



Carlos Granell Ninot
Presidente de SPANCOLD.



F. Javier Baztán Moreno
Secretario general de SPANCOLD.



Francisco J. Enseñat Berea
Director del Comité de Presas y Energía de SPANCOLD.



El almacenamiento hidráulico

La presencia cada vez mayor de fuentes de energía renovables no gestionables provoca fuertes desequilibrios en el sistema energético que hacen que la construcción de proyectos de almacenamiento sea imprescindible. Las centrales reversibles de bombeo están llamadas a jugar un importante papel en la transición energética para conseguir integrar estas energías renovables y proveer servicios auxiliares para mantener la estabilidad de la red.

Palabras clave Almacenamiento de energía, centrales hidroeléctricas reversibles.

The increasing presence of renewable energy sources causes strong imbalances in the energy system that make the construction of storage projects essential. Pumped storage is called to play an important role in the energy transition to integrate these renewable energies and provide ancillary services to maintain grid stability.

Keywords Energy storage, pumped storage plants.

Para evitar los indeseables efectos del cambio climático y cumplir con los objetivos europeos de descarbonización, España planteó el ambicioso Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030, con actuaciones que supondrán un importante cambio en el mix energético actual. El PNIEC estima contar con una potencia total de 157 GW (50 GW eólicos, 37 GW fotovoltaicos, 27 GW de ciclos, 16 GW hidráulicos, 8 GW de bombeos, 7 GW solar térmicos y 3 GW nucleares).

A finales de 2022 en España existen 19,5 GW solares fotovoltaicos (FV) y 30 GW de energía eólica.

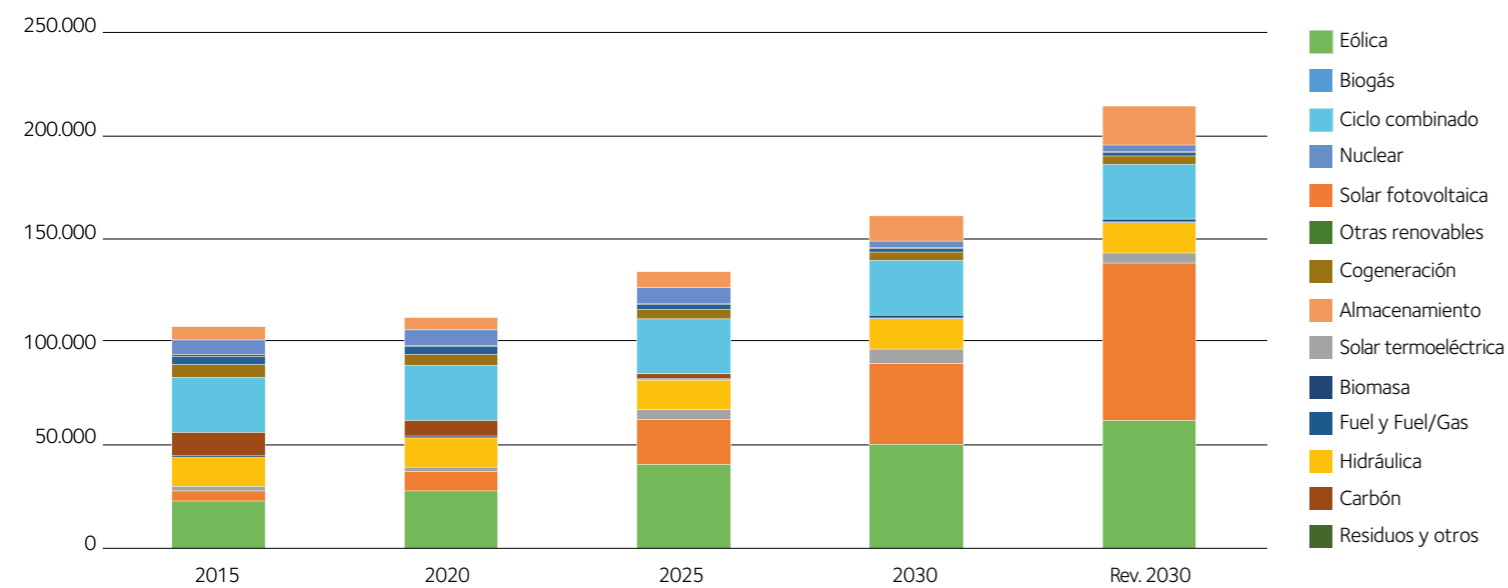
De 2021 a 2030 este nuevo mix supondrá un crecimiento de 59 GW de nueva potencia renovable (30 GW de solar fotovoltaica, 22 GW de eólica, 5 GW de solar termoeléctrica y 0,8 GW de biomasa) y, adicionalmente, una capacidad de almacenamiento de energía extra de 3,5 GW de centrales de bombeo y de 2,5 GW de baterías, que complementarán a los 3,3 GW de bombeo puro existentes y los 2,7 GW de bombeo mixto.

