

INTEGRACIÓN DE SISTEMAS AIP Y BATERÍAS DE ION-LITIO EN SUBMARINOS CONVENCIONALES: MEJORAS OPERATIVAS Y AUTONOMÍA EN INMERSIÓN

Resumen

EL presente artículo analiza la viabilidad técnica y operativa de integrar sistemas de propulsión independiente del aire (AIP) con pilas de combustible tipo PEM y baterías de ion-litio en submarinos convencionales. El objetivo es evaluar el impacto de estas tecnologías sobre la autonomía en inmersión, la eficiencia energética y la reducción de la firma acústica del buque.

A través de modelización matemática y simulaciones basadas en perfiles operativos reales,

se compara el rendimiento de configuraciones híbridas frente a tecnologías convencionales como las baterías de plomo-ácido. Los resultados reflejan incrementos significativos en tiempo de inmersión, reducción del índice de indiscreción y mejoras sustanciales en la capacidad operativa del submarino, especialmente en misiones de larga duración.

Se concluye que la combinación de tecnologías AIP y baterías de ion-litio representa una opción estratégica viable para futuras plataformas submarinas, particularmente en escenarios de alta exigencia táctica.

El *Isaac Peral* (S-81) despliega su capacidad operativa en la Operación Noble Shield. (Fuente: Armada)





Introducción

La guerra submarina del siglo XXI exige plataformas capaces de operar durante períodos prolongados sin emerger, garantizando el sigilo y la capacidad ofensiva en entornos cada vez más hostiles y tecnológicamente saturados. En este contexto, la limitación principal de los submarinos no nucleares reside en su autonomía en inmersión, directamente condicionada por la capacidad de almacenamiento energético.

Tradicionalmente, los submarinos convencionales han empleado baterías de plomo-ácido, pero éstas presentan importantes limitaciones en términos de densidad energética, mantenimiento, seguridad y vida útil. Frente a esta situación, las baterías de ion-litio emergen como una alternativa de alta eficiencia, ya probada en entornos civiles y en proceso de adopción militar.

Paralelamente, los sistemas AIP, y en particular las pilas de combustible tipo PEM (*proton exchange membrane*), han demostrado su potencial para incrementar la autonomía operativa sin necesidad de recurrir a motores diésel en superficie o esnórquel, reduciendo drásticamente la probabilidad de detección. El presente artículo propone un análisis técnico comparado entre ambos sistemas —baterías de ion-litio y pilas de combustible tipo PEM— y

su integración en plataformas submarinas, utilizando como base de cálculo los perfiles energéticos del submarino clase *S-80 Plus*. A través de modelos matemáticos, simulaciones energéticas y análisis comparativo, se pretende establecer las ventajas tácticas y estratégicas de estas tecnologías para su incorporación en futuras generaciones de submarinos convencionales.

Estado del arte

En las últimas décadas, la necesidad de aumentar el tiempo de inmersión de los submarinos convencionales sin recurrir a propulsión diésel ha impulsado el desarrollo de tecnologías energéticas más eficientes, discretas y sostenibles. En este escenario, dos avances clave han revolucionado el diseño de estos buques: la incorporación de baterías de ion-litio de alta densidad energética y los sistemas AIP, especialmente aquéllos basados en pilas de combustible.

Avances en sistemas AIP

El sistema AIP permite al submarino operar en inmersión durante periodos prolongados sin acceder a oxígeno atmosférico, lo que reduce la necesidad de usar el esnórquel, una de las maniobras más comprometedoras

tácticamente. Uno de los referentes más relevantes en este campo es el *U-35* de la clase *U212A*, capaz de permanecer sumergido más de 18 días. Alemania, Suecia, Corea del Sur y Japón lideran el desarrollo e implementación de estos sistemas. Alemania, a través de TKMS, ha desarrollado sistemas de pilas de combustible de última generación con arquitectura modular (ASFC), integrados en los submarinos *U212A*. Corea del Sur ha equipado su clase *KSS-III* con AIP basado en pilas PEM de 600 kW y baterías de litio. Japón fue pionero en reemplazar las baterías de plomo-ácido por litio en sus submarinos *Soryu* desde 2020, logrando mejoras sustanciales en la autonomía y operatividad.

