



UTILIZACIÓN DE BATERÍAS DE LITIO EN SUBMARINOS

Augusto CONTE DE LOS RÍOS
Magíster en Paz, Seguridad y Defensa (UNED)

Juan Diego PELEGRÍN GARCÍA
Doctor en Ingeniería Industrial (UPV)



Introducción



I repasamos el *Ensayo sobre el arte de navegar por debajo del agua* de Narciso Monturiol, vemos que el insigne inventor ya indicaba uno de los grandes problemas del submarino, su propulsión:

«La resolución del problema de la navegación submarina estriba en la construcción de un aparato que sea capaz de descender dentro del mar, de detenerse donde quiera, de moverse en todas direcciones, de volver a la superficie y de navegar por ella; que pueda estar indefinidamente sumergido sin que esté en comunicación con la atmósfera.»

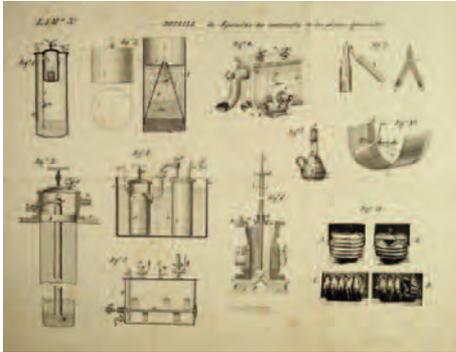


Fig. 1. Elementos del Ictíneo II. (Ilustración de *Ensayo sobre el arte de navegar por debajo del agua*).



Fig. 2. Caja original de la batería del Isaac Peral. (Foto: Diego Quevedo Carmona).

En 1884, Isaac Peral realizaría su primer proyecto de submarino, un modelo de aire comprimido que, a semejanza de los torpedos de la época, contaría con un motor Brotherhood de tres cilindros movidos por un gas fuertemente comprimido y licuado en un aparato de Raoul y Pietet. Un año más tarde, Peral proyecta el submarino eléctrico, sobre el que también trabajaba Isidoro de Cabanyes y D' Olzinelles (1).

Otro precursor del Arma Submarina que mejoraría el invento de Peral fue John P. Holland con la inclusión de un motor de explosión y el uso de diésel para la carga de las baterías. Este modelo de sumergible no cambiaría prácticamente hasta la Segunda Guerra Mundial, con los primeros motores anaeróbicos o AIP (*Air Independent Propulsion*) (2). Más tarde, en 1954, llegaría la revolución de la propulsión submarina con el reactor nuclear del almirante Hyman G. Rickover y su USS *Nautilus* (3).

En las últimas décadas hemos vivido una tercera revolución en los sistemas de propulsión de submarinos, con nuevos sistemas AIP (4) y unos submarinos convencionales que se acercan cada vez más al mito de Monturiol: «Es

(1) CONTE DE LOS RÍOS, A. (2012): «Proyecto de un torpedo submarino accionado por electricidad del teniente coronel de artillería don Isidro de Cabanyes y D'Olzinelles». *REVISTA GENERAL DE MARINA*, 262, pp. 511-522.

(2) Término que engloba las tecnologías para submarinos que permiten generar energía sin necesidad del aire, ahorrándoles subir a cota periscópica y usar el sistema *snorkel* o mástil de inducción.

(3) NAYMARK, C. (1970): «Underway on Nuclear Power: The Development of the *Nautilus*». *Proceedings*. Disponible en: <https://www.usni.org/magazines/proceedings/1970/april/underway-nuclear-power-development-nautilus> (consulta 10/03/2020).

(4) WALKER, M., y KRUSZ, A. (2018): «There's a Case for Diesels». *Proceedings*. Disponible en: <https://www.usni.org/magazines/proceedings/2018/june/theres-case-diesels> (consulta 10/03/2020).

necesario haber navegado con el solo auxilio muscular para sentir la dicha de poseer una fuerza inanimada submarina; de un motor que, además, da aire vital».

España y su Armada han apostado por el reformador de bioetanol y las células de combustible, donde la reacción del H_2 y el O_2 produce electricidad. Este sistema, al principio visto con mucho recelo, es parecido al que van a adoptar los últimos submarinos construidos en Alemania, que antes apostaba por el almacenamiento directo del H_2 en sus tanques de hidruros, lo cual presentaba graves problemas corrosivos y de seguridad. Suecia, por el contrario, sigue con su motor Stirling, un sistema que lleva en funcionamiento desde la Segunda Guerra Mundial.

