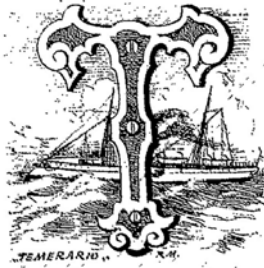


¿LITIO O PLOMO?

José Luis BERNAL SÁNCHEZ



ODOS los submarinistas del mundo tenemos la misma deformación profesional y buscamos hacer de la discreción un arte. Es, sin duda alguna, el arma más letal del submarino, el factor sorpresa, la suposición, pero nunca la confirmación de que estás ahí, acechando bajo las aguas. A pesar de que la tecnología y las armas antisubmarinas (ASW) son cada vez más sofisticadas, es curioso que el 80 por 100 de las detecciones se producen a la vista; esto solo es posible cuando el submarino se encuentra en cota periscópica, su posición más vulnerable pero a la vez necesaria, pues debe situarse cerca de la superficie para el empleo de ciertos sensores, comunicarse con el mando u otras unidades y, en el caso de los submarinos convencionales, cargar baterías.

Los submarinistas buscamos permanecer en cota periscópica el mínimo tiempo posible; es una situación incómoda y en la que nos preguntamos continuamente si la exposición a la que estamos sometidos nos está revirtiendo algún beneficio y cómo es esa relación riesgo/beneficio. En definitiva, cuanto más rápido y eficiente sea un submarino en realizar operaciones en cota periscópica, más discreto será. En este aspecto, el factor más limitante de los submarinos convencionales es la recarga de las baterías, ya que implica una elevada indiscreción tanto a nivel acústico como visual y durante un tiempo elevado.

Los submarinos convencionales presentan varias opciones en lo que a almacenamiento y producción de energía se refiere, cada una con sus ventajas e inconvenientes:

- Baterías de plomo-ácido.
- Baterías de litio.
- Propulsión independiente de la atmósfera (AIP) (1).

(1) A fin de no extender el artículo y por no ser el objetivo, no se desarrollarán los sistemas AIP. Destacar que existen tres tipos de AIP —célula de combustible, turbina Stirling y *Module*



El *Tramontana* (S-74) y el *Isaac Peral* (S-81) navegando juntos el 31 de mayo de 2022, la primera vez que coincidían las dos clases de submarinos en la mar. (Fuente: FLOSUB)

El propósito de este artículo es hacer un breve resumen de todas ellas, compararlas e intentar aplicar la más eficiente, siempre teniendo en cuenta que algunas de las tecnologías tratadas en el artículo son muy novedosas (2), por lo que, aunque aproximadas, las conclusiones extraídas no pueden considerarse como ley.

Baterías de litio frente a las de plomo-ácido

Las baterías de plomo-ácido son las más extendidas entre los submarinos convencionales. Son acumuladores ampliamente probados (3) y su empleo a

d'Energie Sous-Marin Autonome (MESMA)—. Todos ellos generan una potencia energética similar (alrededor de los 200 kW). Un submarino convencional navegando a velocidad baja consume alrededor de 200 kW entre su motor principal, sus auxiliares y su sistema de combate, lo que permite la operación del submarino a bajas velocidades sin descargar la batería principal. Todos precisan de la reacción de elementos químicos inestables que deben ser controlados de manera continua para evitar accidentes.

(2) Como es el caso de las baterías de litio de los submarinos clase *Soryu*, únicas dos unidades del mundo con este tipo de baterías, o el AIP del submarino *S-80*, que aún no ha sido probado.

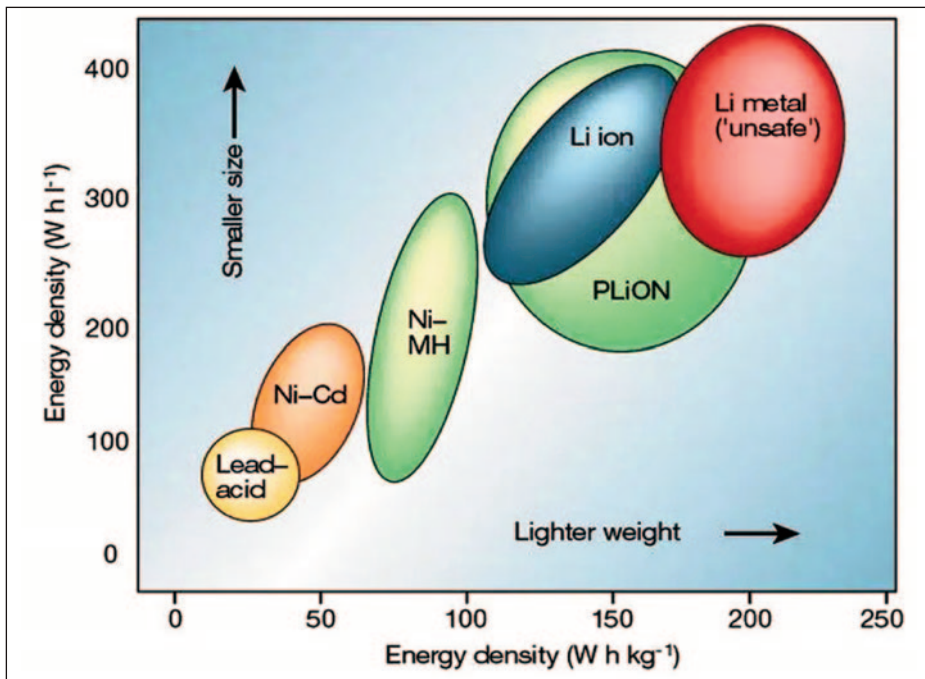
(3) El submarino *Peral* de 1889, desarrollado por el célebre marino Isaac Peral, ya se propulsaba mediante una batería de plomo-ácido.

bordo es seguro. No obstante, las capacidades que ofrecen son limitadas frente a los nuevos desarrollos de baterías a base de iones de litio, las cuales, en contraposición a las de plomo, se encuentran operativas en tan solo dos submarinos convencionales, las dos últimas unidades de la clase *Soryu* (Japón).

