

Jorge E Thomas

Instituto de Investigaciones Físicoquímicas Teóricas y Aplicadas, UNLP-Conicet

Sistemas de almacenamiento de electricidad

Para entender la necesidad del almacenamiento de energía debe comprenderse que la generación y el consumo de electricidad no son constantes: varían a lo largo del día, de la semana y del año, como lo ilustra la figura 1. Hay plantas de generación de funcionamiento permanente, que proporcionan energía de modo continuo: se dice que suministran *energía de base*. Y hay plantas que se ponen en marcha para abastecer la red en momentos de alto consumo y luego se detienen: se dice que generan *energía de pico*. Unas y otras, sin embargo, necesitan salir periódicamente de servicio por razones de mantenimiento planificado, además de ser objeto de detenciones accidentales o de urgencia, lo que incrementa las fluctuaciones en la provisión de energía. Como consecuencia de estos desajustes entre producción y consumo, por momentos los generadores se han puesto a funcionar para producir más energía que la demandada, y hay mo-

mentos en que la cantidad de energía demandada excede la ofrecida y acaecen los conocidos apagones.

Cuando sucede lo primero, para evitar los problemas que causaría a la red el exceso de potencia debe disminuirse la generación, sea deteniendo las plantas que pueden pararse y volver a arrancar con relativa facilidad o reduciendo el número de turbinas en funcionamiento aun al costo de desperdiciar combustible (por ejemplo, por dejar sin uso el vapor producido) o agua (por dejarla fluir por un vertedero si no se puede retener en el embalse). Esto reduce la eficiencia general del sistema.

El objetivo de los consumidores es verse libres de apagones; el de los productores y los administradores del sistema eléctrico, generar de la manera más eficiente posible toda la electricidad que haga falta o pueda venderse, sin desperdiciar energía ni dejar demanda insatisfecha. Ante esta situación, es natural que los técnicos se hayan preguntado si existe alguna forma de conservar para otro

¿DE QUÉ SE TRATA?

La electricidad no se puede almacenar como tal, pero se la puede transformar en formas de energía almacenable.

momento la electricidad que no se consume de inmediato, es decir, si es posible almacenar energía eléctrica.

Una de las principales limitaciones de las fuentes renovables de energía, como la solar fotovoltaica, la solar térmica o la eólica, es su intrínseca intermitencia. El camino para que esas fuentes puedan sustituir eficazmente a las convencionales como los combustibles fósiles es, nuevamente, disponer de sistemas baratos y masivos de

almacenamiento de la energía que no se consume de inmediato. Con ellos, el sistema de generación y distribución de energía sería menos propenso a interrupciones durante los picos de consumo, y la capacidad necesaria de generación sería menor, como lo explica la figura 2.

En algunos países se han puesto en práctica iniciativas para morigerar el efecto de dichas características estructurales del sistema eléctrico, que no eliminan la conveniencia del almacenamiento pero ayudan a reducir la cantidad de energía a almacenar.

Entre esas iniciativas se cuenta permitir a los usuarios que producen electricidad solar con paneles instalados en sus techos que entreguen a la red la energía que no consumen y tomen energía de la red cuando su generación no les resulta suficiente. También se aplican esquemas tarifarios (semejantes a los telefónicos) que hacen más costosa la electricidad en las horas pico y más barata fuera de ellas, para fomentar, por ejemplo, que actividades domésticas como lavado de ropa o de vajilla se realicen cuando el consumo es menor.

Desde hace décadas se ensayan diferentes formas de almacenamiento eléctrico que, en realidad, son formas de eludir el hecho de que la electricidad, como tal, no se puede almacenar. El principio común a todas esas formas es que transforman la energía eléctrica no almacenable en energía almacenable, que quede disponible para cuando se la necesite y permita invertir la transformación para volver a energía eléctrica. En todos los casos, se pierde energía por el camino, en cantidades que pueden en casos ser considerables. La relación entre la energía que se almacena y la que se recupera define la eficiencia del sistema y puede variar entre el $xx\%$ y el $yy\%$.