La pregunta que nos hacemos en este artículo es: ¿estamos ante el sistema definitivo?, ¿podemos encontrar mejoras desde otro enfoque? La irrupción de las baterías de litio podría suponer la cuarta revolución en propulsión submarina, cambiando profundamente las capacidades de los modelos convencionales. Empecemos repasando los sistemas AIP utilizados por las distintas marinas del mundo.

Sistemas AIP en el mundo

La aplicación del sistema de propulsión AIP por los alemanes al final de la Segunda Guerra Mundial es conocida por todos; el ingeniero Hellmuth Walter ideó una turbina impulsada por el vapor que era calentado por la reacción de peróxido de hidrógeno y el agua (5) (Tomasz, 2019). Acabada la contienda, varios países, con mayor o menor éxito, llevaron a cabo investigaciones y construyeron submarinos con sistemas similares de turbinas y motores diésel que trabajaban en ciclo semicerrado. El caso más conocido lo tenemos en los famosos HMS *Explorer* y HMS *Excalibur*, dos submarinos experimentales de la Royal Navy que, debido al riesgo del peróxido, empezaron a llamarlos *Exploder* y *Exciter* (6).

En los últimos años del siglo xx, antes de la caída del Muro de Berlín y el desmoronamiento del Pacto de Varsovia, cuando se contaba con un Arma Submarina rusa a pleno rendimiento, hubo un repunte en la venta de submarinos y en la investigación de sistemas AIP, con el diésel de ciclo cerrado, el motor Stirling (un sistema de pistón con combustión externa) o el MESMA francés (una turbina de vapor impulsada por el calor de la reacción entre

(5) TOMASZ, L. (2019): «Waiting for Breakthrough in Conventional Submarine's Prime Movers». *Transactions on Maritime Science*, 8(1).

(6) El número de averías e incidentes que presentó este proyecto hizo que la Royal Navy lo abandonara y apostara por la propulsión nuclear, mucho más segura.

etanol y oxígeno). También dio comienzo la investigación de las pilas de combustible o *fuel cell*, con diferentes variantes dependiendo de cómo se obtiene el H_2 que se necesita para generar electricidad (generadores eléctricos químicos, tanques de hidruros o reformadores) (7).

Ninguno de estos sistemas supone un submarino totalmente independiente del aire, todos tienen una mayor o menor autonomía según la capacidad que proporcionan sus tanques de combustibles o comburentes. La mayor autonomía la da el sistema del *S-80* español, con capacidad operativa en inmersión pura para guerra antisubmarina superior a las tres semanas (8), el reformador de etanol; y la menor, el sistema Krystall 27-E de la clase rusa *Lada* (9).

Recordemos que los primeros sistemas de célula de combustible se instalaron en los submarinos alemanes de la clase *U-212* para exportación entre 2005 y 2007. Su planta de propulsión combina un sistema convencional, que consiste en un diésel generador y una batería de plomo ácido, al que se añade un sistema AIP de célula de combustible para las patrullas a baja velocidad, que consta de siete células, que proporcionan entre 30 y 50 kW cada una. El oxidante es O_2 líquido que va en un tanque LOX (10), igual que en la serie *S-80*, y el combustible es H_2 , contenido en la red cristalina del hidruro metálico (11) almacenado fuera del casco resistente por el riesgo que supone (Fiori *et al.*, 2015). La cantidad de H_2 almacenada está limitada por el tamaño del submarino, especialmente porque el sistema de tanques de hidruros metálicos es muy voluminoso y pesado.

Esto llevó a España en 2004, al comienzo del diseño del *S-80* por Navantía, a apostar por el reformador, un sistema que produce H_2 a partir del procesado de bioetanol a alta temperatura y que el astillero alemán HDW va a utilizar para sus nuevos submarinos, cambiando el bioetanol por metanol (12) (Krummrich y Llabres, 2015); o los franceses de Naval Group, con el diesel oil, otro combustible. Todavía no hay ningún barco operativo con este tipo de

(7) MINNEHAN, J. (2019): «Non-Nuclear Submarines? Choose Fuel Cells». *Proceedings*. Disponible en: <https://www.usni.org/magazines/proceedings/2019/june/non-nuclear-submarines-choose-fuel-cells> (consulta 10/03/2020).

