



Documento de Investigación I6/2018

Programa de «Trabajo de Futuros»

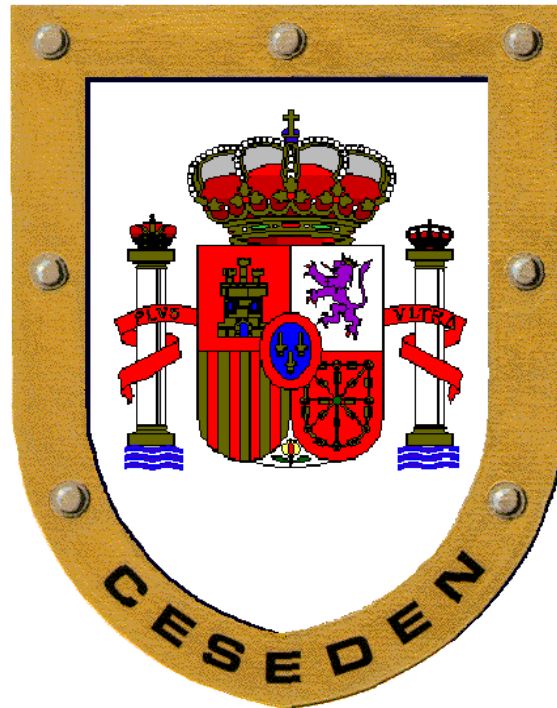
—
«Panorama de tendencias geopolíticas»

-
**Fusión y fisión nuclear, baterías de litio y
células de combustible: tendencias actuales y
perspectivas en el horizonte 2050**

-
*Nuclear fission and fusion, lithium batteries
and nuclear fuel cells: current trends and
prospects in the 2050 horizon*

Organismo solicitante del estudio:
Instituto Español de Estudios Estratégicos (IEEE)

Centro Superior de Estudios de la Defensa Nacional
(CESEDEN)



Trabajo maquetado, en julio de 2018, por el Instituto Español de Estudios Estratégicos (IEEE).

NOTA: Las ideas y opiniones contenidas en este documento son de responsabilidad del autor, sin que reflejen, necesariamente, el pensamiento del Ministerio de Defensa, del CESEDEN o del IEE.

Fusión y fisión nuclear, baterías de litio y células de combustible: tendencias actuales y perspectivas en el horizonte 2050

Luis M. Varela

Grupo de Nanomateriales, Fotónica y Materia Blanda.

Departamento de Física de Partículas.

Universidad de Santiago de Compostela. E-15782.

Santiago de Compostela. España

Resumen

En el presente trabajo se aborda la situación y tendencias actuales en los campos de la energía nuclear, baterías de litio y células de combustible. El desarrollo esperado en las próximas décadas (horizonte 2050) de estas tecnologías críticas para el sistema energético futuro y, por tanto, de importancia fundamental en sectores estratégicos de la economía y de la seguridad, es también objeto de análisis y reflexión crítica.

Palabras clave

Fusión nuclear, fisión nuclear, baterías, células de combustible, litio.

*Nuclear fission and fusion, lithium batteries and nuclear fuel cells:
current trends and prospects in the 2050 horizon*

Abstract

In this work we report the current status and future prospects on nuclear fusion and fission, lithium batteries and fuel cells. The forecasted evolution (on the horizon of 2050) of these technologies, critical for the future energetic mix and, consequently for the economy and security, is also a matter of analysis and critical review.

Keywords

Nuclear fusion, nuclear fission, batteries, fuel cells, lithium.

Introducción

Entre 1973 y 2014 el consumo final de energía primaria mundial se duplicó, pasando de unas 54.335 TWh (4.672 Mtoe) a 109.613 TWh (9.425 Mtoe), (Wikipedia, 2018), con una tasa de eficiencia (porcentaje de producción primaria de energía que efectivamente se consume finalmente) que prácticamente no se ha modificado desde entonces (ver Figura 1).

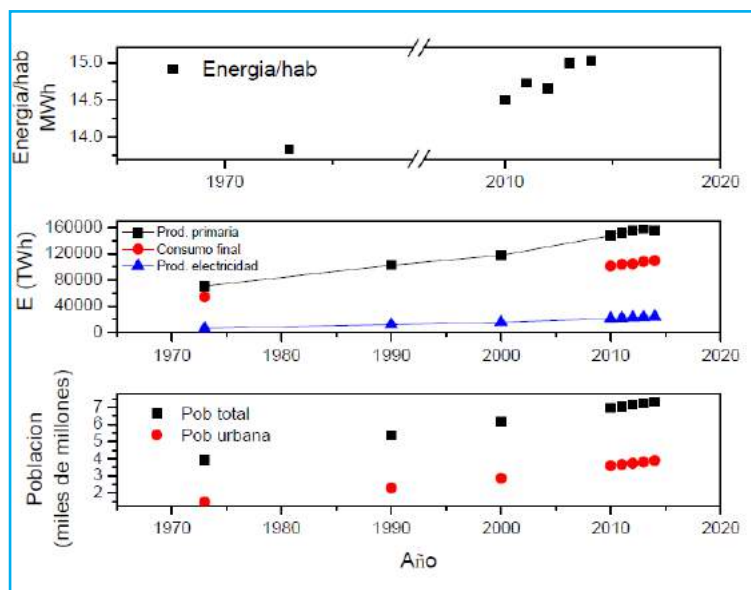


Fig.1 (Fuente: Wikipedia, 2018)