Almacenamiento hidráulico por bombeo

Es una forma extensamente utilizada de almacenar electricidad, y una de las más económicas para hacerlo con grandes cantidades de ella. Consiste en emplear la electricidad excedente para bombear agua a un reservorio elevado, es decir, transformar la energía eléctrica en energía potencial, la que se vuelve al estado de energía eléctrica

Figura 1. Potencia eléctrica (residencial más industrial) requerida para abastecer la demanda argentina en un día de alto consumo (curva superior) y en un día de consumo menor, según datos de 2013 de la Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico (CAMMESA). Las unidades del eje vertical son MW; en el horizontal se indican las horas del día.

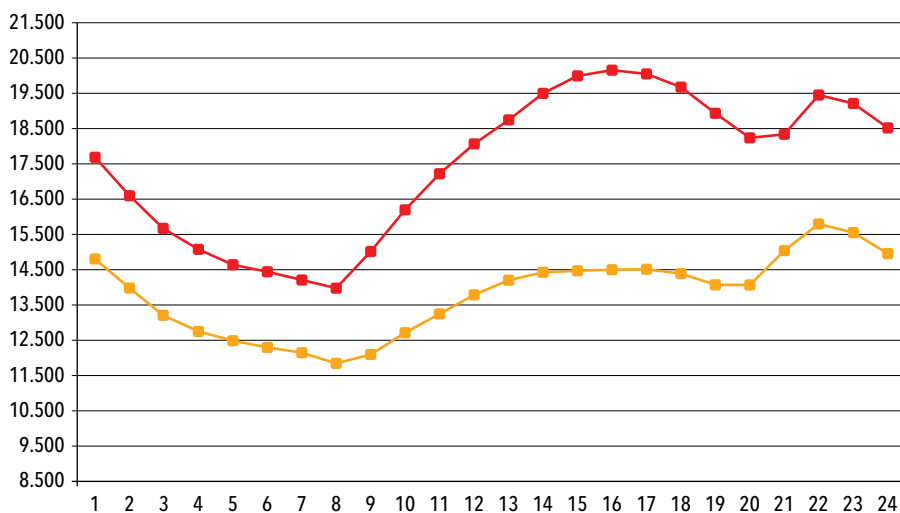
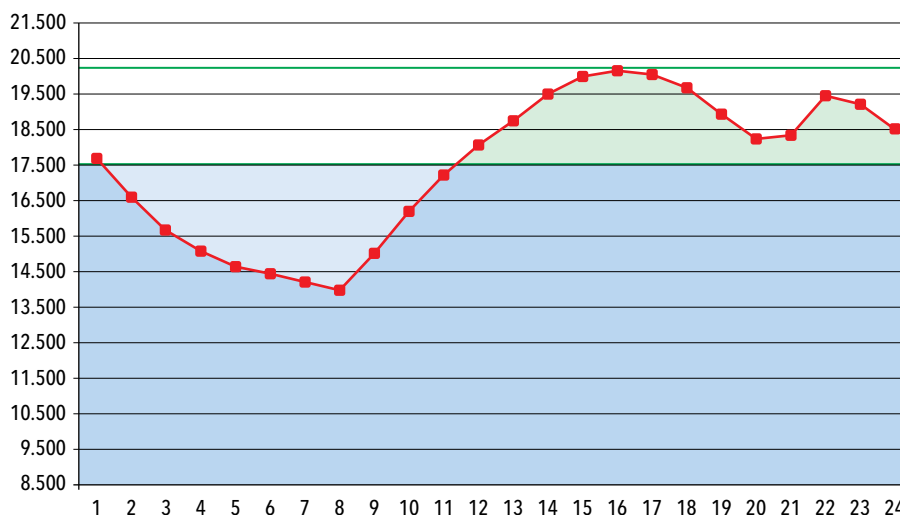


Figura 2. Potencia eléctrica necesaria. La curva roja es la superior de la figura 1 e indica la potencia instalada (en MW) requerida en cada momento para atender la demanda a lo largo de las horas de un día de alto consumo. La línea verde superior indica la potencia que corresponde a la demanda pico de ese día, unos 20.400MW. Si el sistema operara todo el día en su máxima potencia, la cantidad de electricidad producida sería la que indica el área rectangular entre dicha línea verde y el eje horizontal en la base del diagrama. Pero si se dispusiera de un sistema de almacenamiento capaz de acumular energía en la cantidad indicada por el área celeste clara, se la podría liberar para cubrir la representada por el área verdosa, lo que reduciría la potencia instalada necesaria al nivel de la segunda línea verde, unos 17.500MW, con el consiguiente ahorro.