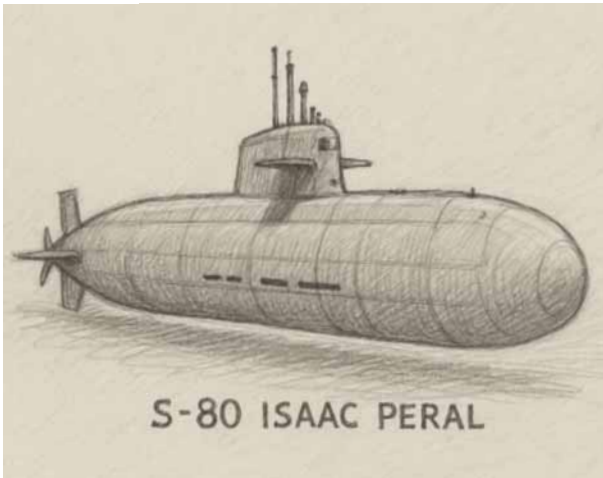


Ilustración del modelo S-80 Plus *Isaac Peral*.
(Elaboración propia)

España, por su parte, ha incorporado un sistema AIP en el submarino clase *S-80 Plus* basado en pilas PEM, con hidrógeno obtenido a partir de bioetanol mediante reformado a bordo, lo que evita la necesidad de almacenarlo directamente en forma presurizada o criogénica. Este enfoque ofrece una gestión más segura de los recursos energéticos sin comprometer el volumen interno ni la seguridad del personal.

Evolución de las baterías en submarinos

Durante más de un siglo, los submarinos han empleado baterías de plomo-ácido. Sin embargo, la baja densidad energética, los altos requisitos de mantenimiento y los riesgos de emisión de gases explosivos han motivado su reemplazo. Las baterías de ion-litio, con mayor voltaje nominal, menor tasa de autodescarga y arquitectura modular escalable, se están consolidando como el nuevo estándar operativo.

Japón ha liderado esta transición con la implementación de baterías de litio-ferrofosfato

LiFePO_4 en su clase *Soryu*. Alemania y Corea del Sur también han incorporado baterías de litio en combinación con sistemas AIP, evidenciando una clara tendencia global hacia una hibridación energética eficiente.

El caso del submarino español *S-80 Plus* resulta paradigmático, ya que combina una planta de generación AIP basada en reformado de bioetanol y pilas PEM con un sistema de almacenamiento energético de baterías de plomo-ácido. Esta integración busca equilibrar autonomía, seguridad, volumen ocupado y huella acústica.

Fundamento teórico

El presente estudio adopta una metodología mixta basada en modelado matemático, análisis comparativo y simulación técnica, con el objetivo de evaluar el rendimiento operativo de sistemas híbridos de propulsión eléctrica en submarinos convencionales. Se

durabilidad y estabilidad química. El uso de recubrimientos nanométricos en los electrodos mejora la resistencia térmica y reduce el riesgo de ignición en atmósferas confinadas. Todo esto convierte al litio en una opción altamente adecuada para misiones de alta exigencia táctica.

Por otra parte, los sistemas AIP permiten la generación de energía sin necesidad de oxígeno atmosférico, extendiendo notablemente la autonomía en inmersión. En el presente análisis se considera una planta AIP basada en pilas PEM, alimentadas por hidrógeno obtenido mediante reformado de bioetanol a bordo del submarino.

Este sistema se seleccionó por su bajo nivel de ruido, alta eficiencia y compatibilidad con infraestructuras existentes. Además, el reformado de bioetanol evita el almacenamiento