Además, como puede verse también en la Fig. 1, la tasa de consumo de energía por habitante ha experimentado una fuerte expansión en las últimas décadas, y continúa con una tendencia alcista. Naturalmente, esta fuerte expansión del consumo mundial de energía está asociada, principalmente, al crecimiento económico mundial y a la incorporación de segmentos cada vez más importantes de la población al desarrollo económico y, por tanto, al consumo, con la consiguiente expansión de la producción y del comercio. Indudablemente, la aceleración del ciclo de producción y consumo está produciendo niveles de bienestar crecientes en sociedades cada vez más complejas, con un mayor grado de organización, aunque también genera las inevitables presiones energéticas y medioambientales. Esto, unido al hecho de la creciente conciencia de las complicaciones asociadas a los combustibles fósiles (carestía progresivamente mayor, riesgo geopolítico, elevada contribución al calentamiento global...), ha generado una fuerte demanda social de sustitución de estas energías -que, por otro lado, continúan siendo en estos momentos responsables de satisfacer el 78,4% de la demanda mundial (Sawin et al., 2017)-, por fuentes sostenibles y medioambientalmente neutras. En esta dirección, las principales candidatas son, naturalmente, las energías renovables, con una contribución al mix energético mundial actual del 19,3% incluyendo la biomasa

tradicional (9,1%) y un 10,2% de energías renovables modernas. Esta demanda de sustitución de los combustibles fósiles está, sin duda, en el trasfondo de todas las mutaciones que se están produciendo en el escenario energético mundial. En este esfuerzo serán líneas de trabajo en las próximas décadas tanto el incremento de la eficiencia de fuentes tradicionales de energía, como el desarrollo de tecnología de fuentes alternativas o la mejora de los medios de almacenamiento energético, procesos todos ellos impulsados por la necesaria descarbonización del mix energético y el imparable incremento del número de procesos que dependen de la electricidad (transporte, electrónica de consumo, robotización...).

En particular, dentro de estas líneas de evolución esperadas, en el presente informe analizaremos el estado actual de desarrollo y las perspectivas de desarrollo de fuentes de energía como la energía nuclear, tanto en sus modalidades de fisión, como de la –muy esperada- fusión, del medio de almacenamiento eléctrico por excelencia, las baterías, más en concreto de las basadas en la tecnología de ion de litio y de las células de combustible imprescindibles para la denominada economía del hidrógeno.

Estado actual y perspectivas de la energía nuclear: fisión y fusión nucleares

La peculiar relación de energía de enlace por nucleón en el interior de los núcleos atómicos hace que sea posible la obtención de energía mediante reacciones que o bien aumenten o bien disminuyan sus números másicos y/o atómicos. Y esto puede hacerse esencialmente de dos formas: formando núcleos más masivos a partir de núcleos ligeros (fusión nuclear) o bien rompiendo núcleos pesados y liberando parte de la energía que contienen. La primera de las estrategias es posible hasta núcleos con la masa del hierro (Fe^{56}), mientras que los núcleos fisiónables con ganancia energética son los núcleos más pesados. A continuación resumiremos el estado de la cuestión y perspectivas de evolución de ambas tecnologías.

Fisión nuclear

La búsqueda de combustibles de bajo coste, con mínimo impacto medioambiental, y sostenibles, ha vuelto a meter a la energía nuclear de fisión en el mix energético, y ha dado un nuevo impulso a la investigación en fusión nuclear. Con la demanda eléctrica incrementándose –como hemos mencionado arriba- de manera sostenida y significativa, la energía nuclear puede contribuir apreciablemente al mix de energía. El pico de producción de energía eléctrica comercial mediante fisión nuclear –una tecnología que se remonta a los años 50 del siglo pasado- se alcanzó en el año 1996 con un 18% de la energía eléctrica total (Horvath & Rachlew, 2016), que disminuyó hasta un 11% en 2013. Horvath y Rachlew (2016) recogen, además, el dato de que en

2015 en la Unión Europea se producía un 27% de la electricidad (13% de la energía primaria) mediante 132 plantas de fisión nuclear, y que el número de nuevos reactores en construcción en el mundo es de 65, estando muchos otros programados. De acuerdo con el informe del director general de la Agencia Internacional para la Energía Atómica (IAEA por sus siglas en inglés) “International Status and Prospects for Nuclear Power 2017” (IAEA, 2017) en 2017 había 447 reactores nucleares operativos en 30 países y sobre 60 en construcción en 15 estados, siendo la capacidad instalada la mayor que se ha alcanzado nunca con 392 GW(e). Asimismo, la IAEA prevé una expansión en la capacidad instalada de un 123% sobre los niveles de 2016 en el escenario más expansivo, mientras que en el escenario menos optimista predice caídas importantes de la capacidad instalada a medio plazo, hasta que se recuperasen los niveles presentes en 2050.

