



Almacenamiento en baterías (BESS) Vs almacenamiento por bombeo (PSH): El reto técnico-económico cubano

BESS Vs PSH: The Cuban technical – economic challenge

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

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

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

*Autor de la correspondencia: peter_habana@yahoo.es

Recibido: 15 de octubre de 2025

Aprobado: 2 de diciembre de 2025

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 internacional](#)



RESUMEN/ ABSTRACT

La situación electro-energética de Cuba es bien compleja actualmente y aunque aprovechar la radiación solar es una buena opción, sino se complementa con una eficaz forma de almacenamiento de energía no puede cumplir objetivos prácticos, porque el sol, como todas las fuentes dependientes de la naturaleza carecen de estabilidad y solamente existen en una parte del día o no están presentes; aunque hay múltiples formas de almacenamiento de la energía las más explotadas internacionalmente son baterías (BESS) y almacenamiento por hidro – bombeo (PSH), ambas tienen ventajas y desventajas técnico – económicas que se detallan en el presente artículo. Usar una u otra opción de almacenamiento energético debe ser precedido de un análisis casuístico, teniendo siempre en consideración las necesidades más prioritarias, costos de instalación y mantenimiento de cada tecnología instalada y vida útil en las condiciones reales existentes en el país, tanto económicas, como de recursos de energía primaria.

Palabras clave: almacenamiento energético, sostenibilidad, aspectos técnicos y económicos.

Cuba's current electricity situation is quite complex, and although harnessing solar radiation is a good option, it cannot achieve practical objectives without being complemented by an efficient form of energy storage. This is because the sun, like all natural sources, lacks stability and is only available for part of the day, or not at all. While multiple forms of energy storage exist, the most widely used internationally are batteries (BESS) and pumped storage hydropower (PSH). Both have technical and economic advantages and disadvantages, which are detailed in this article. Choosing one energy storage option over another should be preceded by a case-by-case analysis, always considering the most pressing needs, installation and maintenance costs of each technology, and its lifespan under the country's actual economic and primary energy resource conditions.

Keywords: energy storage, sustainability, technical and economic aspects.

INTRODUCCIÓN

El contenido energético de los combustibles es prácticamente estable en el tiempo, a lo que se suma la facilidad de almacenamiento y la infraestructura históricamente existente para su uso; por ello desde las décadas finales del siglo XIX hasta 1973 [1, 2], con el aumento de su precio casi ninguna energía renovable tuvo gran importancia (con la excepción de la energía hidroeléctrica [3], que si tuvo importancia energética desde el siglo XIX). Sin embargo, entre las décadas de 1980 y 1990, se produjo una concienciación mundial [4], hacia el creciente uso de energías renovables y se hizo un firme llamado a la sostenibilidad energética.

Cómo citar este artículo:

Pedro Osvaldo Díaz Fustier y Frank Grau Merconchini. Almacenamiento en baterías (BESS) Vs almacenamiento por bombeo (PSH): El reto técnico-económico cubano. Ingeniería Energética. Vol. 46(2025): publicación continua. ISSN 1815-5901.

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

El auge de las energías renovables y la inestabilidad típica de este tipo de energía, hacen necesario contar con un dispositivo de almacenamiento de energía que proporcione esa estabilidad, lo cual es esencial para el suministro de electricidad con calidad a los usuarios. En el caso de las baterías, se trata de energía química, mientras que en el caso de los hidro-acumuladores de bombeo, se utiliza energía gravitacional, que se obtiene elevando grandes cantidades de agua. Los sistemas de almacenamiento de energía mediante baterías (BESS) son mucho más populares y utilizados que los sistemas hidroeléctricos de almacenamiento por bombeo (PSH); si bien ambos métodos de almacenamiento son ampliamente utilizados en todo el mundo, cada uno presenta sus propias ventajas y desventajas, pero sus diseños se pueden complementar a la perfección [5], las condiciones técnico - económicas vigentes en Cuba imponen la necesidad de un análisis más profundo de cómo, dónde y para qué se debe emplear cada tecnología para que realmente sea eficaz en los sectores energéticos del país más prioritarios: energía y transportación, si bien aprovechar la radiación solar es una excelente opción debido a su alta incidencia anual en el país, explotar masiva y mayoritariamente la opción BESS no es económicamente factible, como tampoco sería plausible aplicar indiscriminadamente la opción PSH, considerando siempre que hoy hay grandes problemas locales con el abastecimiento de agua potable, por lo que las opciones electro-energéticas de almacenamiento hidrológico se deben fundamentar en uso de agua de mar.

Aunque el presente artículo no trata de electro-movilidad, se necesita una fuente de recarga y suministro que no se base en la conexión del Sistema Electroenergético Nacional (SEN) actualmente con grandes dificultades, como es el popular caso de múltiples motos eléctricas recargando en casa, en cuyo caso no hay ahorro alguno sino más sobrecarga del SEN. Por todo lo planteado, se requiere un análisis de las posibilidades energéticas de cada opción de almacenamiento para que estén acordes a las necesidades del país.

Debido a la existencia de una tensa situación energética nacional que afecta a todos los sectores vitales y dada la existencia fundamentalmente de dos formas de almacenamiento de energía a nivel internacional (aunque existen otras), es preciso analizar las soluciones de almacenamiento de energía más eficaces para el país, que contribuyan a mejorar a través de los parques solares y eólicos instalados o a instalar la inestabilidad del Sistema Electro-energético Nacional (SEN), disminuyendo el impacto negativo por ausencia temporal de suministro eléctrico de plantas termoeléctricas específicas y en regiones o locales determinados. Para este análisis se emplea una amplia bibliografía sobre los métodos, características, resultados técnico – económicos específicos en diversos países y el nivel real de solución alcanzado para la aplicación más conveniente de uso en las condiciones vigentes energéticamente en Cuba, con el fin de proponer instalación más conveniente de BESS o PSH o combinación de ambas tecnologías de almacenamiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los métodos empleados [6 - 9], específicamente son:

1. El método hipotético-deductivo, basado en la aplicación de principios generales de almacenamiento establecidos internacionalmente hacia casos locales, buscando nuevas soluciones basadas en las ya conocidas en otros países, descubriendo consecuencias para su desarrollo a partir de datos empíricos, principios, teoremas y leyes más generales de la ingeniería eléctrica, sobre una base dialéctica que enfatiza los elementos contradictorios que lo componen y los utiliza como fuente de desarrollo basado en el uso correcto de las posibilidades energéticas de cada región geográfica.
2. El método sistemático, que modela el objeto a partir de sus componentes, sus parámetros y las relaciones entre ellos; estas relaciones determinan su estructura y, por consiguiente, su dinámica.
3. El método histórico-lógico como una estrategia de investigación que combina el estudio de la evolución histórica de un fenómeno considerando sus etapas, antecedentes, causas y condiciones específicas de desarrollo para reunir evidencias de hechos pasados, para construir un relato coherente con el análisis de sus leyes internas de desarrollo lógico para explicar por qué el objeto ha evolucionado de esa forma y no otra.
4. El método comparativo es un procedimiento de investigación sistemático que analiza semejanzas y diferencias entre dos o más objetos, fenómenos o casos; se utiliza para establecer correlaciones, probar hipótesis y lograr generalizaciones empíricas