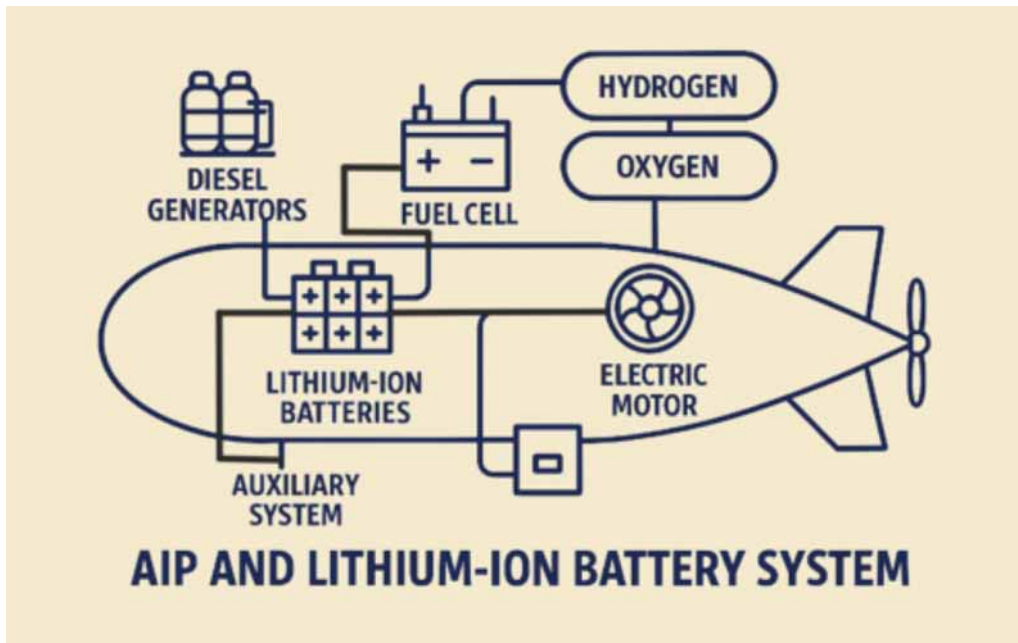
directo de hidrógeno presurizado, reduciendo riesgos asociados a inflamabilidad y complejidad logística.

Se emplea el modelo Ballard FCvelocity HD-6 como referencia, con una arquitectura modular que permite escalar la potencia entregada hasta 600 kW en régimen medio. Esta pila incluye sistemas de refrigeración líquida, controladores de presión, compresores y sensores de flujo para asegurar una operación estable en condiciones submarinas.

Para el modelado del sistema híbrido se evaluó el comportamiento del sistema bajo tres escenarios de potencia:

—Escenario mínimo: 105 kW (propulsión reducida + sistemas auxiliares).

—Escenario medio: 590 kW (navegación normal en zona de patrulla).



Esquema de propulsión submarina mediante baterías de litio y pilas PEM.
(Elaboración propia)

—Escenario máximo: 3.500 kW (maniobra táctica a plena potencia).

Para cada caso se modelaron el tiempo de descarga de las baterías, el consumo de hidrógeno por parte de las pilas de combustible y la autonomía total del sistema. El modelo considera la pérdida de eficiencia de los subsistemas auxiliares (estimada en 83,5 kW), así como la capacidad real de almacenamiento de bioetanol y oxígeno líquido a bordo.

En condiciones de máxima demanda, se estimó una autonomía de 8,02 horas sólo con baterías y 9,33 al incorporar las pilas PEM, lo que supuso una mejora del 16,45 por 100. En escenario medio, la mejora fue del 51 por 100, y en mínimo del 67,81 por 100.

Estos datos evidencian el impacto positivo del sistema híbrido en la operatividad táctica del submarino, permitiendo prolongar la inmersión sin necesidad de exponer el buque mediante el uso del esnórquel o recarga en superficie.

Resultados y análisis comparativo

Los resultados obtenidos mediante simulación permiten cuantificar el rendimiento de los sistemas propuestos bajo distintas condiciones de potencia, utilizando como referencia el consumo energético del submarino clase *S-80 Plus*.

El primer escenario corresponde a una potencia mínima de 105 kW, que representa condiciones estándar de navegación en inmersión prolongada. El sistema híbrido permite mantener operación táctica durante casi 20 días sin necesidad de emerger, destacando además los siguientes aspectos:

—Autonomía con baterías de litio: 280,42 horas (80 por 100 en profundidad de descarga).

—Autonomía adicional con pila de combustible (600 kg H₂): 190,15 horas.

