

# LA PROPULSIÓN MAGNETOHIDRODINÁMICA. DESARROLLO Y ESTADO ACTUAL

Pablo ÁLVAREZ LLANEZA



## Introducción



A magnetohidrodinámica (MHD) es el estudio del movimiento de fluidos conductores en presencia de campos magnéticos y corrientes eléctricas. Es una disciplina que ha conocido un gran desarrollo teórico gracias a la astrofísica.

Sin embargo, sus aplicaciones prácticas no habían encontrado hueco en nuestras vidas hasta hace unas pocas décadas. Hoy en día es utilizada en los reactores nucleares de algunos submarinos y ha sido exitosamente aplicada en los modernos sistemas de propulsión iónica de un número cada vez más numeroso de sondas espaciales. También se puede decir que el concepto de su aplicación en la potenciación de los futuros motores hipersónicos *scramjet* por la técnica llamada *bypass* se encuentra muy desarrollado.

Asimismo, su estudio está siendo clave para la obtención de nuevas fuentes de energía, tanto en lo que a fusión de hidrógeno se refiere —inercial y por confinamiento— como a energías renovables —generadores MHD—.

Lamentablemente, tampoco hay que olvidar que, como ocurre con casi cualquier otra tecnología, esta técnica actualmente está siendo objeto de estudio, tan intenso como secreto, por parte de Estados Unidos, Rusia y China para el desarrollo de grandes armas de pulso electromagnético.

En cuanto a la aplicación práctica de la MHD, que es la que ocupa el presente artículo de opinión, podemos decir que data nada más ni nada menos de dos siglos atrás. En efecto, el movimiento de masas de agua salada mediante el uso

de campos magnéticos y eléctricos fue imaginado ya en su día por el genio de Faraday. No obstante, no fue hasta después de la Segunda Guerra Mundial, con el auge de la Guerra Fría, cuando su empleo como sistema de propulsión naval comenzó a ser investigado de manera profunda.

## Fundamentos de la propulsión MHD

### *Fundamentos de electromagnetismo*

La base de la que parte la propulsión MHD no es sino la llamada fuerza de Lorentz, es decir, la fuerza que ejercen un campo eléctrico y un campo magnético sobre una carga eléctrica. Como es bien sabido, esta fuerza es de la forma:

$$F = q (E + v \times B)$$

Donde  $q$  es la carga puntual,  $E$  el campo eléctrico,  $B$  la inducción magnética y  $V$  la velocidad de la carga. Si consideramos la existencia de tan solo el campo magnético y en lugar de una sola carga, una corriente eléctrica, llegamos a lo que se denomina fuerza de Laplace:

$$F = i \times B \times L \times \text{sen } \alpha$$

Donde  $I$  es la intensidad de la corriente y  $L$  el vector longitud del conductor. Además, debemos considerar que si el campo magnético y el eléctrico se colocan perpendicularmente, el  $\text{sen}90 = 1$ , y, por tanto, se deduce la conocida:

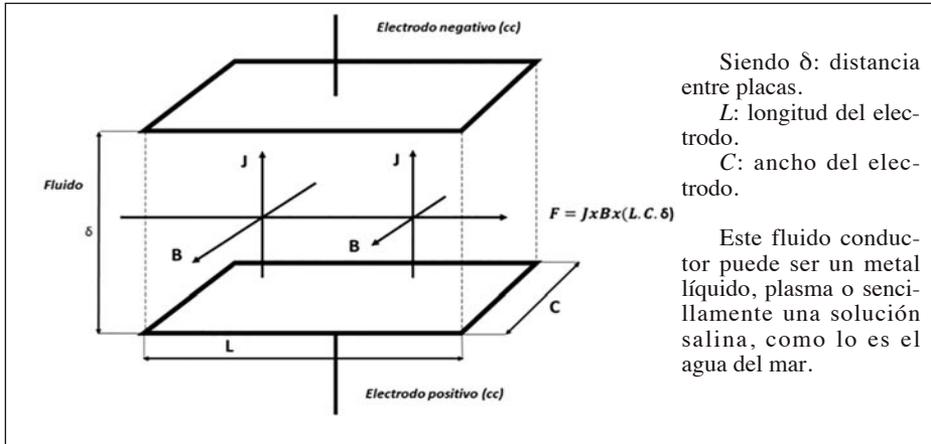
$$F = I \times B \times L$$

Pero en dinámica de medios continuos, como es el caso que nos ocupa, no se puede hablar de una fuerza en concreto, pues cada elemento de volumen se comporta como un elemento de carga. Es por lo que se ha de hablar de fuerza por unidad de volumen. Así entonces tenemos que:

$$F = \int_{\tau} J \times B \, d\tau$$

Donde  $J$  es el vector corriente, el cual representa el flujo de carga y un volumen cualquiera.