Podemos decir que en el momento presente se está produciendo un cierto “resurgir” de la energía nuclear, pues 28 nuevos estados están interesados en entrar en el club de los países con programas civiles de dicha energía. El *Strategic Energy Technology–Plan* (SET-Plan) de la Comisión Europea identifica la energía nuclear como uno de los combustibles que contribuirán a un mix de bajo contenido de carbono en el horizonte 2050, para lo que serán necesarias o convenientes determinadas mejoras como los reactores de 4ª generación¹ o los ciclos cerrados de combustible que permiten el reciclaje del combustible nuclear en las que en estos momentos se centran muchos de los esfuerzos investigadores. Las principales mejoras en estos campos, están recogidas en el *review* de Horvath y Rachlew (2016):

“...substantial improvements with respect to the following issues:

- *Primary system design simplification,*

¹ Los reactores nucleares de fisión se clasifican en Generaciones I, II, II+, III, III+ y IV. Los de Gen I dieron comienzo a la producción comercial de energía y en estos momentos sólo queda uno operativo en el Reino Unido. Algunos de estos son Shippingport, Magnox/UNGG, Fermi I, and Dresden. En particular los Magnox, así denominados por la cobertura de magnesio no oxidable de su combustible, uranio natural no enriquecido) son reactores refrigerados por dióxido de carbono presurizado y moderados por grafito y únicamente pueden operar a baja temperatura (baja eficiencia). Los reactores Gen II incluyen reactores de agua presurizada (*pressurized water reactor*, PWR), reactores tipo CANada Deuterium Uranium reactors (CANDU), reactores de agua hirviendo (*boiling water reactors*, BWR), reactores avanzados refrigerados por gas (*advanced gas-cooled reactors*, AGR), y reactores Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reactors (VVER). Los Gen II+ incorporan medidas de seguridad adicionales y una duración de unos 60 años y, asimismo, los de Gen III son aquellos que durante el ciclo de vida de los Gen II incorporen mejoras en rendimiento térmico, diseño para mejoras económicas y de coste, en sistemas de seguridad pasiva o en tecnología de combustible mejorada. Finalmente, la Gen IV (cuya investigación y desarrollo está coordinada a nivel mundial por grupos como el Foro Internacional de la IV Generación [Generation IV International Forum (GIF)] incluye reactores de muy alta eficiencia como los térmicos de muy alta temperatura, de agua supercrítica, sales fundidas, o los rápidos refrigerados por sodio, plomo o gas.

- *Improved materials,*
- *Innovative heat exchangers and power conversion systems,*
- *Advanced instrumentation, in-service inspection systems,*
- *Enhanced safety,*

and those for fuel cycle issues pertain to:

- *Partitioning and transmutation,*
- *Innovative fuels (including minor actinide-bearing) and core performance,*
- *Advanced separation both via aqueous processes supplementing the Plutonium and Uranium extraction process as well as pyroprocessing, which is mandatory for the reprocessing of the high minor-actinides-containing fuels,*
- *Develop a final depository.”*

La consecución de mejoras significativas en estos temas –especialmente en el reciclaje y/o almacenamiento geológico profundo de residuos en condiciones social y medioambientalmente sostenibles- constituye el objetivo esencial de muchos de los desarrollos estratégicos en la actualidad. En particular, el desarrollo de reactores de neutrones rápidos (FNRs) que permiten multiplicar por un factor de 50 de la energía extraída de una determinada cantidad de uranio comparados con los actuales de tercera generación (Horvath & Rachlew, 2016).

En resumen, un escenario altamente probable en materia de fisión nuclear para 2050 es que se hayan implantado los reactores de alta eficiencia de IV generación –que convivirán para entonces con los más eficientes de generación III+-, y que se hayan registrado avances importantes en el reciclaje (e.g. mejora de disolventes avanzados que optimicen la extracción de radionúclidos relevantes, como, por ejemplo, los líquidos iónicos), gestión (reducción de las vidas medias de los radionúclidos de desecho a cientos en lugar de miles de años) y almacenamiento de residuos. Con estas mejoras y el consiguiente incremento de su aceptabilidad social, en 2050 se puede esperar que un 15-20% de la electricidad sea producido mediante esta tecnología.

Fusión nuclear

Por lo que respecta a la fusión nuclear, los primeros estudios de producción de energía por fusión de núcleos de menor masa que el hierro (Fe^{56})² se remontan a hace casi seis décadas, pero las considerables dificultades científicas y técnicas (aunque

2 No obstante, la mayor cantidad de energía se obtiene por fusión de núcleos ligeros.

muchas superadas) han provocado que aún hoy esta tecnología se encuentre en fase de investigación y que no se haya conseguido producir el proceso de manera autosostenida en condiciones controladas. No obstante, la investigación en esta tecnología que podría cubrir completamente la demanda de la humanidad de manera sostenible y medioambientalmente neutra, continúa, y aún se ha intensificado en las dos décadas anteriores.