(8) Según Naval Group, su sistema FC2G AIP daría 18 semanas, sin especificar qué submarino; se entiende que sería la versión *Scorpene* Chile o Malasia, con unos 2/3 de desplazamiento del *S-80*.

(9) MINNEHAN, J. (2019): *op. cit.* (consulta 10/03/2020).

(10) El tanque LOX o tanque de oxígeno líquido es un recipiente estanco que puede almacenar O_2 a temperatura muy baja, criogenizado, para mantenerlo en estado líquido.

(11) FIORI, C.; DELL'ERA, A.; ZUCCARI, F.; SANTIANGELI, A.; D'ORAZIO, A., y ORECCHINI, F. (2015): «Hydrides for submarine applications: Overview and identification of optimal alloys for air independent propulsion maximization». *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(35), pp. 11.879-11.889.

(12) KRUMMRICH, S., y LLABRES, J. (2015): «Methanol reformer. The next milestone for fuel cell powered submarines». *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(15), pp. 5.482-5.486.

sistemas, y su autonomía se basa en ensayos en instalaciones de prueba terrestre y cálculos de ingeniería; el más avanzado es el español, que se encuentra acumulando horas de pruebas antes de su embarque en el tercer submarino de la serie *S-80*. Estos sistemas, al igual que las combustiones en Stirling y MESMA, introducen diferentes hándicaps respecto a la propulsión pura eléctrica, y uno de los más importantes es el ruido que se produce al expulsar los gases sobrantes del proceso de combustión, sea catalítica o no (13) (Annati y Bastiaans, 2015).

Las nuevas pilas de litio y su uso en submarinos

Las baterías de plomo ácido han sido el estándar utilizado en la industria de submarinos desde que Peral empezara a probar su modelo en 1889 (14). En 1991 Sony comercializó la primera batería de iones de litio, usando como cátodo LiCoO_2 (15), empezando así la revolución del litio. Estas emplean compuestos que incluyen litio tanto en el electrodo positivo (cátodo) como en

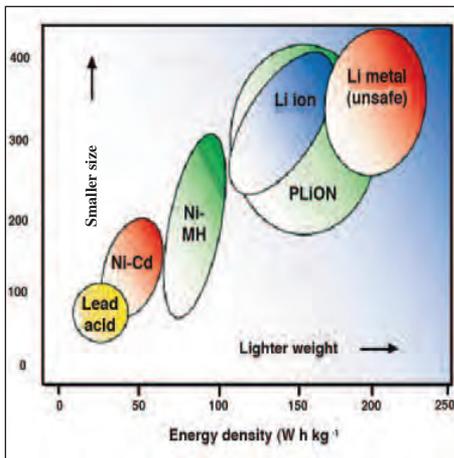


Fig. 3. Densidad energética de diversas tecnologías de baterías recargables del mercado. (Fuente: Wikipedia).

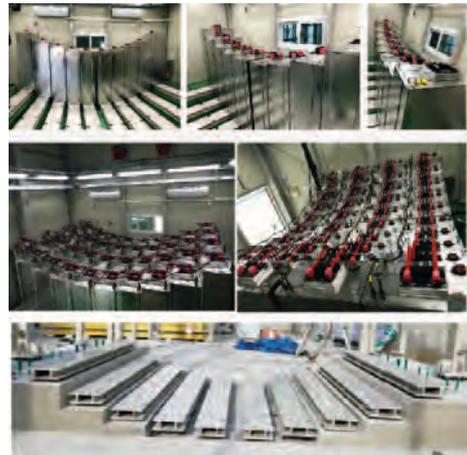


Fig. 4. Disposición de una batería de litio preparada para un submarino surcoreano. (Fuente: Hanwha Defense).

(13) ANNATI, M., y BASTIAANS, P. (2015): «Submarine Developments. Exploring Future Technology Concepts». *Military Technology*, 39, pp. 98-102.

(14) Tres patentes estaban referidas al acumulador eléctrico de su nave (números 7.073, 7.079 y 10.582).

(15) El óxido de litio cobalto, a veces llamado cobaltato o cobaltita de litio, es un compuesto químico con fórmula LiCoO_2 .

el negativo (ánodo). Cuando la batería es cargada/descargada, los iones de litio (Li^+) son intercambiados entre estos electrodos. El material empleado en el electrodo negativo es, en la mayoría de los casos, grafito con litio intercalado, mientras que para el cátodo existen muchas más opciones, como por ejemplo el LiFePO_4 (16) o LiMn_2O_4 (17), cada una presentando diferentes puntos fuertes y débiles en cuanto a energía almacenada, seguridad, coste o vida útil.