Se puede observar, por consiguiente, que un fluido conductor sometido a un campo magnético y a una corriente experimenta una densidad de fuerza perpendicular a ambos.



Siendo  $\delta$ : distancia entre placas.

$L$ : longitud del electrodo.

$C$ : ancho del electrodo.

Este fluido conductor puede ser un metal líquido, plasma o sencillamente una solución salina, como lo es el agua del mar.

Tipo de material	Conductividad
Agua destilada	$10^{-4}$
Agua+25% de NaCL (a 20°C)	21.6
Plasmas	$10^4$ ---- $10^6$
Cobre a 20°C	$6 \times 10^6$

### Fundamentos de hidrodinámica

El aprovechamiento del movimiento del fluido para la propulsión de un buque se lleva a cabo bajo el mismo principio que el de la sustentación de las alas de un avión. La creación de dos regímenes de velocidades distintas en el fluido circundante proporciona, en virtud del principio de Bernoulli, diferencias en las presiones del mismo, resultando de ello una fuerza neta que en el caso de las aeronaves es la de sustentación.

Este concepto es el mismo por el que se regiría en el caso de un submarino propulsado por MHD. La aceleración del fluido por su proa y su deceleración en su popa proporcionan la diferencia de presiones necesaria para que la nave experimente un impulso hacia adelante. Por tanto, si queremos trasladar esto a un buque de superficie, hay que tener en cuenta que aquí la presión se ha de sustituir por el nivel del agua. En todo caso, el resultado es el mismo.

$$p_a + \frac{1}{2} \rho v_a^2 + \int_a^b F(y) dy = p_b + \frac{1}{2} \rho v_b^2$$

En la cual se establece la igualdad  $V_a A_a = V_b A_b$

## Fundamentos de superconductividad

Para conocer la magnitud de los campos y densidades de corrientes necesarias para propulsar un buque, vamos a realizar una pequeña estimación cuantitativa. Para ello comprobaremos las potencias involucradas.

La densidad de potencia del propulsor MHD se puede aproximar a:

$$J = E \times \sigma$$

Siendo  $J$  la densidad de corriente,  $E$  el campo eléctrico y  $\sigma$  la conductividad. Por otra parte, la potencia necesaria para desplazar el fluido es:

$$F_{\text{empuje}} = I \times L \times B = J \times B \quad P = F_{\text{empuje}} \times V = I \times L \times B \times V$$

Donde  $L$  es la llamada longitud de interacción, que no es sino el espacio a lo largo del cual el agua es acelerada dentro del propulsor.

Si queremos producir un desplazamiento del fluido de unos 10 nudos y suponemos que nuestro propulsor tiene una longitud de 10 m, para una densidad común del agua del mar de  $1.025 \text{ kg/m}^3$  la potencia que habremos de emplear para su movimiento es de unos 640 kW. Para una densidad de corriente máxima, impuesta por el límite de hidrólisis del agua, nos da como resultado que es necesario una inducción magnética de 13 T.

Vemos que los campos magnéticos involucrados son muy elevados, pero se encuentran dentro de los límites de las posibilidades técnicas actuales. Si bien hoy en día algunos imanes resistivos, o también llamados electroimanes, de carácter experimental alcanzan estas intensidades, su eventual uso presenta serias dificultades prácticas: una de ellas es su elevado peso; la otra, y más crítica, es el gigantesco consumo energético que necesitan como consecuencia de la disipación de energía por el efecto Joule.

Es por ello que la única opción viable sea la del uso de tecnología superconductora que posibilita la construcción de imanes tremendamente potentes, con los cuales comenzamos a estar familiarizados gracias a los aparatos de resonancia magnética nuclear. Estos imanes no necesitan núcleo, lo que les hace muy ligeros. Además, no requieren ser refrigerados, pues no disipan energía. Por si esto fuera poco, una vez cargados, no consumen energía, ya que la corriente en ellos se mantiene de manera indefinida sin pérdidas caloríficas hasta que se proceda a su descarga.