El principal problema de la fusión nuclear es la superación de las barreras de potencial electrostático entre los núcleos a fusionar que, en el caso de núcleos de H es de unos 700 keV, que, para producir una fusión termonuclear, implicaría calentar el plasma a unos $3.6 \cdot 10^9$ K, algo que resulta completamente imposible de forma controlada en el momento presente. Afortunadamente, isótopos más pesados de hidrógeno ofrecen una menor barrera de potencial para su fusión, liberando no obstante menor energía. Esto, unido a una sección eficaz (probabilidad) relativamente alta y un defecto de masa muy alto, hacen que la mejor alternativa sea la fusión nuclear de deuterio-tritio (D-T) (Pfalzner, 2006). La producción de residuos de Li (procedente de la producción de tritio en el interior del reactor) y la gestión del venenoso Li son claras dificultades de esta tecnología, pero claramente muy inferiores a las generadas por un reactor de fisión (e. g. la vida media del tritio es solamente 12,7 años). No obstante, la obtención de plasma suficientemente denso y caliente con tiempos de confinamiento suficientemente largos, aunque parece cercana, no ha alcanzado todavía las condiciones de ignición de un reactor autosostenido (Horvath & Rachlew, 2016).

Para producir la fusión nuclear ha de mantenerse el plasma a muy elevada temperatura durante tiempos suficientemente largos, en condiciones que cumplan el criterio de Lawson, introducido en 1957, que establece una relación entre la densidad del plasma, el tiempo de confinamiento y la temperatura iónica (Lawson, 1957). Esto puede hacerse esencialmente de dos maneras diferentes: mediante el confinamiento magnético referido, usando potentes campos magnéticos toroidales y poloidales que confinen el plasma a muy baja densidad pero durante tiempos muy largos (segundos), y por medio del confinamiento inercial, que confina el plasma a densidades extremadamente altas durante tiempos muy cortos.

Sobre el futuro y perspectivas de la fusión por confinamiento magnético mediante tokamaks o stellarators, son reveladoras las palabras de Horvath y Rachlew: “tras 50 años de investigación en fusión no hay evidencias de ningún obstáculo fundamental en la física básica. Pero hay todavía muchos problemas que superar...” (Horvath & Rachlew, 2016). Naturalmente, un resumen detallado del estado del arte de la tecnología de fusión, de sus problemas y logros, queda fuera de los límites de este trabajo, aunque puede consultarse un buen *review* del mismo en el artículo de estos dos investigadores (Horvath & Rachlew, 2016). En particular, reseñaremos aquí que la investigación en fusión por confinamiento magnético ha permitido alcanzar ya los valores de los parámetros de plasma (densidad iónica, tiempo de confinamiento y temperatura iónica) definidos por el criterio de Lawson, aunque no todos ellos se

alcanzan simultáneamente. En particular, laboratorios como JET (Oxford, UK) han alcanzado valores del factor de ganancia Q (potencia de fusión/potencia externa suministrada) iguales o superiores a uno.

El gran proyecto científico destinado a probar la viabilidad comercial de la fusión nuclear mediante reactores de fusión de confinamiento magnético es el International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), instalación situada en Francia se encontrará en su puesta en marcha justo en la frontera de la ignición, entendida como la posibilidad de encender una reacción de fusión autosostenida. El objetivo de ITER es la construcción de un reactor de demostración (DEMO) para la producción de una fusión de plasma D-T (sobre 2035, después de la operativa con el primer plasma en 2025) sostenida por el calor generado por las partículas α del propio reactor con el fin de producir unos 500 MW de potencia de fusión con un Q del orden de 10. También pretende demostrar la estabilidad del plasma en presencia de partículas α , el control de la combustión y la eliminación de residuos (Horvath & Rachlew, 2016). ITER se beneficia de toda la experiencia acumulada por otras instalaciones (JET o TFTR en EE. UU.) y su tecnología debe situarle en la frontera de la ignición en condiciones de reactor.

Por lo que respecta a las expectativas de la fusión nuclear en el horizonte 2050, un excelente resumen puede encontrarse en la figura 6 del *review* de Horvath y Rachlew (2016),³ tomada a su vez del informe EFDA2012. Entendemos que este escenario es el que actualmente se maneja como más probable y realista. En este campo, los avances científicos, incluidos los registrados en el campo de la supercomputación que permiten la realización de los complejísimo cálculos de plasma a escalas grandes y los flujos turbulentos en el mismo en escalas pequeñas), hacen que la limitación principal hoy para el desarrollo de la tecnología hasta el nivel comercial sea esencialmente la financiación. No obstante, como se puede ver en la Fig. 2, el escenario de producción comercial en 2050 se maneja en la actualidad como probable, lo que modificaría de manera dramática el escenario energético mundial.

