

# El almacenamiento de electricidad distribuido: origen, estado del arte e implicaciones

**Enrique Serrano**

Responsable de Almacenamiento de Energía de PVHardware (Grupo Gransolar)

Hablar de almacenamiento de electricidad en estos momentos es hablar de un tema que acapara un interés más social o económico que meramente técnico. Las implicaciones que el desarrollo de tecnologías de almacenamiento de electricidad pueden tener en el corto plazo, pero sobre todo en el medio y largo, ponen a estas tecnologías en el foco mediático. Disruptivo es un término comúnmente utilizado y en los medios de comunicación es habitual convivir con expresiones como *e-mobility*, *smart grid*, *behind-the meter* o generación distribuida. La irrupción de Tesla viniendo desde el automóvil eléctrico (movimiento que han seguido otros grandes fabricantes) u operaciones empresariales como la de Total y Saft han avivado el interés en estas tecnologías.

Por otra parte y no menos importante, la permanente bajada de precio de las instalaciones de generación eléctrica de origen renovable, tanto solar como eólica, y por consiguiente los continuos récords de abaratamiento en el coste de la generación de estas plantas han dejado claro que el debate sobre el elevado coste de la generación renovable está superado. Un ejemplo es el récord de coste de generación con 2,99 centavos de dólar por kilovatio hora con el

que se adjudicó un proyecto fotovoltaico de 800 MW en Dubai a un consorcio internacional en el que participa el grupo empresarial Gransolar. Esto ha puesto en el foco el potencial del almacenamiento de energía como complemento a esta generación de electricidad a la que ya solo se le podía achacar que no fuera firme, fiable y disponible acorde con la demanda.

El influyente *Electric Power Research Institute* (EPRI) realiza un símil de la curva del ciclo de sobre-expectación de Gartner para todas las tecnologías eléctricas. Según EPRI las aplicaciones de almacenamiento de electricidad para el usuario final (denominadas *behind-the meter* en inglés) estarían en la actualidad en el "pico de expectativas", seguramente fruto de la exposición mediática ya comentada. Sin embargo el almacenamiento para uso distribuido estaría en el "abismo de la desilusión", muy por debajo en términos de expectativas de su potencial real. Creemos que en términos cualitativos esta descripción es del todo acertada.

Dentro de los tipos de almacenamiento de electricidad, las baterías ya han sido el gran facilitador de la electrónica portátil y ha permitido desarrollar tecnologías como la bate-

ría de iones de litio hasta el nivel de situarla como eje fundamental de la movilidad eléctrica. La llamada Economía Eléctrica exige o impone una masiva electrificación del transporte y robotización de procesos productivos y logísticos, generación distribuida e integración de renovables, y el almacenamiento sería una de las tecnologías críticas.

Además del almacenamiento de electricidad electroquímico, existen otras formas de almacenamiento de energía (mecánico, químico o térmico) pero si pensamos en sistemas distribuidos difícilmente van a ser una opción viable.

Existen dos tecnologías electroquímicas dominantes para el almacenamiento de energía: baterías y condensadores. Los condensadores son los que tienen más densidad de potencia, pero sus prestaciones en energía son muy limitadas, por eso su uso en generación distribuida se puede limitar a actuar de complemento a baterías con respuesta lenta.

En una batería la energía eléctrica se almacena de forma química. De forma simple se podría decir que se dispone de dos electrodos (ánodo y cátodo) y un electrolito por el

que circulan los iones entre los electrodos. Las reacciones químicas se pueden producir en los electrodos, como sucede en la mayoría de las baterías, o en el electrolito lo que constituye una característica única de las baterías de flujo. Por este motivo estas baterías presentan la peculiaridad de que la energía se almacena en el propio electrolito, el cual se bombea en las operaciones de carga y descarga, y por esto los electrodos no tienen la criticidad que tienen en otras tecnologías electroquímicas.