Sin embargo, los materiales superconductores solo alcanzan el régimen de funcionamiento que les caracteriza a temperaturas muy bajas. Existe una llamada temperatura crítica, por encima de la cual la superconductividad del material queda destruida. No solo eso, sino que incluso por debajo de la temperatura crítica, y a pesar de la ausencia de resistencia eléctrica, estos materiales no pueden soportar cualquier intensidad de corriente ni cualquier intensidad del campo

magnético. Existen también las llamadas intensidad crítica y campo crítico, por encima de los cuales la superconductividad resulta igualmente desbaratada. No obstante, se da la afortunada circunstancia de que estas tres magnitudes críticas se hallan directamente relacionadas, de tal modo que un superconductor con una temperatura crítica más elevada que otro también posee una intensidad y un campo críticos más elevados. Por tanto, a mayor temperatura crítica mayores son las prestaciones del superconductor.

Los primeros superconductores que se descubrieron fueron los llamados de Tipo I y no consistían en otra cosa que metales de transición ordinarios, solo que enfriados a temperaturas de unos pocos grados Kelvin mediante helio líquido.

Los superconductores de más alta temperatura son los llamados de Tipo II. Estos son aleaciones metálicas, principalmente compuestos por aleaciones cuyo elemento fundamental es el neodimio. Estas, aunque pueden ser mecanizadas con mayor o menor dificultad en forma de hilo para construir una bobina, poseen una temperatura crítica que, si bien superior a los de Tipo I, aún se encuentra por debajo de la del nitrógeno líquido. Es por ello que igualmente necesitan ser enfriadas mediante helio líquido, una tecnología más cara, compleja y pesada.

A finales de los ochenta, los avances en superconductividad lograron un gran salto al descubrirse de manera casual diversos materiales cerámicos del tipo  $XBaCuO$ , donde la  $X$  podía ser ocupada por mercurio o elementos pertenecientes a las tierras raras, cuya temperatura crítica se encontraba por encima de la del nitrógeno líquido. Su alta temperatura pronostica campos críticos del orden de las 100 T, una cifra sin duda desorbitada para nuestros estándares tecnológicos. Desgraciadamente, este tipo de cerámicas no han podido ser mecanizadas en forma de hilo, y la búsqueda de materiales metálicos de estas características ha resultado igualmente infructuosa. El motivo de ello es que hasta el momento se desconocen los mecanismos exactos por los que se produce la superconductividad en este tipo de cerámicas, por lo que se puede decir que el desarrollo de estos materiales se ha venido haciendo a tientas.

## **Técnicas de propulsión MHD**

En cuanto al tratamiento del flujo se refiere, cabe distinguir las siguientes técnicas:

### *Superficie*

- Interno: el flujo de agua se hace pasar por el interior del mecanismo propulsor.

TEMAS PROFESIONALES

- Lineal: el agua pasa a través de un conducto vacío, siendo el encargado del control del flujo el imán en una configuración por lo general compleja.
  - Helicoidal: el flujo es controlado mecánicamente por medio de una turbina, simplificando la configuración del imán.
- Externo: el dispositivo propulsa el agua que se encuentra adyacente al casco del buque.

*Hidrofoil.*—Esta técnica aún se encuentra en fase conceptual.

En lo que respecta a la generación de la corriente, nos encontramos con dos tipos de esquemas:

- Tipo DC: la corriente es suministrada por electrodos. Este es por su simplicidad el esquema que hasta ahora se ha llevado a la práctica.
- Tipo AC: la corriente es generada por medio de campos magnéticos alternantes. Se encuentra aún en estudio.

Aplicaciones marinas				
Propulsión				Hidrofoil
Tipo DC		Tipo AC		-
Superficie interno	Superficie Externo	Tipo Interno	Tipo Externo	
Lineal	Helicoidal	SEMD-1	-	
<i>Yamato-1</i>	HEMS-1	ST-500	-	

Cuadro resumen para la utilización MHD en aplicaciones navales

**Consideraciones de diseño**

*Geometría*

Flujo lineal.— El diseño geométrico tipo DC para flujo lineal más eficiente es el llamado bicilíndrico, planteado en 1967 por S. Way de Westinghouse. Es tal que establece una ortogonalidad perfecta en todo punto entre el campo, la corriente y el flujo gracias al empleo de imanes dipolares. Sin embargo, esto requiere un andamiaje muy resistente y voluminoso que evite que las dos bobinas superconductoras se atraigan entre sí. Hay que decir que para unas bobinas de

un metro de radio y diez de longitud separadas por dos metros de distancia, que aporten cada una 10 T, la presión a la que someterían a sus bastidores sería del orden de tres MPa. Este concepto precisa pues de una estructura suficientemente fuerte para alojar las bobinas, lo que a su vez incrementa el peso y complica el diseño de la instalación.

