420	9500	600000	5400	8800
FT buque	( )	11.9	13.3	7.7	6.4	6.4	9.3	87.9	41.4	10.7	3.0
FT carga	( )	14.6	8.4	3.4	3.1	1.1	2.4	212.6	71.7	5.2	2.4
FT combustible	( )	4.1	4.2	0.3	0.4	0.4	0.4	26.9	0.0	2.1	4.8
Factor Transporte	( )	30.5	25.9	11.5	9.9	7.9	12.1	327.4	113	17.9	11.3

Tabla 2. Características de algunos vehículos de transporte rápido.

superan las 1.000 toneladas de peso muerto. Si se consolidara una industria de transporte marítimo intercontinental de alta velocidad, se podría esperar una reactivación de la actividad marítima mundial, recuperando así un segmento arrebatado por la aviación comercial de carga. Entre otros aspectos, puede implicar la masificación de este tipo de servicio en diversos ámbitos no cubiertos, como el transporte de productos elaborados de valor intermedio, automóviles, productos perecibles, alimentos frescos, etc. Si se habilitara este transporte en el Pacífico Sur, se podría privilegiar a las exportaciones chilenas de salmones, vino, frutas, etc., y algunas importaciones de autos del Asia, electrónica para el hogar, etc., salvo que predomine el transporte transatlántico con corredores bioceánicos, por sobre el transpacífico. Por otro lado, la posibilidad de un transporte rápido podría estimular el desarrollo mundial de terminales marítimos avanzados, nuevos sistemas y procesos logísticos e industrias afines a este transporte.

Conviene meditar su impacto en las fuerzas navales del mundo. Con este tipo de unidades se podría reestructurar el transporte marítimo militar. Australia, ya ha tomado en cuenta el beneficio del transporte rápido y ha arrendado un catamarán rompeolas para su Armada. En efecto, el HMAS ACR 45 *Jervis Bay*, buque de carga Ro-Ro construido por InCat, ha probado sus servicios en las Operaciones de Paz en Timor Oriental. Este buque de aluminio, de 86 mts. de eslora y 1.250 tons. de desplazamiento, puede transportar 500 hombres equipados, incluyendo vehículos, con una autonomía de 1.000 mn. a 40 nudos, o más si sacrifica parte de la carga. Los últimos catamaranes de InCat superan los 100 m de eslora. La Armada de Estados Unidos apreció las bondades de este diseño y obtendrá uno para evaluarlo.

Los buques rápidos podrían incidir en el diseño de las fuerzas navales. En efecto, no se visualizan argumentos que impidan convertir a un catamarán rompeolas en una fragata de alta velocidad, como el concepto de la

figura 7, con una capacidad defensiva intrínseca frente a submarinos convencionales, que la posicionaría ventajosamente en el combate AS. Podría, por ejemplo, portar helicópteros pesados, sonar remolcado, etc.. Este catamarán también sería apto para multimisiones y combate de superficie, pues puede contar con misiles SSM, y portar UAV, operando hasta 45 nudos, 50% más que una fragata clásica. Este diseño puede recordarnos la silueta y el propósito del prototipo T-AGOS *Sea Shadow*, un catamarán muy furtivo, de 49 m. de eslora. Por otro lado, este concepto podría forzar la reconfiguración de las unidades de vigilancia oceánica en la ZEE, ya que los OPV convencionales no serían capaces de perseguir ni interceptar a los buques de transporte rápido.

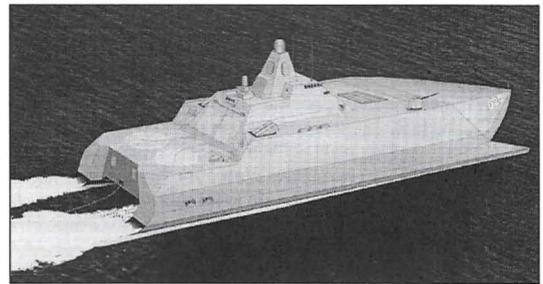


Figura 7. Diagrama esquemático de una fragata catamarán rompeolas con waterjets.