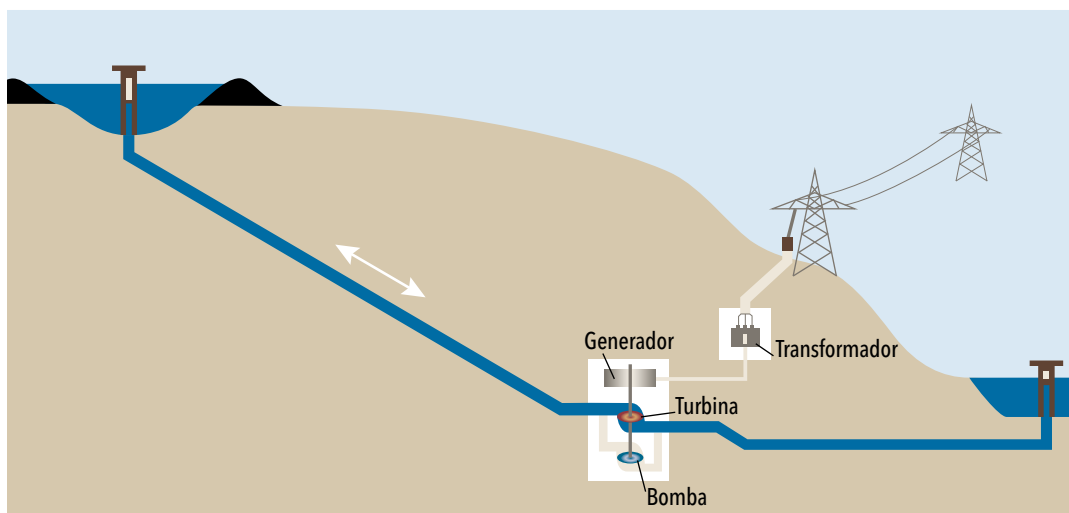


Figura 3. Esquema de una hipotética operación de almacenamiento por bombeo: cuando se genera más electricidad que la demandada, se emplea el sobrante para bombear agua del reservorio inferior (derecha) al superior; cuando se necesita más de lo que se produce, el agua antes elevada, que se deja caer por gravedad, genera electricidad que se vuelve a la red.



Figura 4. Vista aérea de reservorios de almacenamiento por bombeo en Rönkausen, Alemania, que datan de 1969. Tienen una diferencia de nivel de 270m; lleno, cada uno almacena alrededor de 1 millón de m³ de agua y ocupa una superficie de 10ha. El superior (izquierda) puede acumular 140MW de energía potencial.

haciendo descender el agua por gravedad de su depósito elevado y, como en las centrales hidroeléctricas, accionar una turbina conectada con un generador. En adición al reservorio elevado, se puede necesitar otro que contenga el agua antes y después de almacenarla en altura. Ambos reservorios sirven, además, como reservas de agua. Las figuras 3 y 4 ilustran el almacenamiento hidráulico por bombeo, algunas de cuyas instalaciones llegan a acumular en agua energía potencial por más de 1,5GW. El proceso prácticamente no genera contaminación ambiental durante su funcionamiento, pero el tamaño de las lagunas y de las centrales puede alterar el medio donde se instalan, lo que hace depender la posibilidad de usarlo de las condiciones topográficas, geológicas, paisajísticas,

económicas, poblacionales y otras de cada zona, pues no es apto para cualquier geografía. Su eficiencia puede variar entre el 65% y el 80%, según las características de las instalaciones.