La Estrategia de Almacenamiento Energético del Gobierno ratifica las cifras del PNIEC y propone una potencia de almacenamiento global de 20 GW en 2030 y de

30 GW en 2050 aportada por un amplio espectro de tecnologías.

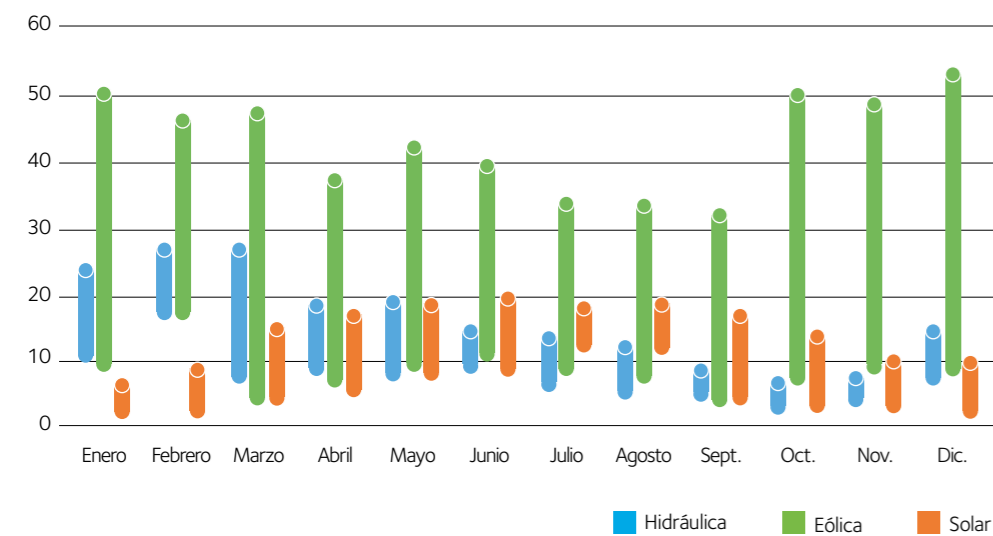
Recientemente, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico presentó el nuevo borrador de actualización del PNIEC 2023-2030 (junio de 2023), en trámite de audiencia e información pública, que eleva la potencia total renovable para 2030 de 113 GW a 160 GW y, en particular, los objetivos de energía fotovoltaica de 37 a 76 GW y de eólica, de 50 a 62 GW. La potencia de almacenamiento se eleva de 20 GW a 22 GW (incluyendo la potencia de almacenamiento termosolar).

PNIEC 2021-2030. Evolución de la potencia instalada de energía eléctrica (MW)



Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2019.

Cobertura diaria (%) máxima y mínima de las tres principales fuentes de energía renovable



Fuente: Red Eléctrica de España. "El sistema eléctrico español" (2021).

¿Por qué ahora es necesario el almacenamiento de energía?

El crecimiento de la generación con tecnologías renovables no gestionables otorga al almacenamiento de energía el rol de aportar la flexibilidad que requiere el sistema y de tratar de evitar los «vertidos» de energía eléctrica, proporcionando una mayor capacidad de gestión a la generación renovable.

Este papel de gestión se manifiesta, al menos, en tres escalas temporales que requieren diferentes formas y dimensionamiento del almacenamiento.