Ventajas

Las baterías de litio ofrecen las siguientes ventajas frente a las de plomo-ácido (4):

- Mayor energía almacenada por unidad de peso y volumen. Las baterías de litio son más ligeras, más pequeñas y, a pesar de ello, tienen una



Densidad energética de los diversos materiales empleados en la elaboración de baterías.
(Fuente: www.wikipedia.org)

(4) Los datos y porcentajes que a continuación se relacionan han sido obtenidos mediante cálculos basados en un mismo volumen de cajón de baterías y un mismo consumo del submarino al que suministran energía.

mayor densidad energética. Esto significa que en el mismo espacio se obtiene un 50 por 100 más de energía empleando litio que con plomo-ácido.

- Tiempos de carga más cortos. Las de litio pueden cargarse a tensión constante sin necesidad de reducir la intensidad de corriente conforme se va cargando el acumulador, al contrario de lo que ocurre con las baterías de plomo. Esto se traduce en un tiempo de carga más corto, ya que los diésel-generadores se encuentran al 100 por 100 de su capacidad durante todo el esnórquel. En el caso del plomo, los diésel-generadores van reduciendo la intensidad de carga progresivamente conforme los elementos se van cargando.
- Tiempos de descarga más largos (mayor capacidad útil). Por seguridad, las baterías no se pueden descargar por debajo de un cierto porcentaje para que en caso de emergencia el submarino siempre disponga de un remanente energético que le permita salir de una situación comprometida. Como se ha reseñado unas líneas más arriba, las baterías de litio cuentan con una mayor densidad energética, por lo que un remanente del 40 por 100 en una de plomo supone la misma energía almacenada que un remanente de alrededor el 20 por 100 en una de litio.
- Mayor rendimiento. Este punto está relacionado con los dos anteriores: tiempos de carga más cortos y tiempos de descarga más largos se traducen en un mayor rendimiento de la batería. Si quisiéramos trasladar esto a porcentajes, estaríamos hablando de un rendimiento del 99 por 100 en las baterías de litio frente a un 87 por 100 en las de plomo-ácido. Hay que añadir que este mayor rendimiento se traduce en un menor consumo de combustible (un 12 por 100 menos).
- Bajo nivel de autodescarga. Cualquier acumulador por efecto de la química interna de sus placas tiende a descargarse progresivamente aunque esté en reposo. Este efecto es sensiblemente menor en el litio que en el plomo (3 por 100 de descarga al mes frente al 10 por 100 del plomo-ácido).
- Menor coeficiente de indiscreción. Dado que con las baterías de litio las descargas son más lentas y las cargas más rápidas, los tiempos de indiscreción se reducen.
- Mayor redundancia. Ambas baterías tienen distintos tipos de conexionado. Con el plomo, todos los elementos de un cajón de baterías están conectados en serie, por lo que si se produce un cortocircuito se pierde todo el cajón. Esto supone la pérdida del 50 por 100 de la energía disponible (5) hasta que se puentee el elemento cortocircuitado. En el hipotético caso de que el submarino se encontrase con los cajones de batería en serie

(5) La mayoría de los submarinos convencionales tienen dos cajones de baterías y la pérdida de uno supone malograr el 50 por 100 de la energía disponible.

para hacer frente a una mayor demanda de energía, el fallo de un solo elemento provocaría un *black-out*. En el caso del litio, el conexionado en *string* (6) provoca una gran redundancia y el mismo fallo descrito más arriba produciría una pérdida de energía del 0,3 por 100.