Introducción a las baterías como almacenador de energía

El almacenamiento recargable de energía eléctrica en baterías es un tema centenario [10], con el nacimiento de las baterías de plomo en 1859 (Gaston Planté / Francia) y en 1899 la de níquel– cadmio (Waldemar Jungner/ Suecia), pero las energías renovables en pleno desarrollo del siglo XXI [11, 12], fundamentalmente eólica y fotovoltaica obligaron a su desarrollo acelerado con potencias y prestaciones cada vez más extraordinarias, en paralelo a el desarrollo de las baterías del vehículo eléctrico. Las baterías se diseñan según su fin de explotación, las baterías de automóviles no - eléctricos proporcionan descargas rápidas de alta potencia durante períodos cortos, generalmente las baterías de los automóviles de combustión interna [13], proporcionan 12 voltios y pueden suministrar muy elevadas corrientes durante un periodo de tiempo muy corto, lo que resulta perfecto para arrancar motores; por lo general, almacenan entre 30 y 70 amperios-hora de energía, aunque se comercializan valores mayores.

Las baterías solares necesitan proporcionar una potencia constante durante períodos de tiempo relativamente largos, esta diferencia básica determina cómo se construye cada batería y qué es lo que puede hacer mejor.

Las baterías solares suelen ofrecer importantes ventajas como:

1. Vida útil prolongada: Las baterías solares generalmente vienen con una garantía de 10 años y pueden durar más de 6000 ciclos.
2. Liberación gradual de energía: Manejan la carga y descarga diaria de manera eficiente respaldando un suministro de energía constante para su hogar o empresa.
3. Diseño modular: La modularidad permite a los propietarios comenzar con capacidades más pequeñas y ampliarlas, según sea necesario.

Las baterías solares vienen en versiones de 12 V, 24 V y 48 V para sistemas fotovoltaicos o eólicos de baja potencia nominal. (hasta 5kVA aproximadamente, para potencias nominales 10 kVA por lo general 48 V o 96V [14]); almacenan mucha más energía, a menudo entre 100 y 400 amperios·hora y esta mayor capacidad le permite suministrar energía durante períodos más prolongados. La densidad energética de las baterías solares es muchísimo mayor que la de las baterías de automóviles, lo que significa que se obtiene más energía almacenada en el mismo espacio físico. Una batería de automóvil típica dura entre 3 y 5 años con un uso razonable, la batería solar puede durar 10 años si se mantiene adecuadamente. El rápido avance tecnológico en el campo de las baterías ha dado lugar a una diversidad de opciones, las baterías de iones de litio, por ejemplo, han ganado gran popularidad comercial debido a su alta densidad energética y larga vida útil [15]. Sin embargo, otras tecnologías como las baterías de flujo, las baterías de sodio-azufre y los súper-condensadores también están buscando lugares específicos en el mercado del almacenamiento de energía [16].

El sistema de almacenamiento en baterías (battery energy storage system / bess)

Un sistema de almacenamiento de energía en baterías (BESS) almacena electricidad para su uso posterior por medios electroquímicos, generalmente los BESS pueden cargarse desde la red eléctrica o desde otras fuentes de generación local, como la eólica, la solar, grupos electrógenos, etc. Los sistemas de almacenamiento de energía en baterías [17], constan de varios componentes (figura 1), que almacenan y gestionan la energía proveniente de fuentes de energía renovable, distribuyen eficientemente la energía eléctrica almacenada en baterías de forma modular, hacia un complejo inversor basado en electrónica de potencia optimizando el rendimiento y manteniendo la seguridad en las aplicaciones de gestión energética y energía de respaldo.

Este almacenamiento de energía en baterías posee un sistema inteligente de control (BMS), en BESS se utilizan sensores ambientales que detectan cualquier condición anormal en su entorno y alerta al módulo de control ambiental: sensores de puertas, sensores de inundación, sensores de humo y temperatura en el local. El módulo de control ambiental contiene un aire acondicionado de precisión, un conducto de refrigeración y un sistema de control automático que proporciona un entorno ideal de temperatura y humedad para las baterías durante la carga y descarga, para evitar incendios accidentales.

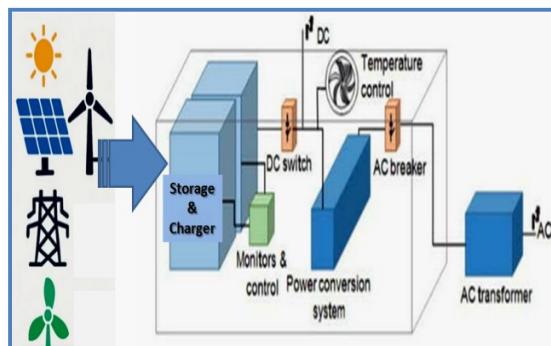


Fig. 1. Partes componentes de un BESS típico: Módulos de almacenamiento energético, Control integral de monitoreo y operativo general del sistema, control de temperatura, sistema de conversión de energía, interruptores y sistema de protección, transformador

El Sistema de Conversión de Energía (PCS) es un dispositivo de electrónica de potencia (SIC MOSFET [18, 19], para 1,2 - 6,5 kV según potencia nominal de la instalación) que convierte la energía eléctrica (figura 2), de corriente directa en corriente alterna sinusoidal con una frecuencia coincidente con la red y con posibilidades de sincronización y simulación de los generadores sincrónicos (generador sincrónico virtual) que componen el sistema electro energético en uso y que por tanto son los que imponen las constantes de tiempo a seguir.