Almacenamiento por aire comprimido

Otro camino basado en aumentar la energía potencial de una sustancia es el almacenamiento por aire comprimido, que consiste en almacenar aire a alta presión en grandes reservorios utilizando compresores eléctricos,

y al liberarlo accionar con él turbinas que hagan girar generadores de electricidad. El aire a presión puede ser almacenado en contenedores metálicos, pero también se ha ensayado hacerlo en cavernas sin riesgo de fugas o de colapso en los ciclos de llenado y vaciado. El sistema es un poco más costoso que el bombeo hidráulico, pero puede entrar en funcionamiento más rápidamente y cubrir pequeños desbalances de potencia en la red, algo que el bombeo hidráulico hace con más dificultad. Su eficiencia generalmente ronda el 70%.

Almacenamiento por calor latente

Otra manera de almacenar energía se basa en calentar una sustancia (agua, sales, compuestos orgánicos, concreto, etcétera) y almacenarla en reservorios térmicamente aislados, para luego utilizar su calor. No necesariamente se debe calentar la sustancia con energía eléctrica: la mayor utilidad del método está en el almacenamiento de energía solar, con la que es factible calentar sales hasta temperaturas de 400°C o más, almacenarlas, y luego generar con ellas, mediante intercambiadores de

calor, vapor de agua a alta presión que se haga pasar por turbinas generadoras de electricidad. La figura 5 muestra una instalación de esta última clase. Partiendo de la radiación solar, la eficiencia puede rondar el 80%, dependiendo del diseño y tipo de instalaciones.

Almacenamiento electroquímico

También se puede almacenar energía en *celdas electroquímicas*, en las cuales ocurren reacciones químicas que generan de electricidad (véase en este mismo número la nota ‘Dispositivos electroquímicos de conversión y almacenamiento de energía’). Una o más de tales celdas componen los dispositivos conocidos como pilas o baterías. Cada celda tiene un terminal positivo o *cátodo* y uno negativo o *ánodo* en contacto con una sustancia sólida o líquida llamada *electrolito*, que conduce los iones (átomos o moléculas con carga eléctrica). Las baterías primarias o descartables, por ejemplo las pilas alcalinas de linternas u otros administrículos portátiles, solo se usan una vez y no se recargan; las secundarias o recargables, como las de plomo-ácido de los automóviles o las de

Figura 5. Vista aérea de la planta eléctrica termosolar Andasol, ubicada a 1100m sobre el nivel de mar en la provincia de Granada, Andalucía. Ocupa unas 50ha, genera anualmente unos 182.000MWh de electricidad, tiene una potencia de generación de 49,9MW y una eficiencia de conversión de la radiación solar a electricidad (pasando por vapor de agua que acciona turbinas) del 16%. Se compone de 624 colectores de radiación con aceite como fluido transmisor de calor hasta la planta de producción de vapor, y su sistema de almacenamiento de energía térmica en sales fundidas tiene capacidad de 1010MWh, que permiten operar las turbinas por 7,5 horas.



ion-litio de dispositivos electrónicos, tanto acumulan como entregan electricidad, si bien dejan de operar después de cierto número de ciclos de carga y descarga. El almacenamiento electroquímico también incluye a los capacitores electrolíticos y los supercapacitores, en los que no hay reacción química sino otros procesos electroquímicos. Los segundos, por ejemplo, se utilizan para impulsar los tranvías de Sevilla cuando circulan por la zona histórica de la ciudad.

El almacenamiento de energía eléctrica en baterías es más eficiente que muchos otros, pues puede alcanzar y aún sobrepasar el 95%, y no necesita grandes instalaciones para realizar la conversión, ya que la batería misma transforma energía eléctrica en química (si es recargable), la almacena y la vuelve a transformar en electricidad. El costo de las baterías depende de la potencia que se necesite recuperar, de la cantidad de energía a almacenar y del tipo de batería.