Almacenamiento estacional, mensual y semanal

Observando el gráfico de cobertura diaria (%) máxima y mínima de las tres principales fuentes de energía renovable (Red Eléctrica

de España, *El Sistema Eléctrico Español. Informe de 2021*), se comprende la gran variabilidad de participación de cada una de las fuentes de generación renovable en los diferentes meses del año.

Si pretendemos abastecernos solamente de energía renovable, es una obviedad que será obligado disponer de una importante capacidad de almacenamiento semanal, mensual o estacional que permita trasladar energía de los meses excedentarios a los deficitarios.

Almacenamiento intradiario

Será necesario trasladar grandes cantidades de energía desde las horas valle (baja demanda y bajos precios) a las horas punta (alta demanda y alto precio). Los valles tradicionalmente se daban en las horas nocturnas por el exceso de generación firme, pero cada vez más se producen en las horas centrales del día por exceso de generación solar.

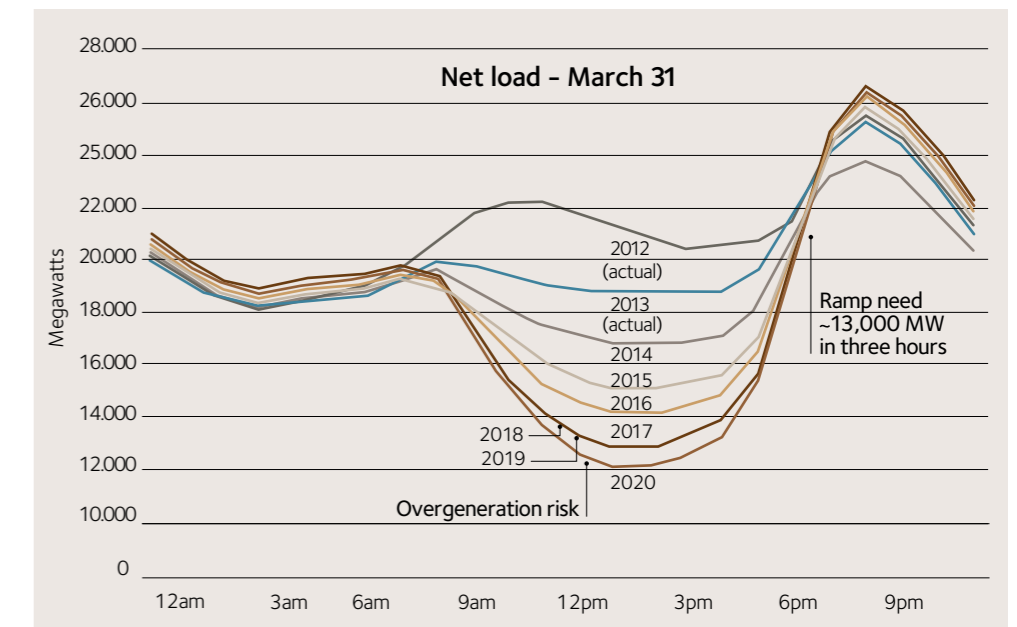
Sin embargo, esto ha sido así hasta ahora porque se contaba con la energía firme de las plantas de carbón y las nucleares, así como con la flexibilidad que aportan las centrales de ciclo combinado, las centrales hidráulicas y las de bombeo existentes.

Ahora bien, en el futuro, ya próximo, cuando no se cuente con la energía firme térmica y nuclear, será necesario reemplazar esta energía por una ingente cantidad de MWh renovables. Ello originará un importante desequilibrio en la generación intradiaria, que generará escasez de energía en horas punta y exceso de energía en horas solares, lo cual provocará el vertido de una importante cantidad de energía renovable.

Almacenamiento de rápida respuesta

California fue uno de los estados pioneros en introducir una alta penetración de generación solar en el sistema eléctrico, por lo que

California Independent System Operator Duck Curve



Fuente: CAISO.

fue la primera en describir el ya famoso riesgo del efecto «pico de pato».

Al anochecer es necesario reemplazar la energía solar de forma rápida y sustituirla por 13,5 GW de otras plantas de generación, provocando fuertes desequilibrios de frecuencia en la red.

Para prestar estos servicios son muy importantes las tecnologías de almacenamiento de muy rápida respuesta.

