

Interreg



Cofinanciado por
la Unión Europea
Cofinanciado pela
União Europeia

España – Portugal



RESUMEN DE ENTREGABLE:

E.2.1: Informe técnico de aplicación de tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica para ser utilizados por pequeños y medianos prosumidores en redes eléctricas inteligentes según estados de desarrollo tecnológico.



Resumen ejecutivo

Este documento constituye un resumen del entregable presentado, el cual se centra en el papel creciente de los pequeños y medianos consumidores de energía en su transición hacia agentes activos del sistema, es decir, prosumidores. En el contexto de una economía baja en carbono, estos prosumidores están adoptando modelos de generación local de energía, medidas de eficiencia energética y participación en mecanismos de respuesta a la demanda. Para que esta transición energética tenga éxito a nivel comunitario, resulta fundamental la integración de innovaciones tanto sociales como tecnológicas.

El almacenamiento energético se consolida como un elemento clave para los prosumidores, ya que permite optimizar la generación y la gestión de la demanda. Al almacenar el excedente de energía generado en periodos de baja demanda, se garantiza una disponibilidad estable durante los picos de consumo, se facilita la integración de fuentes renovables, se mejora la estabilidad de la red, se reducen las pérdidas energéticas y se abren nuevas oportunidades de ingresos mediante la participación en mercados de servicios de ajuste. Todo ello convierte al almacenamiento energético en una inversión estratégica para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas energéticos.

El entregable presenta un análisis de diversas tecnologías de almacenamiento de energía aplicables a pequeños y medianos prosumidores en el marco de las redes inteligentes, clasificadas según su grado de madurez tecnológica y características técnicas relevantes. Además, identifica las tecnologías más adecuadas para su integración con fuentes renovables en microrredes y ofrece una base técnica para orientar la selección de soluciones en proyectos de descentralización y sostenibilidad energética.

1. Introducción

El almacenamiento de energía eléctrica es fundamental para garantizar la eficiencia, confiabilidad y sostenibilidad de los sistemas energéticos. Entre sus principales funciones destacan:

- **Balance entre oferta y demanda:** Maneja la variabilidad de fuentes renovables intermitentes (solar y eólica), permitiendo almacenar excedentes de energía durante baja demanda y utilizarlos cuando la demanda supera la generación, evitando pérdidas de energía.
- **Estabilidad y calidad del suministro:** Ayuda a regular la frecuencia eléctrica, absorbiendo o liberando energía según sea necesario, y provee respaldo ante interrupciones, asegurando suministro continuo en sectores críticos.
- **Impulso a la transición energética:** Maximiza la participación de renovables en la red, posibilitando su uso fuera de los períodos de generación, y reduce las emisiones al sustituir generadores fósiles por sistemas renovables con almacenamiento.
- **Optimización económica:** Facilita el desplazamiento de energía al almacenar electricidad en horas de bajo costo y consumirla en horas pico, reduciendo costos y la necesidad de infraestructuras sobredimensionadas.
- **Resiliencia ante emergencias:** Proporciona autonomía energética en desastres naturales y soporta el funcionamiento de micro-redes y sistemas descentralizados.
- **Innovación tecnológica:** Promueve la movilidad eléctrica y fomenta la investigación en tecnologías sostenibles, como baterías de flujo, supercondensadores y almacenamiento térmico.

En conclusión, el almacenamiento de energía es esencial para integrar renovables, optimizar recursos, mejorar la resiliencia y apoyar el desarrollo sostenible.

2. Tecnologías de almacenamiento de energía

2.1 Descripción de tecnologías de almacenamiento de energía

Las tecnologías de almacenamiento de energía son fundamentales para garantizar un suministro energético eficiente, estable y sostenible, especialmente en sistemas basados en fuentes renovables. Existen múltiples métodos para almacenar energía, cada uno adecuado para distintas aplicaciones según la escala, el tipo de energía almacenada y las necesidades específicas del sistema. Según el tipo de energía almacenada, se clasifican en cinco categorías:

- a. **Electrostática y magnética:** Incluyen tecnologías como los supercondensadores, que almacenan energía en un campo electrostático, y los sistemas de almacenamiento magnético superconductores (SMES), que emplean materiales superconductores para generar campos magnéticos.
- b. **Electroquímica:** Agrupa baterías convencionales, como las de iones de litio y plomo-ácido, y baterías de flujo, que almacenan energía mediante reacciones químicas reversibles, adaptándose tanto a aplicaciones de gran escala como a dispositivos portátiles.
- c. **Mecánica:** Almacenan energía mediante mecanismos físicos, como el bombeo hidráulico (PHES) y los sistemas de aire comprimido (CAES), aprovechando energía potencial o cinética.
- d. **Térmica:** Emplean materiales que absorben o liberan energía térmica, como los sistemas de almacenamiento de calor sensible, latente o termoquímico, útiles en aplicaciones industriales y generación de energía térmica.
- e. **Sistemas de almacenamiento de energía química:** Este tipo de almacenamiento incluye tecnologías que transforman la energía eléctrica en energía química almacenada en combustibles sintéticos, hidrógeno o metanol, para su posterior uso. Estos sistemas son especialmente relevantes para aplicaciones donde la energía debe almacenarse por largos periodos.