Las baterías pueden cumplir muchas funciones en una red eléctrica, como cubrir demandas pico, actuar durante cortes de suministro o regular la potencia. Para cada necesidad existe una amplia variedad de baterías que pueden ser utilizadas, desde las mencionadas de plomo-ácido (figura 6) y de ion-litio hasta sistemas mu-

cho más complejos, como las baterías de sodio-azufre que trabajan a temperaturas de unos 300°C pero pueden entregar muy altas potencias, o las que se tratan a continuación, con las que están realizando grandes avances.

Baterías de flujo

Se trata de baterías de tipo secundario en las que el anolito y el catolito están principalmente disueltos en líquidos almacenados en tanques externos, en vez de ser sólidos emplazados sobre los electrodos (figura 6). Con este diseño, electrodos y celdas son de tamaño fijo, y si se necesita aumentar la energía almacenada, se usan tanques de mayor capacidad, lo cual es mucho más barato que fabricar grandes baterías. El anolito y el catolito de los tanques están conectados por medio de bombas a la celda con los respectivos electrodos, de manera que en los ciclos de carga y descarga todo el volumen del líquido vaya adquiriendo o cediendo energía eléctrica de manera uniforme.

Existen diversas baterías de este tipo, que funcionan con diferentes compuestos electroactivos en los respec-



Figura 6. Banco de baterías de plomo-ácido instaladas en el centro de datos de Atlanta, Georgia, como parte del sistema de emergencia que opera en casos de corte de electricidad. Foto Tim Dorr, Flickr.

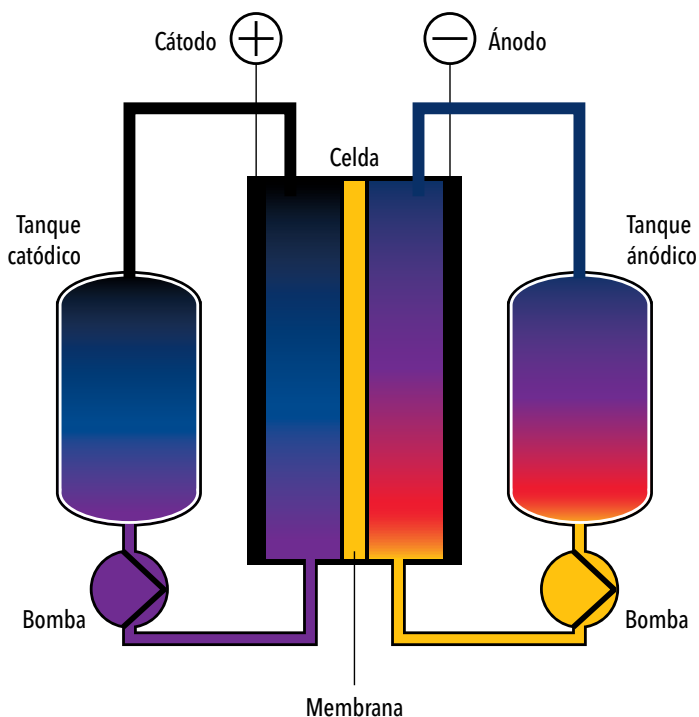


Figura 7. Esquema simplificado de una batería de flujo.

