



# Acumulación de energía por bombeo y sus efectos en el sistema

Ing. Federico Sanz

*Universidad de la República, Uruguay, [federicosanzpol@gmail.com](mailto:federicosanzpol@gmail.com)*

**RESUMEN:** La acumulación por bombeo representa más del 94% de la capacidad global de almacenamiento de energía instalada, y presenta varias ventajas tales como su alta vida útil, bajo costo de operación, alto nivel de sostenibilidad y escala. Los 161.000 MW de acumulación por bombeo existente en el mundo sostienen la estabilidad de la red, reduciendo los costos del sistema y emisiones en la generación.

Se estima que la capacidad global de acumulación por bombeo es de 9.000 GWh. Esta tecnología y su operación se están adaptando a los cambiantes requerimientos del sistema de energía debido a la presencia de las energías renovables variables como la eólica y solar.

Los sistemas de acumulación por bombeo, de velocidad variable y ternarios, permiten rápidos y amplios rangos de operación, proporcionando flexibilidad adicional en todas las escalas de tiempo, lo que permite una mayor penetración de las energías renovables variables.

A medida que las fuentes de financiación se vuelven más impredecibles y los mercados son lentos a la hora de remunerar la flexibilidad, la acumulación por bombeo necesita asegurar nuevas fuentes de ingresos confiables y a largo plazo para poder atraer la inversión, particularmente en mercados de energía liberalizados.

Motivado por la creciente penetración de eólica y solar, y la necesidad de mayor flexibilidad, se espera que para 2030 unos 78.000 MW adicionales o un incremento de 50% en la capacidad de acumulación por bombeo sea puesta en marcha. Esto podría llegar a ser mayor con las políticas energéticas y reglamentación de los mercados pertinentes.

**PALABRAS CLAVE:** energía, acumulación, hidráulica, hidroeléctrica, generación, almacenamiento.

## 1 INTRODUCCIÓN

En la tendencia global hacia modificar la forma de obtener energía, se considera que la acumulación será un factor determinante. En su informe especial publicado en 2018, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) hace hincapié en que los recursos que le den al sistema una mayor flexibilidad como la acumulación, serán esenciales para permitir una rápida incorporación de las renovables.[1]

Desde el inicio del siglo XX, la acumulación de energía por bombeo, ha estado otorgando flexibilidad a las redes eléctricas. En la actualidad, esta forma de almacenamiento representa más del 94% de la capacidad global instalada en términos de potencia, y 99% en términos de capacidad de acumulación de energía, y ha sido utilizada como una forma de desfasar la carga y balancear otras fuentes inflexibles. [2]

En el 2018, se dio el mayor crecimiento anual de capacidad de generación renovable, donde la eólica y la solar fotovoltaica (PV) fueron responsables del casi 60% de lo agregado, remarcando que una transformación global de los sistemas eléctricos está en camino. [3] El éxito de estas tecnologías, basado en una reducción de costos y políticas gubernamentales favorables, viene generando cambios en los sistemas de generación en el mundo entero y presentan una variedad

de desafíos técnicos, regulatorios y de mercado.

El beneficio de la acumulación por bombeo (AxB) radica en su capacidad de balancear la naturaleza variable del viento y el sol, logrando disponer energía confiable a gran escala bajo demanda por períodos de tiempo sostenidos, lo que evita la necesidad de tener que limitarlas durante períodos de exceso de oferta, así como también facilita el incremento en su grado de desarrollo. A medida que las fuentes de energía renovables variables (ERV) continúan desplazando a la generación fósil, la flexibilidad del sistema pasa a ser una herramienta crucial a la hora de prevenir tanto interrupciones al consumidor final, así como también extremada volatilidad de precios.

Mientras que en los últimos años se le ha prestado gran atención a nuevas tecnologías como la acumulación en baterías, según la IHA, se espera que la AxB crezca en varias partes del mundo con hasta 78.000 MW de capacidad adicional a ser puesta en marcha para el año 2030. Se busca en este trabajo, remarcar los atributos que tiene esta alternativa de filtrado de la generación, las innovaciones tecnológicas y operacionales que contribuyen a la flexibilidad del sistema y como puede trabajar en sintonía con otras opciones como las baterías o interconexiones a larga distancia en sistemas compuestos principalmente por renovables como la eólica, solar e hidroeléctrica y de que forma puede verse afectado el sistema.

## 2 EL PROBLEMA

Si bien los beneficios de las energías renovables son muchos, una de las críticas que a menudo se le hace es que las tecnologías como la eólica y la solar solo producen energía cuando sopla el viento o cuando brilla el sol. Se argumenta que no es posible utilizar de manera efectiva estas energías hasta que no se desarrolle una tecnología apropiada de almacenamiento o acumulación de energía.