## Historia

Pilas, acumuladores o baterías surgen a comienzos del siglo XIX, junto con la aparición de la electricidad como nuevo paradigma energético. Es la época del Romanticismo Europeo y científicos como Volta o Galvani estaban en primera línea del interés social y sus experimentos y tecnologías dispararían las expectativas al máximo. Los experimentos con audiencia pública se repiten por las principales ciudades, mandatarios como Napoleón muestran su interés y hasta sirven de inspiración a artistas de la época, como en el caso del Frankenstein de Mary Shelley.

El almacenamiento de electricidad siguió su desarrollo, pero no con la velocidad que otras tecnologías eléctricas. La generación y distribución primaban. Es ya a finales del siglo XX, en la época convulsa para el sector energético de los 70, donde se establecen prácticamente todas las bases de todas las tecnologías que usamos hoy en día. Las primeras versiones de baterías de flujo o de iones litio son de ese momento, y se continúa con el desarrollo de químicas con zinc, sodio o níquel.

Desde universidades y centros de investigación de carácter público se avanza en paralelo con los grandes laboratorios y centros de desarrollo de compañías privadas del momento

(Ford, General Electric, Exxon, Bell, Philips o ya más tarde SONY). Hasta que finaliza el siglo XX es la electrónica de consumo la que sirve de catalizador para el desarrollo de las baterías de iones de litio (Li-ion), y ya en el XXI se suman los usos para movilidad eléctrica y almacenamiento estacionario para integrar con generación renovable.

Son muchas las tecnologías de almacenamiento electroquímico que se han comercializado hasta el momento con éxito (Li-ion, plomo-acido, níquel-cadmio, etc), refiriéndonos siempre a las recargables, y para distintas aplicaciones. De forma natural las tecnologías más comercializadas en el pasado han sido las primeras en incorporarse a aplicaciones de almacenamiento de electricidad estacionario, aunque no necesariamente cumplieran de forma adecuada los requerimientos necesarios.

## Actualidad

Según el *Global Energy Storage Database* del Departamento de Energía de los Estados Unidos en enero de 2016 había en el mundo 887 MW de potencia instalada de almacenamiento estacionario con tecnologías electroquímicas, teniendo un total de 1700 MWh de energía de capacidad. Ya en el verano del mismo año se contaba con 971 proyectos de almacenamiento estacionario que sumaban un total de 2994 MW de potencia. De esta potencia instalada más del 65% es Li-ion, teniendo el resto de tecnologías porcentajes por debajo del 10%.

El dominio del Li-ion tiene su explicación en la madurez de la tecnología y la masiva instalación de baterías para servicios de regulación de frecuencia y calidad de red. En este punto es cuando introducimos una variable crítica para comprender este sector, que no es otra que la gran variedad de servicios eléctricos que son necesarios para

tener fiabilidad en el uso tal y como lo conocemos de la energía eléctrica.

Más del 50% de toda la potencia instalada a nivel mundial de almacenamiento electroquímico a día de hoy está destinada a servicios auxiliares. En este caso nos referimos en su práctica totalidad a instalaciones conectadas a red y que han surgido fundamentalmente por la masiva penetración de generación renovable no firme (eólica y solar) conectada a red y a la alta variabilidad de la demanda.

## Aplicaciones

Una vez que se han descrito los antecedentes y la situación actual conviene hacer una evaluación de las posibilidades de las distintas tecnologías electroquímicas y por otra parte de los requerimientos técnico-económicos para cada aplicación, y solo así seremos capaces de poder tener una visión global.