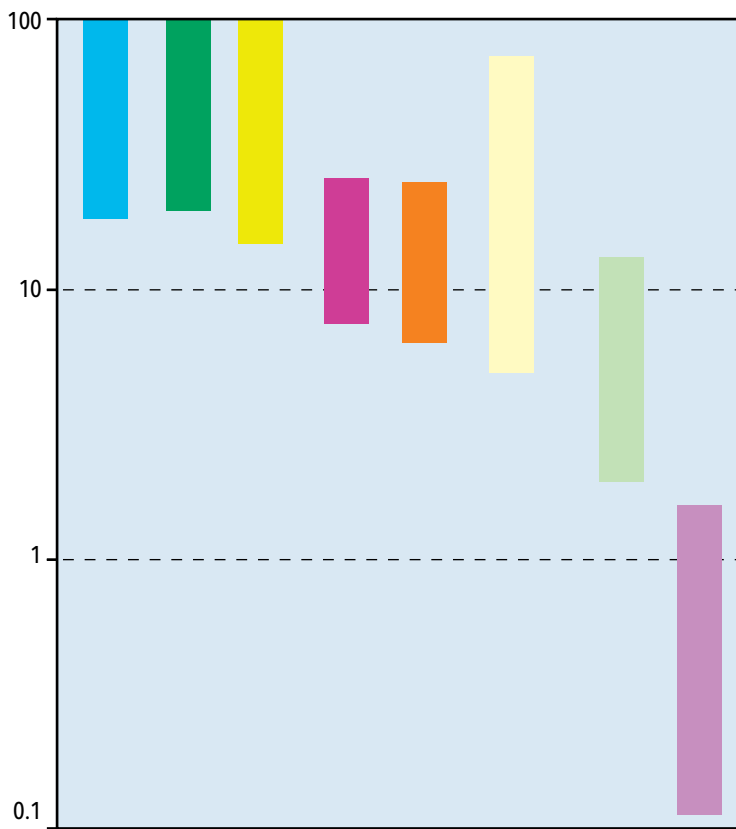


Figura 8. Costo comparativo de diferentes sistemas de almacenamiento eléctrico. Las barras, de izquierda a derecha, corresponden a baterías de plomo-ácido, níquel-cadmio, ion-litio, sodio-azufre, y las Zebra (nombre comercial). La tercera barra de derecha incluye las baterías de flujo de vanadio, zinc-bromuro y polisulfuro-bromuro; la segunda de la derecha indica el almacenamiento por aire comprimido y la última, por bombeo hidráulico.

tivos reservorios; la más conocida es la celda redox de vanadio (*vanadium redox battery* o VRB), que puede llegar a almacenar hasta 10MWh de energía. El término ‘redox’ proviene de reducción-oxidación, es decir las reacciones que producen, respectivamente, ganancias y pérdidas de electrones. La mayoría de las celdas redox de vanadio se encuentran en centrales de generación eléctrica o forman parte de las redes de transmisión.

Volantes de inercia

Otra manera interesante de almacenar energía eléctrica es convertirla en energía cinética. Un motor eléctrico consume energía de la red para hacer girar su rotor; si este es pesado, una vez cortado el suministro eléctrico, sigue girando por unos segundos debido a su inercia, y el trabajo que produce durante el tiempo que tarda en frenar puede ser aprovechado para generar electricidad. Es el almacenamiento por volantes de inercia (*flywheel energy storage*). Hay sistemas que hacen girar un rotor a muy alta velocidad (del orden de las 50.000 revoluciones por minuto) y lo mantienen mientras gira levitando sobre rodamientos magnéticos y en el vacío para evitar su rozamiento con el aire. Si bien esos sistemas pueden entregar muy altas potencias, pueden hacerlo por muy corto tiempo, comparados con las baterías o el almacenamiento por bombeo. Una reciente aplicación de este método, llamada KERS (*kinetic energy recovery system*), se incorporó a los autos de carrera de la fórmula 1, que almacenan energía del frenado en un sistema de volantes de inercia (o en baterías de litio) y disponen así de una reserva de potencia que aprovechan cuando vuelven a acelerar.

Hidrógeno

Un combustible del que se suele afirmar que es muy amigable para el ambiente es el hidrógeno, que se puede producir por la electrólisis del agua con energía generada por molinos de viento. Puede ser almacenado como gas comprimido, licuado o sólido en aleaciones, y luego utilizado para producir energía eléctrica quemándolo en celdas combustible, que dan agua como subproducto. Esta manera de almacenar energía, si bien es ecológicamente inobjetable, no ha logrado resolver algunas cuestiones técnicas.

Si esas cuestiones se resolvieran, usar hidrógeno como combustible tendría sentido en un mundo en el que sobrase electricidad de origen renovable, algo que no sucede hoy, pues esta aporta solo el 2% del total pro-

ducido. Por otro lado, el 90% del hidrógeno generado en el mundo proviene de metano, por un proceso cuya eficiencia es de entre el 30% y el 40% y, además, emite CO₂, lo que hace al hidrógeno mucho menos amigable para el ambiente que el gas natural.


