

Aprender física con ejemplos reales: Las centrales hidroeléctricas reversibles en la educación secundaria

· Daniel Francisco Lois

La transición energética exige mayor uso de fuentes renovables, como la solar y la eólica, cuya generación depende de factores naturales y resulta difícil de gestionar. Para equilibrar oferta y demanda es fundamental contar con sistemas de almacenamiento a gran escala y económicamente viables. En este contexto, las centrales hidroeléctricas reversibles (también llamadas de bombeo) permiten almacenar energía como energía potencial al bombear agua desde un embalse inferior a uno superior, para luego recuperarla mediante turbinado (Figura 1).¹ Las siglas más empleadas para abreviar son CHB en español y PSH en inglés.

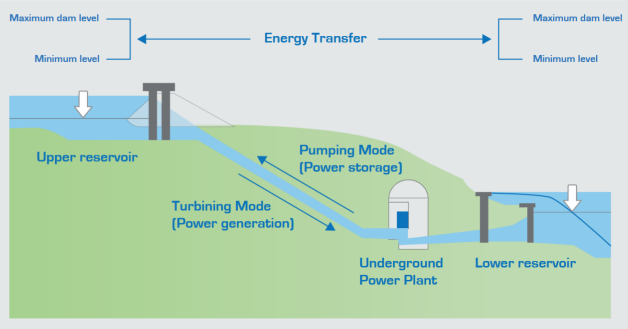


Figura 1. Carga en una central de bombeo. Fuente: EASE.¹

Características y utilidad de las CHB

El gran interés en las CHB se justifica por su fácil integración con centrales de generación renovable, permitiendo acomodar la intermitencia de la producción y facilitando su implantación. Contribuyen al balanceo de carga al trasladar la generación desde periodos de baja demanda hacia periodos de alta demanda, mejorando la eficiencia general de la red. Además, destacan por su alta capacidad de almacenamiento sin requerir elementos químicos estratégicos. Constituyen una tecnología madura y aportan estabilidad a la red eléctrica al responder rápidamente a las variaciones de oferta y demanda. Esto ayuda a mantener la tensión y la frecuencia, evitando apagones. Además, presentan una larga vida útil y un impacto ambiental reducido frente a otros sistemas de almacenamiento. La importancia de las centrales CHB en la estabilidad del sistema eléctrico se puede ilustrar con tres noticias recientes:

- 24-07-2021. Un incendio en Francia provocó la desconexión de la red peninsular. La pérdida de 2,5 GW importados produjo una caída de frecuencia que activó las protecciones automáticas de desconexión de consumos. El apagón afectó a más de 2 M de personas en la Península. Una mayor capacidad en las centrales de bombeo habría amortiguado significativamente el impacto.⁷
- 29-10-2024. Los daños en la red de alta tensión causados por la DANA obligaron a reducir la producción de la nuclear de Cofrentes para evitar una parada automática no programada, mientras que la central reversible de La Muela entró en operación a plena carga en pocos minutos.⁸
- 28-04-2025. Colapso por desconexiones en cascada debido a oscilaciones incontrolables por la elevada penetración de renovables sin respaldo de masa síncrona.⁶ Las CHB desempeñaron un papel clave en la recuperación del sistema.⁹ Se estima que su capacidad debería duplicarse para 2030.¹⁰

La Tabla 1 muestra los rangos de las características técnicas. Como referencia, una de las mayores centrales de bombeo de Europa es La Muela, utiliza como reservorio inferior el embalse de Cortes (curso del Júcar) y como reservorio superior un depósito excavado de 20 hm³. Entre ambos hay un salto de 520 m, que supone una reserva energética de unos 24 GWh.¹¹ Entre ambos reservorios se disponen dos centrales, La Muela I y II, con una potencia total de (634+880) MW en turbinación y (549+744) MW en bombeo. Adicionalmente, la presa de Cortes cuenta con una central hidráulica convencional (salto 116m, potencia instalada 290 MW.). El complejo Cortes-La Muela puede suministrar 1800 MW en turbinación y consumir 1293 MW en bombeo.

