

Almacenamiento por bombeo (PSH): Una opción necesaria

Pumped storage hydropower (PSH): A necessary option

Pedro Osvaldo Díaz Fustier^{I,*}, Orestes Hernández Areu^I, Frank Grau Merconchini^{II}

^IUniversidad Tecnológica de la Habana, José Antonio Echeverría (CUJAE). La Habana, Cuba

^{II}Universidad de Oriente (UO). Santiago de Cuba, Cuba

*Autor de la correspondencia: pedro@electronica.cujae.edu.cu

Recibido: 25 de agosto de 2025

Aprobado: 20 de noviembre de 2025

Este documento posee una [licenciaCreativeCommonsReconocimiento-NoComercial4.0internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



RESUMEN/ ABSTRACT

Se presenta un análisis de los sistemas de acumulación de energía como solución al problema de inestabilidad en el servicio eléctrico con fuentes renovables de energía. Se expone un resumen de las características de los sistemas de acumulación con baterías (BESS) como solución para compensar la inestabilidad de la generación fotovoltaica y de los sistemas de acumulación por bombeo de agua para compensar la inestabilidad en la producción de electricidad mediante las hidroeléctricas. La comparación entre ambos sistemas permite ver que la opción hidro - acumuladora por bombeo (PSH) es un pilar de crecimiento de vital importancia en la infraestructura energética moderna y juega un papel importante como tecnología de almacenamiento energético a gran escala, representando un porcentaje significativo en la capacidad mundial de almacenamiento de energía, creando capacidades de generación de electricidad y desempeñando un papel fundamental en la integración con el creciente suministro de energía solar y eólica a nivel mundial.

Palabras clave: Fuente renovables de energía, almacenamiento de energía.

This paper presents an analysis of energy storage systems as a solution to the problem of instability in the electricity service from renewable sources of energy. It summarizes the characteristics of battery energy storage systems (BESS) as a solution to compensate the instability of photovoltaic generation and of pumped storage systems to compensate the instability of electricity production from hydroelectric plants. The comparison between these two systems reveals that pumped storage hydroelectricity (PSH) is a vital pillar of growth in modern energy infrastructure and plays a significant role as a large-scale energy storage technology, representing a significant percentage of the global energy storage capacity, creating electricity generation capabilities, and playing a fundamental role in integrating with the growing global supply of solar and wind energy.

Keywords: Renewable sources of energy, energy storage.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, con la crisis climatológica y medioambiental existente, el empleo de las fuentes renovables de energía como la energía solar y la energía hidráulica cobran importancia vital. A pesar de la eficacia demostrada de la producción de electricidad a partir energía solar fotovoltaica, esta tiene el inconveniente de su inestabilidad por la variabilidad de la magnitud de las radiaciones solares durante el día o durante épocas del año, por lo que el grado de penetración de esta fuente en los sistemas eléctricos de potencia, debe ser analizado con detenimiento.

Cómo citar este artículo:

Pedro Osvaldo Díaz Fustier y otros. Almacenamiento por bombeo (PSH): Una opción necesaria. Ingeniería Energética. Vol. 46(2025): publicación continua. ISSN 1815-5901.

Sitio de la revista: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

Se sabe que una penetración fotovoltaica en las redes eléctricas entre pequeña y moderada puede ser generalmente tratada como una perturbación pequeña en el sistema [1, 2], resultando en menos demanda de otras fuentes de generación, pero las dificultades aparecen cuando esa penetración alcanza niveles entre 20 a 50%. En el aprovechamiento de la energía solar incide el hecho de que más del 70% de la población del mundo vive en el denominado “cinturón solar” entre 35° N y 35° S, en esta región (figura 1), el recurso solar mensual varía al doble entre verano y el invierno, todo lo cual indica que la producción de electricidad típicamente será mayor en verano cuando la contribución solar es más alta.

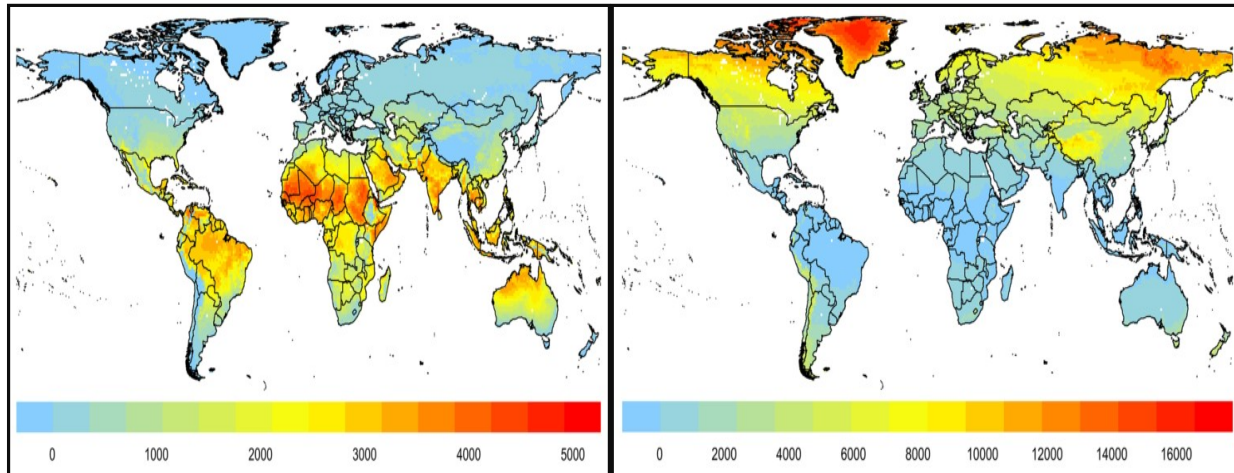


Fig. 1. Comportamiento de la energía solar. Izquierda: Grados-día de calefacción promedio Derecha: Grados-día de enfriamiento promedio

Por otro lado, está la producción de electricidad a partir de la energía hidráulica, mediante hidroeléctricas convencionales. La producción de energía eléctrica mediante las hidroeléctricas convencionales depende de las condiciones hídricas existentes [3]: grandes ríos, lagos, cascadas y de las temporadas de sequía o lluvia, lo cual constituye su principal inconveniente operativo. Por ejemplo, en América del Sur, cuya generación eléctrica es muy dependiente de la hidro-generación, las temporadas con pocas lluvias o sequías afectan severamente el nivel de producción de energía eléctrica. Otro inconveniente operativo importante de las hidroeléctricas es la demanda de agua para regadíos, agricultura en general y abasto de agua potable a la población.

En general, las fuentes renovables de energía se caracterizan por su carácter inestable por depender de factores climatológicos y de la naturaleza, agudizados debido al cambio climático imperante, por tanto, obligatoriamente requieren de un medio de almacenamiento con el cual sustentar la estabilidad que es necesario brindar a la carga. Los sistemas de almacenamiento de energía pueden ayudar a abordar estos problemas almacenando el exceso de energía, proveniente de fuentes renovables, cuando la generación supera la demanda y descargándolo cuando sea necesario. Esto mejora la integración de estas fuentes en la red, aumenta la fiabilidad de la misma, facilita la gestión de la demanda y la oferta, y reduce la escasez de energía limpia.