La dificultad asociada con la integración de fuentes variables de energía proviene del hecho que los sistemas y redes eléctricas por lo general han sido diseñados en torno al concepto de generadores de gran porte que pueden ser controlados y regulados. En la actualidad, los operadores de red utilizan métodos de planificación para garantizar que las plantas de energía produzcan la cantidad de electricidad que en el momento se requiere con el fin de satisfacer de manera consistente y confiable la demanda eléctrica. Debido a que la red tiene muy poca capacidad de acumulación, se debe mantener en todo momento el equilibrio entre el suministro y la demanda para evitar inconvenientes que pueden resultar en cortes de energía y otros problemas en la red. La potencia fluctúa en múltiples horizontes de tiempo de manera intermitente, lo que obliga al operador de la red a ajustar sus procedimientos operativos diarios en tiempo real.

Tomando el ejemplo de la energía solar la cual inherentemente solo se presenta disponible durante las horas del día, hace que el operador de la red deba ajustar el plan diario de manera de ir agregando generadores que puedan ajustar rápidamente su potencia de salida para compensar las fluctuaciones en este tipo de generación. En redes donde originariamente se contaba con

usinas térmicas a base de combustibles fósiles, que operaban las veinticuatro horas del día, todos los días de la semana, la incorporación de energía solar puede hacer que se tengan que sacar de servicio esas centrales durante las horas del día cuando hay sol.

Además de las fluctuaciones diarias causadas por el amanecer y el ocaso, la energía eléctrica producida por los paneles solares también puede cambiar repentinamente debido a la nubosidad. La variabilidad causada por ello puede hacer que sea más difícil para el operador de red pronosticar cuanta generación eléctrica adicional se requerirá durante la próxima hora, por lo que es difícil calcular exactamente cuál será la potencia de salida de cada generador que logre la sintonía adecuada entre la carga y la demanda.

Las rápidas fluctuaciones en la producción de energía eólica o solar no solo interrumpen la forma de planificar el sistema, sino que también el equilibrio segundo a segundo entre la oferta y demanda eléctrica total. Debido a que la energía eólica y solar aumentan la magnitud del déficit o exceso repentino de generación de energía, el operador de red requiere mayor capacidad de reserva lista para responder en cualquier momento para poder garantizar que la red permanezca equilibrada.

Si bien es cierto que las energías renovables interrumpen el funcionamiento de la red de varias maneras, no es imposible filtrar la intermitencia que generan y de hecho existen diversas tecnologías a disposición para lograrlo.

### 3 TECNOLOGÍAS EN ACUMULACIÓN

Dentro de las varias formas de acumulación utilizadas, se pueden encontrar por ejemplo las baterías de estado sólido, las baterías de flujo, los sistemas por aire comprimido, los sistemas térmicos, volantes de inercia, por bombeo, a base de hidrógeno, superconductores magnéticos y super-capacitores entre otros.[4]

Una central de acumulación por bombeo es un proyecto hidroeléctrico el cual genera energía utilizando agua que ha sido previamente bombeada desde una reserva inferior hacia una superior. Debido a la inmensa escala lograda a través de estas aplicaciones, este es el tipo más común de almacenamiento de energía a escala de red. En la figura 3.1 puede verse un esquema de funcionamiento de una de estas centrales.



Figura 3.1. Esquema de funcionamiento de una central de acumulación por bombeo.[5]

A medida que la innovación va generando mejoras en el desempeño y costos de las baterías de litio, la AxB mantiene ciertas ventajas que la distinguen. Esta tecnología toma relevancia en el amplio rango de capacidad de potencia y energía ofrecida por instalaciones existentes en el mundo. Los proyectos de AxB de gran escala se caracterizan por su elevada relación energía-potencia. Por ejemplo, la instalación de mayor envergadura en EEUU, Bath County (de ciclo cerrado), con una capacidad de 3.060 MW/24.000 MWh. Los sistemas de ciclo abierto actuales pueden llegar hasta los 100 GWh de energía almacenada como el caso del emprendimiento Vilarinho das Furnas en Portugal.[6] La central de acumulación de 3.600 MW en construcción de Fengning en China será la más grande del mundo una vez completada en el año 2025. Las baterías de litio y otros sistemas de rápida respuesta son usualmente empleadas en redes de pequeña escala operando en el rango de kW a MW. En términos de tiempo de descarga, haciendo referencia a cuánto tiempo puede ser mantenida la potencia de salida mientras se libera la energía, típicamente las centrales de AxB pueden generar hasta 12 horas (y más en algunos casos) si está siendo cargada y descargada en un período de 24 horas.[7] En comparación, las baterías usualmente proveen un almacenamiento de corta duración, lo que significa que el ciclo de carga y descarga dura menos tiempo. Por ejemplo, la batería de 100 MW del sur de Australia puede almacenar 129 MWh de energía, de manera que si es utilizada a capacidad nominal, solamente es capaz de aportar energía durante poco más de una hora.