Las baterías de iones de litio (también denominadas Li-Ion) son las más utilizadas en el mundo de la electrónica de consumo; prueba de su relevancia fue el Premio Nobel de Química de 2019 (18) concedido a Akira Yoshino, M. Stanley Whittingham y John B. Goodenough por la invención y el desarrollo de las baterías recargables de iones de litio. Esto se debe a sus puntos fuertes frente a otras químicas empleadas en baterías como el plomo ácido:

- Mayor energía almacenada por unidad de peso y volumen (figura 3).
- Menor degradación y mayor número de ciclos de carga/descarga.
- Gran capacidad de carga rápida y tiempos de carga reducidos (cuatro veces).
- Bajo nivel de autodescarga (3 por 100 al mes frente al 10 por 100 en plomo ácido).
- Bajo mantenimiento y elementos sellados.
- Mayor voltaje medio por elemento (3,5 V frente a 2 V en plomo-ácido).
- Mayor capacidad útil que el plomo ácido, ya que estas últimas no deben descargarse por debajo del 40 por 100 (sulfatación), y para recuperar el 100 por 100 requieren cargas especiales periódicamente (tratamiento).

Además de las diversas aplicaciones de baterías de iones de litio en el ámbito de la electrónica de consumo (portátiles y móviles), también hay una creciente demanda en las industrias de defensa, automoción y aeroespacial. Ejemplos de recientes aplicaciones son los coches eléctricos (*Tesla Model S*,

(16) Las baterías de litio-ferro fosfato (LiFePO_4) utilizan una química derivada de la tecnología Li-Ion, de mayor durabilidad, mejores características de seguridad medioambientales, pero con un 30 por 100 menos de densidad de carga.

(17) El óxido de manganeso litio (LiMn_2O_4) se utiliza principalmente en la fabricación de teléfonos móviles y ordenadores portátiles y otros dispositivos electrónicos portátiles para material de cátodo de batería de iones de litio. Se utiliza principalmente en la fabricación de teléfonos móviles y ordenadores portátiles y otros dispositivos electrónicos portátiles para material de cátodo de batería de iones de litio

(18) Nobel Prize (2019). The Nobel Prize in Chemistry 2019. Disponible en: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/press-release/> (Consulta 10/03/2020).

TIPO	CLASE	PROCEDENCIA	CANTIDAD	OBSERVACIONES
SSG	Clase <i>Soryu</i> (19)	 Japón	2	Se trata de una evolución de la clase <i>Soryu</i> , que cuenta con baterías de litio y un sistema especial de extinción. Actualmente Japón tiene dos submarinos con litio: <i>Oryu</i> (SS-511), operativo desde marzo 2020, y el <i>Toryu</i> (SS-512), todavía en construcción. Las baterías son de la multinacional GS Yuasa.
SSG	Clase <i>Dosan Ahn Chang-ho</i>	 Corea del Sur	—	Corea del Sur está trabajando en la clase <i>Dosan Ahn Chang-ho</i> . El primer submarino ha salido con AIP y se prevé que alguna unidad de esta serie pueda suplementarse con baterías de litio de Hanwha.
SSG	SMX-31 (20)	 Francia	—	Prototipo conceptual presentado por Naval Group en la exposición Euronaval-18, con pilas de litio francesas de la casa Saft (en la figura 4 se muestra un prototipo de cámara de baterías de litio del fabricante Hanwha). Alemania también apuesta por las pilas de litio de Saft.
SSG	Clase 212 <i>Mod.</i>	 Alemania	—	TKMS presenta también un proyecto de submarino, evolución de la clase <i>U-212</i> , alimentado con baterías de Saft.
SSG	Clase <i>S-80</i>	 España	—	Navantia presentó una variante del <i>S-80</i> con pilas de Li-Ion para el concurso holandés <i>Walrus Replacement Program</i> , en colaboración con el fabricante francés Saft.
SSG	—	 Rusia	—	Existe un proyecto ruso (21) con una variante con litio del que no sabemos mucho más, solo que Igor Vilnit, director general de los astilleros Rubin lo adelantó en 2013.