También ayuda a gestionar la demanda máxima al trasladar la energía de las horas de baja demanda a las horas pico, reduciendo así la necesidad de costosas centrales eléctricas pico para las horas críticas. Al permitir el desplazamiento horario de la energía, el almacenamiento genera oportunidades de ahorro y optimiza la utilización de los activos de generación. Un almacenamiento estratégicamente implementado puede aliviar la congestión de la transmisión y retrasar las costosas actualizaciones de la infraestructura de la red. Los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica mediante baterías (BESS) se emplean para compensar la inestabilidad en la generación fotovoltaica, a partir de su inserción en el sistema eléctrico en el momento apropiado.

Para compensar la inestabilidad en la producción de energía eléctrica mediante las hidroeléctricas convencionales, se están empleando sistemas hidro-acumuladores de bombeo (PSH), que utilizan energía gravitacional elevando un gran volumen de agua dulce o de mar que, al ser liberado, se emplea para hidro-generación mediante un generador sincrónico. Una hidro – acumuladora por bombeo costero (también conocida como bombeo hidroeléctrico marino o PHES por sus siglas en inglés) se nutre de agua de mar, o sea, no depende de las épocas de sequías o lluvias ni de la necesidad de disponer de agua dulce para sus empleos imperativos. Aunque existe diferencia entre la composición química del agua salada y el agua dulce, la diferencia de densidad no es significativa desde el punto de vista gravitacional. Al igual que las hidroeléctricas convencionales, los PHES aprovechan el peso del agua, la altura del embalse y el caudal con que caiga en los álabes de una turbina hidráulica, pero para almacenar energía, utiliza la diferencia de altura entre un depósito elevado en la costa o acantilados y el nivel del mar. En ocasiones este tipo de proyecto se complementa con el uso de otras fuentes de energía (eólica o fotovoltaica generalmente, aunque puede usar grupos electrógenos para situaciones excepcionales) para garantizar elevar agua al depósito superior.

MATERIALES Y MÉTODOS

Comparación entre los sistemas de almacenamiento a baterías e hídrico por bombeo

En los sistemas hidroeléctricos, en general, el enlace entre la fuente de energía primaria (agua) y el suministro de energía eléctrica a la red, está constituido por una turbina hidráulica, como motor primario, un generador sincrónico y un centro de transformación de tensión. En los sistemas fotovoltaicos, el enlace entre los paneles solares y el suministro de energía eléctrica a la red, está constituido por un inversor y un centro de transformación de tensión [4, 5]. El generador sincrónico es una máquina eléctrica rotatoria que produce corriente alterna haciendo girar mecánicamente campos magnéticos estacionarios.

Los generadores sincrónicos tienen inercia de carácter eléctrica con constantes de tiempo dependientes de los valores de inductancias y resistencias activas de sus devanados de campo y devanados amortiguadores, además tienen inercia mecánica con constantes de tiempo dependientes del peso de la masa en rotación, así como de su diámetro y su velocidad angular. Todo esto provoca valores de retardo entre 1 y 10 segundos aproximadamente, en sus respuestas ante perturbaciones, dando lugar a respuestas transitorias, sub-transitorias y de estado estable. Esta inercia mecánica contribuye a la estabilidad de la red. Un inversor, en cambio, utiliza electrónica de potencia para convertir corriente directa en corriente alterna, por tanto, carece de inercia mecánica. Las constantes de tiempo en un inversor electrónico son de milésimas de segundo, o sea mucho menores con relación a las de un generador sincrónico, por lo cual se requiere emular artificialmente la inercia del generador sincrónico.

Entre las soluciones está el empleo de algoritmos de control como los llamados Generadores Sincrónicos Virtuales (VSG por sus siglas en inglés) que emula las funciones de sincronización y estabilidad de la red, inherentes al generador sincrónico. Aunque el almacenamiento en baterías tiene un tiempo de instalación relativamente breve, se pueden emplazar en cualquier geografía y tecnológicamente, sus costos disminuyen cada año, su uso en grandes potencias solo puede garantizar necesidades energéticas de corta duración (máximo pocas horas) [6]. Los sistemas de almacenamiento de energía mediante baterías son mucho más utilizados que los sistemas hidroeléctricos de almacenamiento por bombeo. Cada uno presenta sus propias ventajas y desventajas, y coexisten con el uso actual de las energías eólica y fotovoltaica. En la tabla 1, se muestra una comparación de ambos sistemas.

Tabla 1. Comparación de los sistemas almacenamientos a baterías e hídrico por bombeo [7 - 9]

Parámetro	Almacenamiento a baterías (BESS)	Almacenamiento hídrico por bombeo (PSH)
Costo Capital (USD/kWh)	Menor. Los costos iniciales de los BESS se han reducido significativamente gracias a los avances tecnológicos. A principios de 2025, el costo capital de los BESS en servicios públicos eran 148 \$/kWh para un sistema de 1 GWh.	Mayor. Los PSH requiere una inversión inicial considerable en obras civiles, como presas, embalses y túneles. En 2020, el costo de capital para un sistema de 100 MW y 10 horas se estimó en 262 \$/kWh.
Costo de Operación (USD/kWh)	Mayor. Los costos operativos de los BESS incluyen el mantenimiento continuo y el eventual reemplazo de baterías después de una vida útil relativamente corta de 5 a 10 años.	Menor. Los PSH tiene menores costos operativos porque no consumen combustible y su equipo tiene bajo desgaste. El mantenimiento se centra en el reemplazo de bombas y turbinas, en lugar de todo el sistema.
Costo Nivelado Almacenamiento (LCOS) (USD/kWh)	Mayor en uso prolongado. El LCOS incluye costo total a lo largo de vida útil del sistema. Debido a los mayores costos operativos y menor duración de la batería, el LCOS del BESS puede ser bastante mayor que el del PSH para proyectos de varias décadas.	Menor para uso prolongado. La larga vida útil de 50 o más años y los bajos gastos operativos resultan en un LCOS muy bajo, especialmente para almacenamiento de gran tamaño y larga duración.
Duración de la energía	De corta a media. Resulta más rentable para aplicaciones de corta duración (p. ej., para grandes potencias, de 2 a 4 horas máximo).	Largo. Los PSH están diseñados para almacenamiento de energía a gran escala y larga duración, a menudo proporciona 10 horas. Hay casos de 36 horas de almacenamiento.
Requisitos de instalación	Flexible. Los BESS se puede construir prácticamente en cualquier lugar con suficiente espacio, ya que no depende de características geográficas específicas.	Restringido. Los PSH requieren una topografía muy específica
Peligrosidad	Incendios, residuos y baterías no degradables.	Inundación, contaminación suelos.
Degradación	2 – 3% por año	Despreciable

Aunque los BESS han demostrado eficacia y su costo va disminuyendo, tecnológicamente continúan siendo una opción muy costosa para niveles grandes de potencia nominal, por lo que debe usarse si se requiere un funcionamiento silencioso y potencias nominales medias y bajas o altas potencias por periodos de tiempo limitados, mientras los PSH ofrecen almacenamiento energético de larga duración (horas a días) e inercia mecánica ante transitorios, por lo que son aconsejables en sistemas de alta potencia y durante periodos de tiempo largos. Todos estos elementos hacen que el empleo de los PSH sean una opción a considerar en países no petroleros. Como toda solución, los sistemas de hidro – acumuladora por bombeo costero (PHES) tienen ventajas y desventajas [10]. Entre estas se tienen:

Ventajas de los PHES

- Independencia energética: No requiere combustibles, solo agua de mar y fuente renovable de energía para elevar el agua hacia el depósito superior.
- Almacenamiento a gran escala: Ideal para compensar la inestabilidad energética de las fuentes renovables de energía.
- Larga vida útil: Las centrales de bombeo duran entre 40 y 50 años, incluso más, con bajo mantenimiento.
- Costo competitivo: El costo nivelado de almacenamiento (LCOS) es menor que el de baterías químicas en grandes potencias nominales.

