

RESUMO DO ENTREGÁVEL:

E.2.1: Relatório técnico sobre a aplicação de tecnologias de armazenamento de energia elétrica para utilização por pequenos e médios prosumidores em redes elétricas inteligentes, de acordo com os respetivos estados de desenvolvimento tecnológico.



Resumo Executivo

O presente documento constitui um resumo do entregável apresentado, centrando-se no papel crescente dos pequenos e médios consumidores de energia na sua transição para agentes ativos do sistema, isto é, prosumidores. No contexto de uma economia de baixo carbono, estes prosumidores estão a adotar modelos de produção local de energia, medidas de eficiência energética e participação em mecanismos de resposta à procura. Para que esta transição energética seja bem-sucedida ao nível comunitário, é fundamental integrar inovações sociais e tecnológicas.

O armazenamento de energia afirma-se como um elemento essencial para os prosumidores, uma vez que permite otimizar a produção e a gestão da procura. Ao armazenar os excedentes de energia gerados durante períodos de baixa procura, garante-se a sua disponibilidade durante os picos de consumo, facilita-se a integração de fontes renováveis, melhora-se a estabilidade da rede, reduzem-se as perdas energéticas e criam-se novas oportunidades de receita através da participação em mercados de serviços de flexibilidade. Esta realidade transforma o armazenamento de energia num investimento estratégico para aumentar a eficiência e a sustentabilidade dos sistemas energéticos.

O entregável apresenta uma análise de diversas tecnologias de armazenamento de energia aplicáveis a pequenos e médios prosumidores no contexto das redes inteligentes, classificadas de acordo com o seu grau de maturidade tecnológica e características técnicas relevantes. Além disso, identifica as tecnologias mais adequadas para integração com fontes renováveis em micro-redes e fornece uma base técnica para apoiar a seleção de soluções em projetos de descentralização e sustentabilidade energética.

1. Introdução

O armazenamento de energia elétrica é fundamental para garantir a eficiência, a fiabilidade e a sustentabilidade dos sistemas energéticos. Entre as suas principais funções destacam-se:

- **Equilíbrio entre oferta e procura:** Gere a variabilidade das fontes renováveis intermitentes (solar e eólica), permitindo armazenar excedentes de energia durante períodos de baixa procura e utilizá-los quando a procura supera a produção, evitando desperdícios energéticos.
- **Estabilidade e qualidade do fornecimento:** Contribui para a regulação da frequência elétrica, absorvendo ou libertando energia conforme necessário, e assegura alimentação de reserva em caso de interrupções, garantindo o fornecimento contínuo em setores críticos.
- **Impulso à transição energética:** Maximiza a integração de energias renováveis na rede, permitindo a sua utilização fora dos períodos de geração, e reduz as emissões ao substituir sistemas baseados em combustíveis fósseis por soluções renováveis com armazenamento.
- **Otimização económica:** Permite deslocar o consumo energético no tempo, armazenando eletricidade em períodos de menor custo e consumindo-a em períodos de ponta, reduzindo custos e a necessidade de infraestruturas sobredimensionadas.
- **Resiliência em situações de emergência:** Proporciona autonomia energética durante catástrofes naturais e suporta o funcionamento de micro-redes e sistemas descentralizados.
- **Inovação tecnológica:** Promove a mobilidade elétrica e incentiva a investigação em tecnologias sustentáveis, como baterias de fluxo, supercondensadores e armazenamento térmico.

Em conclusão, o armazenamento de energia é essencial para integrar energias renováveis, otimizar recursos, reforçar a resiliência e apoiar o desenvolvimento sustentável.

2. Tecnologías de Almacenamiento de Energía

2.1 Descripción de las Tecnologías de Almacenamiento de Energía

As tecnologías de almacenamiento de energía são fundamentais para assegurar um fornecimento energético eficiente, estável e sustentável, especialmente em sistemas baseados em fontes renováveis. Existem múltiplos métodos de armazenamento, cada um adequado a diferentes aplicações em função da escala, do tipo de energia armazenada e das necessidades específicas do sistema. De acordo com o tipo de energia armazenada, estas tecnologías classifícam-se em cinco categorías:

- a. **Eletrostática e magnética:** Inclui tecnologías como os supercondensadores, que armazenam energia num campo eletrostático, e os sistemas *Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)*, que utilizam materiais supercondutores para gerar campos magnéticos.
- b. **Eletroquímica:** Agrupa baterías convencionais, como as de íões de lítio e chumbo-ácido, bem como baterías de fluxo, que armazenam energia através de reações químicas reversíveis.
- c. **Mecânica:** Armazena energia através de mecanismos físicos, como *Pumped Hydro Energy Storage (PHES)* e *Compressed Air Energy Storage (CAES)*, aproveitando energia potencial ou cinética.
- d. **Térmica:** Utiliza materiais que absorvem ou libertam energia térmica, incluindo armazenamento de calor sensível, latente ou termoquímico.
- e. **Sistemas de armazenamento de energia química:** Incluem tecnologías que convertem energia eléctrica em energia química armazenada sob a forma de combustíveis sintéticos, hidrogénio ou metanol para utilização posterior.