Tabla 1. Submarinos con pila de litio en el mundo.

(19) TAKAHASHI, K. (5-3-2020): «Japan commissions first *Soryu*-class submarine equipped with lithium-ion batteries». *Jane's Defence Weekly*. Disponible en: <https://www.janes.com/article/94710/japan-commissions-first-soryu-class-submarine-equipped-with-lithium-ion-batteries> (consulta 10/03/2020).

(20) FRIEDMAN, N. (2018): «World Naval Developments: French SMX 31 Concept Submarine Is Intriguing». *Proceedings*. Disponible en: <https://www.usni.org/magazines/proceedings/2018/december/world-naval-developments-french-smx-31-concept-submarine> (consulta 10/03/2020).

(21) KARNOZOV, V. (2016): «Aip and Ion-Lithium Batteries for Submarines». *Asia-Pacific Defence Reporter*, 42(4), pp. 40–42.



Fig. 5. Vista de un submarino clase *Soryu* equipado con baterías de litio.
(Fuente: *Weapons and Warfare*).

Nissan Leaf), en aviación (*Boeing 787 Dreamliner*, drones), en la industria espacial (satélites y vehículos de exploración) o en combinación con fuentes de energía renovables.

La última industria en sumarse a la revolución del litio ha sido la de submarinos (figuras 4 y 5). En 2018 se botó el primero militar del mundo alimentado por baterías de litio, el *Oryu*, undécimo de la clase *Soryu* (figura 5). Con 84 metros de eslora y un desplazamiento en inmersión de 4.200 t, fue botado el 4 de octubre de 2018 en Kobe, en el astillero de Mitsubishi Heavy Industries, ya operativo tras finalizar sus pruebas. Todos los anteriores cuentan con el sistema estándar de motor AIP Stirling, diésel-generadores y baterías de plomo ácido. El *Oryu* entró en servicio el pasado 5 de marzo de 2020. A este le sigue un segundo prototipo de la misma clase *Soryu*, denominado *Toryu*, el segundo en llevar litio, botado el pasado 6 de noviembre de 2019.

Los dos submarinos experimentales japoneses con pilas de iones de litio utilizan las de GS Yuasa, un fabricante japonés con sede en Kioto, líder mundial en baterías. Japón ha sido el primer país del mundo en equipar sus submarinos con litio, a pesar de tratarse de un modelo con un desplazamiento de 4.200 t en inmersión, es decir, un 40 por 100 superior al *S-80* español.

Corea del Sur también está desarrollando baterías de iones de litio que podrían duplicar la capacidad de las de plomo ácido que equipan sus submarinos. Todavía no tienen ninguno operativo con litio, pero según la Administración del Programa de Adquisición de Defensa (DAPA) esperan tenerlo en un plazo de cinco años.

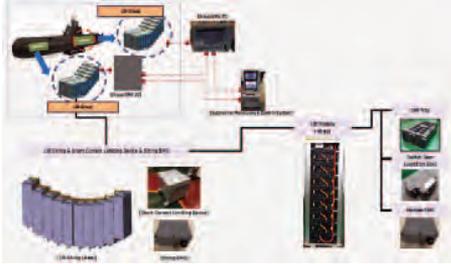


Fig. 6. Montaje de las baterías de litio.
(Fuente: Hanwha Defense).



Fig. 7. Submarino *Dosan Ahn Chang-ho*.
(Fuente: DSME).

Las pilas coreanas van a ser desarrolladas por la casa Samsung en colaboración con Hanwha Defense (22) (figura 6), responsable de integrar y diseñar los módulos de litio del submarino que se construirá en los astilleros de Daewoo Shipbuilding y Marine Engineering. Se trata de una evolución de la clase *Dosan Ahn Chang-ho* (figura 7), equipados con el mismo sistema de guerra electrónica que el *S-80* y que cuenta con 83,5 metros de eslora y un desplazamiento de 3.705 en inmersión, es decir, un 24 por 100 superior al *S-80* español.

Los últimos en anunciar el desarrollo de pilas de litio han sido los franceses, con Saft, un fabricante filial de Total. Saft cuenta con más de 90 años de experiencia trabajando en baterías para submarinos y torpedos y se postula como el referente europeo en este campo; actualmente colabora con los tres principales constructores de submarinos europeos: Naval Group, TKMS y Navantia. Según Saft, su tecnología ofrece dos ventajas principales: consigue almacenar el doble de energía que las pilas de plomo ácido y su fabricación



Fig. 8. Elemento de Li-Ion para submarinos.
(Fuente: Saft).