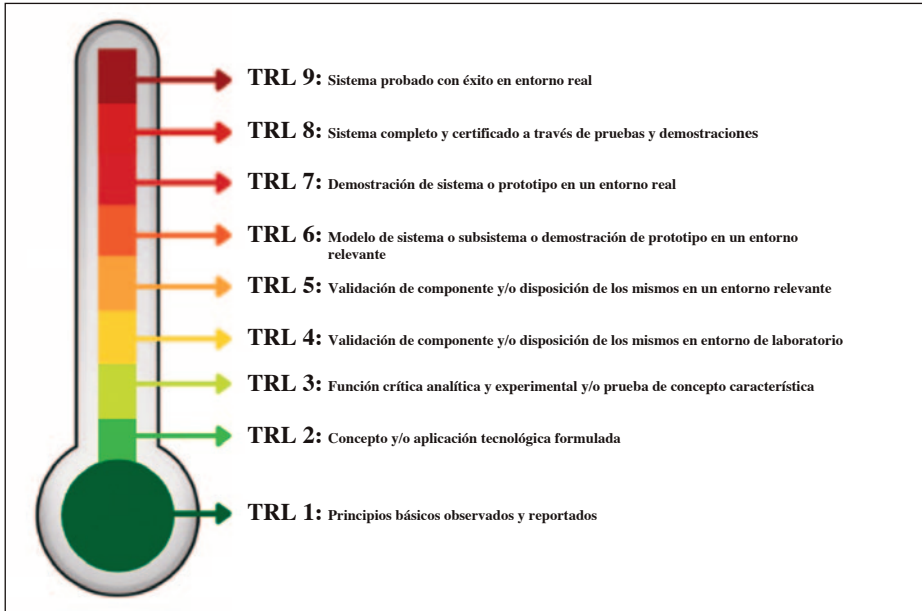
- Menor mantenimiento (elementos sellados). Las baterías de litio, a diferencia de las de plomo, están compuestas por elementos sellados, por lo que el operador no puede acceder a las celdas para comprobar la densidad del electrolito. Esto implica mayor grado de seguridad para el personal, pues no hay motivos para acceder al cajón de baterías (un espacio confinado) mientras el buque se encuentra navegando en inmersión. Además, esto redundaría en menor grado de mantenimiento, pues el elemento es estanco y no se puede manipular y no hace falta añadirle agua desionizada para rellenar el electrolito, como ocurre con las baterías de plomo.
- Menor necesidad de elementos auxiliares. Las baterías de plomo-ácido precisan de ciertos elementos auxiliares para su operación segura a bordo de submarinos. Por ejemplo, tanto en la carga como en la descarga las reacciones químicas que se producen en las baterías de plomo liberan gases nocivos para la salud y explosivos a partir de ciertas concentraciones (7). Esto obliga a contar con un sistema de ventilación que disipe estos gases en el volumen total de la atmósfera del submarino. Además, las de plomo tiende a calentarse mucho, sobre todo en descargas o cargas con gran intensidad de corriente, por lo que están equipadas con un sistema de refrigeración mediante agua desionizada. Algunos de estos sistemas auxiliares no son necesarios con las baterías de litio, lo que redundaría en un menor consumo por parte de sistemas auxiliares y, por lo tanto, en un mejor aprovechamiento de la energía de la batería.
- Mayor vida útil. Duración de más de diez años frente a los siete que ofrecen las de plomo-ácido. Esto puede suponer sustituir la batería cada dos grandes carenas en lugar de cada una.

Inconvenientes

El gran problema que tienen las baterías de litio, además de su precio, estriba en el nivel de madurez de la tecnología (TRL). Hasta la fecha, y como se ha

(6) Este tipo de conexionado combina celdas de batería en paralelo con otras en serie, mientras que el conexionado que se lleva a cabo en las de plomo-ácido conecta todas las celdas en serie.

(7) Las baterías de plomo-ácido liberan hidrógeno, que es nocivo para la salud y explosivo en presencia de chispa o llama a partir de concentraciones superiores al 4 por 100.



Nivel de madurez de la tecnología (*Technology Readiness Level*). (Fuente: internet)

mencionado anteriormente, tan solo la multinacional GS Yuasa ha conseguido obtener un TRL 9 para que sus baterías de litio se operen a bordo de los submarinos *Oryu* (SS-511) y *Toryu* (SS-512), los dos últimos de la clase *Soryu*. El resto de fabricantes, entre los que se encuentra SAFT (filial de Total y que trabaja con TKMS, Naval Group y Navantia) están en un TRL 6.

La dificultad de embarcar baterías de litio en submarinos radica en varios puntos que a continuación relaciono:

- Medidas de seguridad. Estas baterías tienen ciertos peligros (8), entre ellos la producción de gases explosivos o su calentamiento excesivo —conocido como *thermal runaway*—, que puede derivar en un incendio. Actualmente, existen multitud de sistemas para evitar estos fenómenos y atacarlos si se producen. Ahora bien, deben alcanzar el mencionado TRL 9 antes de ser embarcadas en un submarino.
- Dificultad técnica del sistema de gestión de la batería. Las baterías de plomo-ácido cuentan con un sistema de vigilancia que se encarga de

(8) KONG, Lingxi; LI, Chuan; JIANG, Jiuchun; PECHT, Michael G. (2018): «Li-Ion Battery Fire Hazards and Safety Strategies». *Energies*, vol. 11.

monitorizarlas. El cambio al litio supone el desarrollo de un sistema que no solo sea capaz de vigilarlas, sino de gestionarlas, algo que requiere mayor complejidad técnica.

- Mayor precio. La compra de una batería de litio frente a una de plomo-ácido supone un mayor desembolso (aproximadamente el doble). No obstante, la de litio precisa de menos sistemas auxiliares y sus elementos están sellados, lo que significa menos mantenimiento; además, como se ha mencionado anteriormente, las cargas son más rápidas y las descargas más lentas, por lo que el ahorro de combustible es considerable (un 12 por 100 menos). Por último, la vida útil de la batería se amplía hasta casi duplicarse, por lo que no sería descabellado que se cambiase cada dos grandes carenas y no cada gran carena, como sucede con la de plomo-ácido.

En definitiva, la batería de litio es más cara en el momento de la compra, es cierto, pero a lo largo de su ciclo de vida la de plomo-ácido resulta más costosa.

El caso japonés

Hasta la fecha, solo hay un país que haya alcanzado un nivel suficiente de madurez de la tecnología (TRL 9) como para embarcar baterías de litio a bordo de submarinos (9).