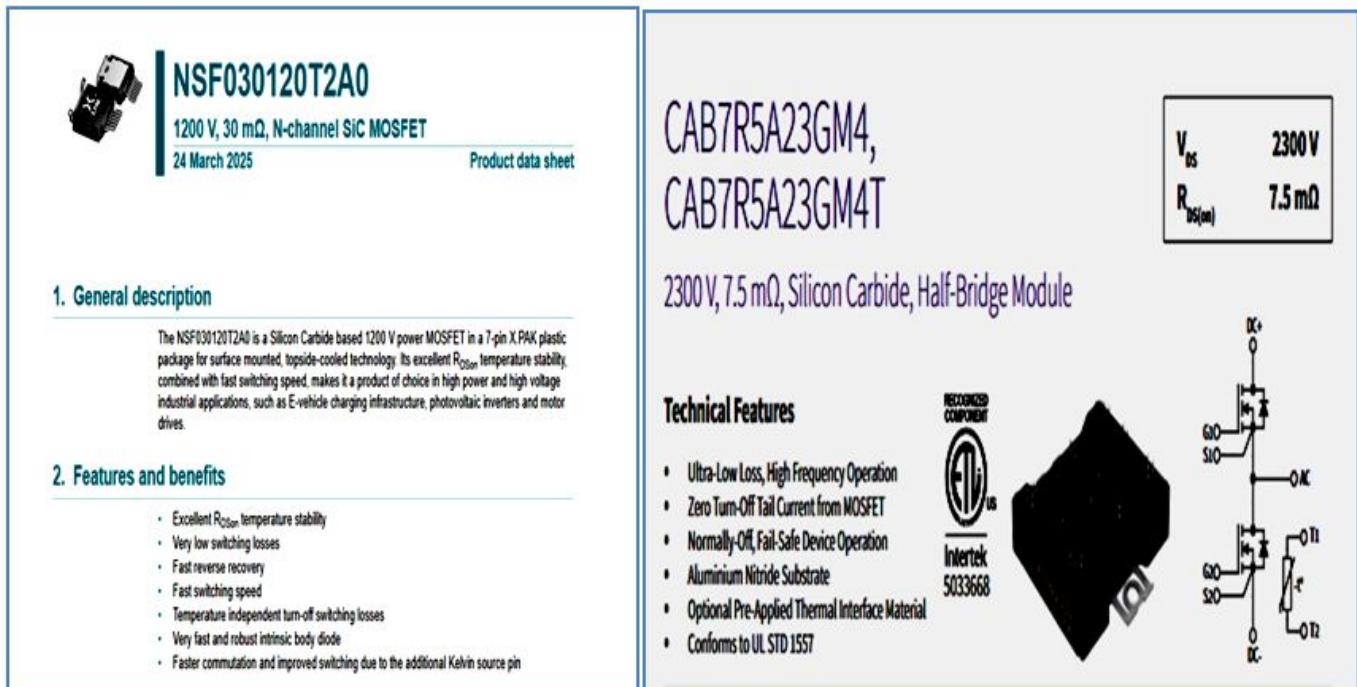


Fig. 2. Componentes electrónicos (SiC MOSFET) en los inversores con varios MW de potencia nominal usados empleados generalmente en los mismos

Este tipo de sistema de almacenamiento de energía tiene como ventajas:

1. Abaratamiento tecnológico sostenido en el diseño de las baterías para usos específicos.
2. Facilidad y rapidez de instalación,
3. No requiere requisitos específicos geográficamente

Sus desventajas principales son:

1. Peligro de incendios en almacenes. (BESS en California /Gran incendio 25 Enero 2025).
2. Es caro y las baterías tienden a degradarse con el tiempo requiriendo reemplazo.
3. Sus tiempos de respuesta ante transitorios difieren ampliamente de las máquinas sincrónicas comerciales, por lo que requieren buena programación para mantener sincronismo.

Los sistemas hidroeléctricos de almacenamiento por bombeo (pumped storage hydropower / psh)

Aunque el uso de la energía hidráulica como fuente de energía mecánica [20], data de muchos siglos atrás, es en las 2 últimas décadas del siglo XIX que aparecen las primeras hidroeléctricas, pero a partir de la segunda década del siglo XX una parte importante de la energía eléctrica se genera por esta vía consistente en grandes embalses con agua almacenada contenido por una presa con el fin de aprovechar su energía potencial gravitatoria a través de una diferencia de altura entre la represa y las turbinas hidráulicas acopladas a generadores sincrónicos. El caudal de agua se controla al transportarse por un sistema de tuberías usando válvulas para adecuar el flujo de agua con respecto a la demanda de electricidad, de esta forma funcionan a grosso modo las centrales hidroeléctricas.

El cambio climático trae frecuentes sequias que restan papel energético a las centrales hidroeléctricas periódicamente en muchas regiones, sin embargo en 1999 con la PSH Okinawa Yanbaru, Japón entra una opción que la presencia de sequia no afecta su potencial energético: el sistema hidroeléctrico por bombeo de agua salada [21, 22]. Japón fue puntero en la implementación de PSH aprovechando sus posibilidades geográficas con la PSH Okinawa Yanbaru (figura 3), trabajando 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 o sea 30MW, fue construido parcialmente con acero inoxidable y tuberías de plástico con fibra de vidrio para resistir la erosión; las PSH también se pueden clasificar como de circuito abierto o de circuito cerrado (figura 4), este caso específico es un PSH de circuito abierto.

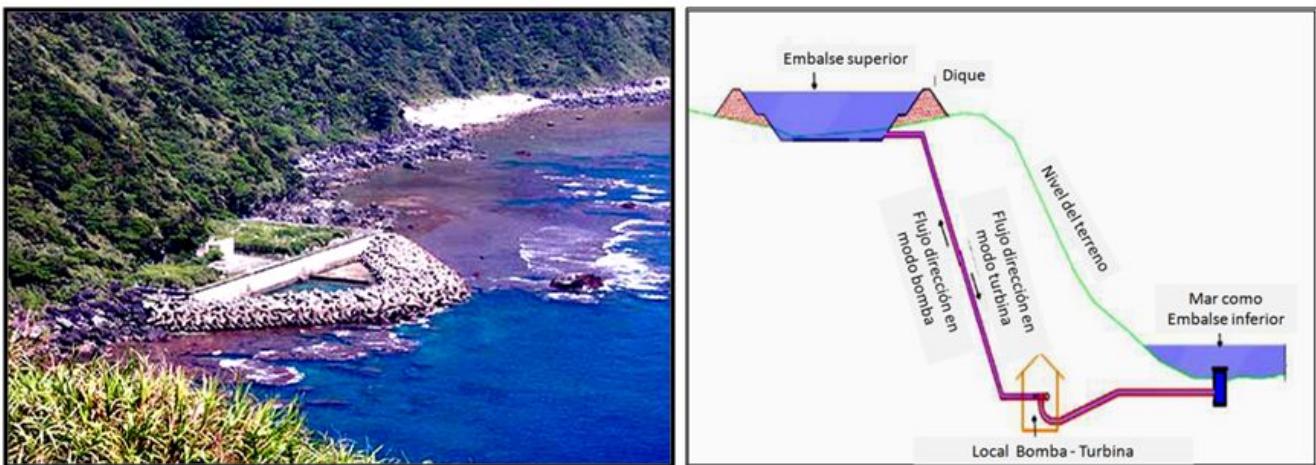


Fig. 3. Izquierda: Bloque de entrada/salida de agua de mar en la central eléctrica de bombeo de agua de mar de Okinawa Yanbaru, orientada al mar de Filipinas, operada por Electric Power Development Co., Ltd, primera en el mundo (1999) con este sistema. Derecha: Esquema básico de PSH usando agua de mar

El primer sistema hidroeléctrico de almacenamiento por bombeo con agua de mar instalado en Okinawa, Japón fue sometido a numerosas pruebas [23], para determinar sus perspectivas constructivas futuras:

- **Infiltración y dispersión del agua de mar:** Se inundó el embalse antes de su inauguración, no detectando fugas en el embalse superior, se verificó el contenido de sal de la atmósfera circundante, no habiendo indicios significativos extras por ser una isla, no hubo alteración de la calidad del agua en arroyos, ni estanques cercanos.
- **Efectos de corrosión por agua de mar:** Los componentes de acero inoxidable, junto con las tuberías de plástico reforzado con fibra (FRP-M), mostraron resistencia a la corrosión tras un examen minucioso de dichos materiales.
- **Incrustaciones de criaturas marinas:** Las inspecciones realizadas por buzos en el interior de la tubería de carga no mostraron adherencias de criaturas marinas.