Figura 1: Classificação das tecnologias de armazenamento de energia.

Cada tecnología presenta ventajas e desventajas en función do contexto de aplicación, nomeadamente no que respeita à capacidade, eficiência, custo e tempo de resposta. A inovação neste domínio procura melhorar a eficiência, reduzir os custos e aumentar a acessibilidade e a sustentabilidade global das soluções de armazenamento.

Na análise estratégica, o desempenho das diferentes tecnologias varia em função de parâmetros como a potência nominal e o tempo de resposta. A tabela seguinte resume características fundamentais, tais como capacidade, eficiência e maturidade tecnológica, proporcionando uma visão abrangente das respetivas possibilidades de aplicação.

TECNOLOGÍA	CAPACIDAD ENERGÉTICA	EFICIENCIA DE CICLO COMPLETO	NIVEL DE MADUREZ
MECÁNICA	Bombeo (PHS)	1-100 GWh	80%
	Bombas de calor (PHES)	500 kWh - 1 GWh	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%
	Power to X (P2X)	1 MWh - varios GWh	50%
TÉRMICA	Calor sensible: sales fundidas	100 MWh - 10 GWh	40 - 60%
	Calor sensible	10 - 50 kWh	50 - 90%
	Calor latente (PCM)	50 - 150 kWh	75 - 90%
	Termoquímico (TCS)	12 - 250 kWh	75 - 100%

Figura 2: Parâmetros de funcionamento das tecnologias de armazenamento de energia

2.2. Tecnologias de armazenamento para pequenos e médios prosumidores: Estado da Arte

2.2.1 Baterías novas

As baterias novas representam tecnologias avançadas de armazenamento eletroquímico, concebidas para maximizar a capacidade, a eficiência e a durabilidade, respondendo às necessidades dos pequenos e médios prosumidores. Estas baterias incorporam avanços em materiais, como óxidos metálicos nos cátodos, separadores avançados e eletrólitos com elevada condutividade iónica, melhorando a estabilidade térmica e a segurança.

As células eletroquímicas, componentes fundamentais das baterias, convertem energia química em energia elétrica através de reações redox. O seu desenho modular permite configurações em série ou em paralelo, adaptando-se a diversas aplicações residenciais, industriais e em redes inteligentes.

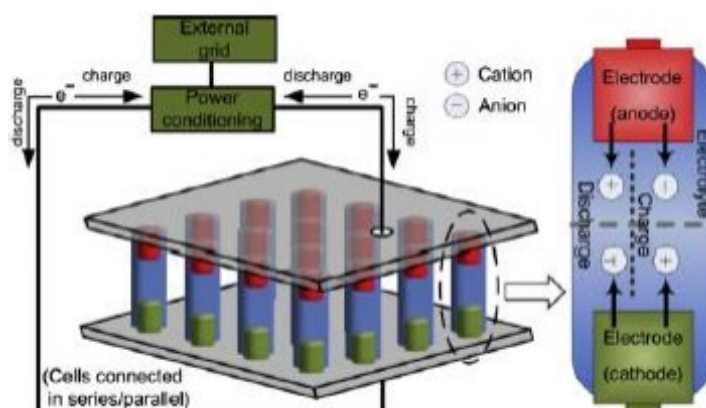


Figura 3: Princípio de funcionamento de uma bateria

Seguidamente, apresentam-se os principais tipos de baterias secundárias atualmente comercializados:

- a. **Baterias Zinco-Ar:** Armazenam energia através da oxidação do zinco na presença de um eletrólito alcalino aquoso, gerando óxido de zinco (ZnO), que pode ser regenerado durante o carregamento. Existem variantes mecânicas, hidráulicas e elétricas, sendo estas últimas as mais promissoras por evitarem a substituição de materiais. Apesar do seu potencial em aplicações estacionárias, enfrentam desafios como a formação de dendrites, a evaporação da água, a formação de carbonatos e a passivação do zinco, fatores que limitam a sua durabilidade.