El Arma Submarina de la Fuerza Marítima de Autodefensa de Japón está compuesta por 12 submarinos, todos de la clase *Soryu*. Se trata de las unidades convencionales más grandes del mundo, con 84 metros de eslora y 4.200 toneladas de desplazamiento en inmersión (los *S-80* tienen 81 metros de eslora y desplazan 3.000 toneladas en inmersión). De ellos, los primeros diez cuentan con baterías de plomo-ácido, dos diésel-generadores de 1.300 kW de potencia y cuatro turbinas Stirling, es decir, cuatro sistemas AIP. Por el contrario, los dos últimos de la clase presentan una configuración propulsora diferente y sustituyen las baterías de plomo y el sistema AIP por baterías de litio. El submarino es el mismo, tan solo se aprovecha el espacio libre que dejan las baterías y el AIP para ocuparlo con litio, tal y como puede verse en las infografías de la disposición interior de ambas series de barcos.

Obviamente, no dispongo de información fidedigna en cuanto a la variación energética que se ha experimentado el *Soryu* Serie 1 respecto a la Serie 2. No

(9) Los submarinos clase *Jang Bogo-III* de la Marina surcoreana incorporan una batería de iones de litio. Se encuentran actualmente en construcción y se espera que la primera unidad sea entregada en 2026.



Submarino *Soryu* (SS-501), el primero de su serie. Su nombre significa Dragón Azul.
(Fuente: internet)

obstante, las infografías de este submarino con las que Navantia hace sus presentaciones acerca del Programa Balit (10) nos indican que la capacidad energética estimada del *Soryu* Serie 2 es de 76.800 kWh (11). A partir de este dato y realizando una serie de cálculos en base a la capacidad energética del litio y del plomo, así como de las dimensiones aproximadas de los cajones de baterías de una y otra serie, se puede establecer con un grado de confianza razonable lo siguiente:

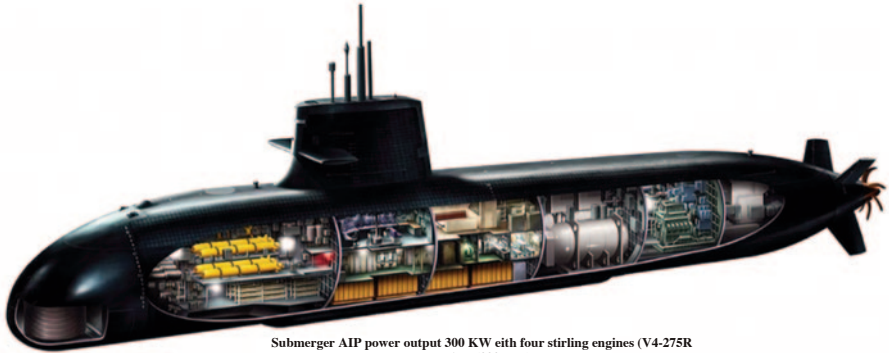
— *Soryu* Serie 1 (SS-501 - 510):

- Baterías de plomo-ácido: 22.000 kWh.
- Sistema AIP: 300 kW.
- Diésel-generadores: 1.300 kW cada uno (2.600 kW en total).

(10) En este programa se estudia la clase *Soryu* por la novedosa sustitución de plomo por litio en una misma clase de submarino. Además de en el Programa Balit, estas dos infografías se encuentran disponibles en numerosas páginas de internet y en este mismo artículo.

(11) El autor desconoce de dónde se ha obtenido este dato o quién es el autor de la citada infografía. No obstante, sabiendo la densidad energética de las baterías de litio y las dimensiones aproximadas de los cajones de batería de los *Soryu* (obtenidas en base a su eslora y su manga), puede afirmar que tiene sentido.

AIP Stirling engines Soryu class submarine SS-501—SS-510



Submerger AIP power output 300 KW cith four stirling engines (V4-275R
It has submerger AIP (300 KW) speed o 7 knots

Maximum fully submerged speed and time by AIP
AIP Soryu 5 knots: 440 h 18 days 2.200 nm (4,074 km)
AIP Type 212 8 knots: 45 h 2 days 365 nm (676 km)
AIP Type 212 4 knots: 339 h 14 days 1.356 nm (2511 km)
AIP Type 214 4 knots: 312 h 13 days 1.248 nm (2,300 km)

Li-S batteries Soryu class submarine SS-511—SS-512



All-solid-state
Lithium-sulfur batteries (Li-S) 230, 400 kWh

Submarine electric motor 8,000 hp (6,000 kW)
maximum fully submerged speed and time

5 knots: 2,094 h 87 days 10,470 nm (19,390 km)
7 knots: 802 h 33 days 5.61 nm (10,397 km)
10 knots: 284 h 12 days 2.841 nm (5,261 km)
15 knots: 90 h
20 knots: 39 h

(LiB) 2010 ~
100 Wh/kg
76,800 Wh

(Li-S) 2000 ~
500 Wh/kg
384,000 kWh

Sil-solid-state
(Li-S) 2020 ~
300 Wh/kg

230,400 Wh

Infografías que muestran la disposición interior de los submarinos clase *Soryu*, primera y segunda series. (Fuente: internet)

— *Soryu* Serie 2 (SS-511 - 512):

- Baterías de litio: 77.000 kWh.
- Diésel-generadores: 1.300 kW cada uno (2.600 kW en total).