No obstante, también ha de prestarse atención a la otra gran alternativa, la fusión nuclear por confinamiento inercial (mediante láseres), cuyo gran centro de referencia en el Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) de EE. UU. junto con Los Alamos National Laboratory, Sandia National Laboratory, y el Rochester's Laboratory for Laser Energetics de la Universidad de Rochester. En la National Ignition Facility del LLNL, certificada en 2009 y que llevó a cabo los primeros experimentos con plasma en 2010 se encuentra en estos momentos aproximadamente a 1/3 de las condiciones requeridas para la ignición.

³ Reproducida aquí, sin cambios, por tratarse la ref. de Horvath & Rachlew (2016) de un artículo Open Access distribuido bajo los términos de *Creative Commons Attribution 4.0 International License* (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>) que permite el uso, distribución y reproducción ilimitadas siempre que se dé el apropiado crédito a los autores y se indique si se han realizado cambios.

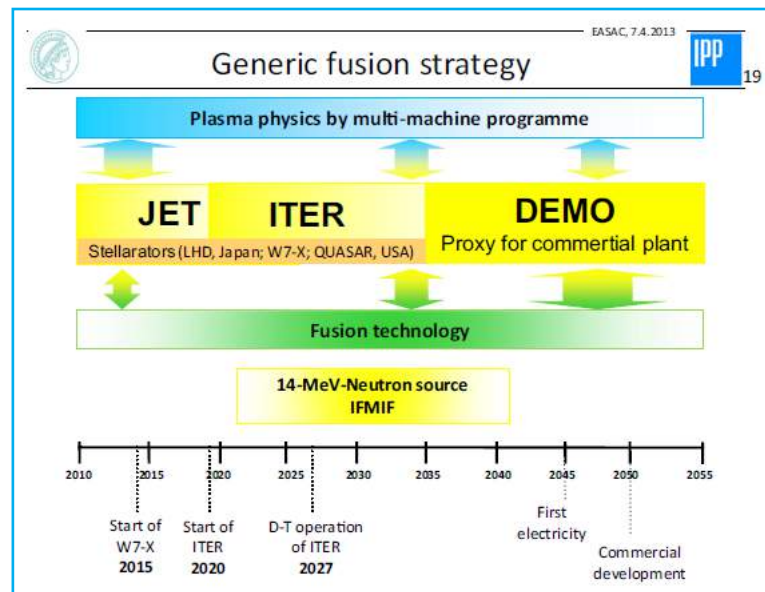


Fig. 2 Hoja de ruta temporal para el reactor de fusión comercial (reproducida de Horvath & Rachlew (2016). EFDA 2012, *Fusion electricity. A roadmap to the realisation of fusion energy.*

Baterías de litio y células de combustible

El adecuado almacenamiento de energía es una necesidad ineludible en un modelo energético orientado hacia la eficiencia y el uso creciente de energías renovables, aquejadas como están estas últimas de intermitencia en la producción. Son muchas las tecnologías implicadas en este objetivo, aunque en este trabajo centraremos nuestra atención en la producción y el almacenamiento eléctricos, y más concretamente, en las baterías y en las células de combustible.

El almacenamiento de energía eléctrica en celdas electroquímicas es lo que define la batería, que se presenta en la actualidad en forma primaria (no recargable, debido a la irreversibilidad de las reacciones químicas implicadas) o secundaria (recargable). La primera puede considerarse más un modo de producción de energía eléctrica, mientras la utilización de baterías en acumulación energética demanda dispositivos del segundo tipo. En el momento presente, definido por la transición hacia una economía descarbonizada, estos dispositivos –históricamente los primeros en producir electricidad- juegan un papel absolutamente crucial. La anteriormente citada tendencia del mercado a la introducción de medios de transporte eléctricos, así como la irrupción masiva de productos electrónicos de uso personal y *wearables*, hacen de la tecnología de baterías avanzadas uno de los aspectos más críticos del panorama científico-tecnológico contemporáneo. Es, consecuentemente, enorme el esfuerzo científico que en estos momentos se realiza para mejorar los cuatro aspectos básicos de un acumulador eléctrico: voltaje, capacidad, eficiencia coulombica y estabilidad

de ciclos. Los dos primeros determinan la densidad de energía de la batería y los dos últimos su tiempo de vida y su eficiencia energética. También concentra un enorme esfuerzo investigador la reducción de costes y el incremento de la velocidad de carga.