Desventajas de los PHES

- Inversión inicial alta: Requiere infraestructura adecuada (grandes depósitos, tuberías, turbinas).
- Geografía adecuada: Necesita acantilados o colinas cerca del mar (por encima de 50 m de altura generalmente) y distancia limitada entre elevación y la costa.
- Corrosión del agua salada: Necesita materiales resistentes (plásticos especiales, acero inoxidable, hormigón especial) lo cual suele encarecer el proyecto.
- Impacto ambiental: Hay alteración del ecosistema costero y posibles filtraciones de sal.

Sistemas hidroeléctricos de almacenamiento por bombeo (PSH)

La potencia nominal de todo sistema hidroeléctrico depende de la altura del depósito superior y del caudal utilizado. La altura es probablemente, el factor más importante para considerar un sitio hidrológicamente bueno, a partir de lo cual todos los otros parámetros pueden ser satisfactorios. La potencia nominal y por consiguiente el rendimiento de energía de un sitio es proporcional a la altura del depósito superior, una baja altura disminuye la energía potencial del agua depositada y los volúmenes de agua requieren aumentarse (porque la presión y por consiguiente las velocidades disminuyen) y el sistema se hace más caro, por ello generalmente los sitios más altos son mejores que los más bajos.

La altura suele oscilar [11, 12], entre 100 y 800 metros, hay diferentes criterios de diseño, pero obligatoriamente el caudal tiene que ser el suficiente para que la turbina hidráulica entregue la potencia requerida. Seleccionar el sitio correcto es vital en los costos de todo proyecto hidroeléctrico. Económicamente es muy importante la existencia de una red eléctrica accesible a la cual apoyar conectándose en horarios pico y es también muy importante la existencia de vías de transportación que garanticen el mantenimiento en servicio. Un inconveniente generalmente encontrado en la construcción de proyectos hidro-energéticos son los derechos del terreno a usar, los permisos medioambientales y los acuerdos entre propietarios. En todas las regiones, cuanto más sensible sea un terreno ecológicamente, más largo y costoso será el proceso de autorización, aunque en términos generales los sistemas hidroeléctricos pueden incorporarse de forma segura en todos los entornos, salvo en los más sensibles, y siempre estarán diseñados para minimizar los impactos negativos, además de proporcionar una mejora neta.

Las PSH requieren características geográficas y geológicas específicas (construcción de grandes presas, embalses, túneles y cavernas subterráneas, etc.), lo que limita su implementación a lugares determinados, requiriendo además largo tiempo de instalación. El creciente uso de fuentes renovables de energía (fundamentalmente eólica y fotovoltaica) en el mundo, ha dado espacio para el desarrollo de nuevos proyectos de almacenamiento hídrico por bombeo ya que es una garantía de estabilidad energética por su posibilidad de almacenamiento energético a gran escala a pesar del costo de la construcción civil, que aun hoy, sigue siendo un obstáculo importante. La hidro - acumulación por bombeo, en este momento, es una opción validada por su aplicación exitosa desde la primera PSH de 30 MW en Okinawa, Japón y es empleada en forma creciente por muchos países.

Japón [13], fue puntero en 1999, en la implementación de la hidro - acumulación por bombeo, aprovechando sus posibilidades geográficas, con la PSH Okinawa Yanbaru, orientado al mar de Filipinas, operada por Electric Power Development Co., Ltd, (figura 2). Este sistema, primero en el mundo, trabaja completamente con agua de mar, con un volumen de agua almacenada de 564,000 m³, una altura eficaz de 136 m de diferencia entre ambos almacenamientos (ciclo abierto), un caudal de 26 m³/s, cubriendo el 2,1% de la demanda de la Región de Okinawa, que es de 30MW fue construido parcialmente con acero inoxidable y tuberías de plástico con fibra de vidrio para resistir la erosión.

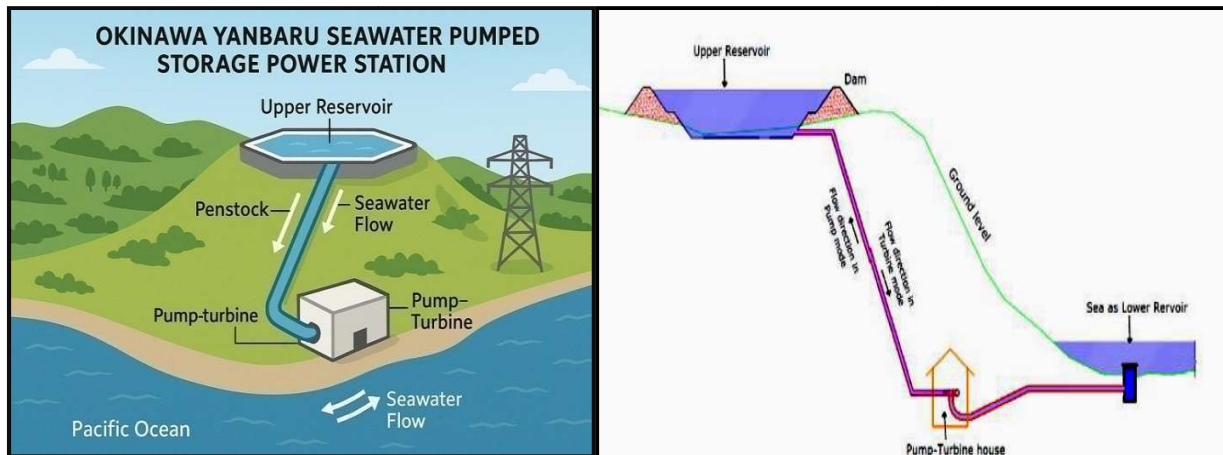


Fig. 2. Izquierda: Entrada/salida de agua de mar de la central eléctrica de bombeo de agua de mar de Okinawa Yanbaru. Derecha: Esquema básico de una PSH usando agua de mar

La Isla Hierro, Islas Canarias es otro ejemplo de sostenibilidad energética con el proyecto “Gorona del Viento” (figura 3). Todo el sistema [14], se mantiene en funcionamiento mediante dos depósitos de agua, una central de bombeo, una central hidroeléctrica y un parque eólico. Todos se coordinan desde un centro de control. Tiene un volumen de tanque superior de 400,000 m³, posee un grupo de bombas de 1,5MW en total y otras 6 independientes de 500kW cada una. Tiene 5 aerogeneradores de 2,3MW cada uno (11,5MW en total), la diferencia de altura entre los 2 depósitos hídricos es 655 m, consta de 4 turbinas Pelton de 2,83MW cada una, el ahorro de combustible acumulado desde su inauguración en 2014 es 40,000 barriles de petróleo.