Ya tenemos una aproximación suficiente de las capacidades de la plataforma; ha llegado la hora de tocar Babor y Estribor de Guardia y hacernos a la mar. Si nos encontrásemos en un *Soryu* de la primera serie, contaríamos con los siguientes tiempos de carga y descarga (12):

- Tiempo de descarga (sin AIP, solo batería): 48 h (dos días). Descargando hasta el 40 por 100 de capacidad de batería, quedando un remanente de 8.800 kWh por seguridad (13).
- Tiempo de descarga (con AIP): 384 horas (16 días). Descargando hasta el 40 por 100 de capacidad de batería, quedando un remanente de 8.800 kWh por seguridad (14).
- Tiempo de carga (mediante diésel-generadores, partiendo de un 40 por 100 de capacidad de batería): 6 horas y 50 minutos.

A continuación, procederé a compararlos con los tiempos de la Serie 2 para una descarga idéntica; esto es, 13.200 kW (22.000 kW - 13.200 kW = 8.800 kW).

En el caso del *Soryu*, equipado con baterías de litio, una descarga de 13.200 kW equivaldría a un consumo del 18 por 100 de la batería, quedando un remanente del 82 por 100 (77.000 kW - 13.200 kW = 63.800 kW):

- Tiempo de descarga: 48 horas (dos días). Es el mismo, ya que los consumos no han variado; da igual que las baterías sean de plomo o de litio, un consumo de 275 kW/h supone una descarga de 13.200 kW en 48 horas (15).
- Tiempo de carga (mediante diésel-generadores, partiendo de un 82 por 100 de capacidad de batería): cinco horas, o sea una hora y 50 minutos más rápida que mediante baterías de plomo (16).

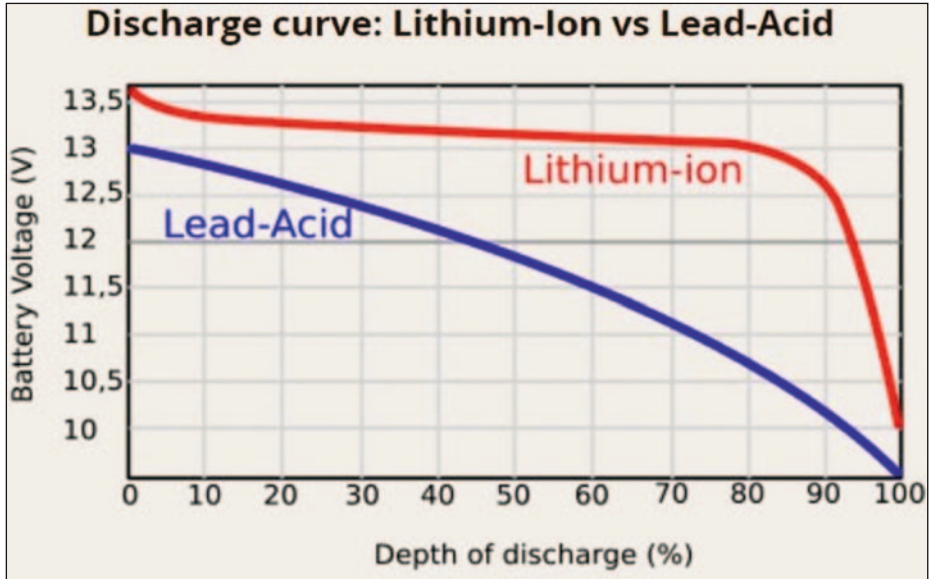
(12) Para este cálculo se ha asumido una velocidad de cinco nudos, unos 275 kW de consumo del motor principal, teniendo en cuenta que este es de una potencia de 6.000 kW (según lo establecido en fuentes abiertas).

(13) Los submarinistas jamás consumimos al 100 por 100 la batería, siempre se deja un remanente para poder salir de una situación complicada, como una vía de agua o un incendio, para llegar a superficie.

(14) Para este cálculo se ha asumido una autonomía de 14 días de AIP para unas condiciones de navegación similares a las del punto anterior, más las 48 horas de la batería.

(15) No obstante, en la primera serie descargamos el acumulador hasta el 40 por 100 de su capacidad, mientras que en la segunda serie la misma descarga ha supuesto quedarnos con el 82 por 100 de remanente de energía.

(16) La capacidad del litio para admitir corriente a intensidad constante presenta cargas más rápidas que con el plomo, donde el acumulador admite menor cantidad de corriente conforme se va cargando.



Gráfica que muestra el comportamiento de la tensión (V) de una y otra batería a medida que se van descargando. (Fuente: <https://www.thepilotgroup.co.uk/lithium-ion-battery-vs-lead-acid-battery/>)

Como puede verse, al llevar a la «práctica» una serie frente a la otra, podemos observar que, ante una descarga y una carga de la batería equivalente, el litio tiene un mejor comportamiento que el plomo, se descarga más lentamente y se carga más rápido. Además, como se aprecia en la gráfica sobre estas líneas, el litio mantiene un voltaje mayor y muy estable a lo largo de la descarga, a diferencia del plomo, que sufre una progresiva caída de tensión conforme se va descargando el acumulador (17).

Al nunca antes haber «navegado» con baterías de litio, me he permitido llevar a cabo otras dos simulaciones, dos operaciones que los submarinistas solemos realizar a menudo, una patrulla de inteligencia y una acción antisuperficie/antisubmarina (ASUW/ASW).

A continuación, se expone una patrulla de inteligencia con 10 días de permanencia en la zona de operaciones a un régimen de velocidades bajo (alrededor de cuatro o cinco nudos, un consumo de 275 kW/h):

(17) La gráfica compara baterías instaladas en automóviles. No obstante, es perfectamente equiparable a una batería a bordo de un submarino.