Hasta ahora nos hemos referido a algunos servicios eléctricos, los cuales sirven de complemento a la red, ya sean para la distribución o potencialmente para el usuario. Calidad de red, regulación primaria, integración de renovables o desplazamiento de demanda requieren prestaciones distintas del sistema de almacenamiento. Es en aplicaciones fuera de red (*off-grid*) o en redes aisladas donde se encuentra uno de los principales mercados para los sistemas de almacenamiento y no se llega a tener cifras de GW de consenso, siendo esto porque el potencial es inmenso, especialmente en países en desarrollo. Para este tipo de aplicaciones el nivel de exigencia de las prestaciones del sistema va a ser más alto al tener que sustituir todo lo que supone estar conectado a un sistema eléctrico fuerte.

Las aplicaciones de potencia son las dominadoras hasta el momento, como ya he-

mos visto, con el Li-ion como tecnología de referencia. En el otro extremo, para usos intensivos de energía, con tiempos de almacenamiento de horas, las baterías de flujo están ya cerca de superar a las de sodio y con seguridad en el presente año lo harán.

No son las aplicaciones de calidad de red o regulación primaria las que espolean el crecimiento del sector, justifican inversiones en desarrollo de tecnología millonarias o hacen prever cambios de modelo de negocio en el sector eléctrico. Son los servicios al usuario final (*behind-the-meter*) y la generación distribuida en todos sus formatos (especialmente fuera de red o en redes aisladas, como ya hemos visto) los que disparan las expectativas y hacen presagiar cambios importantes en el sector eléctrico, siempre unido a la masiva implantación de generación renovable.

Una premisa importante a tener en cuenta es que no existe una tecnología ideal para todas las aplicaciones. Cada una de las tecnologías electroquímicas tienen características técnicas propias y los requerimientos pueden ser muy distintos. A lo que hay que añadir los grados de madurez, nuevas tecnologías en desarrollo, criterios económicos o medioambientales.

Desde el punto de vista técnico - económico una tecnología de almacenamiento tiene como parámetros críticos la densidad de potencia y energía, la profundidad de descarga (en inglés *Depth of Discharge*, DOD), tiempo de respuesta, eficiencia, degradación, vida útil en general y ciclos de vida útil en particular, seguridad e impacto ambiental, temperatura de uso, auto-descarga, mantenimiento, etc. Es importante resaltar que hay variables que suelen tener asociación en algunas tecnologías, como por ejemplo los ciclos de vida útil con la profundidad de descarga, en este caso siempre de forma negativa (con más profundidad

de descarga en cada uso tenemos menos ciclos de vida útil). Y como no podía ser de otra forma el coste, pero no solo por coste de instalación, sino en todas sus dimensiones (coste por ciclo, coste de operación y mantenimiento, etc). Dado que describir técnicamente todas las tecnologías disponibles y futuribles nos ocuparía un espacio que excede este formato nos remitimos a la multitud de información técnica disponible.

### Prestaciones

Potencia y energía nos sirven para responder muchas preguntas sobre almacenamiento de electricidad. Un litro de gasolina comercial está en torno a los 10 kWh y sin embargo las baterías comerciales más comunes de Li-ion pueden estar sobre los 0.1 – 0.2 kWh/kg. Es el Li-ion una de las tecnologías con mayor densidad de energía disponible en tecnologías electroquímicas maduras, por este motivo es usada mayoritariamente en electrónica de consumo y en vehículos eléctricos, pero vemos que está lejos todavía de llegar a las cantidades de energía disponible necesaria por volumen para esta última aplicación.

El resto de las tecnologías electroquímicas más comunes tienen todavía densidades de energía más bajas, por debajo de los 100 Wh/kg y en muchos casos en la franja de 30 – 50 Wh/kg. Para usos de almacenamiento distribuido la densidad de energía podría ser determinante en usos domésticos por la limitación de espacio disponible, pero no debería ser el elemento más crítico en la mayoría de sus aplicaciones. En el caso que nos ocupa debería ser el coste por ciclo durante la vida útil una de las variables de más impacto.