—Autonomía total combinada: 470,47 horas. Incremento frente a sistemas con baterías de plomo-ácido: 113,35 por 100.

El segundo escenario establecido con una potencia de 590 kW simula el régimen operativo habitual en patrullas en zona de interés, donde la eficiencia del sistema AIP es clave para mantener discreción sin comprometer movilidad. Esto se traduce en las prestaciones siguientes:

—Autonomía con baterías de litio: 41,45 horas.

—Autonomía adicional con pila de combustible: 21,15 horas.

—Autonomía total combinada: 62,6 horas.

—Incremento frente a sistemas con batería de plomo-ácido 417,35 por 100.

Este escenario simula el régimen operativo habitual en patrullas en zona de interés, donde la eficiencia del sistema AIP es clave para mantener discreción sin comprometer movilidad.

Finalmente, se analizó el escenario final correspondiente a un régimen de potencia de 3.500 kW. Aunque éste representa situaciones puntuales (huida, maniobra ofensiva), la mejora operativa permite extender la acción táctica crítica al menos una hora adicional sin aumentar la probabilidad de detección:

—Autonomía con baterías de litio: 8,02 horas.

—Autonomía total con pila de combustible integrada: 9,33 horas.

—Incremento frente a LAB: 273 por 100.

En relación con el análisis del consumo de hidrógeno, el modelo muestra que se incrementa

exponencialmente con la demanda de potencia. A mayor intensidad, menor eficiencia global del sistema AIP. En potencia máxima, el consumo agotaría los 600 kg de hidrógeno en unas 20 horas.

Este factor subraya la importancia de optimizar el uso del AIP en regímenes medios y bajos, donde la relación consumo-beneficio es más favorable.

Finalmente, en el momento de una comparación global con sistemas convencionales, el análisis comparativo con tecnologías basadas exclusivamente en LAB revela mejoras sustanciales:

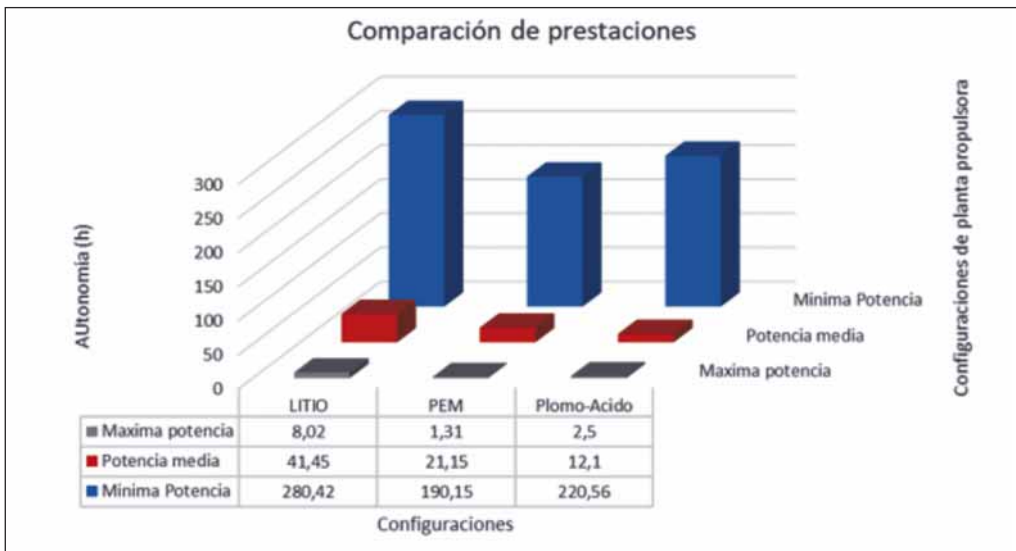
- Menor mantenimiento preventivo.
- Mayor densidad energética (volumétrica y gravimétrica).
- Reducción del índice de indiscreción (menor necesidad de esnórquel).
- Mejor gestión térmica y modularidad.
- Aumento global de la autonomía operativa entre un 113 y un 417 por 100 según el régimen.