Las principales tecnologías que se utilizan en la actualidad para la producción y almacenamiento eléctricos en baterías de litio pueden consultarse en (Wikipedia, 2018b), tanto en lo relativo a electrodos como a electrolitos. Un excelente estado de la cuestión puede encontrarse también en el *review* de Manthiram (2017) o en las refs. de Qi Li et al. (2016) y Manthiram et al. (2017). Probablemente, la mejor tecnología disponible en la actualidad en lo que respecta a la densidad de almacenamiento y voltaje de celda es la de Li-ion, que también presenta bajas tasas de auto descarga y mínimo efecto memoria, aunque su coste es relativamente elevado. Centramos nuestro análisis, por razones de brevedad, en el estado y evolución de esta última tecnología⁴, que focaliza el interés en aplicaciones domésticas y de *wearables*, al tiempo que gana terreno en aplicaciones de automoción, aeronáuticas y militares. En este tipo de baterías los iones de litio fluyen del ánodo al cátodo durante la descarga y al revés durante la carga. A diferencia de las baterías no recargables de Li, o simplemente baterías de litio, que usan Li metálico, en las recargables (baterías de ion litio) se usan electrodos de aleaciones de litio (óxido de litio cobalto, LiCoO_2 , la primera comercializada en 1991; fosfato de litio hierro, LiFePO_4 ; óxidos de litio manganeso, LiMn_2O_4 , Li_2MnO_3 ; óxido de litio níquel cobalto aluminio, LiNiCoAlO_2 , titanato de litio, $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, y óxido de litio níquel manganeso cobalto, LiNiMnCoO_2 , entre otros) para los cátodos, y generalmente grafito con pureza del 99.99% (*anode-grade*) para los ánodos (electrodo cargado negativamente). Los primeros compuestos encuentran aplicaciones en herramientas eléctricas, mientras que la última composición (LiNiMnCoO_2) es la usualmente utilizada en automoción. Estas tecnologías suministran normalmente unos 1000 ciclos de carga en la actualidad con una densidad de energía de 150 a 200 W·h/kg. Frente a esta densidad cabe destacar los actuales 400-600 W·h/kg de las baterías de litio azufre [con un potencial teórico de hasta 2600 W·h/kg (Qi Li et al., 2016)], que recientemente se han empleado para vuelos impulsados por energía solar. Ambas palidecen, no obstante, ante los 11140 W·h /kg de las baterías litio-aire (excluyendo el oxígeno), que no están lejos de las densidades máxicas de almacenamiento de la gasolina (11860 W·h/kg) (Qi Li et al., 2016).

Por otro lado, los electrolitos convencionalmente empleados en la actualidad en estas baterías son generalmente líquidos formados por disoluciones de sales de litio como LiPF_6 , LiBF_4 o LiClO_4 en disolventes orgánicos como los carbonatos de etileno, dimetilo o de dietilo, con conductividades típicas en el orden de los 10 mS cm^{-1} a 20 °C, aunque las nueva tendencias van también la dirección del uso de *composites*

4 No mencionaremos aquí por razones de brevedad la investigación en baterías de Na, Mg, Ca o Al, que están conociendo un fuerte desarrollo recientemente (Qi Li et al., 2016) y son estrategias muy prometedoras para un futuro próximo.

basados en el óxido de polietileno (POE) o, más prometedoramente incluso, de sales fundidas a temperatura ambiente o líquidos iónicos, que disminuyen drásticamente la inflamabilidad y volatilidad del electrolito en condiciones operativas de alta exigencia. En concreto, en la actualidad se usan cinco tipos de electrolito diferentes: 1) electrolitos orgánicos, 2) electrolitos acuosos, 3) líquidos iónicos, 4) electrolitos poliméricos, y 5) electrolitos híbridos, teniendo también gran importancia los prometedores electrolitos sólidos (Manthiram et al., 2017). Son muchas las circunstancias a tener en cuenta a la hora de elegir el electrolito, en especial la adecuada formación de capas de pasivación estables (*solid electrolyte interface*, SEI). La eficiencia global de operación de baterías basadas en las diferentes tecnologías es muy diversa y evoluciona constantemente en un campo en creciente efervescencia.

Por todo esta investigación y desarrollo de las últimas décadas, la batería de Li-ion se ha convertido en el dispositivo de alta densidad energética y ciclo de vida, y elevada eficiencia que es hoy. Con todos los avances tecnológicos que se están produciendo –y que es previsible que continúen en el futuro próximo mejorando costes, densidad de almacenamiento, ciclabilidad, seguridad y potencia con electrolitos y electrodos optimizados para mejorar el transportes de Li, las interacciones mutuas, la estabilidad térmica, etc.- es de esperar que la tecnología de Li-ion siga siendo predominante en las próximas décadas en la producción global de baterías.

Para ello es también, lógicamente, crítico el suministro adecuado y seguro de materias primas (esencialmente Li). En este sentido el Argonne National Laboratory (Gains & Nelson, 2009) de EE. UU., estima un porcentaje de penetración del 90% de vehículos con algún tipo de propulsión eléctrica en EE. UU. en 2050, y una penetración del 10% de vehículos puramente eléctricos (20% en estimaciones de la International Energy Agency). Esta última ha estimado unas ventas globales en 2050 de aproximadamente 150 millones de vehículos/año de los cuales unos 60 millones serían híbridos y, aproximadamente, 40 millones puramente eléctricos, lo que, según el ANL implicaría una demanda global de unas 450.000 toneladas de Li al año, pero, con una tasa de reciclaje del 84% en ese escenario sólo serían necesarias unas 40.000 toneladas de aporte neto al año, estimándose unas reservas globales de unos 11.000.000 de toneladas (aunque muy concentrada en lugares como Bolivia o China). Aunque esta demanda se incrementará por la procedente de la industria aeronáutica⁵ y de la industria de electrónica de consumo, la demanda global de Li en 2050 podría ser satisfecha por las reservas disponibles, aunque algunos otros componentes de los electrodos (e.g. Co) pudieran ser un factor limitante en caso de que no se hayan sustituido en esa fecha. Por todo ello, es de esperar que en 2050 las baterías de litio sean todavía la principal tecnología del sector, especialmente si se registran avances

.....