Potencia instalada	10 - 4000 MW
Capacidad de almacenaje	Hasta 100 GW·h
Tiempo de descarga	1-24+ h
Autodescarga	Despreciable
Ciclo de vida	Ilimitado
Tiempo de respuesta	s - min
Vida útil	> 80 años
Eficiencia total	70 - 85%
Densidad energética	0,5 - 3 W·h/kg
Inversión (CAPEX)	40 150 €/kW·h, 400-1500 €/kW

Tabla 1. Rangos de características técnicas. Fuente: EASE y Papadakis et al.^{1,3}

Los proyectos para incremento de capacidad en todo el mundo son numerosos, según datos de la IHA suman alrededor de los 600 GW de potencia en distintas fases de estudio o ejecución.¹² En España la capacidad actual es de 3,5 GW, con el objetivo de llegar a los 9,5 GW en 2030.¹³

Ecuaciones fundamentales

La energía potencial E_p almacenada por la masa de agua m en el reservorio superior se relaciona con la energía de entrada (consumida en el bombeo) según la ecuación: $E_p = mgh = \rho Vgh = \eta_b E_e$, donde g es la aceleración de la gravedad, h la diferencia alturas entre los niveles de ambos reservorios y η_b es el rendimiento de bombeo. La energía de salida se calcula mediante la siguiente ecuación: $E_s = \eta_g E_p = \eta_g \eta_b E_e = \eta_{\text{global}} E_e$, donde η_s es el rendimiento de la generación, que tiene en cuenta las pérdidas energéticas en la turbina y el generador y η_{global} representa el rendimiento global del sistema. El rendimiento global oscila normalmente entre el 70 y el 85%;¹⁴ siendo el rango del rendimiento de bombeo, 85-92%, menor que el de generación, que puede estar en el rango 90-93% incluyendo turbina y generación. La explicación de las conversiones puede apoyarse en un diagrama de Sankey (Figura 2), el cual ayuda a visualizar las pérdidas aproximadas en las transformaciones energéticas.

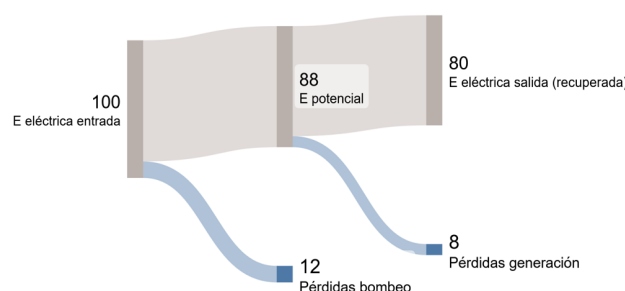


Figura 2. Visualización de los flujos energéticos y pérdidas de una central hidroeléctrica reversible en un diagrama de Sankey.

Fuente: El autor.

Toda instalación energética se proyecta con una capacidad de entrega de energía en un intervalo temporal determinado, su potencia nominal, que en las CHB está directamente relacionada con la diferencia de altura (o salto hidráulico h) y con el caudal circulante