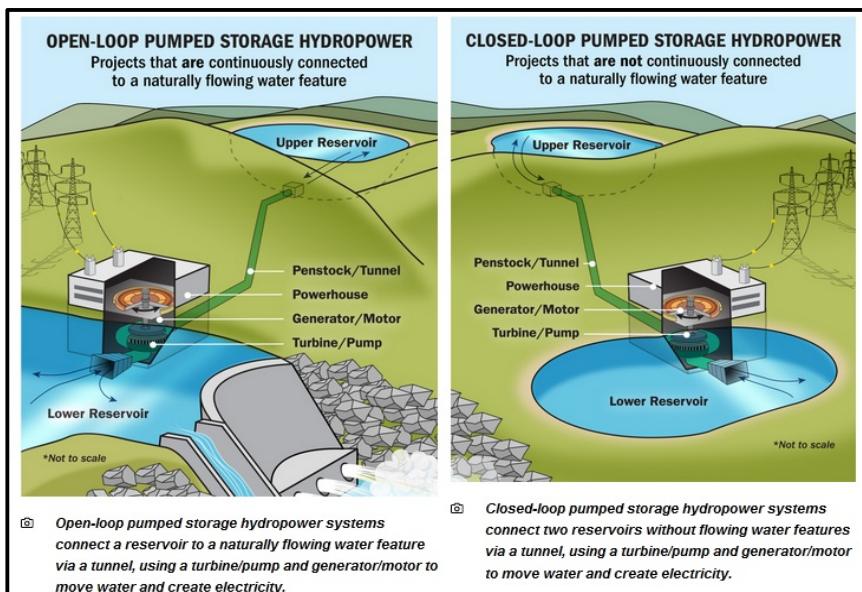


Fig. 4. PSH de ciclo abierto y de ciclo cerrado [24]

Un ejemplo típico de PSH de circuito cerrado es “Gorona del Viento” (figura 5), en Hierro, una de las Islas Canarias, muy citado como ejemplo de sostenibilidad energética en muchos artículos y textos, posee 2 depósitos de almacenamiento hídrico, una central de bombeo, una central hidroeléctrica, acoplados a un parque eólico, los cuales se coordinan desde un centro de control. Volumen tanque superior: 400,000 m³, posee un grupo de bombas de 1,5MW en total y otras 6 independientes de 500kW cada una, 5 aerogeneradores de 2,3MW cada uno (11,5MW), 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 [25 - 27].

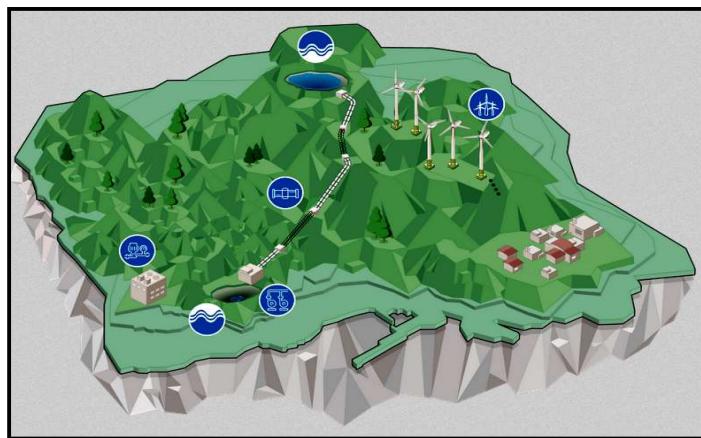


Fig. 5. PSH Gorona del viento, Hierro, Islas Canarias

Almacenamiento en baterías (bess) vs almacenamiento por bombeo (psh)

Según el uso energético que se requiera puntualmente puede usarse PSH o BESS [28, 29], e incluso combinación entre ambas opciones de almacenamiento, en la figura 6, se puede observar una comparación entre ambas tecnologías.

Ventajas	Desventajas	PSH	BESS
<ul style="list-style-type: none"> Almacenamiento de larga duración: Ideal para almacenar energía para suministrar durante períodos prolongados (de 6 a 12 horas o más). Alta eficiencia: La eficiencia de bombear y descargar suele oscilar entre el 70 % y el 80 %. Estabilidad de la red: Proporciona inercia, control de frecuencia y capacidad de arranque. Menores costes operativos: Una vez construido, los gastos operativos son mínimos. Larga vida útil: Puede funcionar durante 40 a 50 años o más con un mantenimiento adecuado. 	<ul style="list-style-type: none"> Limitaciones geográficas: Requiere un desnivel adecuado, distancias tuberías limitadas y grandes depósitos de agua Impacto ambiental: Uso de agua a gran escala y alteración del suelo, posibilidad de inundaciones por fallas técnicas. Alta inversión inicial de capital: Los costos de construcción son considerables. Largo plazo de ejecución: La construcción pueden tardar varios años, aunque puede minimizarse algo el tiempo. 	<ul style="list-style-type: none"> Implementación flexible: Instalación modular, sin limitaciones geográficas y corto tiempo.. Tiempo de respuesta rápido: Proporciona soporte instantáneo a la red, regulación de frecuencia y estabilidad de tensión (aunque esta rapidez puede traer problemas si no se toman medidas al respecto) Integración con energías renovables: Mejora el aprovechamiento de la energía solar y eólica mediante el almacenamiento del exceso de energía. Escalable: Fácilmente ampliable para aplicaciones a escala de servicios públicos o distribuidos. Impacto ambiental mínimo: Sin consumo de recursos hídricos, ni de áreas de gran escala. 	<ul style="list-style-type: none"> Altos costos de inversión: Las baterías de iones de litio y las baterías de avanzada en general son caras e igualmente el sistema de conversión de energía. Peligro de incendios: El almacenamiento y uso de muchas baterías crea peligro de incendios Vida útil limitada: Los ciclos de carga y descarga provocan pérdidas de eficiencia y vida útil en función del tiempo. Problemas de reciclaje y eliminación: La eliminación de baterías al final de su vida útil puede representar desafíos ambientales. Dependencia permanente de importación de repuestos.

Fig. 6. Comparación entre almacenamiento por bombeo (PSH) y almacenamiento por baterías (BESS)

En Alemania (2018) se hizo un estudio muy detallado para determinar la instalación de la tecnología de almacenamiento más adecuada para planificar su construcción a través de la muy prestigiosa compañía Voith [30], cuyos autores recibieron el premio anual “Technical Paper of the Year Award for the Market Trends and Strategies Tracks”, basado en que la sustancial reducción de los costos de los sistemas de almacenamiento en baterías (BESS) había dado lugar a un aumento de la cantidad instalados en Alemania durante los últimos años, con una capacidad instalada superior a 120 MW, mientras paralelamente la incertidumbre del mercado, junto con los elevados costes de inversión y los largos períodos de amortización, desalentaba a los inversores a desarrollar nuevas plantas de almacenamiento por bombeo (PSH).