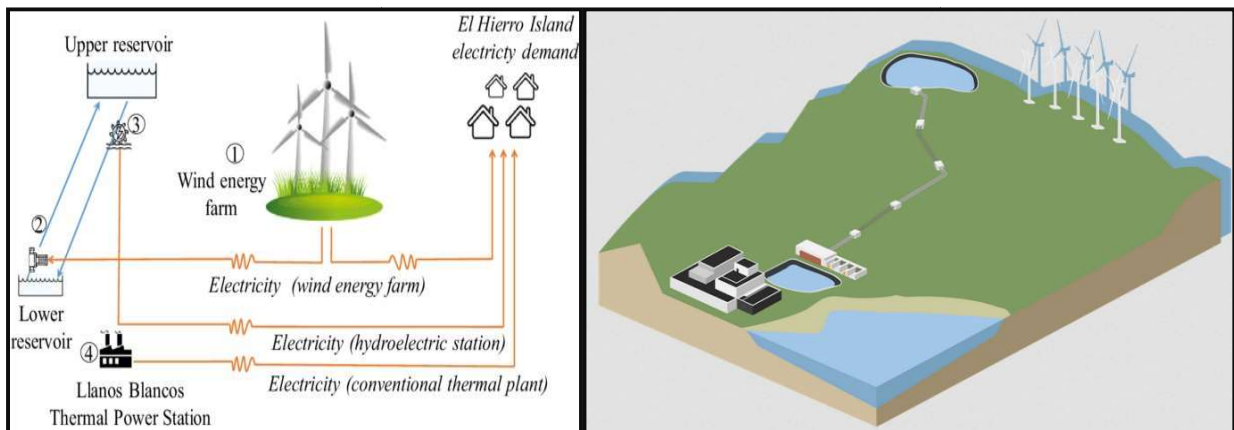


Fig. 3. Izquierda: Esquema funcional de la hidroacumuladora por bombeo Gorona del Viento. Derecha: Diagrama físico de la instalación hidroenergética

Muchos gobiernos han tenido en cuenta en su planificación la importancia del almacenamiento de energía [15]. India su meta hacia un futuro energético sostenible para el año 2030 es de un 50% de fuentes de energía renovables, complementando las formas de almacenamiento de energía por baterías y almacenamiento hídrico por bombeo. Los objetivos de la India en materia de energías renovables plantean desafíos para la estabilidad de la red y la calidad de la energía debido a la intermitencia de la energía eólica y solar. El proyecto Chitravathi [16], de 500 MW (figura 4), es un proyecto hidroeléctrico de bombeo en el distrito de Sri Sathya Sai, Andhra Pradesh, India, desarrollado por Adani Green Energy (AGEL). Sus especificaciones técnicas incluyen una capacidad total de almacenamiento de energía de 2805 MWh, utilizando el embalse de equilibrio existente de Chitravathi como embalse inferior y un embalse superior de nueva construcción.

El proyecto busca impulsar la integración de energías renovables en la red eléctrica, proporcionando estabilidad a la red y satisfaciendo la demanda máxima de energía. La presa del proyecto será una presa de rocas con núcleo de arcilla, compuesta por material excavado del embalse. El embalse superior será de nueva construcción, con un almacenamiento de 6,11 millones de metros cúbicos (MCM) y un nivel de elevación (EL) de 495 m en el nivel de llenado del embalse. El embalse inferior existente tiene un EL de 298 m y un almacenamiento vivo de 1,22 MCM.

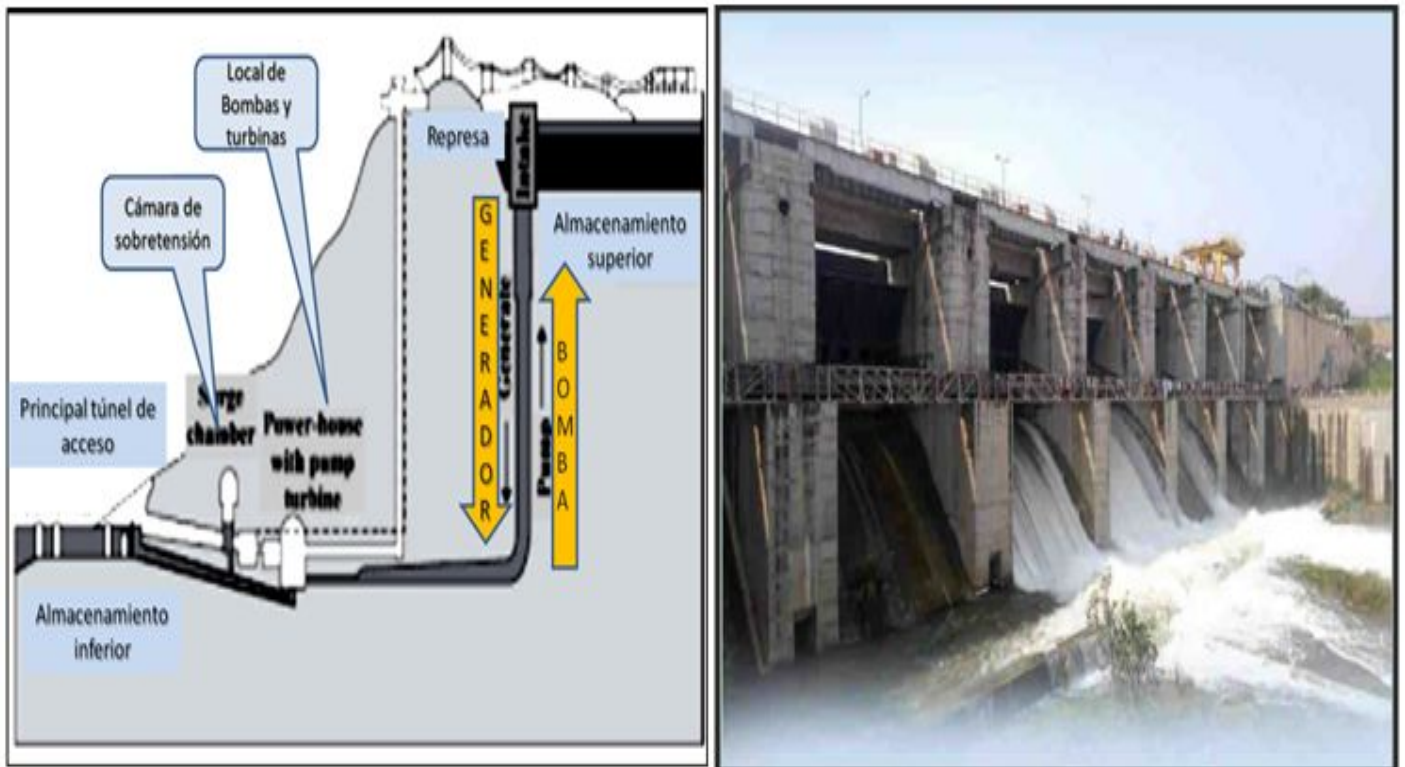


Fig. 4. Izquierda: Esquema funcional de la hidroacumuladora por bombeo Chitravathi de 500 MW, India Derecha: Foto de la instalación