$$Q: P = \frac{E_s}{t} = \eta_g \rho Qgh$$

Para dos instalaciones con idéntica potencia nominal y capacidad de almacenamiento energético, el volumen de agua a almacenar y el caudal requerido resultan inversamente proporcionales al salto disponible. Esto determina la inversión económica, la ocupación de superficie, el volumen de excavaciones y la extensión de obras subterráneas (túneles, galerías y conducciones). Los desniveles habituales oscilan entre 200 y 800 metros y se consideran óptimos los valores superiores a 400 m. Otro parámetro crítico para la viabilidad es la relación entre la longitud de la conducción y el salto (L/h). Ratios elevados incrementan los costes de construcción y disminuyen la eficiencia de operación al aumentar las pérdidas por fricción en el sistema. Valores inferiores a 5 son óptimos y entre 3 y 8 aceptables. Las condiciones geológicas del emplazamiento deben garantizar la estabilidad de las excavaciones subterráneas y la impermeabilización de los embalses. Condiciones geotécnicas desfavorables incrementan notablemente los costes de construcción. La preexistencia de al menos uno de los embalses resulta crucial al reducir la inversión y el impacto. Otro requisito es la proximidad a infraestructuras de red eléctrica de alta tensión. Distancias excesivas al punto de conexión implican inversiones adicionales significativas en líneas de transmisión y subestaciones eléctricas.

Potencial didáctico

La utilización de estas instalaciones como recurso educativo se justifica por las siguientes razones:

- Relevancia y conexión con la realidad: tema actual, con gran apoyo público y presencia en los medios, que permite vincular principios científicos con el entorno del alumnado mediante casos cercanos.^{15, 16}
- Accesibilidad conceptual: basado en principios sencillos, fomenta una actitud positiva hacia el aprendizaje y facilita el pensamiento crítico.
- Fortalecimiento de la alfabetización científica: como tema de referencia, facilita ejemplificar el razonamiento científico y su relevancia en la participación social y la toma de decisiones informadas.
- Dimensión socioambiental: conecta la ciencia con cuestiones sociales, ambientales y éticas y permite ejemplificar objetivos de PISA 2025 relacionados con la comprensión y la capacidad de actuar ante retos medioambientales.¹⁷
- Versatilidad: adaptable a todos los niveles de ESO y Bachillerato.

Resultados de la experiencia didáctica, valoración y propuestas de mejora

Se tomó como punto de partida una noticia publicada en diversos medios sobre un proyecto de construcción de una central CHB que aprovecharía un embalse existente en las proximidades del centro educativo.¹⁸ La actividad se desarrolló en dos grupos de 4º ESO con un total de 51 estudiantes, de los cuales el 61% eran alumnas. Tras una breve introducción en el aula, se propuso al alumnado un trabajo de investigación individual en el que debían buscar, analizar y sintetizar información para responder a un cuestionario estructurado en torno a tres ejes temáticos: los fundamentos científicos de estos sistemas de almacenamiento energético, su utilidad práctica en el contexto del sistema eléctrico actual y los posibles impactos ambientales asociados. El cuestionario se complementó con cuatro problemas de cálculo energético de nivel básico, incluyendo cambios de unidades y uso de factores de eficiencia.

En este tipo de actividades se pueden evaluar dos dimensiones complementarias: por un lado, el interés y motivación del alumnado, medidos a través del porcentaje de trabajos no entregados y el esmero en la presentación; por otro lado, el aprendizaje efectivo, evaluado mediante la comprensión conceptual, la coherencia en las respuestas sobre impacto ambiental y la resolución correcta de los problemas planteados. Los resultados se analizaron mediante el programa estadístico gratuito Jamovi.¹⁹ La tasa de entrega fue superior al 90%, sin diferencia significativa por género según el test exacto de Fisher. Un 86% de los trabajos entregados obtuvo una calificación superior a 7 sobre 10, resultado muy satisfactorio que evidencia comprensión adecuada de los contenidos. Al tratarse de un trabajo obligatorio es necesario considerar las no entregas (ceros) en el análisis. Las distribuciones de notas son no normales (test de Shapiro-Wilk), por lo que se empleó el test U de Mann-Whitney para la comparación de medianas (8,14 alumnas - 7,87 alumnos), siendo la diferencia no significativa por razón de género. En todo caso, si no se incluyen los zeros las distribuciones son normales y el test de student de comparación de promedios (8,41 alumnas - 8,02 alumnos) también indica que las diferencias no son significativas. Los datos no muestran, por tanto, evidencias de brecha de género en esta experiencia.