- Tiempo de descarga: 249 h (10 días y medio). Descargando hasta el 11 por 100 de capacidad de batería, quedando un remanente de 8.470 kWh por seguridad (18).
- Tiempo de carga (mediante diésel-generadores, partiendo de un 11 por 100 de capacidad de batería): 26 horas.

Como puede verse, el submarino habría permanecido en la zona de operaciones diez días seguidos sin más exposición que aquellos mástiles que necesitase en cada ocasión para la recolección de inteligencia (19). El no haber tenido que hacer esnórquel le otorga una discreción clave a la hora de realizar labores de inteligencia.

Una vez alcanzados los objetivos de inteligencia y con el submarino ya fuera de la zona de operaciones, en aguas abiertas, podría llevar a cabo la carga de 26 horas cuando la posibilidad de ser contradetectado sea mucho menor.

Veamos ahora los tiempos de carga y descarga en una acción ASUW/ASW. Para someter a la batería a una mayor demanda, he supuesto una acción de 12 horas contra una o varias fragatas y/o aeronaves, donde el submarino se vea obligado a hacer uso de grandes velocidades en períodos de tiempo determinados (velocidad baja, 275 kW/h de consumo durante seis horas, y de 2.000 o 3.000 kW/h, es decir, alrededor de 12 nudos, durante otras seis horas):

- Tiempo de descarga: 12 horas (el tiempo de la acción). Se descargan 22 puntos porcentuales de la batería (17.000 kW), quedando un remanente de 60.000 kW, el 78 por 100.
- Tiempo de carga (mediante diésel-generadores, partiendo de un 78 por 100 de capacidad de batería): 6 horas y 30 minutos.

Después de una acción tan larga, es normal que el submarino disponga de ese tiempo (seis horas) para reposicionarse y comenzar la siguiente (20); si no fuera así, un 78 por 100 de la capacidad de batería se me antoja más que suficiente para afrontar otra acción de similares características.

En este ejemplo, la ventaja que ofrece el litio frente al plomo es sustancial, puesto que otorga a la plataforma algo que los submarinos convencionales han ansiado desde siempre, velocidad.

(18) Nótese que dejamos prácticamente la misma cantidad de energía remanente que en los casos anteriores.

(19) Periscopio oprónico para la inteligencia de imágenes (IMINT), mástil de medidas electromagnéticas (ESM) para inteligencia de señales electromagnéticas (ELINT) o el mástil de comunicaciones para inteligencia de comunicaciones (COMINT).

(20) Si no el comandante dispondría de al menos tres horas, pudiendo cargar la batería hasta el 89 por 100 (estimaciones basadas en la experiencia del autor en ejercicios antisubmarinos OTAN como los DYNAMIC MANTA).

El AIP aumenta la capacidad de la batería, pero con una «coletilla», a velocidades bajas. Sin embargo, el litio se muestra en este caso decisivo, permite al submarino el empleo de velocidad en momentos puntuales sin que la capacidad de la batería se vea ampliamente degradada (21). Esto, en una acción contra unidades de superficie, es decisivo, bien sea al posicionarse para atacar o al evadirse en caso de ser contradetectado.

El caso español

Este año 2023 tendrá lugar la entrega a la Armada del primer submarino S-80, el *Isaac Peral* (S-81), que por dimensiones y capacidades se asemeja mucho al *Soryu*.

A diferencia de lo que me ocurría con el *Soryu*, en esta ocasión no tengo que realizar cálculos de cuánta puede ser la densidad energética de sus baterías o del AIP, ya que conozco el barco perfectamente, estoy destinado a bordo. Como es lógico, no voy a dar datos en fuentes abiertas y me limitaré por tanto a lo que viene reflejado en internet.



El *Isaac Peral* (S-81) durante su primera salida a la mar el 27 de mayo de 2022.
(Autor: José Damián González Martínez, FLOSUB)

(21) Como ocurre con el plomo-ácido.

Clase <i>Soryu</i>	
Desplazamiento en inmersión	4.200 t
Eslora	84 m
Manga	9,1 m
Calado	8,5 m
Propulsión (generación de energía)	Dos motores diésel-eléctricos Kawasaki 12 V 25/25 + 4 motores Stirling Kawasaki Kockums V4-275R
Dotación	66 personas
Clase <i>Isaac Peral</i>	
Desplazamiento en inmersión	3.000 t
Eslora	81,05 m
Manga	11,68 m
Calado	6,02 m
Propulsión (generación de energía)	Tres motores diésel-generadores MTU 15V 369 SE-84L-GB31L + Sistema AIP <i>Fuel Cell</i>
Dotación	66 personas

Las diversas fuentes consultadas coinciden en que el *S-80* es capaz de permanecer alrededor de dos días en inmersión dependiendo únicamente de sus baterías de plomo-ácido, mientras que puede aguantar hasta 21 días haciendo uso del AIP (22).

Como puede verse, al compararse con la clase *Soryu*, el *S-80* dispone de la misma permanencia en inmersión al depender de sus baterías. Por el contrario, esta se ve aumentada si comparamos el sistema AIP de uno y otro buque (turbina Stirling frente a *Fuel Cell*) (23).