Cada tecnología tiene sus familias, así el Li-ion tiene el LiFePO<sub>4</sub> y LiCoO<sub>2</sub> entre otros, y como hemos mencionado sus propias características técnicas. Una de las más importantes es

la relación ciclos de vida útil y profundidad de descarga. De forma genérica podemos decir que las baterías de iones de litio tienen una vida útil de 2000 – 3000 ciclos con descargas (DoD) medias del 70%, sin olvidar que este valor se verá afectado por la temperatura de operación. Estos valores son referencias generales, pues la variedad de familias es muy grande. A modo de ejemplo, las que utilizan ánodos de titanato pueden multiplicar este número de ciclos, si bien la densidad de energía y el coste no las sitúe en el mercado de la generación distribuida. Por último, y relevante para este análisis tenemos que valorar la degradación y la vida útil del equipo, al margen de los ciclos. Salvo en el caso de las baterías de flujo, por su especial configuración, el resto de tecnologías suele tener una vida útil de sus celdas en torno a los 10 años.

Estos aspectos descritos son especialmente importantes a la hora de definir la idoneidad de la tecnología para la aplicación. Una instalación que funciona de forma aislada (*off-grid*) junto a generación renovable va a ser uno de los casos más exigentes, como ya hemos planteado. Los servicios eléctricos exigidos a la batería van a ser prácticamente su totalidad - sustituir a la red - y los ciclos y prestaciones demandadas van a ser muy notables.

Es por esto que en la actualidad el plomo-acido, con un muy limitado número de ciclos de vida útil y a pesar de su bajo coste de instalación, se está viendo desbancado por las baterías de Li-ion para aplicaciones de este tipo. Y de forma paralela se vaticina un enorme potencial en las baterías de flujo, al presentar un coste competitivo y un prácticamente ilimitado número de ciclos de vida útil.

Eficiencia y costes son otros parámetros determinantes, y no solo por la propia tecnología electroquímica sino también por el resto de elementos auxiliares del sistema. Es im-

portante tener esto en cuenta, pues se suele prestar a confusión cuando se menciona el coste o eficiencia de las celdas y no del global de la instalación. Así de esta forma se usa comúnmente el término *round-trip efficiency* para referirnos al total del sistema y con el ciclo de carga y descarga completo. En el caso de instalaciones con baterías de iones de litio incluiría electrónica de potencia, aparataje eléctrico y control entre otros, y sobre todo sistema de acondicionamiento térmico. El caso de baterías de flujo es muy similar, pero incluyendo el sistema de bombeo del electrolito y minimizando el acondicionamiento térmico.

Es ya habitual encontrar análisis con este enfoque, incluyendo también el resto de variables técnico-económicas en la vida útil de la instalación, teniendo finalmente un símil al coste ponderado de generación eléctrica (*levelized cost of energy*, LCOE) para el almacenamiento. Lazard ya publicó en 2015 su *Levelized Cost of Storage Analysis* en su versión 1, donde podemos tener una primera aproximación con cierta fiabilidad.

Aunque esta pueda ser una de las variables de más peso no hay que olvidar otras como el tiempo de respuesta (crítico para algunos servicios eléctricos), velocidad de carga y descarga o elementos de seguridad y medioambientales, etc.

El objetivo de coste de instalación del sistema de almacenamiento para el 2020 oscila en un rango de 150 - 200 US \$/kWh. Estas cifras son manejadas desde el Departamento de Energía de EE.UU. hasta por la Unión Europea, pasando con empresas tecnológicas o entidades financieras o de inversión. Este coste tendrá severas implicaciones para el uso de almacenamiento en generación distribuida, dependiendo de los ciclos de vida útil de las distintas tecnologías. Recordar que para movilidad eléctrica

es mucho más crítica la densidad de energía que se pueda conseguir que el coste del sistema. Decimos severas porque con este coste de instalación y con un número de ciclos de vida útil mínimos el coste por ciclo se sitúa por debajo de un umbral donde el sistema de almacenamiento junto con generación renovable fotovoltaico o eólica es tremendamente competitivo.