Figura 1: Clasificación de las tecnologías de almacenamiento energético

Cada tecnología presenta ventajas y desventajas según el contexto de aplicación, como capacidad, eficiencia, coste y tiempo de respuesta. La innovación en este campo busca mejorar la eficiencia, reducir costos y aumentar la accesibilidad y sostenibilidad global.

En el análisis estratégico, las prestaciones de las distintas tecnologías varían en función de parámetros como potencia nominal y tiempo de respuesta. La siguiente tabla resume características clave como capacidad, eficiencia y madurez tecnológica, proporcionando un panorama integral de sus posibilidades de aplicación.

TECNOLOGÍA	CAPACIDAD ENERGÉTICA	EFICIENCIA DE CICLO COMPLETO	NIVEL DE MADUREZ
MECÁNICA	Bombeo (PHS)	1-100 GWh	80%
	Bombas de calor (PHES)	500 kWh - 1GWh	70 - 75%
	Aire comprimido adiabático (ACAES)	10 MWh - 10 GWh	> 70%
	Aire comprimido (CAES)	10 MWh - 10 GWh	45 - 60%
	Aire líquido (LAES)	10 MWh - 8 GWh	50 - 100%
ELECTROQUÍMICA	Volante de inercia	5 - 10 kWh	85%
	Baterías ion-litio	< 10 MWh	86%
ELÉCTRICA	Baterías de flujo (V, Zn, Fe, Zn Br)	< 100 MWh	70%
	Imanes superconductores (SMES)	1 - 10 kWh	> 90%
QUÍMICA	Supercondensadores	1 - 5 kWh	90%
	Power to gas (H2)	Hasta 100 GWh	20 - 40%
TÉRMICA	Power to X (P2X)	1 MWh - varios GWh	50%
	Calor sensible: sales fundidas	100 MWh - 10GWh	40 - 60%
	Calor sensible	10 - 50 kWh	50 - 90%
	Calor latente (PCM)	50 - 150 kWh	75 - 90%
	Termoquímico (TCS)	12 - 250 kWh	75 - 100%

MUY MADURO
NO MADURO

Figura 2: Parámetros de funcionamiento de las tecnologías de almacenamiento energético

2.2 Tecnologías de almacenamiento para pequeños y medianos prosumidores: Estado del Arte

2.2.1 Baterías nuevas

Las baterías nuevas representan tecnologías avanzadas en almacenamiento electroquímico, diseñadas para maximizar capacidad, eficiencia y durabilidad, respondiendo a las demandas de pequeños y medianos prosumidores. Estas baterías integran avances en materiales como óxidos metálicos en cátodos, separadores avanzados y electrolitos con alta conductividad iónica, lo que mejora la estabilidad térmica y la seguridad.

Las celdas electroquímicas, componentes fundamentales de las baterías, convierten energía química en eléctrica mediante reacciones redox. Su diseño modular permite configuraciones en serie o paralelo, adaptándose a diversas aplicaciones residenciales, industriales y en redes inteligentes.

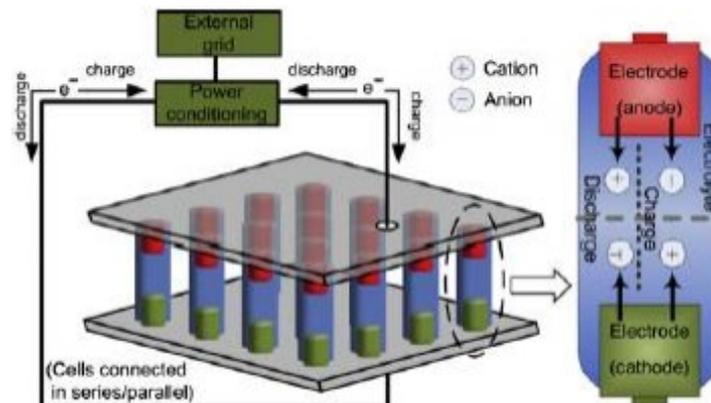


Figura 3: Principio de funcionamiento de una batería

A continuación, se enumeran los principales tipos de baterías secundarias que se comercializan:

- a. **Baterías de Zinc-Aire:** Almacenan energía mediante la oxidación del zinc en presencia de un electrolito alcalino acuoso, generando óxido de zinc (ZnO) que puede regenerarse durante la recarga. Existen variantes mecánicas, hidráulicas y eléctricas, siendo estas últimas las más prometedoras al evitar el reemplazo de materiales. A pesar de su potencial en aplicaciones estacionarias, enfrentan desafíos como la formación de dendritas, evaporación del agua, formación de carbonatos y pasivación del zinc, que limitan su durabilidad.
- b. **Baterías de Níquel-Cadmio (Ni-Cd):** funciona mediante reacciones redox entre un ánodo de cadmio y un cátodo de níquel-hidróxido, con un electrolito alcalino

de hidróxido de potasio (KOH). Operan en condiciones extremas de y su resistencia a sobrecargas y descargas profundas, características que las hacen ideales para aplicaciones críticas como transporte ferroviario, aviación y telecomunicaciones.

Ofrecen estabilidad y durabilidad, aunque tienen menor eficiencia en comparación con tecnologías modernas como las baterías de ion-litio. Su robustez en condiciones adversas sigue siendo una ventaja clave en aplicaciones industriales y de respaldo.

- c. **Baterías de Níquel-Hierro (NiFe):** son sistemas recargables que emplean un electrodo de hierro y un electrodo de níquel-hidróxido (NiO_2H), con hidróxido de potasio (KOH) como electrolito. Ofrecen una buena estabilidad en ciclos de carga/descarga a bajas tasas, pero su rendimiento disminuye significativamente en condiciones de bajas temperaturas y tasas de descarga elevadas.
- d. **Baterías de Níquel-Metal Hidruro (NiMH):** funcionan mediante reacciones electroquímicas entre un cátodo de níquel oxi-hidróxido y un ánodo de aleación de hidruro metálico. Destacan por su durabilidad y flexibilidad, ya que no sufren efecto memoria. Sin embargo, presentan una mayor tasa de autodescarga y son sensibles a temperaturas extremas, lo que requiere un control cuidadoso durante su carga. Son ideales para transporte y sistemas estacionarios donde la eficiencia y sostenibilidad son claves.
- e. **Baterías de Ión-Litio (Li-ion):** funcionan mediante reacciones de intercalación entre un ánodo de grafito y un cátodo (LCO, NMC o LFP), con un electrolito no acuoso que facilita el movimiento de iones. Destacan por su voltaje operativo por celda, eficiencia y capacidad de adaptarse a diversas aplicaciones. Recientes avances han mejorado los materiales del cátodo y explorado alternativas como litio-azufre y polímeros, incrementando la seguridad y densidad energética. Sin embargo, son costosas y requieren precauciones de seguridad debido a su composición química reactiva. A pesar de estos desafíos, las baterías Li-ion siguen liderando el mercado por su rendimiento superior y versatilidad.
- f. **Batería de litio-aire:** funcionan mediante reacciones electroquímicas donde el litio se oxida en el ánodo y el oxígeno del aire se reduce en el cátodo, formando compuestos como Li_2O para almacenar energía. Avances recientes incluyen el uso de electrolitos sólidos y nanopartículas, mejorando la eficiencia, la estabilidad del ciclo y la seguridad.
- g. **Baterías de Estado sólido:** usa tanto electrodos como electrólitos sólidos, destacan por su alta densidad energética, seguridad mejorada y mayor vida útil.

Ofrecen tiempos de recarga rápidos y rendimiento eficiente a bajas temperaturas. Reducen la huella de carbono y costos respecto a las de ion-litio.