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de tipos y tendencias actuales de las PSH

Todo diseño de PSH [17], incluye:

- **Embalses:** El tamaño y la diferencia de altura afectan la capacidad de almacenamiento y la producción de energía. Estos emplazamientos en ocasiones se ubican en regiones montañosas o accidentadas, lo que requiere una cuidadosa adaptación a la geología variable, puede usar agua potable o agua de mar.
- **Turbinas:** Las turbinas generalmente son turbinas/bombas reversibles que permiten alternar entre bombeo y generación en un mismo equipamiento. Los modelos de velocidad variable mejoran la flexibilidad. Esto resulta especialmente útil en la red eléctrica con fuentes renovables fluctuantes.
- **Vías fluviales:** Las tuberías y los túneles deben gestionar el caudal con mínimas pérdidas.
- **Factores ambientales:** La selección del emplazamiento debe priorizar la minimización del impacto ecológico y la gestión de los retos de adquisición de terrenos.
- **Integración en la red eléctrica:** Los diseños cada vez más admiten instalaciones híbridas con energía solar o eólica, lo cual es fundamental para el impulso a la expansión de las energías renovables y la fiabilidad de la red.

Existen dos tipos de sistemas hidroeléctricos de almacenamiento por bombeo [18]: de circuito abierto y de circuito cerrado (figura 5).

Central hidroeléctrica de almacenamiento por bombeo de circuito abierto: Una central hidroeléctrica de almacenamiento por bombeo de circuito abierto cuenta con una conexión hidrológica continua a una fuente de agua natural, como un río o un lago. En este tipo, el embalse superior o inferior está conectado a un flujo de agua.

Central hidroeléctrica de almacenamiento por bombeo de circuito cerrado: Una central hidroeléctrica de almacenamiento por bombeo de circuito cerrado consta de dos embalses que no están conectados a ningún cuerpo de agua natural externo. El sistema bombea el agua únicamente entre los embalses superior e inferior.

La PSH de ciclo abierto tiene mayor probabilidad de contaminación ambiental que el ciclo cerrado.

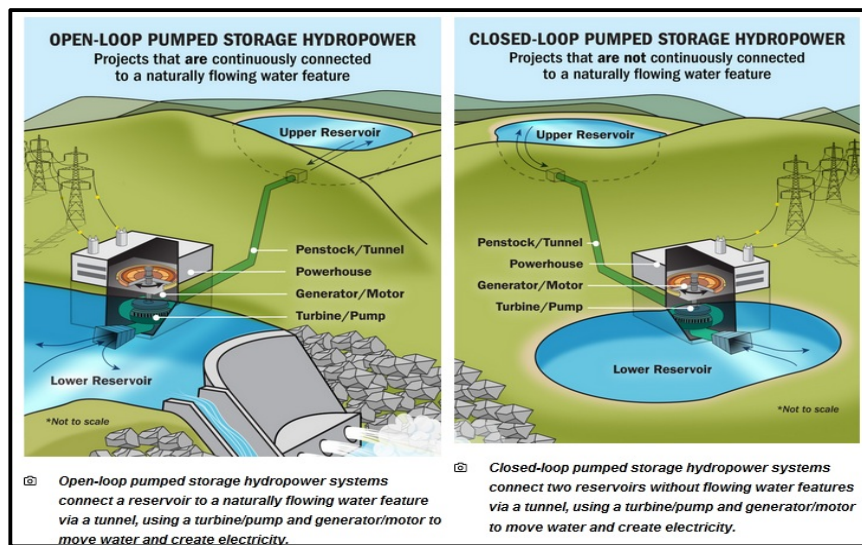


Fig. 5. PSH de ciclo abierto y de ciclo cerrado

Las principales tendencias en PSH [19, 20], buscan la reducción de su costo constructivo y su trabajo más eficiente. Algunas soluciones son más empleadas que otras. Entre estas hay 12 que se encuentran en diferentes niveles de madurez tecnológica, estas son:

1. PSH de pequeña potencia nominal. Emplea depósitos de acero corrugado y membranas flotantes.
2. PSH de turbinas-bombas sumergibles y moto-generadores.
3. PSH geo-mecánica.
4. PSH híbrida con planta eólica y/o solar.
5. PSH integrada con planta desalinizadora.
6. PSH subterránea con tuneladoras para la excavación del almacenamiento.
7. PSH de mina subterránea.
8. PSH de mina a cielo abierto.
9. PSH híbrida modular de circuito cerrado y escalable.
10. PSH de recipiente presurizado.
11. PSH subterránea térmica.
12. PSH de fluido de alta densidad.

Los principales elementos que diferencian estas soluciones, son:

- Costo capital total.
- Costo nivelado estimado del almacenamiento (LCOS).
- Tiempo de construcción.
- Riesgo en acometer el proyecto (aplicación de nuevos conceptos innovadores o la aplicación de métodos y tecnologías de construcción probados).
- Escalabilidad y aplicabilidad (Rango de capacidad mínima y máxima estimada en MW).
- Flexibilidad operacional (Amplio rango operativo, velocidades de rampa rápidas, tiempos de cambio de modo rápido).
- Tamaño potencial del mercado.
- Impacto ambiental.
- Limitaciones geográficas o topológicas.

Solución del uso de depósitos de acero corrugado y membranas flotantes (figura 6)

El uso de alternativas de almacenamiento externo tiene como objetivo abaratar la construcción del depósito superior, esta solución fue planteada por vez primera por Shell Energy North America (SENA) al Departamento de Energía de Estados Unidos, para de esta forma, aprovechar la experiencia exitosa de almacenamiento de enormes cantidades de combustible en grandes depósitos de 10 metros de diámetro y unos 6 metros de altura, todo lo cual no solamente facilitaría la más rápida construcción sino que también garantizaría el aislamiento del medio ambiente exterior. El depósito inferior es flotante. Es una tecnología fácilmente modulable y escalable que disminuye visiblemente las limitantes topológicas del terreno y facilita la obra civil.