**Flujo helicoidal.**— Esta geometría presenta una mayor eficiencia, posibilita mayores intensidades de inducción magnética y simplifica mucho la instalación, por lo que se considera el esquema más prometedor a la hora de ser implementado en buques y submarinos. Consta de una tobera dentro de la cual es alojada coaxialmente un torno helicoidal. El ánodo lo constituiría el eje del torno y el cátodo la pared interior de la tobera, de tal manera que la corriente sea radial. El campo magnético es coaxial y es suministrado por una única bobina que envolvería la tobera. El empuje comunicado al agua será entonces tangencial y será convertido en empuje axial gracias al eje.

En principio, este sistema tiene la virtud de permitir un mayor aprovechamiento del campo magnético, pues el grueso de la energía magnética queda concentrado en el interior de la bobina, al contrario de lo que ocurre con los imanes dipolares.

## Reseña histórica

### *Los inicios*

La investigación en los años cincuenta sobre reactores nucleares refrigerados y moderados con metal líquido ayudó al desarrollo de la magnetohidrodinámica aplicada, y ello inspiró la búsqueda de nuevas aplicaciones. Así, ya en la década siguiente, concretamente en 1961, W. A. Rice registró una patente en la que planteó por vez primera el concepto de un buque propulsado con las mismas técnicas de transferencia que empleaban los reactores nucleares antes citados. A partir de ahí, las investigaciones se sucedieron rápidamente. En 1962, O. M. Philips planteó la posibilidad del uso de campos magnéticos alternos. En 1963, R. A. Doragh propuso el empleo de imanes superconductores y predijo una eficiencia teórica de hasta el 60 por 100. En 1965, el ingeniero estadounidense S. Way diseñó un sistema de propulsión MHD externo, que con el empleo de imanes superconductores alcanzaba una eficiencia teórica del 50 por 100; y no solo eso, sino que además construyó el primer prototipo experimental, el EMS-1, un pequeño modelo submarino que utilizaba imanes resistivos de 0,015 T y que fue probado en las costas de California. A pesar de que el prototipo funcionaba, era muy poco eficiente debido a la poca intensidad de la inducción magnética, y habría que esperar a que la tecnología de superconductores se desarrollara. En 1976, el equipo del profesor Y. Saji, de la Universidad de Kobe, construyó dos modelos de superficie, el SEMD-1 y el ST-500, con propulsión externa, y

alimentados con imanes superconductores y DC, probando por vez primera que la propulsión MHD empleando superconductividad era más eficiente que la convencional a hélice.

### *La experiencia del Yamato-I*

En 1985, un consorcio japonés formado por la Universidad de la Marina Mercante de Kobe (KUMM) y la empresa Mitsubishi abordaron el diseño y la fabricación del —hasta el momento y que haya sido públicamente reconocido— único navío de propulsión MHD que se ha navegado. Fue botado un 26 de julio de 1992. Se trataba de un pequeño buque de 30 m de eslora y 180 t de desplazamiento, el cual montaba dos conjuntos de propulsores MHD internos de flujo lineal, con una configuración de seis toberas cada uno, empleando sendos imanes superconductores DC que aportaban una inducción magnética de dos teslas cada uno. Las corrientes utilizadas eran de 3770 A, distribuidas en densidades de 4.457 A/m<sup>2</sup>. Durante la experiencia alcanzó la velocidad de ocho nudos. Además, se llevaron a cabo distintas mediciones del empuje por medio de cables hechos firmes a norays, así como la operación completa en puerto de la carga de helio, magnetización y posterior desmagnetización de las bobinas, resultando todo ello un completo éxito. No obstante, la eficiencia de empuje obtenida apenas superaba el 1 por 100.

Hoy en día el *Yamato-I* descansa en dique seco dentro del Museo de la Ciencia de Kobe.