- h. Baterías de Fosfato de Hierro y Litio (LFP ó LiFePO4):** destacan por su alta seguridad, durabilidad y bajo impacto ambiental, ya que no contienen materiales tóxicos. Ofrecen estabilidad térmica, operan en rangos extremos de y son ideales para aplicaciones críticas como almacenamiento solar y vehículos eléctricos. Aunque su coste inicial es mayor, su eficiencia y bajo mantenimiento las hacen rentables a largo plazo.
- i. Baterías de Plomo-Ácido:** longeva y fiable, ampliamente utilizada en sistemas de respaldo y transporte gracias a su bajo coste y capacidad para soportar muchos ciclos de carga/descarga. Aunque enfrentan desafíos como la sulfatación y la estratificación del electrolito, las variantes modernas de plomo-cristal y plomo-carbono mejoran su eficiencia, durabilidad y resistencia a descargas profundas, haciéndolas ideales para aplicaciones de ciclo profundo y entornos exigentes.
- j. Baterías de Sodio:** utiliza iones de sodio (Na⁺) como portadores de carga eléctrica. Su principio de funcionamiento y la construcción de sus celdas son casi idénticos a los de la batería de ion de litio, pero sustituyendo el litio por sodio.
- k. Baterías de Sodio-Azufre:** es un tipo de batería de sal fundida construida a partir de líquido de sodio (Na) y azufre (S). Tiene una alta densidad de energía, alta eficiencia de carga / descarga y un largo ciclo de vida y se fabrica a partir de materiales de bajo costo.
- l. Baterías de Flujo:** Las baterías de flujo almacenan energía en electrolitos líquidos contenidos en tanques externos, permitiendo la conversión de energía química en eléctrica a través de celdas electroquímicas. Su diseño separa la energía (volumen de electrolitos) de la potencia (área activa de las celdas), lo que las hace escalables para aplicaciones desde pequeñas instalaciones hasta grandes proyectos industriales.

2.2.2 Baterías de segunda vida

Las baterías de segunda vida, provenientes de vehículos eléctricos, son una solución económica y sostenible para el almacenamiento estacionario. Tras su uso inicial, conservan entre el 70% y 80% de su capacidad, siendo ideales para integrar energías renovables y apoyar una economía circular al reducir la extracción de recursos como litio y cobalto.

Con una vida útil adicional de 5 a 10 años, estas baterías pueden ser hasta un 70% más económicas que las nuevas, fomentando proyectos de almacenamiento accesibles. A pesar de los desafíos técnicos, como la diversidad de formatos y químicas, y barreras regulatorias, su reutilización contribuye a reducir la huella de carbono, minimizar residuos y crear nuevos mercados en el sector energético.

2.2.3 Supercondensadores

Los supercondensadores son dispositivos avanzados de almacenamiento energético que destacan por su alta potencia específica (hasta 5000 W/kg), eficiencia (>90%) y vida útil superior a un millón de ciclos. Utilizan electrodos porosos y un electrolito líquido que permite almacenar energía mediante la capacitancia de doble capa y la pseudocapacidad. Son ideales para aplicaciones de alta potencia y entornos exigentes, gracias a su amplio rango de operación térmica (-40 °C a 65 °C) y su rápida capacidad de respuesta.

Se clasifican en tres tipos principales:

- EDLCs: Basados en carbono poroso, ofrecen alta potencia y longevidad.
- Pseudocapacitores: Utilizan reacciones redox en materiales como óxidos metálicos, logrando mayor densidad energética.
- Híbridos: Combinan características de EDLCs y pseudocapacitores, equilibrando potencia y energía.

Aunque su densidad energética (2-25 Wh/kg) es limitada respecto a las baterías, su durabilidad y rapidez los convierten en una tecnología clave para el transporte, redes eléctricas y aplicaciones industriales.

3. El Rol de los Prosumidores y la Flexibilidad en la Transición Energética

La transición energética hacia un modelo sostenible y descentralizado posiciona a los prosumidores como actores clave. Estos evolucionan desde autoconsumidores que generan energía renovable, hasta prosumagers que la almacenan, y flexumers que ofrecen servicios de flexibilidad al sistema eléctrico. Tecnologías como microgrids y modelos colaborativos, como las centrales eléctricas virtuales (VPP), están transformando la interacción entre usuarios y proveedores.

La flexibilidad en la red eléctrica, esencial para integrar energías renovables intermitentes, se logra mediante baterías inteligentes que almacenan y liberan energía según la demanda. La agregación de múltiples prosumidores facilita servicios de flexibilidad a gran escala, aliviando la congestión y mejorando la estabilidad del sistema. Esta combinación de roles activos y adaptabilidad de la red es fundamental para un sistema energético eficiente y sostenible.