Mientras que una central de AxB puede tomar varios años en ser construida, son el tipo de tecnología de almacenamiento con la que se obtiene mayor vida útil, de 60 a 100 años. A pesar de que el montaje de un banco de baterías es mucho más rápido, tienen la limitante de que se degradan también rápidamente (la eficiencia del ciclo entero puede caer entre un 85 y 70%) y su vida útil no supera los 10 años, dependiendo de las condiciones de operación: tales como la frecuencia del ciclo, profundidad de descarga y temperatura.[8] Según [9], en una base de costo de capital por kWh la AxB puede llegar a ubicarse dentro del rango de USD 200 a USD 300 mientras que en la misma base el rango de valores para las baterías de iones de litio es de USD 400 a USD 900.\* En términos del LCOE, la AxB se ubica entre los USD 150 y USD 200 por MWh mientras que en el caso de las baterías de litio lo hacen entre USD 250 y USD 500 por MWh. Si bien estos valores refieren a instalaciones de grandes saltos y podrían variar en la realidad nacional, esto refleja por ejemplo, que las baterías poseen una vida mucho más corta como también la necesidad de un reemplazo regular. Sumado a eso, dada la habilidad de la AxB de almacenar energía durante días y hasta semanas a un muy bajo costo, incluso teniendo en cuenta el potencial que tienen hoy las baterías de reducir su valor, la AxB continúa siendo una solución económicamente efectiva para grandes cantidades y períodos de almacenamiento.

Con respecto a la sostenibilidad de ambas tecnologías, existen diversas variables a considerar. En el caso de la AxB a menudo se trata de una propuesta específica del sitio mientras que las baterías pueden ser montadas modularmente cercanas al centro de consumo. Muchos de los impactos ambientales de construir y operar una central de bombeo pueden ser mitigados, aunque suelen implicar costos asociados. Utilizando reservas existentes o sistemas de ciclo cerrado apartados del río, se pueden reducir los impactos de manera significativa.[10] El análisis detallado y comprensivo sobre la vida útil de las baterías aún se encuentra en una etapa temprana, pero estudios recientes indican que el potencial de calentamiento global de las baterías sobre un período de 100 años podría ser el doble que el de la AxB.[10] Gran parte de esto se debe

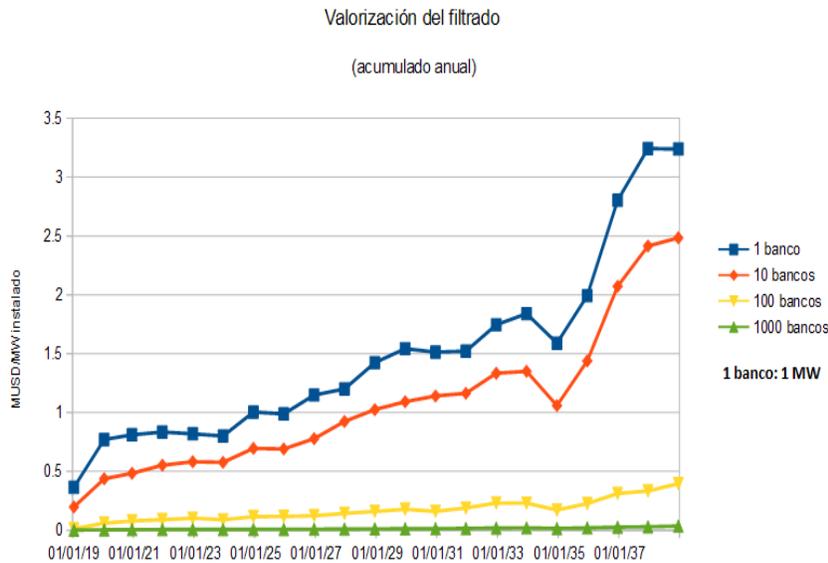
---

\*El costo por unidad representa el costo del capital o inversión para desarrollar una instalación de acumulación mientras que el LCOE tiene en cuenta los costos totales, incluyendo los del capital y de operación del proyecto, sobre una vida de 20 años dividido la energía total generada.

a las emisiones asociadas con las vastas cantidades de materiales en bruto tales como el litio, grafito, cobalto y níquel (principalmente durante el minado, refinado y manufacturado) requeridos debido al envejecimiento y corta vida útil.