*Yamato-I* en el dique seco del Museo de la Ciencia de Kobe. (Foto: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org))

### *Experiencias posteriores*

Entre 1996 y 1998, el Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Academia de las Ciencias china (IEEAS) desarrolló un modelo de 3,2 metros de eslora y una tonelada de desplazamiento, el *HEMS-1*, tripulado por una sola persona, el cual montaba una bobina superconductor de TiNb que proporcionaba de dos a cinco teslas y empleaba densidades de corriente que iban desde 1.923 hasta 2.163 A/m<sup>2</sup>.

Lo novedoso de este modelo era que implementaba por primera vez una propulsión MHD de tipo helicoidal. El cátodo formaba la cara interna de la tobera, mientras que el ánodo constituía el eje sobre el que iba montada la estructura helicoidal que controlaba el flujo.

Fue probado en una piscina de agua salada, con una densidad de 1.095 kg/m<sup>3</sup> y una conductividad de 6,8 S/m, unas condiciones algo superiores a las normales. Consumiendo una potencia de 4.760 W, pudo alcanzar una velocidad de apenas un nudo (0,65 m/s), con una eficiencia de 0,68 por 100, un valor bajo que los diseñadores achacan al reducido campo magnético.

Durante el proceso, los ingenieros pudieron constatar la discreción de este sistema de propulsión, que apenas dejaba tras de sí pequeñas burbujas, nunca más allá de un metro de distancia de la embarcación.

Fruto de la experiencia que habían acumulado en este campo tanto China como Japón, en 1999 el IEEAS y la KUMM decidieron unir esfuerzos para llevar más allá el diseño helicoidal del *HEMS-1*, pero con imanes tan potentes como el desarrollado hasta ese momento por el Instituto Nacional de Ciencias de Materiales nipón (NIMS), el cual alcanzaba una intensidad de 14 T. En esta ocasión el propulsor no fue montado en ninguna plataforma; fue un experimento estático en el que se emplearon una conductividad del agua de 4,93 S/m y una densidad de 1.020 kg/m<sup>3</sup>. A pesar de que el imán no estaba diseñado para tal efecto, se consiguieron resultados espectaculares. Se comprobó que el diseño helicoidal proporcionaba una eficiencia mayor que el lineal usado por el *Yamato-1* en relación a la potencia suministrada en ambos casos. Utilizando densidades de corriente de 2.033 A/m<sup>2</sup>, menos de la mitad de las utilizadas por el buque japonés, se consiguió alcanzar una densidad de empuje de 24.300 N/m<sup>3</sup>, con una eficiencia del 13 por 100.

### **Aplicaciones militares**

Pero tras lo explicado en los puntos anteriores, debemos plantearnos si realmente todo I +D + i dedicado al estudio de esta increíble tecnología es viable para su aplicación militar en buques y, lo que es más importante, para su uso en submarinos.

En la guerra submarina o antisubmarina, según a quien se le pregunte, factores como la discreción visual, acústica y térmica, la maniobrabilidad y el

magnetismo son fundamentales. De todos ellos, la discreción del submarino es un factor decisivo para conseguir el éxito en cualquiera de sus misiones. Además, debe valorarse la capacidad de ser estancos con un sistema como este a grandes profundidades sin que ponga en riesgo la plataforma y obviamente, al personal que la opera.

- La maniobrabilidad se puede obtener de forma simple, únicamente cambiando la dirección del campo eléctrico. Y si conseguimos varios impulsores, se pueden valorar también los supermecanismos mecánicos que lleva asociados esta instalación.
- El magnetismo generado por este tipo de propulsión es bastante elevado y plantea dos problemas, uno interno y otro externo. El externo radica en que puede ser detectado por los aviones de patrulla marítima con un detector de anomalías magnéticas, ya que el campo generado es bastante alto en este tipo de propulsión. En cuanto al interno, los equipos eléctricos y electrónicos sufren un deterioro cuando se encuentran sometidos a campos magnéticos elevados. Por ello, es necesario desarrollar un blindaje magnético que permita aislar las bobinas de los elementos internos, por ejemplo, utilizando elementos paramagnéticos.
- La discreción visual está garantizada en comparación con los sistemas actuales de esnórquel. No obstante, la única indiscreción que podría cometer es una pequeña estela de burbujas, no más allá de un metro del submarino producidas por la electrólisis.
- La discreción acústica sería un salto enorme, probablemente el mayor y más importante de todos los factores aquí analizados, puesto que suprimir la hélice implica eliminar todos los mecanismos asociados, la línea de ejes y toda la instalación de refrigeración del sistema. Además, se evitaría también el fenómeno de la cavitación, que tan indeseable es cuando se trata de pasar inadvertidos.
- La discreción térmica se podría contener fácilmente, ya que, como es sabido, el calor se generaría por el comentado efecto Joule y, al navegar en inmersión y normalmente a grandes profundidades, el submarino no tendría problemas en ocultar su firma térmica.
- La estanqueidad también sería una de las grandes ventajas, puesto que si se eliminara la hélice, los ejes y elementos asociados, así como el timón vertical, se aumentaría la supervivencia de la plataforma considerablemente.