Ventajas del almacenamiento hidráulico

Las centrales hidroeléctricas reversibles permiten el desplazamiento de energía mediante el bombeo de agua desde un embalse inferior a otro embalse superior próximo y su posterior conversión en energía eléctrica por turbinación.

La tecnología del almacenamiento hidráulico presenta las siguientes ventajas:

Dependencia del recurso hídrico. Ubicación

Las centrales reversibles no tienen un uso consuntivo de agua, ni dependen de la hidrología del emplazamiento y, por tanto, son muy versátiles en cuanto a su ubicación. Pueden proyectarse en zonas muy áridas (p.ej., hay reversibles en desarrollo en Israel, Arabia Saudí, Marruecos), o incluso fuera del dominio público hidráulico.

Gran parte de las centrales en desarrollo aprovechan embalses existentes para la toma inferior y solo requieren la construcción de una balsa superior en puntos altos del valle.

Las centrales se sitúan generalmente en caverna y gran parte de las conducciones y pozos son obras subterráneas; así pues, la geología desempeña un papel determinante en la viabilidad de los proyectos y supone que el impacto ambiental de sus obras

En términos de CAPEX, es fundamental buscar la máxima optimización de las centrales, reduciendo el valor de L/H

sea moderado. En España, el gran número de presas construidas y los desniveles aprovechables con la construcción de una balsa confieren al país un gran potencial para el desarrollo de nuevos proyectos.

Las centrales crean empleo en su entorno, tanto en la construcción como en la operación; aportan valor añadido nacional y contribuyen a los principios de la transición justa.

Potencia instalada

Los bombeos permiten una gran potencia (100-3000MW) y capacidad energética (1-300 GWh) en una sola instalación, aprovechando desniveles topográficos de 100 a 1000 m, y grandes caudales compatibles con los máximos diámetros constructivos de las conducciones.

Las 3 mayores centrales reversibles del mundo son:

- Bath County. 3003 MW. Estados Unidos;
- Huizhou. 2448 MW. China;
- Guangdong o Guangzhou. 2400 MW. China.

Actualmente son muchos los países en los que este tipo de proyectos se encuentran en construcción; es el caso de China con la central de Fengning (3600 MW), que será la mayor del mundo, y el de Australia, con la central de Snowy 2.0 (2000 MW).

Flexibilidad operativa

Las centrales reversibles bombean en horas valle con precios más bajos y turbinan en horas punta de demanda con mayores precios. De esta manera contribuyen a la regulación de la curva diaria de demanda, consumiendo excedentes nocturnos y de producción fotovoltaica y aportando potencia en puntas sin empleo de combustibles fósiles.



Bolarque. Presa de 1910 y central reversible de 1969. Fuente: Naturgy.

Aportan una alta flexibilidad operativa ya que pueden arrancar y alcanzar la plena carga en cuestión de pocos minutos, así como cambiar del modo de turbinación al de bombeo.

Proporcionan generación sincrona acoplada a la red, que proporciona servicios auxiliares críticos con capacidad de regular frecuencia y tensión. Los nuevos diseños de velocidad variable permiten regular la potencia en modo bomba.

El rendimiento del ciclo carga-descarga es alto (75-80%), y las horas de funcionamiento son de 8 horas a varios días.

Madurez de la tecnología

El almacenamiento hidráulico es la tecnología de almacenamiento más madura. En la actualidad hay 161 GW instalados en el mundo, una cifra que representa el 94% del almacenamiento de energía eléctrica en todo el planeta.

Tiene una fiabilidad demostrada de funcionamiento más de 50 años, cuando, en las décadas de los años 1970 y 1980, se produjo la construcción masiva, ligada al desarrollo nuclear.

Vida útil

La vida útil de las centrales reversibles es una de sus grandes ventajas. La de la obra civil es

muy elevada (100 años) y la de los equipos electromecánicos puede alcanzar los 50 años sin degradación ni deterioro de su rendimiento, siendo necesario un mantenimiento relativamente reducido.