- b. Baterias de Níquel-Cádmio (Ni-Cd):** Funcionam através de reações redox entre um ânodo de cádmio e um cátodo de hidróxido de níquel, utilizando hidróxido de potássio (KOH) como eletrólito alcalino. Operam em condições extremas e apresentam elevada resistência a sobrecargas e descargas profundas, características que as tornam adequadas para aplicações críticas, como transporte ferroviário, aviação e telecomunicações. Oferecem estabilidade e durabilidade, embora apresentem uma eficiência inferior à de tecnologias mais modernas, como as baterias de íões de lítio. A sua robustez em condições adversas continua a constituir uma vantagem importante em aplicações industriais e de reserva.
- c. Baterias de Níquel-Ferro (NiFe):** São sistemas recarregáveis que utilizam um elétrodo de ferro e um elétrodo de hidróxido de níquel ($\text{NiO} \cdot \text{H}_2\text{O}$), tendo o hidróxido de potássio (KOH) como eletrólito. Apresentam boa estabilidade em ciclos de carga e descarga a baixas taxas, embora o seu desempenho diminua significativamente em condições de baixas temperaturas e elevadas taxas de descarga.
- d. Baterias de Níquel-Hidreto Metálico (NiMH):** Funcionam através de reações eletroquímicas entre um cátodo de oxi-hidróxido de níquel e um ânodo de liga de hidreto metálico. Destacam-se pela sua durabilidade e flexibilidade, uma vez que não sofrem de efeito memória. No entanto, apresentam uma taxa mais elevada de autodescarga e são sensíveis a temperaturas extremas, exigindo um controlo cuidadoso durante o carregamento. São adequadas para aplicações nos transportes e em sistemas estacionários onde a eficiência e a sustentabilidade são fatores determinantes.
- e. Baterias de Íões de Lítio (Li-ion):** Funcionam através de reações de intercalação entre um ânodo de grafite e um cátodo (LCO, NMC ou LFP), utilizando um eletrólito não aquoso que facilita o movimento dos íões. Destacam-se pela elevada tensão operacional por célula, eficiência e capacidade de adaptação a diferentes aplicações. Os avanços recentes permitiram melhorar os materiais dos cátodos e explorar alternativas, como as baterias de lítio-enxofre e os polímeros, aumentando a segurança e a densidade energética. Apesar disso, continuam a apresentar custos elevados e exigem precauções adicionais devido à natureza reativa da sua composição química. Mesmo assim, mantêm uma posição dominante no mercado graças ao seu elevado desempenho e versatilidade.
- f. Baterias de Lítio-Ar:** Funcionam através de reações eletroquímicas nas quais o lítio é oxidado no ânodo e o oxigénio do ar é reduzido no cátodo, formando compostos como Li_2O_2 para armazenar energia. Os avanços recentes incluem

a utilização de eletrólitos sólidos e nanopartículas, melhorando a eficiência, a estabilidade dos ciclos e a segurança

- g. **Baterias de Estado Sólido:** Utilizam tanto elétrodos como eletrólitos sólidos, destacando-se pela elevada densidade energética, maior segurança e vida útil prolongada. Oferecem tempos de carregamento reduzidos e desempenho eficiente a baixas temperaturas. Além disso, contribuem para a redução da pegada de carbono e dos custos quando comparadas com as baterias de íões de lítio.
- h. **Baterias de Fosfato de Ferro e Lítio (LFP ou LiFePO_4):** Destacam-se pela elevada segurança, durabilidade e reduzido impacto ambiental, uma vez que não contêm materiais tóxicos. Apresentam estabilidade térmica, funcionam em intervalos extremos de temperatura e são particularmente adequadas para aplicações críticas, como armazenamento solar e veículos elétricos. Embora o investimento inicial seja superior, a sua eficiência e reduzidas necessidades de manutenção tornam-nas economicamente vantajosas a longo prazo.
- i. **Baterias de Chumbo-Ácido:** Tecnologia consolidada e fiável, amplamente utilizada em sistemas de reserva e aplicações de transporte devido ao seu baixo custo e capacidade para suportar numerosos ciclos de carga e descarga. Embora enfrentem desafios como a sulfatação e a estratificação do eletrólito, as variantes modernas de chumbo-cristal e chumbo-carbono melhoram significativamente a eficiência, durabilidade e resistência a descargas profundas, tornando-as adequadas para aplicações de ciclo profundo e ambientes exigentes.
- j. **Baterias de Sódio:** Utilizam íões de sódio (Na^+) como transportadores de carga elétrica. O seu princípio de funcionamento e a construção das suas células são muito semelhantes aos das baterias de íões de lítio, substituindo apenas o lítio pelo sódio.
- k. **Baterias de Sódio-Enxofre:** Constituem um tipo de bateria de sal fundido construída a partir de sódio (Na) líquido e enxofre (S). Apresentam elevada densidade energética, alta eficiência de carga e descarga, longa vida útil e são fabricadas com materiais de baixo custo.
- l. **Baterias de Fluxo:** Armazenam energia em eletrólitos líquidos contidos em reservatórios externos, permitindo a conversão de energia química em energia elétrica através de células eletroquímicas. A separação entre energia armazenada (volume dos eletrólitos) e potência (área ativa das