Fig. 9. Submarino *Ouessant* con baterías de Saft.
(Fuente: Saft).

(22) Hanwha Defense. Disponible en: <https://www.hanwha.com/hanwha-defense-systems.html> (consulta 10/03/20).

ofrece un diseño modular que puede ajustarse a la relación potencia-energía requerida por el cliente, que va desde baterías pequeñas y de alta potencia para el sector de la tecnología de consumo a los sistemas más robusto y grandes para el sector industrial.

Inconvenientes de las baterías de litio

El principal inconveniente de estas baterías es el riesgo de un incendio o explosión. A todos nos suenan las noticias sobre estos casos en vehículos eléctricos (*Tesla*), aviones (*Boeing 787 Dreamliner*), móviles (*Samsung*) o incluso cigarrillos electrónicos.

Esto puede ocurrir por diferentes razones que hay que tener en cuenta por si nos pasa dentro del submarino. El rendimiento, tiempo de vida y seguridad dependen en gran medida de su temperatura, siendo el rango óptimo de utilización los 15-35° C. Cuando, por alguna razón, la temperatura sube por encima de los 100° C, cifra que varía dependiendo de la química de la batería, comienza un proceso conocido como *thermal runaway*, aumentando de manera descontrolada (figura 10). A esta temperatura, algunos componentes empiezan a no ser estables (el electrolito y el separador, principalmente, aunque también el cátodo), comienzan a descomponerse y a desprender calor (reacciones secundarias no deseadas). Si este calor no es convenientemente disipado, la temperatura sigue aumentando y nos lleva a un proceso en cadena que finalmente termina en un incendio o explosión, propagándose entre los elementos que conforman la batería (figura 11).

Para reducir el riesgo de *thermal runaway* se pueden tomar diversas medidas, entre ellas utilizar material más seguro, como cátodos basados en fosfato de hierro, LiFePO_4 , una de las baterías de litio más seguras del mercado y una clara opción para llevar a bordo de un submarino, pese a su menor energía almacenada en comparación con otras que utilizan metal de litio. La

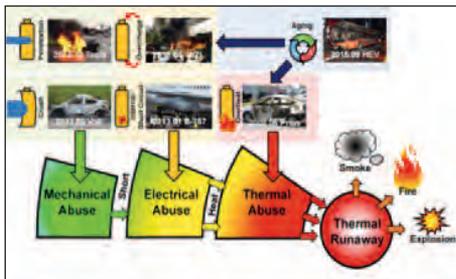


Fig. 10. Fenómeno *thermal runaway*.
(Fuente: Wikipedia).



Fig. 11. Incendio por litio en un barco.
(Fuente: Lithium Safe).

temperatura crítica de estas baterías que usan LiFePO_4 es la más alta, unos 246°C .

Por otro lado, necesitan disponer de un buen sistema de refrigeración, junto con un excelente sistema de vigilancia y control de carga y descarga, otra de las claves para evitar el famoso *thermal runaway*; no debemos olvidar que este tipo de baterías equivale a miles de elementos individuales.

En cualquier caso, cabe destacar que la mayoría de las químicas empleadas en cualquier batería presenta siempre ciertos riesgos a los que estamos acostumbrados los submarinistas, como el de explosión por liberación de hidrógeno de las baterías de plomo ácido, que se ha llevado por delante a submarinos como el USS *Scorpion* (23). Se espera que en los próximos años esta tecnología se desarrolle y permita su uso con las garantías de seguridad adecuadas.

El futuro de las baterías de litio

El sector está trabajando para desarrollar una batería con una densidad de energía de 400 vatios-hora por kilogramo (Wh/kg), que actualmente oscila entre 95 y 200 Wh/kg. El uso del azufre es otra opción que también se está barajando. Es un elemento que no escasea y tiene un bajo coste, consiguiendo densidades por encima de los 200 Wh/kg. Esta alta capacidad ha llevado al Joint Center for Energy Storage Research (JCESR) (24) a apostar por esta opción, y se espera que estas baterías de litio-azufre copen casi un tercio de la demanda en el sector de la electrónica.