Conclusiones

El análisis realizado demuestra que la integración de baterías de ion-litio con sistemas AIP basados en pilas de combustible tipo PEM representa una mejora tecnológica significativa respecto a las configuraciones tradicionales de submarinos equipados únicamente con baterías de plomo-ácido.

Las simulaciones desarrolladas para tres escenarios operativos muestran incrementos de autonomía de entre un 113 y un 417 por 100, dependiendo del nivel de potencia requerido. Estas mejoras se traducen directamente en una mayor capacidad de permanencia en zona de operaciones, una reducción drástica de la necesidad de esnórquel y, por ende, un descenso del índice de indiscreción.

A nivel técnico, las baterías de ion-litio ofrecen ventajas en densidad energética, modularidad, fiabilidad térmica y mantenimiento reducido. Por su parte, los sistemas AIP permiten



Comparación de prestaciones en base a los escenarios analizados.
(Elaboración propia)

extender la autonomía sin recurrir a la propulsión diésel, con un impacto mínimo en la firma acústica del submarino.

El modelo híbrido permite al submarino adaptarse dinámicamente a distintas condiciones de misión, combinando la alta capacidad de respuesta de las baterías con la eficiencia sostenida de las pilas de combustible. En conjunto, se plantea una alternativa operativa robusta frente a las limitaciones logísticas y estratégicas de las plataformas nucleares.

Para consolidar la adopción de esta arquitectura híbrida en futuros desarrollos de submarinos convencionales (como la potencial clase *S-90*), se proponen las siguientes líneas de acción:

- Desarrollo de sistemas de craqueo de amoníaco a bordo como alternativa al reformado de bioetanol, aprovechando su menor complejidad de almacenamiento y su infraestructura industrial existente.
- Reutilización del calor residual generado por las pilas de combustible para procesos auxiliares, como el craqueo de amoníaco o la climatización interna, incrementando la eficiencia global del sistema.

—Optimización del volumen interno mediante diseños modulares de baterías y depósitos energéticos adaptados a la arquitectura del casco, reduciendo el impacto sobre la carga útil y la habitabilidad.

—Desarrollo de tecnologías de almacenamiento energético híbrido flexible, como supercondensadores acoplados a módulos de litio para absorber picos de demanda sin penalizar la autonomía general.

—Simulaciones multivariable en escenarios tácticos reales, integrando datos de misión, variables ambientales y perfiles de amenaza para ajustar dinámicamente el empleo del sistema AIP y del banco de baterías.

—Estudio del ciclo de vida completo del sistema desde una perspectiva logística y medioambiental, incluyendo el reciclaje de baterías y el impacto del combustible empleado.

En conclusión, la implementación de sistemas híbridos AIP-ion litio no sólo mejora la autonomía y capacidad de inmersión, sino que representa una evolución lógica y necesaria para los submarinos convencionales en el entorno operativo actual.