Debido a tratarse de sustancias tóxicas y contaminantes, además de la capacidad de entrar en combustión espontáneamente del litio, la disposición final de las baterías representa un problema de mayor complejidad.

Teóricamente, ambas tecnologías pueden ofrecer servicios secundarios y de balance similares, pero últimamente debido a sus características técnicas son aplicados y utilizados de manera diferente. Las ventajas de la AxB están en su efectiva relación costo de acumulación y su capacidad de descargar grandes cantidades de energía rápidamente mientras que las baterías suelen ser más apropiadas para balance incremental de corto plazo debido a su capacidad de liberar su energía en cuestión de milisegundos (la AxB puede llegar a demorar más de 60 segundos en entrar en régimen). Por esta razón los bancos de acumulación menores tienden a ser despachados antes que las centrales de acumulación de mayor porte, lo cual puede jugar en contra de su viabilidad económica. En la figura 3.2, puede verse una estimación de la valorización del filtrado acumulado anual en valor esperado para las diferentes potencias, como resultado de 100 simulaciones realizadas para un sistema de energía como el nacional, el cual cuenta con una elevada componente eólica (1500 MW instalados para una demanda anual media aproximada de 1300 MW)[11], lo cual remarca la complementariedad de ambas tecnologías y la necesidad de su estudio. Con la demanda creciente de energía eléctrica y la tendencia por descarbonizar la generación el alcanzar la mejor solución para un sistema dependerá de sus circunstancias particulares.



## 4 CONCLUSIONES

La acumulación de energía, tiene un rol crucial a la hora de facilitar mayores niveles de penetración eólica y solar. Debido a sus altas capacidades de acumulación y alta relación energía/potencia, la AxB ofrece la posibilidad de aportar amplios rangos de flexibilidad al sistema para balancearlo. El nivel de generación libre de carbono requerida para alcanzar los ambiciosos objetivos climáticos sugiere que la AxB pueda ser requerida para trabajar en conjunto con otras tecnologías de acumulación, especialmente baterías, además de otros recursos de flexibilización de la red.

Se trata de una tecnología ampliamente comprobada, que se destaca por su alta capacidad y potencia. El desafío estaría en desarrollar el mercado y marco regulatorio que ayuden asegurar su contribución en la transición hacia energías menos contaminantes siendo utilizada complementariamente con otros sistemas de respuesta rápida.

## 5 AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de ingeniería (UdelaR) por el apoyo económico, y a los tutores: Dr. José Cataldo y MSc.Ing. Ruben Chaer.

## 6 REFERENCIAS

- 1 IPCC [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)], (2018). Summary for Policymakers in: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- 2 IEA (2018). Renewables 2018, International Energy Agency of the Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris, France.
- 3 REN21 (2018). Renewables 2018 – Global Status Report, REN21 Secretariat, Paris, France.
- 4 Vaughan D. and N. West (Agosto 2017). Batteries vs Pumped Hydro – Are they sustainable? Entura. Recuperado de <http://www.entura.com.au/batteries-vspumped-storage-hydropower-are-they-sustainable/>
- 5 Revolution of EV in a Lankan perspective (12 de Mayo 2019). Recuperado de <https://evrev.lk/2019/05/12/pumped-hydro-storage>
- 6 EDP (Noviembre 2018) Vilarinho das Furnas – Technical Information, Energias de Portugal, Recuperado de [https://a-nossa-energia.edp.pt/centros\\_produtores/info\\_tecnica.php?item\\_id=63&cp\\_type=&section\\_type=info\\_tecnica](https://a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/info_tecnica.php?item_id=63&cp_type=&section_type=info_tecnica)
- 7 EASE (2016). Pumped Hydro Storage, Energy Storage Technology Descriptions, European Association for Storage of Energy, Brussels, Belgium. Recuperado de [http://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/07/EASE\\_TD\\_Mechanical\\_PHS.pdf](http://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/07/EASE_TD_Mechanical_PHS.pdf)
- 8 Newbery, D. (2016). A simple introduction to the economics of storage: shifting demand and supply over time and space, Working Paper, Energy Policy Research Group, University of Cambridge, Cambridge, UK.
- 9 Lazard (2016). Lazard’s levelised cost of storage – Version 2.0. Recuperado de <https://www.lazard.com/media/438042/lazard-levelized-cost-of-storage-v20.pdf>
- 10 Kruger et al. (2018). Li-Ion Battery versus Pumped Storage for Bulk Energy Storage – A comparison of Raw Material, Investment Costs and CO2-Footprints, Hydrovision 2018, Gdansk, Poland.
- 11 Balance Energético Nacional Uruguay, (2 de agosto 2019). Recuperado de <https://ben.miem.gub.uy/oferta3.html>