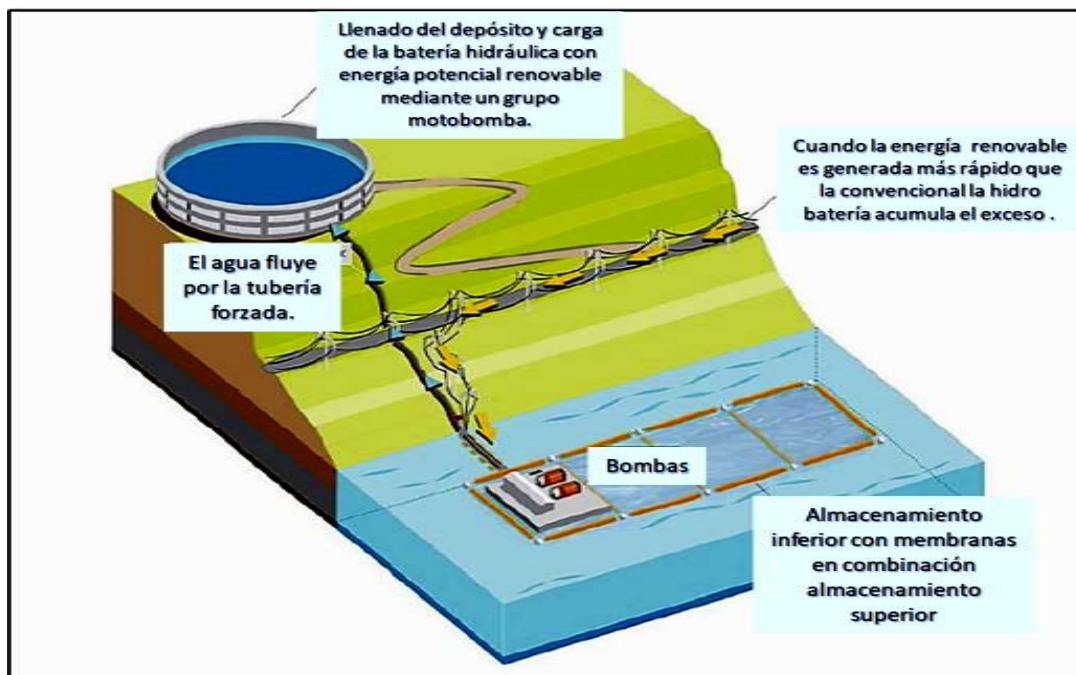


Fig. 6. Solución del uso de depósitos de acero corrugado y membranas flotantes en PSH

Solución con turbinas-bombas sumergibles y moto-generadores (figura 7)

En esta solución el objetivo es eliminar la construcción de un local para las turbinas y generadores.

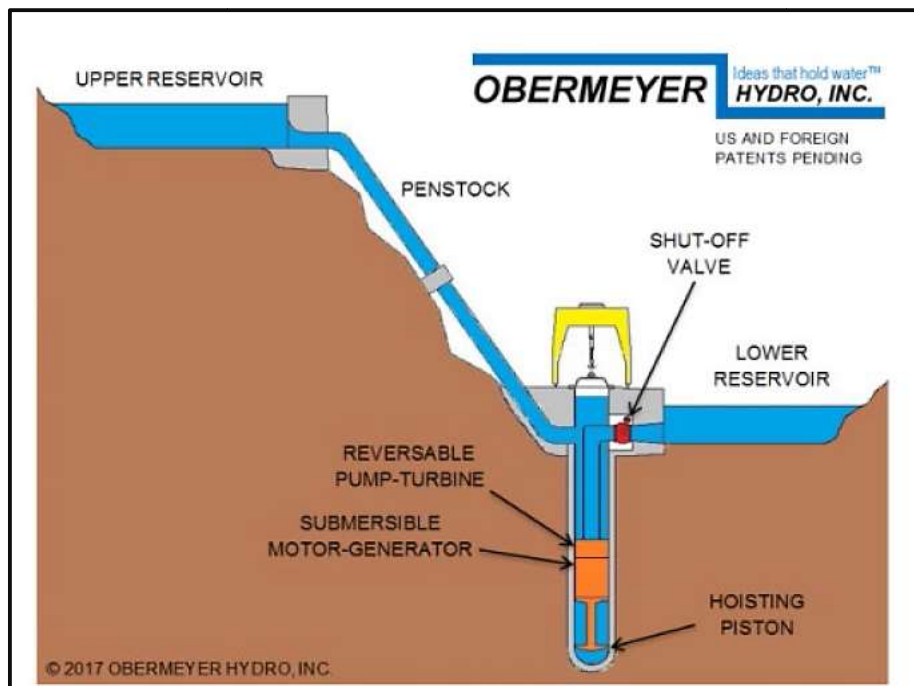


Fig. 7. Solución del de turbina y generador sumergibles

Integración con planta desalinizadora (figura 8)

Esta solución fue planteada por IPHROCES (Integrated Pump Hydro Reverse Osmosis Clean Energy System) y desarrollada por Oceanus Power & Water, LLC (Oceanus). Es una combinación de PSH con una planta desalinizadora con lo cual se aprovecha el agua de mar como fuente de energía gravitatoria amparada en fuentes renovables de energía cercanas, mientras se produce agua potable en una localización adyacente. Este proyecto se está ejecutando en Chile.

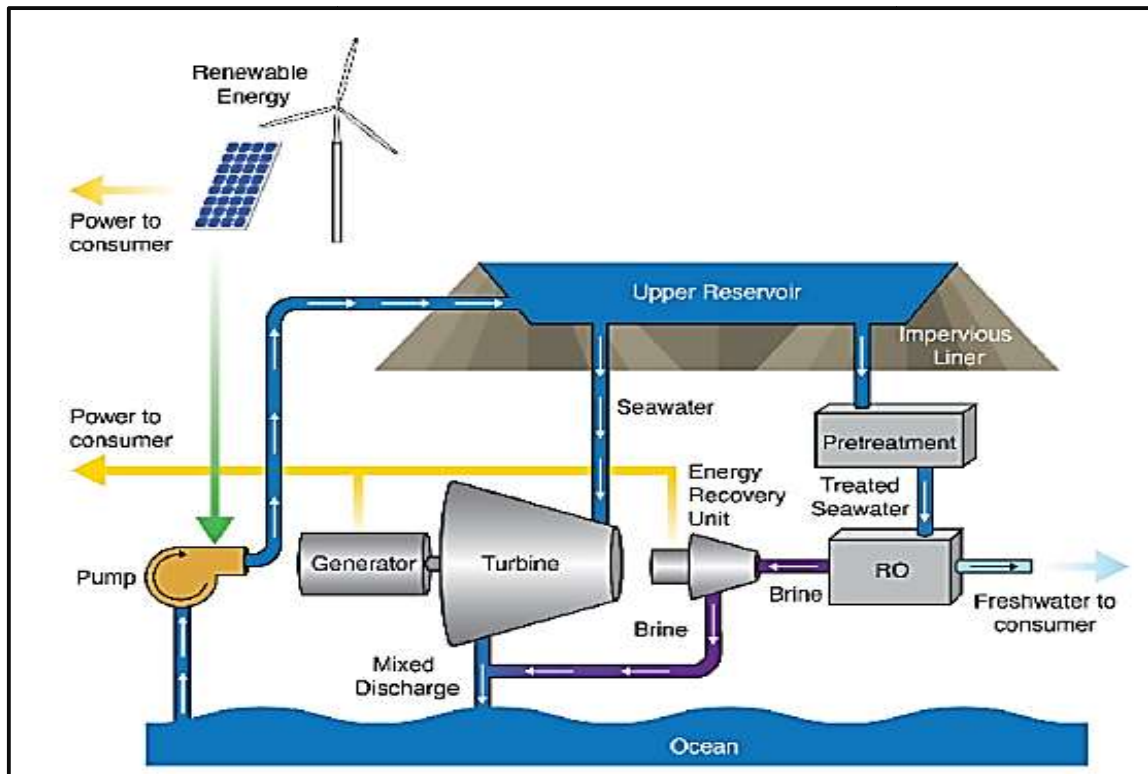


Fig. 8. Integración entre planta desalinizadora, fuentes renovables y PSH

Los países con mayor desarrollo y uso de PSH [23, 24], son China, Estados Unidos, India, Japón y Australia, (figura 9), aunque hay actualmente un uso muy generalizado. China incorporó 7,75 GW de PSH en 2024 y está en vías de alcanzar su objetivo de 120 GW para 2030. Australia tiene 15 GW de PSH en construcción o desarrollo, incluyendo el gigantesco proyecto Snowy 2.0 de 2 GW. Estados Unidos tiene más de 50 GW de nueva capacidad de PSH. Se encuentran en fase de planificación 67 proyectos en 21 estados. Europa tiene una cartera de PSH para el continente que incluye 52,9 GW en desarrollo, con 3 GW actualmente en construcción.