La introducción de este proyecto energético real permitió contextualizar eficazmente los contenidos sobre generación, almacenamiento y transformación de la energía, conectando el currículo con el entorno del alumnado. Como mejora, se propone incorporar un debate final para reforzar los conceptos clave y fomentar el pensamiento crítico. Para reducir la tasa de no entrega, aumentar la frecuencia de recordatorios sobre la fecha límite.

Se proponen algunas líneas de trabajo, organizadas en niveles de complejidad progresiva, que permiten su adaptación a diferentes cursos y grados de profundización:

- Trabajo con conceptos físicos fundamentales: fuente de ejemplos para contextualizar conceptos nucleares del currículo: la conservación de la energía; distinción entre energía primaria y secundaria; trabajo con diferentes unidades de energía y potencia facilitando la transición desde las unidades del S.I. hacia las cotidianas del sector eléctrico (kWh, MWh, MW, GW, etc.)
- Razonamiento cuantitativo y desarrollo de competencias científicas: el contexto de las PSH permite trabajar con estimaciones de Fermi (razonar con datos incompletos) y análisis dimensional (validar coherencia de ecuaciones), herramientas que desarrollan pensamiento científico auténtico pero que permanecen infrutilizadas en secundaria.
- Integración de renovables y almacenamiento energético: permiten analizar el papel de los sistemas de acumulación en la gestión de la variabilidad de las fuentes renovables y en el mantenimiento de la estabilidad del sistema eléctrico. La discusión puede ampliarse al estudio comparativo de diferentes tecnologías de almacenamiento (macrobaterías de ion-Li, baterías de flujo redox, CAES, etc.).
- Conexiones interdisciplinares: vincular con economía industrial, analizando cómo el precio y la disponibilidad de electricidad condicionan la competitividad de sectores electrointensivos y el desarrollo industrial y territorial.
- Proyecto experimental integrador: diseño y construcción colaborativa de un simulador de CHB en horas no lectivas. Integra conceptos cuantitativos trabajados y desarrolla competencias de diseño, construcción y análisis experimental.

Bibliografía

1. EASE - European Association for Storage of Energy- (2016). Pumped Hydro Storage. Mechanical Energy Storage: https://energystorageeurope.eu/wp-content/uploads/2016/07/EASE_TD_Mechanical_PHS.pdf (última consulta 07/02/2026)
2. Dargaville, R. (2019). Five gifs that explain how pumped hydro actually works. *The Conversation*: <https://theconversation.com/five-gifs-that-explain-how-pumped-hydro-actually-works-112610> (última consulta 07/02/2026)
3. Papadakis, C. N., Fafalakis, M. and Katsaprakakis, D. (2023). A Review of Pumped Hydro Storage Systems. *Energies*. 16 (11), 4516. <https://doi.org/10.3390/en16114516>.
4. Baztán, J. (2022). Centrales reversibles. *Jornada de Presas y Green Deal*. <https://www.spancold.org/wp-content/uploads/2022/05/JGreenDeal20220428-Centrales-Reversibles-Javier-Bazt%C3%A1n.pdf>
5. Page, D. (2024). Las eléctricas lanzan una avalancha de proyectos para convertir embalses en 'superbaterías' por toda España. *El Periódico de España*: www.epe.es/es/activos/20240618/electricas-lanzan-avalancha-proyectos-convertir-10392707
6. GES&CIP - Gestión y Control Integral de Proyectos SL - (2025). Gran apagón histórico deja a oscuras a España tras colapso de la red (Informe técnico). Écija (Sevilla); 29 abril 2025
7. Roca, R. (2021). Un incendio produjo el apagón que dejó a millones de españoles sin luz durante una hora el pasado julio: así fueron los hechos. *El Periódico de la Energía*: <https://elperiodicodelaenergia.com/un-incendio-produjo-el-apagon-que-dejo-a-millones-de-espanoles-sin-luz-durante-una-hora-el-pasado-julio-asi-fueron-los-hechos/>