Por otra parte, un reciente estudio que compara la emisión de gases de efecto invernadero durante la construcción y operación de las diferentes tecnologías de almacenamiento ha demostrado que las centrales reversibles son las que menos emisiones producen por cada kWh almacenado durante su ciclo completo de vida (cien años). Estas emisiones son mucho menores cuando los proyectos de bombeo parten de instalaciones existentes que cuando son íntegramente proyectos de nueva construcción. (*Life Cycle Assessment of Closed-Loop Pumped Storage Hydropower in the United States. acs.org*).

CAPEX y OPEX

El coste de instalación en términos de potencia puede oscilar, en función del emplazamiento, entre los 500-1500 €/kW, dependiendo de que los embalses superior e inferior sean de nueva construcción o existentes, la tipología de la central, la longitud del circuito hidráulico, las condiciones naturales del emplazamiento (geología, topografía), la distancia al punto de conexión a la red eléctrica de

alta tensión y las medidas compensatorias medioambientales y socioeconómicas.

El coste específico de la energía almacenada puede oscilar entre los 50 y los 200 €/kWh almacenados, según sea la capacidad de los embalses.

Los costes de operación y mantenimiento (OPEX) son bajos en comparación con la alta potencia instalada y el alto volumen de energía almacenado.



Cortes-La Muela I + II. 1482 MW, 24 GWh. L/H muy reducido 3-4. Fuente: Iberdrola.

En términos de costes de inversión (CAPEX), es fundamental buscar la máxima optimización de las centrales, reduciendo el valor de L/H (cociente entre la longitud de las conducciones necesarias y el desnivel disponible).

Es recomendable aprovechar embalses inferiores compatibles con moderadas variaciones de nivel.

Las barreras y los retos en el desarrollo del almacenamiento hidráulico

Barreras al desarrollo

El freno en el desarrollo de las centrales reversibles a pesar de sus indudables ventajas se debe fundamentalmente a las siguientes barreras:

- La falta de ingresos estables y suficientes que rentabilicen unas inversiones intensivas en capital con un largo período de construcción. En la situación actual estas inversiones no llegan a ser rentables exclusivamente con el arbitraje de precios, y necesitan de la retribución de la potencia y de los servicios auxiliares, que cada vez serán más demandados reconociendo el servicio que estas centrales aportarán en el nuevo mix energético eminentemente renovable. Depender sólo del



spread de los precios es un riesgo inasumible, pues cuanto mayor sea la penetración de estas centrales, mayor será el aplanamiento de la curva de precios y, por tanto, de los ingresos por arbitraje.

- Los trámites administrativos que se dilatan en el tiempo, en especial, la tramitación de las concesiones hidráulicas y las declaraciones ambientales.

- Las centrales reversibles se consideran instalaciones de generación y, por lo tanto, compiten con todos los generadores en el acceso a red. El bombeo hidroeléctrico reversible se encuentra bloqueado por falta de acceso a la red eléctrica, siendo actualmente el primer hito administrativo.

Sin embargo, las centrales de bombeo son instalaciones que descongestionan las redes, aumentando su grado de utilización, retirando energía en los momentos de exceso de generación y aportando potencia en los momentos de déficit de energía. Es urgente dar acceso a la red a las centrales reversibles para evitar los vertidos renovables.

Borrador de Actualización del PNIEC 2023-2030

En el nuevo borrador de actualización del PNIEC 2023-2030 (junio de 2023) se añade una medida específica (Medida 1.9) para el cumplimiento del Plan y el fomento de las centrales reversibles que va muy en línea con lo expuesto en este artículo. Se reconoce que el almacenamiento de energía mediante centrales hidroeléctricas reversibles es clave para la explotación de un sistema eléctrico basado en un alto grado de penetración de energías renovables, pues permitirá ir reduciendo la

necesidad de centrales basadas en combustibles fósiles. Esta medida sugiere el aprovechamiento del potencial disponible en las infraestructuras hidráulicas existentes para el desarrollo de nueva capacidad de almacenamiento, lo cual, además de permitir una disminución de la inversión, limita el impacto ambiental asociado a las obras requeridas.

Específicamente, se enumeran los mecanismos de actuación siguientes:

- Simplificación de la tramitación administrativa para nuevas centrales hidroeléctricas reversibles que utilicen embalses existentes.