células) torna estas baterias altamente escaláveis, desde pequenas instalações até grandes projetos industriais.

2.2.2 Baterías de segunda vida

As baterias de segunda vida, provenientes de veículos elétricos, constituem uma solução económica e sustentável para o armazenamento estacionário. Após a sua utilização inicial, conservam entre 70 % e 80 % da capacidade original, sendo adequadas para integrar energias renováveis e promover a economia circular através da redução da extração de recursos como o lítio e o cobalto.

Com uma vida útil adicional de 5 a 10 anos, estas baterias podem ser até 70% mais económicas do que as novas, promovendo projetos de armazenamento mais acessíveis. Apesar dos desafios técnicos, como a diversidade de formatos e de composições químicas, e das barreiras regulamentares, a sua reutilização contribui para reduzir a pegada de carbono, minimizar os resíduos e criar novos mercados no setor energético.

2.2.3 Supercondensadores

Os supercondensadores são dispositivos avançados de armazenamento de energia que se destacam pela elevada potência específica (até 5 000 W/kg), eficiência (>90 %) e vida útil superior a um milhão de ciclos. Utilizam elétrodos porosos e um eletrólito líquido que permite armazenar energia através da capacitância de dupla camada e da pseudocapacitância. São particularmente adequados para aplicações de elevada potência e ambientes exigentes

Classificam-se em três tipos principais:

- **EDLCs:** Baseados em carbono poroso, oferecem elevada potência e longa durabilidade.
- **Pseudocondensadores:** Utilizam reações redox em materiais como óxidos metálicos, alcançando maior densidade energética.
- **Híbridos:** Combinam características dos EDLCs e dos pseudocondensadores, equilibrando potência e energia.

Embora a sua densidade energética (2-25 Wh/kg) seja inferior à das baterias, a sua elevada durabilidade e rapidez de resposta fazem deles uma tecnologia fundamental para os transportes, as redes elétricas e as aplicações industriais.

3. O Papel dos Prosumidores e da Flexibilidade na Transição Energética

A transição energética para um modelo sustentável e descentralizado posiciona os prosumidores como intervenientes fundamentais. Estes evoluem de autoconsumidores que produzem energia renovável para prosumagers que a armazenam, e posteriormente para flexumers capazes de prestar serviços de flexibilidade ao sistema elétrico. Tecnologias como as microrredes e modelos colaborativos, como as Centrais Elétricas Virtuais (VPP), estão a transformar a interação entre utilizadores e fornecedores de energia.

A flexibilidade da rede elétrica, essencial para integrar energias renováveis intermitentes, é alcançada através de baterias inteligentes que armazenam e libertam energia de acordo com a procura. A agregação de múltiplos prosumidores facilita a prestação de serviços de flexibilidade em grande escala, reduzindo a congestão e melhorando a estabilidade do sistema. Esta combinação de papéis ativos e de adaptabilidade da rede é fundamental para um sistema energético eficiente e sustentável.

4. Comparação de custos e eficiência das tecnologias de armazenamento

O armazenamento de energia é essencial para otimizar o autoconsumo, estabilizar redes inteligentes e integrar energias renováveis. Seguidamente, são comparadas as principais tecnologias em termos de custos, eficiência e ciclos de vida:

a. Baterías novas

As baterias de iões de lítio dominam o mercado devido à sua elevada densidade energética e aos custos em redução. Apresentam uma eficiência de 90-95% e uma vida útil de 4.000-5.000 ciclos, sendo ideais para aplicações de autoconsumo residencial e comercial. Embora ainda se encontrem numa fase inicial de desenvolvimento, as baterias de estado sólido prometem maior segurança e densidade energética, com menor custo e uma vida útil superior a 5.000 ciclos.