4. Comparativa de costes y eficiencia de tecnologías de almacenamiento

El almacenamiento energético es fundamental para optimizar el autoconsumo, estabilizar redes inteligentes e integrar renovables. A continuación, se comparan las principales tecnologías en costos, eficiencia y ciclos de vida:

a. Baterías nuevas

Las baterías de iones de litio dominan el mercado por su alta densidad energética y costos en descenso. Ofrecen una eficiencia del 90-95% y una vida útil de 4.000-5.000 ciclos, siendo ideales para aplicaciones de autoconsumo residencial y comercial. Aunque aún incipientes, las baterías de estado sólido prometen mayor seguridad y densidad energética, con menor coste y una vida útil superior a 5.000 ciclos.

b. Baterías de segunda vida

Provenientes de vehículos eléctricos, estas baterías ofrecen una alternativa económica y sostenible, con costos hasta un 40% menores que las baterías nuevas. Conservan entre el 60% y 80% de su capacidad original, alcanzan una eficiencia del 85-90% y tienen una vida útil de 5 a 10 años en su segunda etapa. Son ideales para almacenamiento estacionario en aplicaciones renovables.

c. Supercondensadores

Aunque su costo es elevado, los supercondensadores destacan por su alta eficiencia (>95%) y durabilidad, superando un millón de ciclos. Son ideales para ciclos rápidos y alta potencia, siendo usados principalmente para estabilizar redes y complementar baterías en sistemas híbridos.

5. Conclusiones

Las tecnologías de almacenamiento permiten la integración eficiente de fuentes renovables, mejoran la estabilidad de las redes eléctricas y proporcionan a los pequeños y medianos prosumidores una herramienta clave para maximizar el autoconsumo, gestionar excedentes y garantizar la seguridad energética.

Dentro de las tecnologías disponibles, las baterías de iones de litio son especialmente valoradas por su alta densidad energética, tiempos de respuesta rápidos y modularidad, lo que las convierte en una opción viable para maximizar el autoconsumo y gestionar excedentes en microrredes residenciales y comunitarias. Aunque las baterías de estado sólido están ganando popularidad debido a su mayor seguridad, longevidad y capacidad de carga rápida, características que las hacen especialmente adecuadas para microrredes. También, las baterías de plomo-ácido se destacan por su bajo costo y facilidad de fabricación, siendo útiles como acumuladores en sistemas de microrredes eléctricas.

Las baterías de segunda vida, provenientes principalmente de vehículos eléctricos, representan una solución sostenible y económica al reutilizar recursos que, de otro modo, serían desechados. Aunque presentan una densidad energética inferior en comparación con las baterías nuevas, son ideales para aplicaciones estacionarias en microrredes comunitarias, donde el costo y la sostenibilidad son factores prioritarios.

Los supercondensadores son una tecnología complementaria para microrredes que integran generación renovable. Aunque no están diseñados para almacenamiento a largo plazo, su capacidad de respuesta ultrarrápida y alta eficiencia los hace ideales para estabilizar la red y gestionar picos de demanda, por lo que, en combinación con baterías, los supercapacitores pueden mejorar significativamente la calidad del suministro eléctrico en microrredes, especialmente en sistemas con alta variabilidad de generación.

Los sistemas de almacenamiento mecánico presentan soluciones eficientes a gran escala, pero con limitaciones para su implementación en microrredes de pequeños y medianos prosumidores. El bombeo hidroeléctrico (PHS), aunque altamente eficiente, requiere condiciones geográficas específicas y una infraestructura compleja, lo que lo hace inviable en entornos descentralizados. De manera similar, el almacenamiento por aire comprimido (CAES) ofrece gran capacidad energética, pero su baja eficiencia y altos costos restringen su uso a instalaciones centralizadas.

En contraste, los volantes de inercia son una opción viable en microrredes para la regulación de frecuencia y la estabilidad operativa, gracias a su alta densidad de

potencia y rápida respuesta. No obstante, su limitada capacidad de almacenamiento los posiciona como una solución complementaria. Los sistemas térmicos (TES) son útiles en aplicaciones híbridas que requieren electricidad y calor, especialmente en entornos industriales, aunque su eficiencia se ve afectada por pérdidas térmicas, limitando su uso en almacenamiento eléctrico puro.

En cuanto a los sistemas químicos, la conversión de energía en hidrógeno y su posterior reconversión en electricidad tiene una eficiencia de ciclo significativamente menor en comparación con las baterías. Por tanto, su aplicación en microrredes de pequeños prosumidores es limitada, aunque puede complementar sistemas de almacenamiento a corto y mediano plazo para almacenamiento estacional en aplicaciones de mayor escala.

El éxito de estas tecnologías dependerá de su capacidad de adaptación a cada aplicación, considerando costos, sostenibilidad y eficiencia. Una combinación estratégica de soluciones permitirá avanzar hacia un sistema energético descentralizado, seguro y sostenible, donde los prosumidores desempeñarán un papel clave en la transición energética.

Interreg
España – Portugal



Cofinanciado por
la Unión Europea
Cofinanciado pela
União Europeia



@AgerarPlus



Agerar Plus