Por lo tanto, era necesario un análisis científicamente fundamentado de estas dos opciones de almacenamiento para garantizar que la tecnología de almacenamiento utilizada no comprometa los objetivos climáticos y sea económicamente factible, comparando en relación con indicadores económicos y ambientales clave. Un primer análisis considera los costos de las materias primas de ambas tecnologías, ya que este es el factor limitante absoluto para la optimización futura de la construcción de componentes y plantas. En un segundo paso, se analizan las inversiones financieras de ambas tecnologías. A continuación se muestran detalles claves del análisis de referencia, a través de una traducción de los párrafos explicativos:

“Es evidente que existe una amplia gama de costos para las diferentes materias primas, especialmente algunas de las utilizadas en el BESS, que son muy costosas. Al considerar estos costos, se hace evidente la diferencia en los costos de materia prima entre el BESS y el PSH (véase la figura 6). Como se muestra, el BESS es aproximadamente 3,7 veces más costoso que el PSH en cuanto a costos de materia prima para la misma capacidad de almacenamiento de 13,4 GWh. La figura 4, indica que, para el almacenamiento en baterías, los costos de las baterías en sí superan con creces los costos del edificio. Además, la figura 4, ilustra que el principal factor determinante de los costos de materia prima para el PSH son los costos del combustible diésel para el proceso de construcción”.

En el párrafo anterior se refieren a la figura 7, mostrada a continuación, en el documento de referencia se demuestran científicamente que en proyectos de elevada potencia nominal (a partir de varios MW) no es rentable almacenar energía en BESS, a pesar del alto costo constructivo de las PSH debido fundamentalmente al consumo de combustible en el equipamiento de acondicionamiento del terreno.

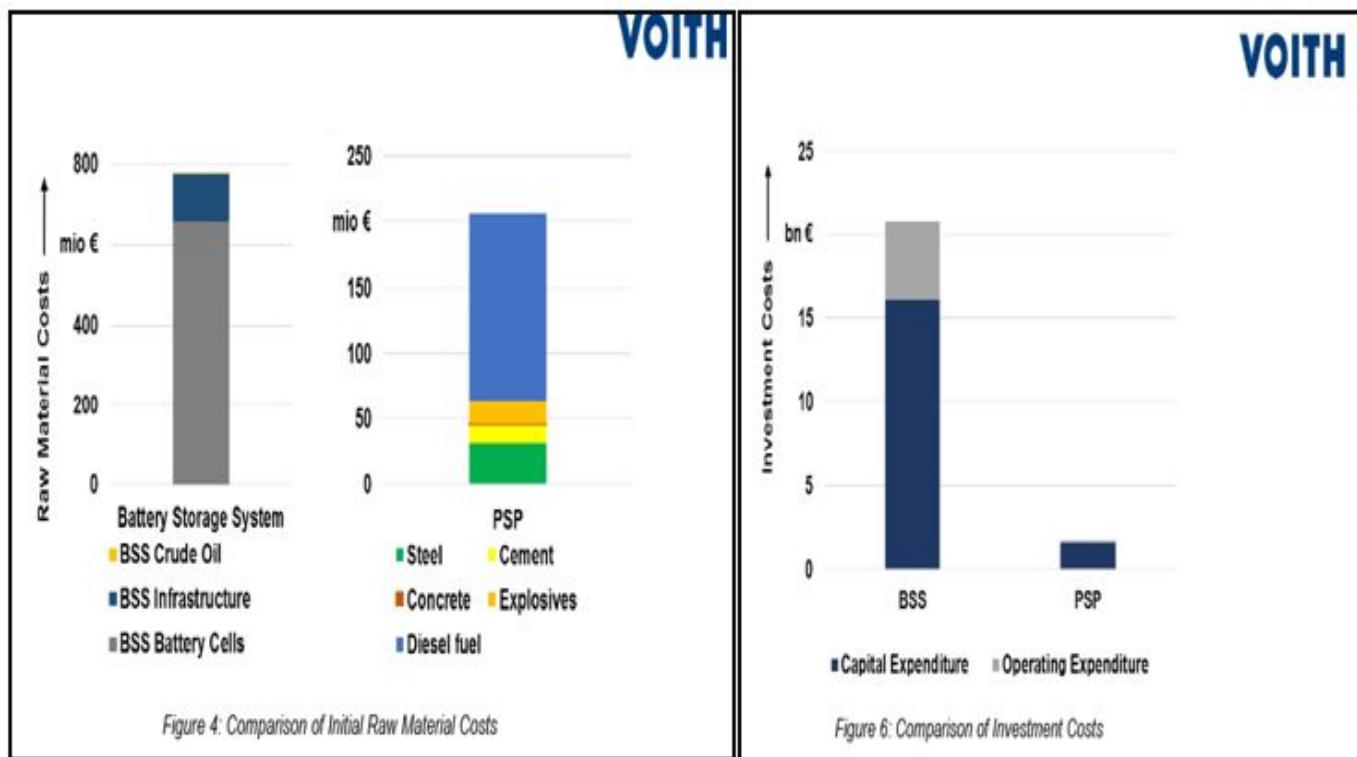


Fig. 7. Costos materias primas iniciales y comparación costos de inversión

Lo cual se hace más evidente en un cálculo para un uso de 100 años, como parte del mismo estudio referido (figura 8):

Coste total de la materia prima durante la vida útil

Durante una vida útil de 100 años, los costes de la materia prima para las dos opciones de almacenamiento de energía a grosso modo son muy diferentes; debido a la periódica sustitución de la baterías y a los elevados costes de su materia prima, los costos materiales de funcionamiento son mucho mayores que los de la maquinaria del PSH. Los costes de materia prima de funcionamiento (excluyendo la materia prima inicial) del BESS son aproximadamente 357 veces más elevados a lo largo de 100 años. En total, a lo largo de 100 años, los requisitos de materia prima del BESS son aproximadamente 18 veces más elevados que los del PSH.”