8. María, P. (2024). La cadena de decisiones que "en cuestión de minutos" evitó un apagón eléctrico de varios días en Valencia por la DANA. *El Mundo*: <https://www.elmundo.es/economia/empresas/2024/11/18/6731fee121efa01f218b4592.html>
9. Servén, R. (2025). La recuperación del gran apagón en España empezó en Riba-roja d'Ebre. *Diari de Tarragona*: <https://www.diaridetarragona.com/economia/231619/la-recuperacion-del-gran-apagon-en-espana-empezo-en-riba-roja-d-ebre-em23855540.html>
10. Guinaldo, S. (2025). Las centrales de bombeo, la renovable más eficaz para solventar 'apagones', debe duplicar su capacidad para 2030. *El Economista*: <https://www.eleconomista.es/energia/noticias/13337722/04/25/las-centrales-de-bombeo-la-renovable-mas-eficaz-para-solventar-apagones-debe-duplicar-su-capacidad-para-2030.html>
11. Elípe, J.C. (2012) Refuerzo de potencia del Aprovechamiento de Cortes-La Muela: https://www.spancold.org/wp-content/uploads/2020/08/III_ITIPB_20130207_06_Juan_Carlos_Elpe.pdf (última consulta 07/02/2026)
12. IHA - International Hydropower Association- (2025). Pumped Storage Hydropower. Water batteries for the renewable energy sector: <https://www.hydropower.org/factsheets/pumped-storage> (última consulta 07/02/2026)
13. IHA - International Hydropower Association- (2025). Policy Frameworks for PSH development: <https://indd.adobe.com/view/0381fecb-1e80-435f-b021-e873dc8c4bf0> (última consulta 07/02/2026)
14. Mongird, K., Viswanathan, V., Alam, J., Vartanian, Sprenkle, V. and Baxter., R. (2020). Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy Publication No. DOE/PA-0204: <https://www.energy.gov/energy-storage-grand-challenge/downloads/2020-grid-energy-storage-technology-cost-and-performance>. (última consulta 07/02/2026)
15. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2024). Resolución por la que se aprueba la concesión de ayudas correspondientes a la primera convocatoria de ayudas para proyectos innovadores de almacenamiento mediante bombeo reversible en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia - Financiado por la Unión UE - Next GenerationEU: https://sede.idae.gob.es/sites/default/files/documentos/2024/almacenamiento/381_boralmac_resoluciondefinitiva_adjudicacion.pdf
16. Extracto de la Resolución de 23 de diciembre de 2025, del Consejo de Administración de E.P.E. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), M.P. por la que se aprueba la segunda convocatoria de ayudas para proyectos innovadores de almacenamiento mediante bombeo reversible en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia - Financiado por la UE - Next GenerationEU. «BOE» núm. 3, de 3 de enero de 2026, páginas 234 a 235 (2 págs.) BOE-B-2026-125 <https://www.boc.es/buscar/doc.php?id=BOE-B-2026-125>
17. White, P., Ardoin, N., Monroe, M. C. (2023). Agency in the Anthropocene - supporting document to the PISA 2025 Science Framework. OECD Education Working Papers No. 297: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2023/06/agency-in-the-anthropocene_b5843618/8d3b6cfa-en.pdf (última consulta 07/02/2026)
18. Maciejewski, D. G. (2022). El Atazar podría acoger la primera gran central hidráulica de bombeo de la Comunidad de Madrid. *El Español*: https://www.elespanol.com/enclave-ods/historias/20220202/atazar-podria-primera-central-hidraulica-comunidad-madrid/646935595_0.html
19. *The jamovi project (2025), Version 2.6 Software gratuito de análisis estadístico*: <https://www.jamovi.org/download.html> (última consulta 07/02/2026)

Daniel Francisco Lois
IES Cortes de Cádiz (El Molar, Madrid)
dfranciscois@educa.madrid.org