b. Baterías de segunda vida

Provenientes de vehículos eléctricos, estas baterías constituyen una alternativa económica y sostenible, con costos até 40% inferiores a las de las baterías nuevas. Conservan entre 60% e 80% de su capacidad original, alcanzan una eficiencia de 85-90% e presentan una vida útil de 5 a 10 años en su segunda fase de utilización. Son ideales para almacenamiento estacionario en aplicaciones de energías renovables.

c. Supercondensadores

Embora o seu custo seja elevado, os supercondensadores destacam-se pela sua elevada eficiência (>95%) e durabilidade, ultrapassando um milhão de ciclos. São ideais para ciclos rápidos e aplicações de elevada potência, sendo utilizados principalmente para estabilizar redes elétricas e complementar baterías em sistemas híbridos.

5. Conclusões

As tecnologias de armazenamento permitem a integração eficiente de fontes renováveis, melhoram a estabilidade das redes elétricas e proporcionam aos pequenos e médios prosumidores uma ferramenta essencial para maximizar o autoconsumo, gerir excedentes e garantir a segurança energética.

Entre as tecnologias disponíveis, as baterías de íons de lítio são particularmente valorizadas pela sua elevada densidade energética, tempos de resposta rápidos e modularidade, o que as torna uma opção viável para maximizar o autoconsumo e gerir excedentes em micro-redes residenciais e comunitárias. Embora as baterías de estado sólido estejam a ganhar popularidade devido à sua maior segurança, longevidade e capacidade de carregamento rápido, características que as tornam especialmente adequadas para micro-redes. Por sua vez, as baterías de chumbo-ácido destacam-se pelo seu baixo custo e facilidade de fabrico, sendo úteis como acumuladores em sistemas de micro-redes elétricas.

As baterías de segunda vida, provenientes principalmente de veículos eléctricos, representam uma solução sustentável e económica ao reutilizarem recursos que, de outro modo, seriam descartados. Embora apresentem uma densidade energética inferior à das baterías novas, são ideais para aplicações estacionárias em micro-redes comunitárias, onde o custo e a sustentabilidade constituem fatores prioritários.

Os supercondensadores são uma tecnologia complementar para micro-redes que integram produção de energia renovável. Embora não tenham sido concebidos para armazenamento de longa duração, a sua capacidade de resposta ultrarrápida e elevada eficiência tornam-nos ideais para estabilizar a rede e gerir picos de procura. Assim, em combinação com baterias, os supercondensadores podem melhorar significativamente a qualidade do fornecimento elétrico em micro-redes, especialmente em sistemas com elevada variabilidade de produção.

Os sistemas de armazenamento mecânico apresentam soluções eficientes à escala industrial, mas com limitações para a sua implementação em micro-redes de pequenos e médios prosumidores. O *Pumped Hydro Storage (PHS)*, embora altamente eficiente, requer condições geográficas específicas e uma infraestrutura complexa, o que o torna inviável em ambientes descentralizados. De forma semelhante, o *Compressed Air Energy Storage (CAES)* oferece uma elevada capacidade energética, mas a sua baixa eficiência e os elevados custos restringem a sua utilização a instalações centralizadas.

Em contrapartida, os volantes de inércia constituem uma opção viável em micro-redes para a regulação da frequência e a estabilidade operacional, graças à sua elevada densidade de potência e rápida capacidade de resposta. No entanto, a sua reduzida capacidade de armazenamento posiciona-os como uma solução complementar. Os sistemas térmicos (*Thermal Energy Storage, TES*) são úteis em aplicações híbridas que requerem eletricidade e calor, especialmente em ambientes industriais, embora a sua eficiência seja afetada por perdas térmicas, limitando a sua utilização no armazenamento exclusivamente elétrico.

Relativamente aos sistemas químicos, a conversão de energia em hidrogénio e a sua posterior reconversão em eletricidade apresentam uma eficiência de ciclo significativamente inferior à das baterias. Por conseguinte, a sua aplicação em micro-redes de pequenos prosumidores é limitada, embora possam complementar sistemas de armazenamento de curto e médio prazo destinados ao armazenamento sazonal em aplicações de maior escala.

O sucesso destas tecnologias dependerá da sua capacidade de adaptação a cada aplicação, tendo em consideração os custos, a sustentabilidade e a eficiência. Uma combinação estratégica de soluções permitirá avançar para um sistema energético descentralizado, seguro e sustentável, no qual os prosumidores desempenharão um papel fundamental na transição energética.

Interreg



Cofinanciado por
la Unión Europea
Cofinanciado pela
União Europeia

España – Portugal



@AgerarPlus



Agerar Plus