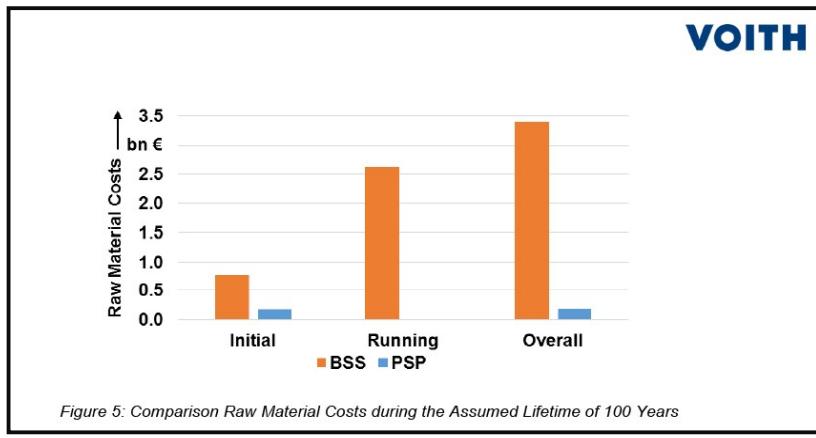


Fig. 8. Comparación costos materias primas durante una asumida vida útil de 100 años

El reto técnico – económico cubano

Cuba posee 5,746 km de costas accesibles al agua salada [31], 38.100 millones de metros cúbicos (m^3) de agua dulce accesible a la actividad humana, de los cuales 31.700 millones superficiales y 6.400 millones subterráneas, existe en explotación una única Central Hidroeléctrica (43MW) y varias mini y micro hidroeléctricas, por todo lo cual este tipo de energía renovable a penas aporta algo apreciable al sistema electro energético nacional, imperando el criterio de que Cuba carece de condiciones para desarrollarnos seriamente en este tipo de energía, porque la propia configuración de la isla de Cuba, larga y estrecha da lugar a la existencia de ríos de corto curso y reducido caudal en su mayoría, siendo el río más grande el Cauto y el más caudaloso el Toa [32], pero en realidad apenas son poco más que riachuelos comparados con los grandes ríos que se ven en América del Norte, del Sur o Europa; sin embargo varios países de Centroamérica, fundamentalmente Costa Rica y Panamá sin poseer significativos ríos producen cantidades apreciables de energía eléctrica.

En Cuba se han realizado estudios para la construcción de hidro-acumuladoras [33], desde la década de los 80 del siglo pasado, motivado por la intención de construcción de la Central Electrónuclear en Juraguá, Cienfuegos donde era necesario el control de la generación de electricidad y garantizar la carga base en el horario de la madrugada. Cuba aceleró su transición energética en 2024 [34], con el objetivo de instalar 1000 MW de energía fotovoltaica en dos años y 2000 MW adicionales para 2031, buscando reducir la importación de combustibles y mejorar la estabilidad eléctrica. Están en distintas fases de construcción 26 parques solares actualmente con más de 21MW de potencia nominal cada uno, con proyecciones de multiplicar casi cinco veces la potencia instalada en una década. Sin embargo como se puede observar en la figura 9, no hay un aprovechamiento estable [35], de la radiación solar según el horario del día, ni en función de los meses del año, ni el índice de claridad es estable, incluso el ángulo en que incide el sol también varía; o sea que es totalmente erróneo calcular la potencia que se pueda obtener de un parque fotovoltaico por su potencia nominal, sólo cumplen objetivo práctico complementados por una forma de acumulación de energía.

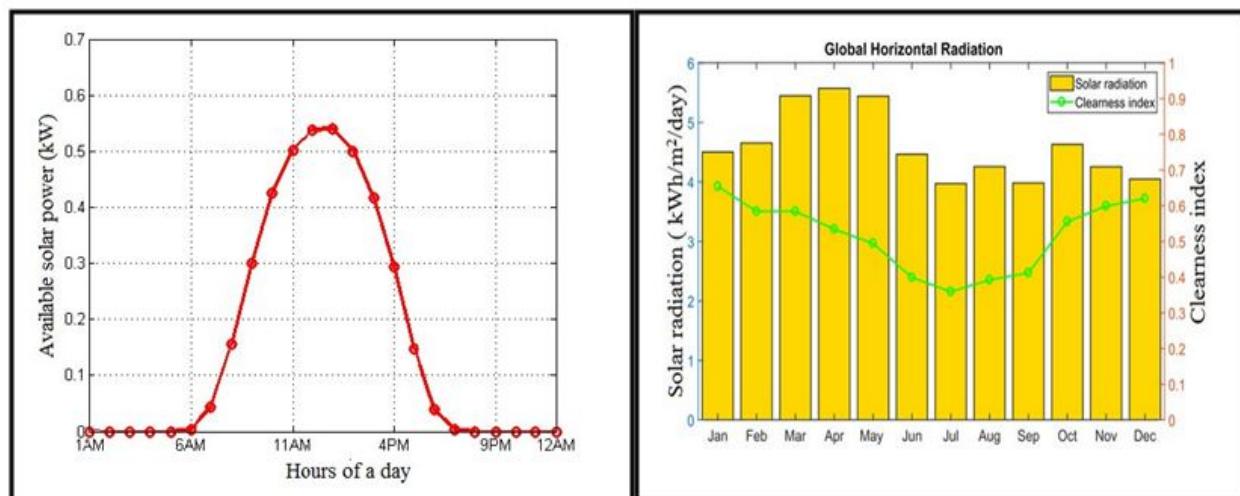


Fig. 9. Izquierda: Horas de aprovechamiento de radiación solar en celdas fotovoltaicas. Derecha: Radiación solar e índice de claridad en función de los meses del año

Optar exclusivamente o mayoritariamente por la opción BESS en almacenamiento energético para cientos o miles de MW encadenaría a Cuba a una extrema dependencia de importaciones: instalar y mantener baterías, así como instalar y mantener grandes inversores, porque en ambos casos son tecnologías de difícil encontrar otras opciones de repuesto, muy costoso. Sin embargo en casos puntuales es rentable el uso de BESS de altas potencias nominales, como es el caso de “Antillana de Acero” [36], que introduce altos consumos al sistema nacional, pero en tiempos bastante menores de 1 hora. También resultaría rentable resolviendo problemas en muchísimos lugares prioritarios por debajo de 800 kW y en infinidad de micro consumidores por debajo de 10 kW; otro uso muy prioritario en el país es recarga y mantenimiento del transporte público [37], a través del uso extensivo de vehículos eléctricos incorporando el uso de trolley bus como forma de ahorrar baterías, pero sin recargar el sistema electro-energético nacional como mayoritariamente ocurre actualmente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dentro de las soluciones evaluadas nacionalmente se ha estudiado el uso de hidro-acumuladoras [38], en Cuba se han estudiado alrededor de 30 sitios con muy buenas condiciones hidrológicas, geológicas y topográficas para la construcción de hidro-acumuladoras, localizados en las tres regiones geo-políticas del país: Occidente, Centro y Oriente (figura 10). En la parte occidental se han identificado 11 sitios ubicados en el macizo montañoso de la Sierra del Rosario con excelente ubicación por su cercanía a los grandes centros de consumo y generación del país, en la región central 4 sitios y en la región oriental 15



Fig. 10. Zonas en Cuba con potencialidades para instalar PSH

Una de las mayores ventajas del uso de las hidro-acumuladoras por bombeo de agua de mar en el caso de apoyo al Sistema Electro-energético Nacional es el empleo de turbinas hidráulicas acopladas a generadores sincrónicos, lo cual incorpora estabilidad y muy baja posibilidad de roturas, independientemente que el agua de mar es un recurso permanente y propio, así como no interfiere con los planes de abastecimiento de agua potable; es muy útil tener en cuenta que la hidroeléctrica de Hanabanilla es una fuente muy estable en todos los sentidos a pesar de tener más de 6 décadas de explotación .