5 Sobre la aplicación en aeronáutica (civil o militar) da buena cuenta el acuerdo firmado por Rolls-Royce y Airbus con la división eAircraft de Siemens que predice la implantación de rutas con jets híbridos hasta 1,000 km entre 2030 y 2035. (<http://www.independent.co.uk>).

significativos en electrolitos híbridos y/o de estado sólido y electrodos de alta eficiencia. No obstante, será imprescindible prestar atención a las tecnologías basadas en cationes alternativos (Na, K, Mg, Ca, Al).

Otra de las estrategias de descarbonización de la economía pasa por el almacenamiento a gran escala de hidrógeno y su utilización como combustible, lo que demanda el uso de células de combustible, herramientas imprescindibles en el ciclo de almacenamiento de hidrogeno que permiten invertir el proceso de electrólisis de agua (u otros combustibles líquidos o gaseosos como metanol, diésel metano, propano, etc.) -especialmente la realizada mediante energías renovables- para generar energía eléctrica de forma directa. Existen en la actualidad diferentes tipos de células de combustible⁶, aunque todas ellas comparten cuatro elementos clave: cátodo (parte aérea o polo positivo), ánodo (lado del hidrógeno o polo negativo), un electrolito que permite el flujo de iones (normalmente protones) entre los electrodos y placas bipolares que proporcionan el espacio para el flujo de aire (oxígeno) e hidrógeno a los electrodos y la circulación de refrigerante en el caso de células refrigeradas por líquido. La producción de una sola celda, está en torno a 0,7 V, y su eficiencia real ronda el 40-60%, aunque en instalaciones en las que se reutilice el calor producido por la celda (cogeneración) puede llegar al 85%.

El hidrógeno es particularmente útil como combustible debido a su portabilidad y posibilidad de almacenamiento en espacios y con pesos reducidos. Aunque en el momento presente no se haya conseguido introducir de forma masiva la automoción basada en hidrógeno y la predicha economía del hidrógeno (Rifkin, 2003) diste de ser una realidad, la investigación en células de combustible continúa con la vista puesta en la automoción, el transporte aéreo o naval, con las consiguientes reducciones de emisiones contaminantes, pero también en los dispositivos portátiles (especialmente relevante son las innovaciones para uso militar, que reducen significativamente el peso del equipo portátil de los soldados). Un buen *review* reciente del estado de la industria de las células de combustible está disponible en la ref. (Hart et al., 2015).

En la última década se ha producido una fuerte reducción de costes, teniendo hoy un precio las celdas PEM usadas en aplicaciones automovilísticas de \$55/kW, estando prevista una reducción a \$40/kW para 2020 y un objetivo final de \$30/kW (DoE 2013) para hacerse competitiva entre unos \$25-35/kW (Ahluwalia et al. 2011). Además, la implantación de un sistema energético que utilice de forma masiva el hidrógeno

⁶ Hay diferentes tipos de células de combustible dependiendo del electrolito y los iones móviles usados para la reacción $H_2 + 1/2O_2 > H_2O$ (Larminie and Dicks, 2003): células de combustible de intercambio de protones o de electrolito polimérico (*Proton Exchange or Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*, PEMFC), células de combustible de ácido fosfórico (*phosphoric acid fuel cells*, PAFCs), células de combustible de metanol (*direct methanol fuel cells*, DMFCs), células alcalinas (*alkaline fuel cells*, AFCs); células de combustible de carbonato fundido (*molten carbonate fuel cells*, MCFCs), que operan a unos 600 °C; y células de combustible de óxidos sólidos (*solid oxide fuel cells*, SOFCs).

depende de desarrollar diferentes acciones tecnológicas y regulatorias que han sido recopiladas por la International Energy Agency en su *roadmap* (Körner et al., 2015). Aunque en el momento presente es difícil predecir si esta tecnología será competitiva con otras que se encuentran en el paisaje, la fuerte reducción de costes, las inversiones en producción, almacenamiento y transporte de hidrógenos hacen presagiar que, sin duda alguna, estará muy presente en el panorama energético de 2050.