Otra variante son las baterías de litio-aire, que también utilizan el litio como ánodo y, a medida que la batería se descarga, este reacciona con el oxígeno consiguiendo densidades de energía teóricas 10 veces superiores a las de las baterías de iones de litio, aunque con menor vida útil y menos seguridad, lo que las descartan por el momento para los submarinos.

También se baraja sustituir el litio del cátodo por otros elementos, como el sodio o el magnesio, que poseen propiedades electrónicas similares al litio. Dada su relativa abundancia y bajo precio, son opciones muy atractivas para los futuros desarrolladores que buscan reducir el coste de las baterías.

(23) BRADLEY, M. (1998): «Why They Called the Scorpion Scrapiron». *Proceedings*. Disponible en: <https://www.usni.org/magazines/proceedings/1998/july/why-they-called-scorpion-scraperon> (consulta 10/03/2020).

(24) El Joint Center for Energy Storage Research (JCESR), líder en la comunidad científica, reconoció la importancia del litio-azufre dentro del panorama de las baterías en 2016, cuando arrancó el foro internacional Li-SM3 de referencia para este tipo de baterías. <http://www.lism3.org/> <https://bit.ly/2MxMyDE> (consulta 10/03/2020).

	E _o (V vs ENH)	Capacidad específica volumétrica (mAh mL ⁻¹)	Capacidad específica gravimétrica (mAh g ⁻¹)	Abundancia (%)	Radio iónico (Å)	Masa atómica relativa (u.m.a.)	Relación masa/carga
Li	-3,04	2062	3861	0,002	0,76	6,94	6,94
Na	-2,71	1128	1166	2,7	1,02	22,98	22,98
K	-2,93	591	685	2,4	1,38	39,1	39,1
Mg	-2,37	3883	2205	2,08	0,72	24,31	12,16
Ca	-2,87	2073	1337	5	1,00	40,08	20,04
Zn	-0,76	5851	820	0,008	0,74	65,39	32,7
Al	-1,66	8046	2980	8,2	0,535	26,98	8,99

Tabla 2. Relación masa/carga de los elementos metálicos utilizados en los sistemas de baterías. (Fuente: Internet).

El peligro de la proliferación del litio y el ahorro que supone nos puede llevar a un submarino mediano y económico (25), puro eléctrico con baterías de litio, muy silencioso, más que los *Gotland* suecos con el AIP Stirling, que ya pusieron en jaque a la US Navy. Los rusos lo saben, y por eso Igor Vilnit, director general de los astilleros Rubin, ya lo adelantó en 2013 (26):

«Para los submarinistas, la batería siempre ha sido, y sigue siendo, un tema muy especial. Las baterías de ácido producen hidrógeno. Es por eso por lo que hay reglas estrictas para controlar su uso en los submarinos. La batería Li-Ion, que Rubin ha desarrollado, no tiene ese inconveniente. Ya hemos probado sus elementos en cargas cortas, descarga rápida y alta tensión. El resultado de estas pruebas permite afirmar que la nueva batería funciona bien. No tenemos duda de que el próximo año 2014 lograremos completar el desarrollo de la batería de litio para nuestros submarinos.»

Entramos en un futuro donde convivirán enjambres de minidrones submarinos (27) con submarinos pequeños no tripulados (28), y disponer de una planta eléctrica de gran autonomía, buenas prestaciones y poco mantenimiento es fundamental.

(25) GUERRERO, A. (2020): «Submarinos: el siguiente paso de la Marina de Guerra de Marruecos». *Global Strategy*. Disponible en: <https://global-strategy.org/submarinos-el-siguiente-paso-de-la-marina-de-guerra-de-marruecos/> (consulta 10/03/2020).

(26) KARNOZOV, V.: *op. cit.*, p. 41.

(27) ALLEN, C. y Allen, C. (2018). 20,000 Drones Under the Sea. *Proceedings*. Disponible en: <https://www.usni.org/magazines/proceedings/2018/july/20000-drones-under-sea> (Consulta 10/03/2020).

(28) SUTTON, H. I. (5-3-2020): «Royal Navy To Get First Large Autonomous Submarine». *Forbes*. Disponible en: <https://www.forbes.com/sites/hisutton/2020/03/05/royal-navy-to-get-first-large-autonomous-submarine/#4c0c540d1f0b> (consulta 10/03/2020).