Ahora bien, ¿qué ocurriría si «japonizáramos» el *S-81* y en su primera gran carena sustituyéramos el plomo por el litio? El proyecto Balit de Navantia, en

(22) El AIP estará disponible a partir de 2026 para la tercera y cuarta unidades, mientras que será instalado a bordo de los *S-81* y *S-82* a partir de 2030, durante la primera gran carena de ambos buques.

(23) Cabe recordar al lector que la permanencia que otorga el AIP del *S-80* es teórica, aún no ha sido probada y que la permanencia del *Soryu* reflejada en este artículo es fruto del cálculo del autor.

colaboración con SAFT (24), es un estudio de I + D que busca instalar baterías de litio en un submarino convencional, ya sea en un proyecto ya desarrollado, como el *S-80*, o en un futuro *S-90*. Si esto llegara a materializarse en el *S-80*, se convertiría en el primer submarino del mundo en combinar baterías de litio y un sistema AIP, ya que por sus dimensiones y configuración propulsora se muestra idóneo para un cambio de plomo por litio:

- Por su tamaño. Es uno de los submarinos convencionales más grandes del mundo, algo menor que el japonés pero equiparable a este. Esto significa que el volumen de sus compartimentos de baterías es muy grande y que por lo tanto puede almacenar gran cantidad de células de litio; sumado a la mayor densidad energética que ofrece el litio frente al plomo, convertiría al *S-80* en un submarino con una capacidad de batería un 50 por 100 superior (25).
- Por su capacidad de generar energía. Su planta generadora es de mayor potencia que la del *Soryu*. Si los japoneses cuentan con dos diésel-generadores, el submarino español tiene tres y de una potencia similar. Esto se traduce en un 30 por 100 más de potencia a favor del español.

Con una batería de litio, el *S-80* podría permanecer más tiempo sumergido tan solo dependiendo de su batería, pudiendo incluso doblar los dos días establecidos por la de plomo-ácido. Además, el submarino seguiría disponiendo de la ventaja de permanencia que otorga el AIP a velocidades bajas.

Por último, la capacidad de recarga de sus baterías mediante los diésel-generadores se vería aumentada, ya que, como se ha comentado anteriormente, las de litio pueden cargarse a tensión constante sin necesidad de reducir la intensidad de corriente conforme se va cargando el acumulador (26), lo que resultaría en esnórquel más cortos, ya que se puede emplear el 100 por 100 de la potencia generada por los diésel.

En definitiva, una japonización del *S-80* resultaría en un submarino más discreto y con una mayor capacidad de velocidad sin una descarga sustancial de la batería.

Discreción y velocidad: lo primero, el sino del submarinista; lo segundo, algo siempre buscado pero que hasta ahora no era posible.

(24) SAFT es una empresa filial de Total y que ha realizado estudios similares para otros astilleros constructores de submarinos como TKMS (Alemania) y Naval Group (Francia).

(25) Tanto es así que el programa de I + D de Navantia (Balit) no contempla sacrificar el sistema AIP para dejar sitio al litio.

(26) Al contrario de lo que ocurre con las de plomo, que ven reducida la intensidad de carga conforme se van acercando al 100 por 100.

Otras alternativas al litio

Las baterías de iones de litio son las más extendidas en la industria tecnológica. Sus aplicaciones son infinitas, desde su empleo en la electrónica de consumo (móviles, tabletas, portátiles) hasta su instalación en coches eléctricos, una industria que está creciendo de forma meteórica. Esto se debe principalmente a las ventajas que se han mencionado anteriormente, entre las que destaca sobremanera su alta densidad energética, todavía no superada por ningún otro material.

Sin embargo, no es litio todo lo que reluce; la gran demanda que ha experimentado el metal en los últimos años ha provocado que su precio se haya disparado, que cada vez sea más difícil de conseguir y que se empiece a temer por las reservas que tiene el planeta (27).

Baterías de estado sólido

Actualmente las baterías de litio utilizan un electrolito líquido que permite el desplazamiento de los átomos entre los electrodos. La industria se halla en pleno desarrollo de baterías que sustituyan el electrolito en estado líquido por uno sólido a base de iones capaz de soportar mayores voltajes y esfuerzos. Las baterías de litio en estado sólido ofrecerán una mayor densidad energética con un peso muy reducido (lo que permitirá almacenar más elementos en un mismo vehículo).

Además, se ven mejorados otros aspectos que no son menores, como una reducción de autodescarga y una mayor seguridad al ganar la estabilidad química, algo que no puede ofrecer un líquido. Este último punto la hace especialmente idónea para su embarque en submarinos.

Baterías de sulfuro de litio (azufre + litio)

Las baterías de litio-sulfuro (Li-S) son otra tecnología que, a pesar de utilizar litio en su composición, aspiran a sustituir a las actuales de iones de litio.

A diferencia de lo que ocurre con una batería de litio convencional, el acumulador de litio-sulfuro no mueve iones de un lado a otro utilizando un electrolito líquido, sino que al descargarse consume el ánodo de litio y el cátodo de azufre, dando lugar a una reacción química que libera energía. No emplean un electrolito líquido, por lo que son cuatro veces más densas que las actuales baterías de litio. En definitiva, presentan las siguientes mejoras frente al litio:

(27) Diferentes estudios exponen que, de mantenerse el ritmo de consumo actual, el planeta tiene reservas de litio suficiente para 70 años.