Es difícil poder ofrecer unos datos fiables de costes de sistemas por tecnologías en el momento actual. El dinamismo de esta industria, la entrada en producción de nuevas factorías y el escalado de la fabricación nos proporcionan distintos costes para la misma tecnología en función al periodo y cantidad del suministro. Lazard situaba el coste de la práctica totalidad de las tecnologías en la horquilla de los 500 – 1000 US \$/kWh en el año 2015.

## Tecnologías

La lista de tecnologías electroquímicas disponibles a nivel comercial y sus correspondientes familias es muy extensa, pero las que están en desarrollo en la actualidad en distintos niveles la supera con creces.

La batería de plomo-ácido regulada por válvula (VRLA) tiene como principales variedades las de gel y AGM, que junto con las de electrolito líquido son sus principales familias. El tejido industrial alrededor de estas tecnologías es inmenso, y la madurez tecnológica es la más alta del sector, sin embargo por distintos factores (limitados ciclos de vida útil y profundidad de descarga, además de problemas ambientales) el sector del almacenamiento para generación distribuida no está apostando por esta tecnología.

El níquel-cadmio (NiCd) ha sido el formato tradicional que usaba el níquel como elemento principal, y ya desde hace algún

tiempo las baterías de níquel-hidruro metálico (Ni-MH) se están desarrollando fuertemente. Sin embargo ambas tecnologías tampoco dan buen perfil para aplicaciones en generación distribuida.

Las baterías de metal aire han recibido mucha atención en los últimos tiempos, principalmente por las densidades de energías teóricas que presentan (miles de Wh/L). En la actualidad se cuentan con tecnologías de uso primario - no recargables – como pueden ser las de zinc. Se está trabajando con litio o aluminio, pero tienen importantes retos tecnológicos para ser fiables (seguridad) y viables (eficiencia).

La batería de iones de litio es sin duda la que domina en la actualidad el uso de almacenamiento para gestión de electricidad, además de las aplicaciones portátiles o móviles, o más bien gracias al desarrollo tomado en esas aplicaciones se ha convertido en un actor relevante en el sector eléctrico. Según distintas entidades de estudios en 2013 casi el 75% de las celdas de Li-ion vendidas en el mundo eran para teléfonos, tablet y ordenadores portátiles.

LiFePO<sub>4</sub>, LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> y LiCoO<sub>2</sub> pueden ser las principales familias tecnológicas dentro de las baterías de iones de litio. Todas ellas se encuentran entre el 20 y el 30% de la densidad de energía teórica a la que podrían llegar, sin superar aún los 250 Wh/kg. La batería de litio-azufre es otra de las promesas por el potencial de densidad de energía al que podría llegar, más de 400 Wh/kg, pero no es una realidad industrial en estos momentos.

Las baterías de flujo han disparado sus expectativas especialmente por el uso en generación distribuida o como complemento a la red eléctrica. Al contener la energía en el electrolito que se bombea tienen la ca-

racterística única de que potencia y energía están desacopladas y pueden configurarse por separado. Además no tienen los procesos de degradación habituales en otras tecnologías al ser los electrodos únicamente colectores de corriente. Con un correcto mantenimiento pueden tener una larga vida útil y miles de ciclos de operación.

La principal barrera en la actualidad es la experiencia y madurez de la tecnología, una vez que el coste está bajando gracias al escalado industrial y la correspondiente bajada de costes de sus elementos principales. Esta tecnología, pese a tener su origen entre las décadas de los 70 y 80, ha despegado comercialmente muy recientemente, arrastrada por la sustancial bajada de precios de la generación renovable. Pese a ser una tecnología con más de 30 años, su baja densidad de energía no le había permitido encontrar su hueco de aplicación hasta ahora.