Otras formas de almacenamiento

Un sistema aún en fase de investigación es el almacenamiento de energía magnética por superconducción. Se basa en bobinados de superconductores enfriados a temperaturas cercanas al cero absoluto que permiten el flujo sin resistencia de corriente eléctrica. Si esa corriente circula por una bobina que genera un campo magnético, este se puede mantener por tiempo indefinido a condición de que el equipo permanezca a la temperatura necesaria. Cuando se requiere recuperar la energía, el campo magnético la produce por inducción en las mismas bobinas. Pero los costos de fabricación de los equipos y el consumo de energía para refrigeración impiden por el momento el uso del sistema en gran escala.

Existen otras maneras de almacenar energía, que la investigación científica y tecnológica procura multiplicar y hacer comercialmente competitivas. En gran parte del territorio argentino, el uso de energía solar para generar electricidad es una posibilidad promisoriosa. En el sur del país y en la costa atlántica, lo son la energía eólica y la mareomotriz. Disponer de sistemas de almacenamiento ayudaría a que esas energías de fuentes renovables pudiesen abastecer la red, lo que permitiría ponerlas en explotación y daría más estabilidad al sistema de abastecimiento. La conveniencia de afrontar el costo de instalación de estos sistemas depende del uso que se dé a la energía y de la magnitud de los beneficios del servicio a

atender: no son los mismos por asegurar el suministro de energía eléctrica a un quirófano que a pantallas LED con publicidad en la vía pública.

La figura 6 proporciona indicaciones sobre el costo relativo de los equipos y las instalaciones de diferentes sistemas de almacenamiento de energía eléctrica. Se advierte, por ejemplo, que un sistema de baterías podría llegar a costar entre diez y cien veces más que uno de bombeo de agua de igual capacidad. La comparación no tiene en cuenta los costos de operación y mantenimiento, ni considera las diferencias de las necesidades para cuya satisfacción puede haberse diseñado cada uno. Conviene tener en cuenta, sin embargo, que la evaluación económica de las distintas opciones va más allá del costo de inversión, y aún del análisis de la rentabilidad financiera o de la eficiencia energética de cada sistema. Un sistema relativamente costoso, como un panel solar fotovoltaico de silicio multicristalino, por tomar un ejemplo, que tiene una eficiencia que ronda el 20% (de una energía que obtenemos gratis), puede proporcionar beneficios sociales suficientes (que se pueden cuantificar) para hacer rentable la inversión. Algo similar sucede con los sistemas de almacenamiento, que difieren enormemente en su costo inicial y su eficiencia, pero también en sus beneficios a lo largo de su vida útil.

Este concepto, que lleva a medir los costos y beneficios mediante lo que los economistas llaman *precios sociales*, va más allá de los sistemas de almacenamiento y resulta particularmente importante para analizar la conveniencia de las energías de fuente renovable en comparación con los combustibles fósiles, entre otras cosas porque en el mundo de la energía los precios están fuertemente distorsionados por impuestos y subsidios y, además, porque hay de por medio importantes efectos de tipo ambiental, como la emisión de CO₂, que los precios de mercado no reflejan. 

LECTURAS SUGERIDAS

BOSSELU, 2006, 'Does a hydrogen economy make sense?', *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 94, 10. Doi: 10.1109/JPROC.2006.883715

US Department of Energy, 2013, *Grid Energy Storage*, informe técnico accesible en <http://energy.gov/oe/downloads/grid-energy-storage-december-2013>.

YANG Z et al., 2011, 'Electrochemical energy storage for green grid', *Chemical Reviews*, 111, 5: 3577-3613. Accesible en <http://energy.gov/oe/downloads/grid-energy-storage-december-2013>.



Jorge E Thomas

Doctor en ingeniería, UNLP.
Investigador asistente en el
INIFTA, UNLP-Conicet.
ing.thomasjorge@gmail.com