CONCLUSIONES

En un país con las condiciones técnico – económicas imperantes en estos momentos es mucho más aconsejable no depender mayoritariamente de BESS, debido al alto costo de baterías, inversores y controles necesarios, todo totalmente dependiente de importaciones, por ejemplo la electrónica de potencia instalada en los inversores, su deterioro por x causa futura es costoso y muy específico, en el texto se considera correcto el uso de BESS en solución de muchos problemas puntuales, pero no mayoritariamente como apoyo al Sistema Electro-energético Nacional. Si bien el costo de PSH es superior a BESS y demora más en instalar; al estar rodeado de costas con acceso al mar, es mucho más factible el empleo mayoritario de PSH como método de almacenamiento energético, garantizando por grandes períodos presente y futuro una fuente de energía primaria inagotable y accesible: el agua de mar, además hubo una tradición de construcción de turbinas hidráulicas nacionales y del control de las mismas, por todo lo cual es aconsejable tomar muy seriamente la opción PSH como fundamental apoyo al Sistema Electro-energético Nacional. Por supuesto se requiere una adaptación técnico – económica del diseño de PSH acorde a las posibilidades reales del país.

REFERENCIAS

- [1]. Alpanda, S., & Peralta-Alva, A. "Oil crisis, energy-saving technological change and the stock market crash of 1973–74". *Review of Economic Dynamics*. 2010, vol. 13, n. 4, p. 824-842. ISSN 1096-6099. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/5048234_Oil_Crisis_Energy-Saving_Technological_Change_and_the_Stock_Market_Crash_of_1973-74
- [2]. Mitchell, T. "The resources of economics: making the 1973 oil crisis". *Journal of Cultural Economy*. 2010, vol. 3, n. 2, p. 189-204. ISSN 1753-0369. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17530350.2010.494123>
- [3]. Allerhand, A. "Hydroelectric power: The first 30 years [history] ". *IEEE Power and Energy Magazine*. 2020, vol. 18, n. 5, p. 76-87. ISSN 1540-7977. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/344029079_Hydroelectric_Power_The_First_30_Years_History
- [4]. Rockström, J., et al. "Global sustainability: the challenge ahead". *Global Sustainability*. 2018, vol. 1, n. 6. ISSN 2059-4798. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/326515297_Global_sustainability_the_challenge_ahead
- [5]. Lee, J., et al. "Comparison of stabilization effects of Variable Pumping Storage Hydro (VPSH) and BESS on renewable generation oriented power system". *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2023, vol. 18, n. 5, p. 3375-3389. ISSN 1975-0102. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/368721361_Comparison_of_Stabilization_Effects_of_Variable_Pumping_Storage_Hydro_VPSH_and_BESS_on_Renewable_Generation_Oriented_Power_System
- [6]. Castellanos, R., et al. "Metodología de la investigación científica para las ciencias técnicas". Universidad de Matanzas. 2003. Disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://zenodo.org/record/1296510/files/Met%2520Inv%2520Cientifica%2520para%2520CT.pdf&ved=2ahUKEwjk0subvp-SAxWOQzABHXsgGrkQFnoECAwQAQ&usg=AOvVaw3yw8osfhIQ-IQw6oTh9l7X>
- [7]. Wei, P., et al. "Progress in energy storage technologies and methods for renewable energy systems application". *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, n. 9. ISSN 2076-3417. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/9/5626>
- [8]. Torres, T. "En defensa del método histórico-lógico desde la lógica como ciencia". *Revista Cubana de Educación Superior*. 2020, vol. 39, n. 2. ISSN 0257-4314. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/348406624_En_defensa_del_modo_historico-logico_desde_la_Logica_como_ciencia
- [9]. Sánchez, A., & Murillo, A. "Enfoques metodológicos en la investigación histórica: cuantitativa, cualitativa y comparativa". *Debates por la Historia*. 2021, vol. 9, n. 2, p. 147-181. ISSN 2594-2956. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2594-29562021000200147
- [10]. Santamaría, C., & Herradón, B. "Aspectos históricos y sociales de las baterías y los líquidos iónicos". *Revista de Plásticos Modernos*. 2021, vol. 121, n. 767, p. 27-34. ISSN 0034-8708. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/372236371_Aspectos_históricos_y_sociales_de_las_baterias_y_los_líquidos_iónicos
- [11]. Carralero, L., et al. "An isolated standalone photovoltaic-battery system for remote areas applications". *Journal of energy storage*. 2022, vol. 55, n. 1. ISSN 2352-152X. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/363348873_An_Isolated_Standalone_Photovoltaic-Battery_System_for_Remote_Areas_Applications
- [12]. Espinoza, J., et al. "Revisión de la Literatura para Gestión de Sistemas de Almacenamiento de Energía por Medio de Baterías para Determinar su Eficiencia". Polo del Conocimiento. 2024, vol.9, n. 7, p. 1478-1495. ISSN 2550-682X. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/382339880_Revision_de_la_Literatura_para_Gestion_de_Sistemas_de_Almacenamiento_de_Energia_por_Medio_de_Baterias_para_Determinar_su_Eficiencia
- [13]. Cueva, E., et al. "Revisión del estado del arte de baterías para aplicaciones automotrices". *Enfoque UTE*. 2018, vol. 9, n. 1, p. 166-176. ISSN 1390-6542. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/5722/572261854015/html/>
- [14]. Inya, N., & Arihilam, E. "ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT DEMONSTRATED IN A [DC] ONE BEDROOM FLAT". *International Journal of Science Academic Research*. 2023, vol. 4, n. 9, p. 6264-6268. ISSN 2582-6425. Disponible en: <https://www.scienceijsr.com/sites/default/files/article-pdf/IJSAR-1771.pdf>
- [15]. Li, M., et al. "30 Years of Lithium-Ion Batteries". *Advanced Materials*. 2020, vol. 30, n. 33. ISSN 1521-4095. Disponible en: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.201800561>
- [16]. Zubi, G., et al. "The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022, vol. 89, p. 292-308. ISSN 1879-0690. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118300728>
- [17]. Zhao, C., et al. "Grid-connected battery energy storage system: a review on application and integration". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023, vol. 182, p. 19. ISSN 1364-0321. Disponible en: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/grid-connected-battery-energy-storage-system-a-review-on-applicat/>