Siendo una de las tecnologías más prometedoras para su uso combinado con renovables se han relanzado químicas que habían quedado en el olvido (hierro-cromo, hierro o bromo-hidrogeno) y por supuesto las más comercializadas: zinc-bromo y vanadio. Aunque hay exitosas compañías que comercializan sistemas de zinc-bromo y que han tenido importantes operaciones mercantiles sobre ellas para potenciar su actividad comercial, sin duda el dominador tecnológico y comercial es el vanadio. De esta tecnología son los grandes proyectos comerciales en demostración en EE.UU., China o Japón, siendo en este país donde se cuenta con el sistema de más potencia y capacidad (15 MW / 60 MW) que opera conectado a red en una zona con alta penetración eólica.

Distintos centros de investigación coinciden en que el futuro de estas baterías de flujo

pasa por que en el medio plazo sustituyan el electrolito con pares metálicos por electrolitos con elementos orgánicos. Este cambio no es trivial, pese a seguir utilizando el mismo *hardware* los nuevos electrolitos podrían romper los límites de las prestaciones y los costes objetivo. Investigadores en EE.UU. (Harvard, MIT, PNNL, etc), Alemania o China están lanzados a la carrera de formular moléculas orgánicas con características diseñadas a medida y coinciden en que el futuro de esta tecnología pasa por evolucionar a este tipo de electrolitos.

Citábamos antes la densidad de energía que tenía un litro de gasolina comercial (recordar, de origen orgánico), sabemos de la energía que puede contener los azúcares u otros tipos de compuestos orgánicos, y además entra en juego el diseño de los compuestos, por lo que a priori no existiría límite teórico para estas baterías. Electrolitos en desarrollo ya han demostrado densidades de energía superiores al Li-ion (sin ser estables aún), y es un camino que se acaba de comenzar a recorrer. El atractivo de poder diseñar sin límite las prestaciones del electrolito y eliminar el uso de metales (coste y problemas de suministro) refuerza los esfuerzos en estas líneas de trabajo.

### Escalado

Muchas veces olvidado, no podemos dejar de hablar del impacto del escalado industrial en el futuro de cada tecnología. Este fue el gran error de muchos analistas con la industria fotovoltaica. Se puso demasiado el foco en los posibles avances de prestaciones o nuevos materiales y se olvidó el impacto de la fabricación masiva en este sector. Simplificando, y sujeto a discusión, un módulo fotovoltaico utiliza unas materias primas sin coste relevante, y depende de tener procesos de fabricación térmicamente eficientes y con escala masiva. Todas

estas premisas eran reales (silicio abundante; optimización de la fabricación, recuerden el cambio en las refinerías de petróleo después de la crisis de los 70 con respecto a las mejoras de eficiencia térmica en procesos) y en la actualidad tenemos módulos fotovoltaicos con las mismas prestaciones, prácticamente, que hace 20 años pero que han llegado a tener un coste que ha conseguido hacer tambalear el sector eléctrico.

Esta misma pregunta es la que surge con la próxima entrada en producción de las megafactorías para baterías de iones de litio. ¿Cuánto bajara el coste de estas celdas?, es difícil pronosticar. Las materias primas en este caso tienen aspectos distintos, y sobre todo nos encontramos ante procesos de transformación complejos y costosos. Sí que hay consenso en que la única forma de hacer viable esta industria es ir a modelos de megafactorías muy intensivas en capital.

Teniendo en cuenta estos factores, existen análisis que pronostican que el escaldado de la fabricación de baterías de flujo puede ser más asumible y lograr un abaratamiento del producto final más rápido. Quizá el análisis más fundamentado lo aporten investigadores del *The Joint Center for Energy Storage Research* (JCESR) de EE.UU., donde comparan inversiones para las mismas capacidades de fabricación de baterías de iones litio y baterías de flujo, concluyendo que es menos costoso, más rápido y con más impacto en el coste final de las baterías el escaldado gradual de fabricación de baterías de flujo, siendo el efecto final en ambas solo comparable en grandes magnitudes. Esto puede ser visto desde la perspectiva de que la fabricación de baterías de flujo es muy similar a la industrial asociada a la fabricación de automóviles (plásticos, ensamblajes, etc) y la fabricación de baterías de litio introduce transformación compleja de elementos, procesos químicos sofisticados, etc.