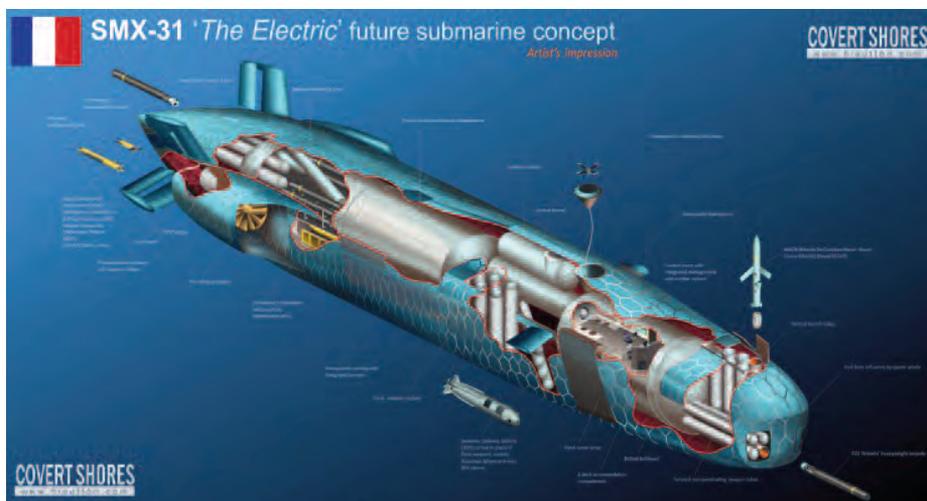


Fig. 12. Vista del submarino *SMX-31* de litio propuesto por Naval Group en la Euronaval de París en 2018. (Fuente: H. I. Sutton).

Conclusiones

Los científicos siguen buscando desde hace mucho tiempo la manera de incrementar la capacidad anaeróbica de los submarinos, bien con propulsión AIP, nuclear o con innovadoras baterías de gran capacidad que reemplacen a las clásicas de plomo ácido; es el sueño del hombre desde que Narciso Monturiol nos planteara el problema de la navegación submarina.

En la actualidad, si se pretende un sumergible no nuclear con 15 o más días de autonomía en inmersión, que pueda llegar incluso a las tres semanas, como está demostrando en el AIP del *S-80*, es necesario disponer de un AIP de reformado. Este sistema es en el que están trabajando tres de los principales fabricantes de submarinos —Navantia, TKMS y Naval Group—, si bien solo Navantia dispone de un proyecto diseñado ex profeso, el *S-80*, mientras que el resto son solo desarrollos.

Los datos que tenemos de litio para submarinos, Saft y Hanwha, dibujan una pila de 100 o 200 Wh/kg, que puede proporcionar entre cuatro y ocho días de autonomía a velocidades bajas. Además de España, Francia y Alemania —los máximos exportadores occidentales—, Rusia, empieza a pensar en el litio para su clase *Lada*.

El submarino con baterías de litio es ya una realidad, aunque aún esté en pruebas de prototipo. No tenemos datos de su autonomía y prestaciones, tampoco si emplea batería de iones de litio, litio-azufre u otra combinación de materiales que pueda superar los 200 Wh/kg.

Corea del Sur se unirá pronto a este selecto grupo. Navantia les sigue de cerca, controlando la evolución de esta tecnología y pensando en futuros desarrollos. Se trata de un sector en constante evolución y mejora. La apuesta de Navantia es aunar litio y AIP —conseguir las ventajas del litio con una mayor autonomía gracias al AIP del reformador de bioetanol— en un submarino de menor desplazamiento.

La superioridad de las baterías de litio frente al plomo ácido en autonomía, prestaciones, tiempos de carga, vida y mantenimiento van a dejar pronto obsoletas a las actuales en nuestros submarinos. Sin embargo, el litio no está libre de incertidumbres; los riesgos de seguridad (incendio y explosión), junto con la gran variedad de materiales usados como ánodo y cátodo, son cuestiones todavía abiertas que necesitan investigaciones adicionales para su implantación de manera estandarizada y segura a bordo.

Dentro de diez años se habrán superado los 200 Wh/kg y tendremos submarinos muy competitivos y baratos, que pueden terminar en terceros países que sueñan con tener este tipo de arma. Además, el litio es garantía de éxito en el mercado de los submarinos autónomos. La Armada debe empezar a pensar en un submarino de tamaño medio no tripulado con las capacidades de los convencionales, como la serie S-70.