BIBLIOGRAFÍA

- Larminie, J., & Lowry, J. (2003): *Electric Vehicle Technology Explained*. John Wiley & Sons, Ltd., doi:10.1002/0470090707
- O'Hayre, R.; Cha, S.-W.; Colella, W., & Prinz, F. B. (2009): *Fuel Cell Fundamentals*. John Wiley & Sons.
- Sperling, D., & Gordon, D. (2009): *Two Billion Cars: Driving Toward Sustainability*. Oxford University Press.
- Pukrushpan, J. T., & Stefanopoulou, A. G. (2004): *Control of Fuel Cell Systems*. CRC Press.
- González Gil, J. E.; Díaz Rey, Á. O., & González-Estrada, O. A. (2018): «Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna». *Revista UIS Ingenierías*, 17(1), pp. 143-154.
- Fúnez Guerra, C.; Almansa Rodríguez, E., & Fuentes Ferrera, D. (2010): «El hidrógeno: vector energético del futuro». *Energía & Minas: Revista Profesional, Técnica y Cultural de los Ingenieros Técnicos de Minas*, n.º 8, pp. 20-27.
- Martins, M. E.; Peretti, H. A.; Spinadel, E.; Zinola, C. F., & Visintin, A. (2008): «Conversión y almacenamiento de energía basados en hidrógeno: Estado del arte y propuesta de estrategias en el Mercosur». *Revista técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia*, 31(2), pp. 99-114.
- Rusman, N., & Dahari, M. (2016): «A review on the current progress of metal hydrides material for solid-state hydrogen storage applications». *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(28), pp. 12.108-12.126.
- Turner, J. A. (1999): «A Realizable Renewable Energy Future». *Science*, 285(5428), pp. 687-689, doi:10.1126/science.285.5428.687
- Puig-Pla, C., & Rosa-Rosell, A. (2009): «Narciso Monturiol (1819-1885), pioneer of submarine navigation». *Contributions to Science*, pp. 147-157.
- Ghosh, P. C., & Vasudeva, U. (2011): «Analysis of 3000T class submarines equipped with polymer electrolyte fuel cells». *Energy (Oxford)*, 36(5), pp. 3.138-3.147, doi:10.1016/j.energy.2011.03.003
- Bove, R., & Ubertini, S. (2008): «Modelling solid oxide fuel cells: methods, procedures and techniques». *Springer Science & Business Media*.
- Rodríguez Granadillo, J. C. (2020): Modelado de una pila de combustible del tipo PEM para el uso en la automoción. Trabajo de Fin de Grado. Universidad de La Laguna, <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/21419/>
- Li, Q.; Chen, W.; Liu, Z.; Li, M., & Ma, L. (2015): «Development of energy management system based on a power sharing strategy for a fuel cell-battery-supercapacitor hybrid tramway». *Journal of Power Sources*, 279, pp. 267-280.
- Njoya, M. S.; Tremblay, O.; Dessaint, L. (2009): «A generic fuel cell model for the simulation of fuel cell vehicles». *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1.722-1.729.
- Maleki, A., & Askarzadeh, A. (2014): «Optimal sizing of a PV/wind/diesel system with battery storage for electrification to an off-grid remote region: A case study of Rafsanjan, Iran». *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7, pp. 147-153, doi:10.1016/j.seta.2014.04.005
- Mikhaylov, K. (2012): «Development of Energy Efficiency Aware Applications Using Commercial Low Power Embedded Systems». *IntechOpen*, doi:10.5772/38171
- Gan, L. K.; Shek, J. K., & Mueller, M. A. (2015): «Hybrid wind-photovoltaic-diesel-battery system sizing tool development using empirical approach, life-cycle cost and performance analysis: A case study in Scotland». *Energy Conversion and Management*, 106, pp. 479-494.
- Lan, H.; Wen, S.; Hong, Y.; David, C. Y., & Zhang, L. (2015): «Optimal sizing of hybrid PV/diesel/battery in ship power system». *Applied Energy*, 158, pp. 26-34.
- Brighton, D. R.; Mart, P. L.; Clark, G. A., & Rowan, M. (1994): «The use of fuel cells to enhance the underwater performance of conventional diesel electric submarines». *Journal of Power Sources*, 51(3), pp. 375-389.
- García, P.; Torreglosa, J. P.; Fernández, L. M., & Jurado, F. (2013): «Optimal energy management system for stand-alone wind turbine/photovoltaic/hydrogen/battery hybrid system with supervisory control based on fuzzy logic». *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(33), pp. 14.146-14.158.
- Li, Q.; Chen, W.; Li, Y.; Liu, S., & Huang, J. (2012): «Energy management strategy for fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid vehicle based on fuzzy logic». *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 43(1), pp. 514-525.
- Miller, D., et al. (2016): «Recent Advances in Electrolysis for Hydrogen Production». *Journal of Electrochemical Society*, vol. 163(4), pp. H276-H287.
- International Energy Agency (IEA), <https://www.iea.org>