### Conclusiones.

Debido al mayor intercambio comercial internacional de bienes de alto valor agregado, se presenta una oportunidad para reactivar el transporte marítimo en el segmento de alta velocidad, que dependerá de la capacidad industrial para innovar tecnológicamente, y escapar de las actuales prácticas de diseño. Hay nuevos diseños de buques con buen FT, varios de ellos con posibilidades comerciales en el corto y mediano plazo, empleando cascos de baja resistencia al avance, que dispondrán de turbinas y propulsores waterjets eficientes de alta potencia, y eventualmente podría revitalizar la propulsión nuclear con reactores livianos. La disponibilidad de nuevos materiales estructurales facilita la mayoría de las innovaciones.

Para ser efectivo, el sistema debe contemplar un sistema logístico integral, de manera que los beneficios de un transporte marítimo rápido no se diluyan por limitaciones en el manejo y distribución final de la carga, o por limitaciones físicas en puertos y canales.

Finalmente, esta tendencia invita a reflexionar sobre el impacto que estas tecnologías podrían tener en el diseño y perfil operacional de las futuras unidades

navales, adoptando diseños menos tradicionales bajo la perspectiva actual, por ejemplo catamaranes, buques de proa invertida, propulsores de alto rendimiento, entre otros. Además, esto permitirá que, mediante la utilización de estos cascos menos resistentes y propulsores menos ruidosos y eficientes, se reaprecie el valor estratégico, táctico y logístico de la velocidad.

## BIBLIOGRAFIA

- Flight International, Return of the Giants, Vol. 156 N° 4708, pp. 35-47, y Turbofan Engines, Vol. 156 N° 4706, pp. 52-62, enero 2000.
- Giles, D.L., Faster Ships for the Future, American Scientific, octubre 1997.
- Holzer R., US Navy Looks to Obtain High-Speed Ferry for Tests, Defense News Vol. 15 N° 48, diciembre 2000.
- Jane's Navy International, Australia Adopts Catamaran Transport, Vol. 105 N° 5, junio 1999.
- Kennell C., Design Trends in High-Speed Transport, Marine Technology, Vol. 35 N° 3, julio 1998.
- Kennell C., Lavis D.R. y Templeman M.T., High-Speed Sealift Technology, Marine Technology, Vol. 35 N° 3, julio 1998.
- Landsburg A.C., Gabler E., Levine G., Sonnenschein R. y Simmons E., U.S. Commercial Ships for Tomorrow, Marine Technology, Vol. 27 N° 3, mayo 1990.
- MergeGlobal, Inc., Cargo Analyst, Fast Ships, 1995.
- Michel W.H., Mission Impact on Vessel Design, Chapter II, en Ship Design and Construction, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1980.
- Quereda R., "El Rendimiento en el Sistema Propulsivo por Agua de Chorro", pág. 88 a 97, Ingeniería Naval, octubre 1998.
- Referente List, abcLIPS Water Jets, 1999.
- Referente List, KaMeWa Water Jet Propulsion, KaMeWa Group, 1999.
- Sitios www: cargolifter.de -ship-technology.com - fastship.com - boeing.com.
- Todd F.H., Resistance and Propulsion, Chapter VII, en Principles of Naval Architecture, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1967.
- Verbeek R. y Bullen N., Recent Developments in Waterjet Design, Lips Jets BV, The Netherlands, 1998.
- Vergara J., Elementos de Arquitectura, Construcción e Ingeniería Naval, apuntes de clases, Programa DAIN, Academia Politécnica Naval, 1998.

## EN MI OPINION



Excelente el artículo "Torpederas en Acción" del Capitán de Navío Sr. Hugo Alsina Calderón, publicado en la Revista de Marina N° 1/2001, porque permite conocer la realidad histórica de la gestión de algunos acontecimientos de enorme importancia para nuestra Armada, que nacieron espontáneamente a través de las ideas visionarias de sus integrantes.

En adición a lo anterior, quiero resaltar que en la página 89 el autor comenta: "Fue también preciso diseñar y probar un buzo de combate, que fuese protector del frío y del

agua y que además sirviera como salvavidas". Esa idea fue exitosamente materializada por la industria petrolera Costa Afuera del Mar del Norte, para proteger de un elemento de seguridad absolutamente necesario para las dotaciones de las plataformas de producción. Posteriormente, la Empresa Nacional del Petróleo, ENAP, importó este tipo de buzo para el esforzado personal que labora en el estrecho de Magallanes.

Carlos Quiñones López  
Contraalmirante  
Ex Ministro de Minería.