## Futuro

Es difícil anticipar el futuro, incluso a corto o medio plazo, con los niveles de inversión en desarrollo que se están viendo en los últimos años. Hay que mantener la premisa de que el almacenamiento de electricidad no deja de ser una tecnología energética, y que su velocidad de penetración en el mercado está condicionada por factores como desarrollo de prototipos, test, validaciones, horas de operación, escalado industrial, fabricación masiva, desarrollo de normativas, aceptación de uso, etc.

El Departamento de Energía de Estados Unidos cifraba su inversión en el periodo 2000 – 2012 en más de mil millones de dólares, destinada al desarrollo de tecnologías de almacenamiento en sus primeros estadios. Desde ese periodo, Lux Research estima la inversión directa en compañías tecnológicas del sector en más de 4000 mil millones de dólares, con una cifra promedio por compañía en su fase de lanzamiento de 40 millones de dólares. Existen otros estudios de las inversiones realizadas en el desarrollo de tecnologías y en la capacidad de fabricación ya de tecnologías maduras.

Goldman Sachs o Deutsche Bank, McKinsey o Deloitte intentan poner perspectiva y datos sobre un sector con un dinamismo tremendo, al que incluso es difícil seguir. Iniciativas como la *Breakthrough Energy Coalition* (formada por Bill Gates, Mark Zuckerberg o Richard Branson) prometían en el 2015 más de 20 mil millones de dólares de inversiones en tecnologías *Clean Tech*, los *Big Three* del Li-ion (Samsung, LG y Panasonic) comprometen en investigación disruptiva cifras multimillonarias, y así desde la investigación fundamental hasta las inversiones en megafactorías, y tanto en el sector privado como el público.

El número de patentes y publicaciones científicas crece de forma exponencial y hace aumentar la masa crítica de trabajo realizado. El desarrollo de este trabajo va ganando velocidad gracias al efecto acumulativo de la experiencia adquirida y a la sinergia con otros campos tecnológicos como el desarrollo de nuevos materiales o simulación computacional, y todo esto nos trae continuos avances de las tecnologías existentes y nuevas propuestas.

Hay que recordar, otra vez, que este furor de nuevas tecnologías, prestaciones y posibilidades hay que verlo desde el punto de vista de tecnología energética y todo lo que conlleva, de lo cual ya hemos comentado brevemente. No son los plazos de medicamentos o productos farmacéuticos pero tampoco son los del mundo de Internet.

Como siempre recuerda Stanley Whittingham, uno de los pioneros en las baterías de iones de litio y científico candidato al premio nobel de química, las tecnologías electroquímicas para almacenamiento de electricidad no siguen la ley de Moore. Esto es muy importante tenerlo en cuenta, y quizá pueda haber sido uno de los errores de compañías que han puesto el almacenamiento como tecnología estratégica en sus productos. Siguiendo el pensamiento de Whittingham, de cara a plantear el futuro tecnológico del almacenamiento, debemos calcular los límites teóricos de las tecnologías y el uso de materias primas y coste de procesado. Con la práctica totalidad de las tecnologías existentes esta tarea no es complicada al estar fundamentadas básicamente en elementos metálicos.

Curiosamente es el propio Whittingham, precursor del Li-ion en los 70, el que primero propuso la época post litio. El difícil procesado de electrodos y la limitada disponibilidad de litio para una economía eléctrica

le llevo a pensar en electroquímicas no basadas en litio. Magnesio, sodio o zinc como sustitutos del litio, baterías de metal – aire o baterías de flujo para esta era *Beyond-Lithium* son propuestos por este científico.