Conclusiones

En el presente trabajo hemos hecho una revisión breve del panorama actual de las energías nucleares (fisión y fusión) y de las baterías de Li-ion y células de combustible, así como de la presencia previsible de estas tecnologías en el horizonte de un mix energético descarbonizado en 2050. Por lo que respecta a la fisión nuclear, es predecible la generalización de las centrales de cuarta generación, así como de importantes innovaciones en el tratamiento de los residuos nucleares (ciclo cerrado de combustible). Esto aumentará la eficiencia, seguridad y aceptabilidad social de esta tecnología, que podría, de este modo, estar presente en el mix energético de 2050 con porcentajes muy significativos (15%-20%) de la demanda de electricidad. Por lo que respecta a la fusión nuclear, los escenarios previstos, por ejemplo, en ITER implican la implantación de una planta de demostración (DEMO) en 2035, con comercialización en 2050, lo que transformaría de manera radical el panorama energético. Por otro lado, previsiblemente, el panorama de baterías en 2050 seguirá dominado por la tecnología de Li-ion, previsiblemente con mejoras muy significativas en lo que respecta a la tecnología de electrodos y electrolitos (estado sólido, híbridos) con mejoras de eficiencia muy significativas y un suministro global de Li capaz de satisfacer la demanda gracias, en particular, a tasas de reciclaje de Li muy elevadas, próximas a un 80%. Finalmente, las células de combustible, con notables descensos de precios en los últimos tiempos, significativas inversiones e intensa investigación en electrolitos, membranas y electrodos, hacen presagiar una presencia considerable de las mismas en un mix energético con contribuciones importantes de hidrógeno en 2050.

Referencias

- Ahluwalia RK, Wang X, Kwon J, Rousseau A, Kalinoski J, James B, Marcinkoski J (2011) Performance and cost of automotive fuel cell systems with ultra-low platinum loadings. *J Power Sources* 196(10):4619–4630.
- BP Statistical Review of World Energy (2016) <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf>.

- DoE (2013) US department of energy, hydrogen and fuel cell program: annual progress review. http://www.hydrogen.energy.gov/annual_progress13.html.
- Horvath, A, & Rachlew, E (2016). Nuclear power in the 21st century: Challenges and possibilities. *Ambio*, 45(1), 38-49.
- IAEA, 2017 International Status and Prospects for Nuclear Power, 2017.
- Gains, L, & Nelson, P (2009). Lithium-Ion Batteries: Possible Material Demand Issues. Argonne National Laboratory. <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/B/584>. PDF.
- Hart, D, Lehner, F, Rose, R, Lewis, J, & Klippenstein, M (2015). The fuel cell industry review 2014. *E4tech, London*. http://www.fuelcelltoday.com/media/1889744/fct_review_2013.pdf
- Körner, A, Tam, C, Bennett, S, & Gagné, J F (2015). Technology roadmap-hydrogen and fuel cells. International Energy Agency (IEA): Paris, France.
- Larminie J., Dicks A. (2003) Fuel cell explained, 2^a edn. Wiley, New York.
- Lawson, J. D. (1957). Some criteria for a power producing thermonuclear reactor. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 70(1), 6.
- Li, Q., Chen, J., Fan, L., Kong, X., & Lu, Y. (2016). Progress in electrolytes for rechargeable Li-based batteries and beyond. *Green Energy & Environment*, 1(1), 18-42.
- Manthiram, A. (2017). An Outlook on Lithium Ion Battery Technology. *ACS central science*, 3(10), 1063-1069.
- Manthiram, A., Yu, X., & Wang, S. (2017). Lithium battery chemistries enabled by solid-state electrolytes. *Nature Reviews Materials*, 2(4), 16103.
- Pfalzner, S. (2006). An introduction to inertial confinement fusion. CRC Press.
- Rifkin, J. (2003). The hydrogen economy: The creation of the worldwide energy web and the redistribution of power on earth. Penguin.
- Sawin, J. L., Sverrisson, E., Seyboth, K., Adib, R., Murdock, H. E., Lins, C., & Satzinger, K. (2013). Renewables 2017 Global Status Report.
- Shabani, B., & Andrews, J. (2015). Hydrogen and fuel cells. In *Energy sustainability through green energy* (pp. 453-491). Springer, New Delhi.
- Wikipedia 2018 https://en.wikipedia.org/wiki/World_energy_consumption, Key World Energy Statistics 2015-17.
- Wikipedia 2018b https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery.

ieee.es
Instituto Español de Estudios Estratégicos

The logo for the Instituto Español de Estudios Estratégicos (IEEE) is displayed within a white rounded rectangle with a blue border. The text 'ieee.es' is in a large, bold, sans-serif font, with 'ieee' in black and '.es' in blue. Below it, the full name 'Instituto Español de Estudios Estratégicos' is written in a smaller, black, sans-serif font.

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

The logo of the Universidade de Santiago de Compostela (USC) is shown within a white rounded rectangle with a blue border. It features the letters 'USC' in a large, white, serif font on a dark blue background. To the right, the university's name 'UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA' is written in a smaller, white, sans-serif font.

 **CESEG**
CENTRO DE ESTUDOS DE SEGURIDADE

The logo of the Centro de Estudos de Seguridade (CESEG) is presented within a white rounded rectangle with a blue border. On the left is the coat of arms of the University of Santiago de Compostela, which includes a cross, stars, and a lion. To the right, the acronym 'CESEG' is written in a large, bold, blue, serif font, with the full name 'CENTRO DE ESTUDOS DE SEGURIDADE' in a smaller, blue, sans-serif font below it.