- Asociación Nacional de Ingenieros de ICAI. Asociación/Colegio Nacional de Ingenieros ICAI. Fuel Cell Today. (2014), <http://www.fuelcelltoday.com/>
- Sánchez, D. (2020): «Del submarino Isaac Peral al S-80, la revolucionaria tecnología de las 'pilas' fabricadas por Tudor». Murciaplaza, <https://murciaplaza.com/del-submarino-isaac-peral-al-s-80-la-revolucionaria-tecnologia-de-las-pilas-fabricadas-por-tudor>
- «Lithium Ion Cell Sizes: A Comprehensive Guide». UFine Blog, <https://www.ufinebattery.com/blog/lithium-ion-cell-sizes-a-comprehensive-guide/>
- «Métodos de almacenamiento y transporte de hidrógeno». SynerHy. Hydrogen Experts, <https://synerhy.com/2022/05/metodos-de-almacenamiento-y-transporte-de-hidrogeno/>
- Monereo Alonso, N. (2011): «El S-80, un programa en construcción». *Revista General de Marina*, agosto-septiembre.
- Monereo Alonso, N., & Costell Berges, F. J. (2011): «El cambio climático y la eficiencia energética. El futuro de una flota verde. El caso español». *IEEE. Pre-Bie3*, (2), p. 30.
- Linares Hurtado, J. I., & Moratilla Soria, B. Y. (2007): *El hidrógeno y la energía*. Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI.
- Patiño Jiménez, F. (2007): *Diseño y construcción de una celda de combustible de metanol directo de bajo impacto ambiental*.
- Sosa Marcelo, P. (1995): *Los sistemas anaeróbicos de generación de energía y su aplicación a los submarinos*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Rosa Iglesias, M. F. (2008): «Hidrógeno como vector energético: Elementos y usos». *Boletín de la Academia Malagueña de Ciencias*.
- Dos Reis Sintra, A. (2021): *Estudio comparativo dos diferentes sistemas AIP existentes utilizando lógica difusa*.
- Villalba-Herreros, A.; Santiago Carretero, O.; D'Amore Domenech, R.; Abad Arroyo, R., & Leo Mena, T. J. (2017): «Pila de combustible de metanol directo aplicada a vehículos autónomos submarinos». ETSI Navales. Universidad Politécnica de Madrid.
- Muñoz Hernández, G. A. (2016): *Reconfiguración de un motor Stirling para generación de energía basada en combustión limpia*.
- Gamboa García, F.; Ángel, M.; Rodríguez, G., & Gil, A. G. (2015): *Estudio de los sistemas de propulsión AIP y sus líneas de desarrollo. Análisis y propuesta de aplicación en la Armada*.
- García Ruiz, M. (2015): *Pasado, presente y futuro de vehículos eléctricos*.
- Martínez Bertran, J.: *Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas*. TFG, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.
- Conocimientos generales de los submarinos serie 80 Plus. Secretaría Técnica.
- Zamora Belver, I.; Ignacio, J., San Martín, J.; Eguía, P.; Kevin, J., & Muñoz, M.: «Análisis del comportamiento dinámico de una pila de combustible PEMFC». XIII ERIAC.
- Zhang, C.; Jiang, J.; Zhang, L.; Liu, S.; Wang, L., & Loh, P. (2016): «A Generalized SOC-OCV Model for Lithium-Ion Batteries and the SOC Estimation for LNMCO Battery». *Energies* (Basel), 9(11), doi:900. 10.3390/en9110900
- Delgado, E.; Serrano, D.; Montoya, L.; Peralta, J., & Moreira, C. (2017): «Estudio y modelización de una pila de combustible SOFC». *Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions*, doi:10.18687/laccei2017.1.1.320
- Živanović, Z. (2017): «Perspectives of application of fuel cell electric buses—some experiences from their operation». UDC.
- Department of Energy USA (2017): *Technical System Targets: Onboard Hydrogen Storage for Light-Duty Fuel Cell Vehicles*.
- Baccouche, I.; Essoukri, N.; Jemmali, S.; Mlayah, A.; Manai, B., & Amara, B. (2018): «Implementation of an Improved Coulomb-Counting Algorithm Based on a Piecewise SOC-OCV Relationship for SOC Estimation of Li-Ion Battery». *ARXIV*. Cornell University.
- «Sistemas AIP en submarinos». Noticias SENER (2015).
- Rieger, P. H. (1994): *Electrochemistry*, 2.nd Edition, Chapman & Hall, Inc., New York.

VIVIDO Y CONTADO