- [18]. Mhiesan, H., et al. "Evaluation of 1.2 kV SiC MOSFETs in multilevel cascaded H-bridge three-phase inverter for medium-voltage grid applications". Chinese Journal of Electrical Engineering. 2019, vol. 5, n. 2, p. 1-13. ISSN 2096-1529. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8794848/>
- [19]. Sengupta, A., et al. "Single-event effects in heavy-ion irradiated 3-kV SiC charge-balanced power devices". IEEE Transactions on Nuclear Science. 2024, vol. 71, n. 8, p. 1447-1454. ISSN 1558-1578. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10479570>
- [20]. Arora, D., & Arora, K. "Hydro power generation-growth story, challenges & solutions". Water and Energy International. 2024, vol. 67, n. 4, p. 28-32. ISSN 0972-057X. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/387751090_Literature_Review_Main_Challenges_in_Hydropower_Development_and_Strategies_for_Overcoming_Them
- [21]. Pradhan, A., et al. "The adoption of Seawater Pump Storage Hydropower Systems increases the share of renewable energy production in Small Island Developing States". Renewable Energy. 2021, vol. 177, p. 448-460. ISSN 1879-0682. Disponible en: www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096014812100834X
- [22]. METY. "The upper pond for Okinawa: the world's first pumped storage plant using seawater". Hydropower and Dams. 2012, vol. 19, n. 3. ISSN 1352-2523. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.hydropower-dams.com/articles/the-upper-pond-for-okinawa-the-worlds-first-pumped-storage-plant-using-seawater/&ved=2ahUKEwjXzNHdqtWRAXQL1kFHR2qOCkQFnoECBMQAQ&usg=AOvVaw2F_IxEohNKGR_ZH9GXg8hi
- [23]. CMS. "Japanese pumped storage embraces the ocean waves". International Water Power and Dam Construction. 2000. ISSN 0306-400X. Disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.waterpowermagazine.com/analysis/japanese-pumped-storage-embraces-the-ocean-waves/&ved=2ahUKEwjXzNHdqtWRAXQL1kFHR2qOCkQFnoECB4QAQ&usg=AOvVaw3rxjMC4Nu4PaaY5mRZsnp3>
- [24]. Toufani, P., et al. "Short-term assessment of pumped hydro energy storage configurations: Up, down, or closed?". Renewable Energy. 2022, vol. 201, p. 17. ISSN 1879-0682. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/364062276_Short-Term_Assessment_of_Pumped_Hydro_Energy_Storage_Configurations_Up_Down_or_Closed
- [25]. Ochoa, D., et al. "Pathways to 100% Renewable Energy in Island Systems: A Systematic Review of Challenges, Solutions Strategies, and Success Cases". Technologies. 2025, vol. 13, n. 5, p. 180. ISSN 2227-7080. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2227-7080/13/5/180>
- [26]. Rojas, F. "La apuesta por el almacenamiento de energía renovable con centrales hidroeléctricas reversibles en Canarias". Cuadernos de Derecho Regulatorio. 2024, vol. 2, p. 67-75. ISSN 3020-6162. Disponible en: <https://revistasmarcialpons.es/cuadernosdederechoregulatorio/article/view/villar-la-apuesta-por-el-almacenamiento-de-energia>
- [27]. Galán, S., & Candelaria, M. "El hierro: Modelo de sostenibilidad". Revista EXPE: Experiencias y Proyectos Educativos. 2022, n. 6, p. 40-55. ISSN 2530-7908. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9529715>
- [28]. Lee, J., et al. "Comparison of stabilization effects of variable pumping storage hydro (vpsh) and bess on renewable generation oriented power system". Journal of Electrical Engineering & Technology. 2023, vol. 18, n. 5, p. 3375-3389. ISSN 1975-0102. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/368721361_Comparison_of_Stabilization_Effects_of_Variable_Pumping_Storage_Hydro_VPSH_and_BEES_on_Renewable_Generation_Oriented_Power_System
- [29]. Agupugo, P., et al. "Policy and regulatory framework supporting renewable energy microgrids and energy storage systems". Eng. Sci. Technol. J. 2022, vol. 5, p. 2589-2615. ISSN 2215-0986. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/383405521_Policy_and_regulatory_framework_supporting_renewable_energy_microgrids_and_energy_storage_systems
- [30]. Krüger, K., et al. "Li-ion Battery versus pumped Storage for bulk energy storage-A Comparison of raw material, investment Costs and CO2-footprints". Conference on HydroVision International. 2018. Carolina del Norte, EUA. Disponible en: https://www.ili-energy.com/case-for-psb/Voith_2018_06_27_HydroVision_Li-Ion_Vs_Pumped_Storage.pdf
- [31]. Silva, J. "Evaluación de los recursos hídricos de Cuba". Revista Geográfica. 2016, vol. 157, p. 73-83. ISSN 0031-0581. Disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.revistasipgh.org/index.php/region/article/download/212/215/386&ved=2ahUKEwjxriDl8mOAxAxXlm4kEHWipN7sQFnoECBcQAQ&usg=AOvVaw37DTqW2bLKCRGCRdzRLwFG>
- [32]. Alfonso, L. "Geografía de Cuba. Volumen I: Introducción al estudio de la Geografía de Cuba: consideraciones geográficas, didácticas y metodológicas para el estudio del país natal". Editorial Universitaria, Cuba. 2024. ISBN 978-959-16-5099-3. Disponible en: <https://isbncuba.ccl.cerlalc.org/catalogo.php?mode=detalle&nt=85609>

- [33]. Pupo, P., et al. “The role of hydropower in the Cuban electricity system and future plans towards 2030”. CUBAN ENERGY SYSTEM DEVELOPMENT. 2022, vol. 159. ISSN 1797-1322. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/359427199_THE_ROLE_OF_HYDROPOWER_IN_THE_CUBAN_ELECTRICITY_SYSTEM_AND_FUTURE_PLANS_TOWARD_2030
- [34]. Korkeakoski, M., & Filgueiras, M. “Una mirada a la transición de la matriz energética cubana”. Ingeniería Energética. 2022, vol. 43, n. 3, p. 40-47. ISSN 18815-5901. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/370283814_Una_mirada_a_la_transicion_de_la_matriz_energetica_cubana
- [35]. Hossain, S., et al. “Solar PV and biomass resources-based sustainable energy supply for off-grid cellular base stations”. IEEE Access. 2020, vol. 8, p. 53817-53840. ISSN 2169-3536. Disponible en:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9022971/>
- [36]. Torres, O., et al. “Una solución integral para los problemas de suministro eléctrico de Antillana de Acero”. Ingeniería Energética. 2020, vol. 41, n. 2. ISSN 1815-5901. Disponible en:
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7643794>
- [37]. CYTED. “Red para la integración a gran escala de energías renovables en los sistemas eléctricos”. Primer Simposio Internacional sobre Electromovilidad y Transición Energética (ELECTROMOVILIDAD 2024). La Habana, Cuba. Disponible en:
https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.cyted.org/conteudo.php%3Fid_rede%3D5466%26id_rede%3D522&ved=2ahUKEwjKq8nmp9qRAxVRD1kFHUOsBsIQFnoECBgQAQ&usg=AQVaw3E9K1waWrmlxsA7cr_BVBd
- [38]. Pupo, P., et al. “Cuban energy system development–Technological challenges and possibilities”. p. 159-175. Futures Research Centre. Finland. 2022. ISBN 978-952-249-568-6. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/359427199_THE_ROLE_OF_HYDROPOWER_IN_THE_CUBAN_ELECTRICITY_SYSTEM_AND_FUTURE_PLANS_TOWARD_2030

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que 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.

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.