- Se encuentran muy próximas a las baterías de estado sólido, con las ventajas que estas ofrecen.
- Su ligereza las convierte en una opción muy interesante a bordo de submarinos, donde es imprescindible vigilar el peso y el espacio del conjunto de la batería.
- Al ser el azufre un material más abundante y barato que el litio, serían más sencillas de industrializar y producir.
- Tienen una menor toxicidad que las de litio, lo que las convierte en más seguras para su embarque en submarinos, aparte de que son más respetuosas con el medio ambiente.
- Sin embargo, existen dos aspectos que aún deben mejorar y que hasta ahora han impedido su eclosión en la industria. Por un lado, la alta degradación que presenta el cátodo de azufre, lo que le lleva a una vida útil muy limitada. Por otro, su baja densidad volumétrica, que por ahora acota su uso en aquellas aplicaciones en las que el espacio pueda ser limitado.

Baterías de iones de sodio

Hemos visto distintas evoluciones de acumuladores, pero todos con una característica común: emplean litio en mayor o en menor medida. Sin embargo, esta no es la única alternativa, pues las baterías a base de sodio son cada vez más populares. Una popularidad que va en aumento, sobre todo después del anuncio de CATL —principal proveedor de baterías del mundo (28)— el pasado mes de julio, en el que confirmó su intención de comenzar la industrialización de esta tecnología a gran escala a partir de este mismo año 2023.

Además de CATL, la compañía americana Natron también ha informado de que comenzará a fabricar este tipo de baterías a partir de 2023. A este anuncio ha añadido que su diseño ofrece una fuerte densidad de potencia volumétrica entre la del plomo-ácido y la del litio-ion, con una carga súper rápida en tan solo ocho minutos y una vida útil enorme, 25 veces mayor que la de los competidores de litio-ion.

Las grandes fortalezas de las baterías de sodio son:

- Capacidad de realizar cargas rápidas.
- Menor coste por mayor cantidad de sodio disponible frente a litio.
- Mayor sostenibilidad.

(28) La firma china se ha colocado por quinto año consecutivo como el mayor proveedor de baterías para coches del mundo (una de cada tres son suyas), proveyendo a marcas como Tesla, Nio o Volkswagen. CATL fabrica baterías para toda clase de vehículos, desde pequeñas motocicletas hasta buques de gran porte.

	Baterías de sodio-ion	Baterías de Li-S	Baterías de aluminio-ion	Baterías de potasio-ion
Pros	Capacidad de realizar cargas rápidas	Densidad energética	Alta densidad de potencia	Mayor vida útil
	Temperatura de operación	Industrialización	Mayor vida útil	Abundancia en la naturaleza
	Coste	Menos toxicidad	Abundancia en la naturaleza	
	Sostenibilidad	Ligereza		
Cons	Densidad energética (≈ 150 Wh/kg)	Alta degradación (menor vida útil)	Densidad energética (< 160 Wh/kg)	Menor capacidad y rendimiento durante el proceso de carga y descarga
		Baja densidad volumétrica		

Comparativa de las diferentes tecnologías de acumuladores.

(Fuente: <https://cicenergigune.com/es/blog/mas-alla-litio-tecnologias-fabricantes-baterias>)

Sin embargo, todavía presentan una gran debilidad, su densidad energética, lo que supone menor autonomía en comparación con las de litio-ion: 250 Wh/kg de media en las de litio frente los 150-160 Wh/kg de las de sodio, un 60 por 100 menor (29).

Aluminio, potasio, calcio... La tabla periódica es muy amplia

Las baterías de sodio y azufre son las que más han destacado y las que se postulan como candidatas a desbancar al litio que, por otra parte, hasta la fecha se ha mostrado como la alternativa más eficiente, con la mayor densidad energética y la mejor relación peso-volumen-potencia.

Sin embargo, estas no son las únicas opciones al litio; dentro del sector de las baterías, encontramos gran cantidad de materiales que están siendo estudiados (todavía de forma experimental) para su uso como acumuladores, entre los que podemos encontrar el aluminio, el potasio o incluso el calcio. No obstante, todos ellos encierran un problema común y que se muestra como el gran caballo de batalla a batir: la densidad energética. Por el momento, ninguna combinación ha sido capaz de superar los 150 Wh/kg, lo que las sitúa muy lejos de los 250 Wh/kg que es capaz de ofrecer el litio.

(29) La propia CATL ya ha anunciado que su segunda generación de baterías de sodio-ion contará con una densidad de alrededor de 200 Wh/kg, lo que demuestra que todavía existe margen de mejora en este sentido.

En la tabla de la página anterior se muestran de forma esquemática las ventajas e inconvenientes de los nuevos avances en materia de baterías.

Conclusiones

Hace una década, los submarinos convencionales eran prácticamente el único vehículo que se servía de una batería para desplazarse y consumir energía. La revolución que estamos sufriendo en nuestros días por el agotamiento de los combustibles fósiles ha provocado que sean muchas las variantes de vehículos que utilizan una pila para desplazarse. Esto, obviamente, juega a favor de la industria de defensa a la hora de diseñar y construir submarinos. Está claro que no es lo mismo instalar una batería en un coche que en un submarino, dado el medio hostil en el que opera este último. No obstante, las alternativas que se presentan son muchas y cada desarrollo que se investiga nos muestra baterías más baratas y con una mayor densidad energética. De continuar así, en un futuro cercano la industria de los acumuladores habrá desarrollado baterías de submarino capaces de hablar de tú a tú a la propulsión nuclear, si no en velocidad, al menos sí en permanencia bajo el agua.