## Conclusiones

Tras todo el análisis del sistema, su desarrollo y las aplicaciones y ventajas militares estudiadas en este documento, podremos concluir diciendo que el

sistema MHD proporciona unas ventajas enormes en comparación con los sistemas de propulsión utilizados actualmente. Estas se materializan en una menor detección visual en comparación con los submarinos convencionales, una menor firma acústica al eliminarse los golpes de timón y de la hélice y, por supuesto, una mayor capacidad de supervivencia al eliminar una multitud de pasos de casco. Por el contrario, se mantiene la firma magnética e incluso se aumenta debido a los altos campos que se generarían con este equipo. Queda pendiente de estudio si al encontrarse a grandes profundidades o utilizando técnicas actuales de desmagnetización podrían llegar a ocultarse de forma eficaz.

En cualquier caso, el sistema presenta ciertas desventajas y a día de hoy, al menos según fuentes abiertas, el desarrollo y la investigación de la propulsión magnetohidrodinámica se encuentran parados. El primer motivo es la gran inversión en I + D + i que debe hacerse para seguir explorando en el desarrollo de nuevos superconductores que permitan obtener rendimientos aceptables para una plataforma de uso militar. Además de esto, el uso del sistema no implica unas grandes velocidades, para evadirse sería bastante complicado y ese problema ya está superado con los nuevos submarinos nucleares de ataque, que pueden alcanzar velocidades más altas que los buques antisubmarinos.

Por tanto y como conclusión final, creo que hasta que los escenarios y amenazas no sean más coyunturales este sistema de propulsión se quedará a la espera de fondos para su desarrollo, puesto que a día de hoy no ofrece unas garantías altas de éxito para el escenario actual.

#### BIBLIOGRAFÍA

- A Feasibility Study and Experimental Evaluation on MHD Acceleration for Application to Advanced Propulsion and Hypervelocity Ground Testing.*
- BASHKATOV, V. (1991, octubre): *Reactive forces in magneto-hydrodynamics and their application for MHD-jet propulsive ocean ships.* International Symposium on Superconducting Magneto-hydrodynamic Ship Propulsion, Kobe.
- DOSS, E. D., & GEYER, H. K. (1992): *An overview of MHD seawater thruster performance and loss mechanisms.*
- PETRICK, M.; LIBERA, J.; BOUILLARD, J. X.; PIERSON, E. S., & HILL, D. (1992): *Results from a large-scale MHD propulsion experiment* (No. ANL/CP-76633; CONF-920677-16; CONF-921038-4). Argonne National Lab., IL (United States).
- PICOLOGLOU, B.; DOSS, E.; BLACK, D., & SIKES, W. (1992): *Experimental determination of magnetohydrodynamic seawater thruster performance in a two Tesla test facility* (No. ANL/CP-76576; CONF-920801-22). Argonne National Lab., IL (United States).
- TAKEDA, M.; OKUJI, Y.; AKAZAWA, T.; LIU, X., & KIYOSHI, T. (2005): «Fundamental studies of helical-type seawater MHD generation system». *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15(2), pp. 2.170-2.173.
- TAKEZAWA, S.; TAMAMA, H.; SUGAWAWA, K.; SAKAI, H.; MATSUYAMA, C.; MORITA, H., & UHEYAMA, Y. (1995): «Operation of the thruster for superconducting electromagnetohydrodynamic propulsion ship *YAMATO 1*». *Bulletin of the MESJ*, 23(1), 46.
- WEIER, T.; SHATROV, V., & GERBETH, G. (2007): *Flow control and propulsion in poor conductors.* In *Magnetohydrodynamics*, pp. 295-312. Springer, Dordrecht.

Llegada del cazaminas *Segura* a Barcelona con motivo del Salón Náutico y bautismos de mar, octubre de 2022. (Foto: José Jorge Bonet Albalat)