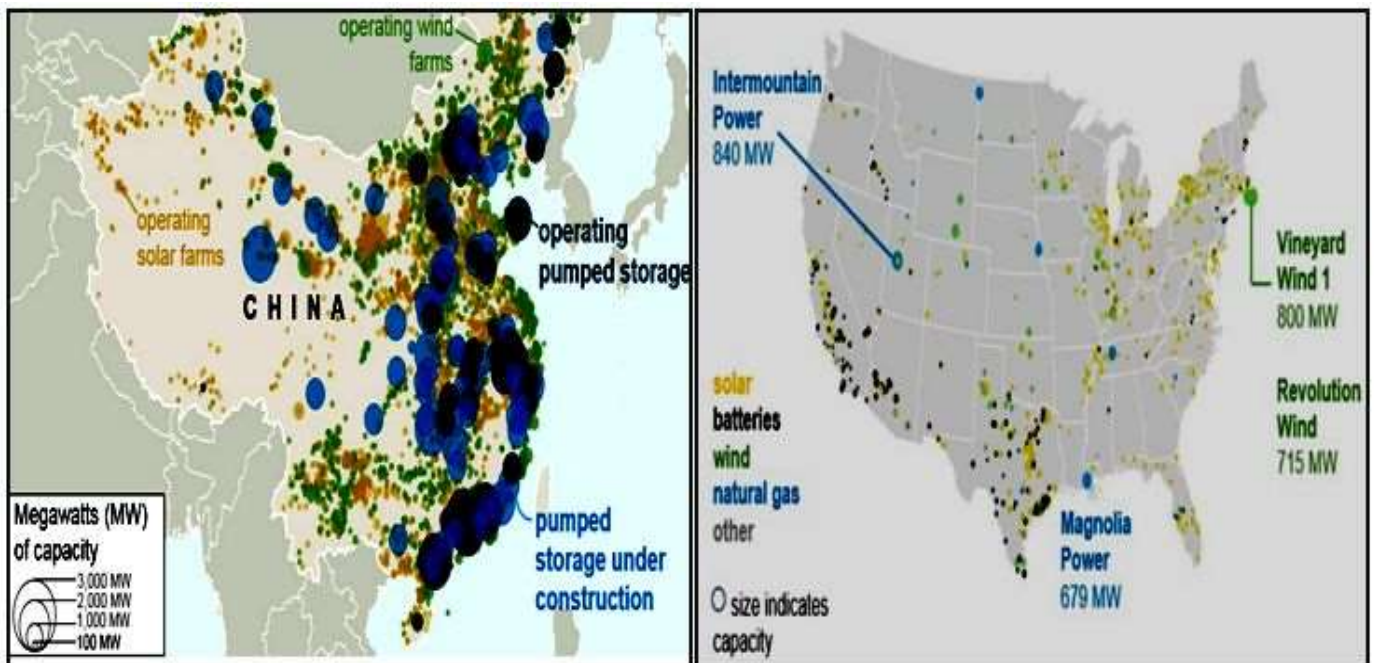


Fig. 9. Izquierda: PSH en China 2023. Derecha: Planificación de energía para 2025 en Estados Unidos

CONCLUSIONES

El aprovechamiento de la energía gravitacional hidráulica es una opción ampliamente usada con éxito. La creación de nuevas capacidades de generación hidroeléctrica de bombeo (PSH) desempeña un papel fundamental en la integración con el creciente suministro de energía solar y eólica a nivel mundial. Las instalaciones de PSH, almacenan el exceso de energía procedente de fuentes renovables variables y la liberan cuando la generación es baja o la demanda es alta, estabilizando la red y reduciendo la necesidad de centrales pico basadas en combustibles fósiles. Hasta el año 2023 había una capacidad instalada a nivel global, de 183GW en PSH. Se aspira a 420GW para el 2050. La opción hidro - acumuladora por bombeo (PSH) es un pilar de crecimiento de vital importancia en la infraestructura energética moderna y juega un papel importante como tecnología de almacenamiento energético a gran escala, representando un porcentaje significativo de la capacidad total mundial de almacenamiento de energía para 2025, con China, EE.UU., India y Japón a la cabeza.