- Estudio del uso de almacenamiento hidroeléctrico en embalses de titularidad estatal para servir de depósito inferior en nuevas instalaciones de almacenamiento hidráulico de energía (138 potenciales emplazamientos de centrales hidroeléctricas reversibles).

- Adaptación de la red eléctrica para la conexión de la nueva capacidad de almacenamiento hidráulico de energía, incluyendo la previsión de nuevos nodos de evacuación y el refuerzo de los existentes.

Retos

El desarrollo de las nuevas centrales debe enfrentarse a una serie de retos que optimicen los proyectos y los hagan más útiles para sus nuevas funciones.

Con objeto de conseguir la máxima rentabilidad de la inversión se debe buscar la optimización del CAPEX de las centrales, reduciendo el valor L/H, buscando conducciones cortas y balsas con almacenamiento de entre 8 y 20 h.

Es interesante la implantación de sistemas que flexibilicen el funcionamiento, tales

como la velocidad variable y el cortocircuito hidráulico.

Las baterías y los bombeos, aunque compiten en algunos servicios, ocupan diferentes rangos de tiempo de descarga y de capacidad de almacenamiento por lo que son tecnologías totalmente complementarias.

El tiempo de respuesta es una variable importante a considerar en el nuevo diseño de los sistemas hidráulicos. La respuesta, sin llegar a ser tan inmediata como la de los sistemas de baterías, alcanza valores de pocos segundos.

Conclusiones

- La penetración de las renovables y la retirada de plantas térmicas provocan una mayor complejidad en la operación del sistema eléctrico, ocasionando vertidos y rápidas variaciones de generación y frecuencia. En el nuevo mix energético las centrales de almacenamiento jugarán el relevante papel de poner a disposición del sistema la potencia necesaria para almacenar excedentes de energía renovable en los momentos de exceso de generación y aportarla de nuevo en los momentos de escasez y de mayor demanda, participando además en la regulación de la frecuencia de la red.

- Por la orografía de nuestro país, existe un enorme potencial de centrales reversibles; no hay más que ver los 40 GW que ya se han solicitado.

- España debe aprovechar el inmenso activo hidráulico de presas y embalses con el que cuenta, fomentando el aprovechamiento de los embalses inferiores disponibles, sin que se impongan nuevas condiciones



concesionales que hagan inviable la explotación de los aprovechamientos preexistentes.

- Resulta de especial interés el desarrollo de un plan de centrales reversibles que aproveche las presas y embalses del Estado. Con él se podrían aprovechar presas ya construidas con un mínimo impacto en el entorno y se buscarían sinergias de un uso no consuntivo con los usos e infraestructuras de evacuación

ya existentes de estos embalses, minimizando los costes de O&M y generando ingresos adicionales para el Estado.

- Los bombeos deben ubicarse en buenos emplazamientos topográficos (se recomienda $L/H < 5$) para conseguir así altos índices de estabilidad y mejora del tiempo de respuesta ante variaciones de frecuencia. Además deben situarse cerca de las líneas de alta tensión y de

centros de consumo. El embalse inferior debe ser de gran superficie y volumen con objeto de que no se produzcan variaciones de nivel importantes.

- Existe una gran incertidumbre sobre la rentabilidad de las inversiones necesarias en nuevas centrales reversibles, que está retrasando la toma de decisiones sobre los proyectos en desarrollo.

Por tanto, se considera necesario:

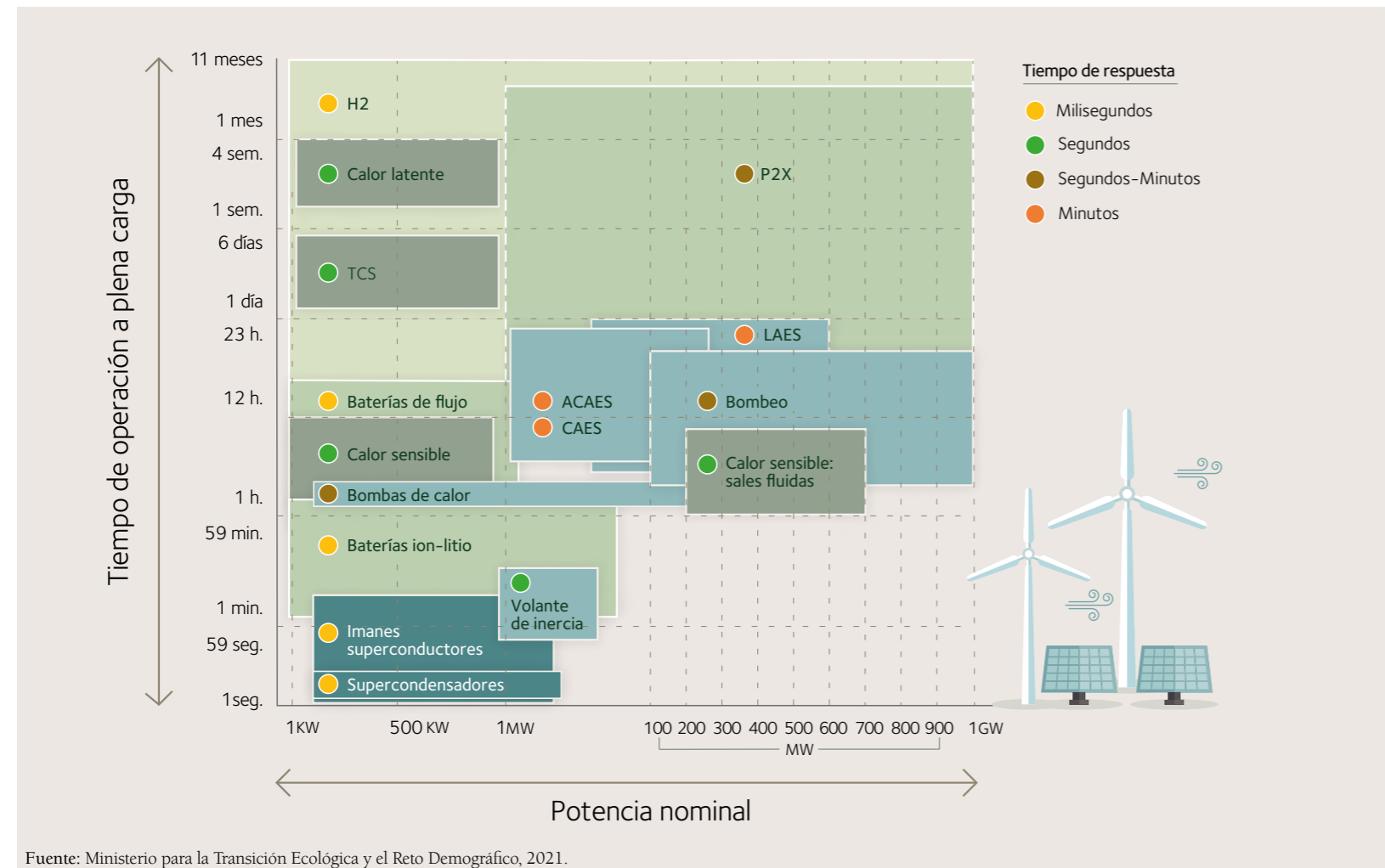
- agilizar la tramitación administrativa de los nuevos proyectos de almacenamiento en los ámbitos de acceso a red, concesional y ambiental;

- establecer la regulación necesaria, a la mayor brevedad, que posibilite un marco claro y estable de remuneración del almacenamiento de energía.

- Se trata de una tecnología que requiere de un elevado conocimiento en el diseño de obras hidráulicas, geotecnia, equipos hidroeléctricos, así como experiencia en su operación. Cada proyecto es un reto. En España hay muchas empresas y profesionales que han desarrollado importantes proyectos a nivel nacional e internacional, por lo que se dispone de la tecnología y la experiencia para afrontar los retos futuros.

- Todas las tecnologías de almacenamiento son complementarias por su ubicación en la red y por el tipo de servicio que pueden proporcionar, aunque el almacenamiento hidráulico mediante centrales de bombeo es una excelente opción de elevadas prestaciones, riesgo tecnológico nulo, impacto ambiental reducido y larga vida útil a un coste altamente competitivo.

Parámetros de funcionamiento de las tecnologías de almacenamiento energético



Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021.