## Impacto

Según Genis Roca (uno de los 25 españoles más influyentes en tecnologías digitales) los grandes cambios en la humanidad han venido por cambios del modelo productivo o cambios del modelo de transmisión de conocimiento (desde el jeroglífico a la escritura, a la imprenta, al audio, el vídeo y en la actualidad a los medios digitales). La aparición de las tecnologías líticas, la domesticación de las especies, la industrialización, la electricidad y finalmente la llegada de los medios digitales serían los cinco grandes cambios de modelo productivo que ha tenido la humanidad hasta la fecha. La generación distribuida fusiona el uso de la electricidad junto con los medios digitales, y esto puede hacer prever un cambio sustantivo, sobre todo de modelo de negocio en el sector eléctrico.

La generación distribuida necesita de nuevo *hardware* eléctrico (almacenamiento o electrónica de potencia), pero sobre todo necesita de un tremendo procesado de información para ser viable. Todos tenemos claro que esto ya es posible, y el potencial es palpable (Apple ya se ha convertido en compañía eléctrica en EE.UU.).

Existe gran debate académico e industrial sobre cómo debe ser o será el modelo de negocio del almacenamiento, pero siempre bajo la perspectiva del mercado eléctrico de *utility* unidireccional que ha funcionado con éxito hasta la actualidad. Quizá la respuesta deba surgir planteando otro enunciado, y es que, aunque es muy complejo aventurarse, con toda seguridad las reglas del mercado eléctrico van a cambiar.

Podemos introducir la experiencia, en lo que se refiere a evolución en el mercado, del sector fotovoltaico y eólico. Tecnológicamente y en potencia instalada el crecimiento de ambas es exponencial, no hay récord u objetivo que se vea superado mucho antes de lo esperado. Sin embargo, y con gran similitud a ámbitos digitales asistimos a un continuo de casos de quiebras de grandes compañías (promotores, operadores o fabricantes, da igual). El crecimiento del mercado es brutal, pero el darwinismo de este sector no es menos impresionante. ¿Existe un modelo de negocio fiable y repetible? quizá no. Desde luego no van a tener mucho tiempo para probarlo.

El centro de estudios *The Oxford Institute for Energy Studies* publicó en 2015 un muy recomendable estudio titulado *The Scissors Effect*, donde analizaban multitud de facto-

res que afectan al modelo de negocio eléctrico convencional y su desempeño en el último tiempo. Podemos resumirlo en que cada vez más clientes tienen fuertes incentivos para salirse del sistema y el coste del mismo se reparte entre menos, por lo que se agrava el problema. Esto además, y no menos importante, tiene un fuerte impacto en el sistema regulatorio y recaudatorio de los estados, y es que nuevamente ven cómo un sector económico crítico y de gran tamaño empieza a operar fuera de su alcance.

¿Puede la electricidad pasar de ser un producto (consumido en tiempo real) a ser un servicio? Hasta el día de hoy, aplicando la lógica de Internet y la transformación digital esto siempre se ha cumplido, tarde o temprano. El almacenamiento eléctrico es parte de ese nuevo *hardware* eléctrico que nece-

sita la generación distribuida, con unos requerimientos técnicos y costes asimilables. Fotovoltaica, eólica e incluso sistemas de cogeneración de pequeña escala presentan ya unos costes viables para afrontar estos retos. El almacenamiento prácticamente ya lo está, y el potencial de manejo de información para operar todo no hace más que crecer.

Un importante ejecutivo de una compañía eléctrica me decía que el problema de la generación distribuida era que sobre todo era distribuida, y sus estructuras no podían operar así. Comienza a ser una tendencia en escuelas de negocio que lo crítico son las tecnologías y no los modelos de negocio, que estos van a tener una vida tan corta y presentan tantas incertidumbres que no deberían ser estratégicos. Quizá sea el enfoque correcto. ■