REFERENCIAS

- [1]. Mistry, M. "Cooling Degree days and Heating degree days". EnergyA. 2018. ISSN 0360-5442. Disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.energy-a.eu/cooling-degree-days-and-heating-degree-days/&ved=2ahUKEwjGs8nem9KPAXVMlIkEHQkZJRUFnoECBgQAQ&usg=AOvVaw2ONyR9Ni8mIwNiVnjyODm2>
- [2]. Sebestyén, V. "Renewable and Sustainable Energy Reviews: environmental impact networks of renewable energy power plants". ScienceDirect. 2021, vol. 151. ISSN 1872-6291. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/journal/renewable-and-sustainable-energy-reviews/vol/151/suppl/C>
- [3]. Pérez, J., *et al.* "Trends and challenges in the operation of pumped-storage hydropower plants". Renew. Sustain. Energy Rev. 2018, vol. 44, p. 767–784. ISSN 1364-0321. Disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115000398&ved=2ahUKEwjz4syldKPAXXcRTABHT1ZH8QQFnoECCAQAQ&usg=AOvVaw3IhBz3TTPlbPLyaolaTe6m>
- [4]. Alizadeh, M., and Sun, W. "Dynamic Interactions Between Inverter-Based Resources and Synchronous Generator: A Comparative Study for Cascading Failure Risk". IEEE Access. 2025, vol. 13, p. 102830-102847. ISSN 2169-3536. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/11031413>
- [5]. Meng, X., *et al.* "Comparison between virtual synchronous generator and droop controlled inverter". Conference: 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC). Auckland, New Zealand, 2016. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.researchgate.net/publication/313543535_Comparison_between_virtual_synchronous_generator_and_droop_controlled_inverter&ved=2ahUKEwixZv_2tSPAXW9m4kEHbB5JxIQFnoECBgQAQ&usg=AOvVaw0csY_cC-tmhkvwrrj1eVr0
- [6]. Suski, A., *et al.* "Analysis of Pumped Hydro, Storage Hydro and Battery Storage Options: An Indian Case Study". SSRN. 2024, p. 23. ISSN 1556-5068. Disponible en: <https://papers.ssrn.com/sol3/Delivery.cfm?abstractid=4788707>
- [7]. Topalović, Z., *et al.* "Economics of electric energy storage. The case of Western Balkans". Elsevier. 2022, vol. 238. ISSN 0922-3444. Disponible en: <https://ideas.repec.org/a/eee/energy/v238y2022ip0360544221019174.html>
- [8]. Ponomareva, A. "Efficient energy management and energy saving with a BESS (Battery Energy Storage System)". Medium. 2024. ISSN 0261-3077. Disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://medium.com/integra-sources-blog/smart-energy-consumption-cost-cutting-resilience-resource-saving-environmental-efficiency-2fd3f52e8f0&ved=2ahUKEwjR7OjA67-RAXVuSjABHYoTFIMQFnoECBwQAQ&usg=AOvVaw12qaguDVMSq6sj11Eua-ho>
- [9]. IRENA. "Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030". IRENA. Germany, 2017. ISBN 978-92-9260-038-9. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf&ved=2ahUKEwjXr-q6r-RAXU0o7AFHTJAB9IQFnoECCEQAQ&usg=AOvVaw00zzMFCrUiQM2MLTSBWVJX
- [10]. Blakers, A., *et al.* "A review of pumped hydro energy storage". Progress in Energy. 2021, vol. 3, n. 2. ISSN 2516-1083. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/350396132_A_review_of_pumped_hydro_energy_storage
- [11]. Wilkins, M., *et al.* "Identifying potential sites for large-scale Pumped Hydroelectric Energy Storage (PHES) in New Zealand". National Institute of Water & Atmospheric. 2021. ISSN 2230-5548. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.mbie.govt.nz/dmsdocument/28349-identifying-potential-sites-for-large-scale-pumped-hydroelectric-energy-storage-phes-in-new-zealand-september-2021&ved=2ahUKEwinopmexaeRAXUXF1kFHduSGYcQFnoECDgQAQ&usg=AOvVaw1l5pfD0ynl0wmhYvj40Z_A

- [12]. Blakers, A., *et al.* "An atlas of pumped hydro energy storage". ANU Open Research. 2020. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://openresearch-repository.anu.edu.au/bitstreams/54a0074b-9194-4670-810e-04f62bbcd88/download&ved=2ahUKewinopmexaeRAXUXF1kFHduSGYcQFnoECDIOAQ&usg=AOvVaw1yAmgMvs4eqkVL_JZqSpBL
- [13]. Katsaprakakis, D., *et al.* "Technical details regarding the design, the construction and the operation of seawater pumped storage systems". Proceedings of the ICE - Energy. 2013, vol. 55, p. 619-630. ISSN 1751-4231. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/257176691_Technical_details_regarding_the_design_the_construction_and_the_operation_of_seawater_pumped_storage_systems
- [14]. Quevedo, A., *et al.* "Gorona del viento wind-hydro power plant". In 3rd International Hybrid Power Systems Workshop. Tenerife, Spain, 2018. Disponible en: https://hybridpowersystems.org/wp-content/uploads/sites/9/2018/05/1_2_TENE18_036_paper_Marrero_Agustin.pdf
- [15]. Filho, R., *et al.* "Strategic Guidelines for Battery Energy Storage System Deployment: Regulatory Framework, Incentives, and Market Planning". Energies. 2023, vol. 16. ISSN 1996-1073. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/21/7272>
- [16]. ENERGY. "Chitravathi Pumped Storage Project, Andhra Pradesh, India". Energy. 2024. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.nsenergybusiness.com/projects/chitravathi-pumped-storage-project-andhra-pradesh-india/&ved=2ahUKewiH_oE_Mp_dKPaxW8TjABHRJ7NSEQFnoECBkQAQ&usg=AOvVaw0KfGiPWb28AoRu0i6es_bv
- [17]. Lei, L., *et al.* "Optimization and decision making of guide vane closing law for pumped storage hydropower system to improve adaptability under complex conditions". Journal of Energy Storage. 2023, vol. 73. ISSN 2352-1538. Disponible en: <https://strathprints.strath.ac.uk/87658/1/Lei-et-al-JES-2023-Optimization-and-decision-making-of-guide-vane-closing-law-for-pumped-storage-hydropower-system.pdf>
- [18]. Ruppert, L., *et al.* "An analysis of different pumped storage schemes from a technological and economic perspective". Energy. 2017, vol. 141. ISSN 1873-6785. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/319953155_An_analysis_of_different_pumped_storage_schemes_from_a_technological_and_economic_perspective
- [19]. Koritarov, V., *et al.* "A Review of Technology Innovations for Pumped Storage Hydropower". HydroWires. 2022. ISSN 1570-6443. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://publications.anl.gov/anlpubs/2022/05/175341.pdf&ved=2ahUKewjhrMmV0NmPaxUQ0PACHQVDGnEQFnoECBsQAQ&usg=AOvVaw2NvSU4w7k_T-tjHDMJiWPe
- [20]. Timilsina, A., *et al.* "Water vortex hydropower technology: a state-of-the-art review of developmental trends". Clean Techn Environ Policy. 2018, vol. 20, p. 1737–1760. ISSN 1618-954X. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Water-vortex-hydropower-technology%3A-a-review-of-Timilsina-Mulligan/81586dd7c23acc15a5a0f0761c384a6084de9f19>
- [21]. Yang, K., *et al.* "Research on development demand and potential of pumped storage power plants combined with abandoned mines in China". Journal of Energy Storage. 2023, vol. 63. ISSN 2352-1538. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/371972880_Research_on_development_demand_and_potential_of_pumped_storage_power_plants_combined_with_abandoned_mines_in_China
- [22]. Karambelkar, S., *et al.* "Pumped storage hydropower in the United States". WIRES. 2025, vol. 12, n. 2. ISSN 1939-0041. Disponible en: <https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wat2.70017>
- [23]. Hunt, D., *et al.* "Existing and new arrangements of pumped-hydro storage plants". Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020, vol. 129. ISSN 1879-0690. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/341943349_Existing_and_new_arrangements_of_pumped-hydro_storage_plants
- [24]. Bhattarai, B., *et al.* "Pumped Storage Hydropower Systems: A Comprehensive Review of Innovations, Resilience, and Climate Adaptation". IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2025, vol. 1533, n. 1. ISSN 1755-1315. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/394991311_Pumped_Storage_Hydropower_Systems_A_Comprehensive_Review_of_Innovations_Resilience_and_Climate_Adaptation

CONFLICTOS DE INTERESES

No existen conflictos de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Pedro Osvaldo Díaz Fustier: <http://orcid.org/0000-0003-2005-4412>

Participó en la ejecución de los trabajos, el análisis de los resultados, la redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Orestes Hernández Areu: <https://orcid.org/0000-0002-2672-239X>

Participó en la ejecución de los trabajos, el análisis de los resultados, la redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

Frank Grau Merconchini: <https://orcid.org/0000-0002-0174-5309>

Participó en la ejecución de los trabajos, el análisis de los resultados, la redacción del borrador del artículo, la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.