

tecnologias de **armazenamento** de **energia** e disponibilidade de **materiais**

Carlos Nogueira, Teresa Ponce de Leão

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P.
Campus do Lumiar, Estrada do Paço do Lumiar, 1 699-038 Lisboa
carlos.nogueira@lneg.pt

O desenvolvimento das energias renováveis é um dos pilares fundamentais no combate e mitigação dos efeitos das alterações climáticas. Dado o carácter intermitente das fontes renováveis variáveis no tempo, como a solar e a eólica, a sua implementação em larga escala e a sua prevalência no *mix* de energia implicará a integração generalizada de sistemas de armazenamento de energia (Figura 1), que sejam adaptáveis às necessidades, tecnicamente robustos e fiáveis, e obviamente, com custos comportáveis. Este tem sido um dos principais constrangimentos, porque existem muitas tecnologias de armazenamento, mas na maioria dos casos, a sua fiabilidade a larga escala ainda não está totalmente demonstrada e os custos associados são ainda impraticáveis na atual conjuntura. O armazenamento de energia tem particular interesse na aplicação ao sistema elétrico, especialmente na eletricidade gerada a partir de fontes renováveis, sendo esse o foco principal deste artigo.

Quando aplicado à rede elétrica, o armazenamento de energia funciona segundo o seguinte princípio: realizar a carga do sistema de armazenamento nos períodos de vazio, quando existe excesso de capacidade de produção de eletricidade nos períodos de baixo consumo, a preços mais baixos, e posteriormente efetuar a descarga para a rede nos períodos de elevado consumo, quando os preços são superiores.

Revêm-se, de seguida, as principais tecnologias de armazenamento de energia, de forma sucinta, e discutem-se as necessidades e disponibilidade de materiais para as mesmas, que constituem um dos fatores fundamentais para o aumento da penetração das renováveis.

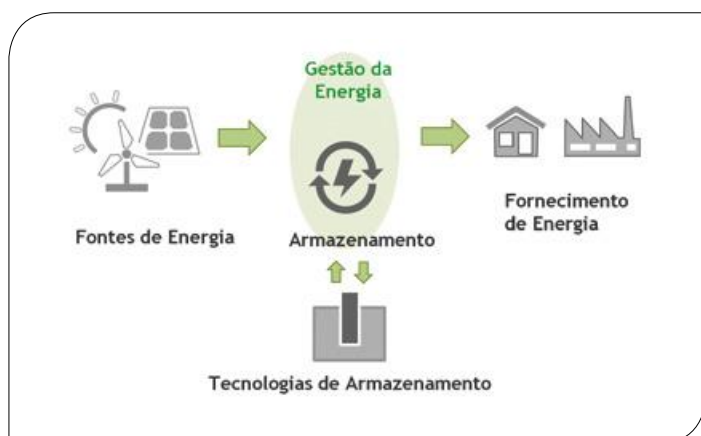


Figura 1 Ilustração da integração do armazenamento de energia.

Tecnologias de armazenamento

A identificação e a opção por uma determinada tecnologia de armazenamento passa por um conjunto de critérios, dos quais podemos assinalar os seguintes: capacidade e densidade de energia; densidade de potência; tempo de resposta/descarga; eficiência; ciclo e tempo de vida; segurança; custo. As principais tecnologias podem agrupar-se em várias classes: armazenamento mecânico, químico, eletroquímico, térmico e elétrico, que se ilustram na Figura 2.

Armazenamento mecânico

Neste tipo de tecnologias, utilizam-se transformações de energia elétrica em mecânica, reversivelmente, como formas de armazenamento. Nesta classe destacam-se:

- Bombagem hidroelétrica;
- Ar comprimido e ar líquido;
- Volantes de inércia.

A bombagem hidroelétrica é a tecnologia de armazenamento praticada com sucesso em todo o mundo, sendo de grande utilidade na adaptação da produção de eletricidade à variação do consumo. Esta tecnologia, que representa hoje a grande maioria da capacidade mundial de armazenamento de energia (sendo os restantes sistemas quase residuais, comparativamente), é de grande flexibilidade de operação, permitindo controlar

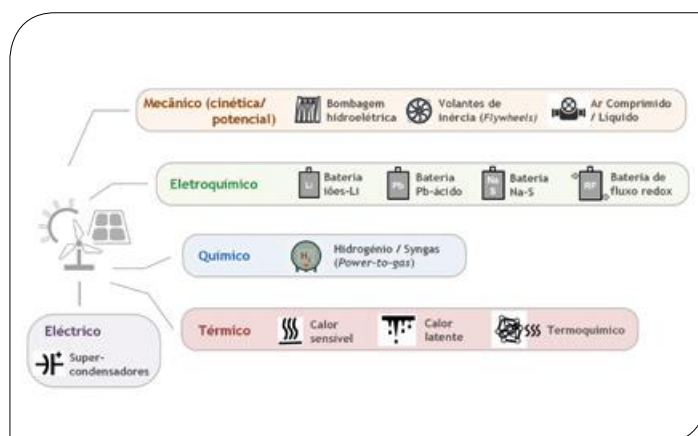


Figura 2 Principais tecnologias de armazenamento aplicadas à rede elétrica renovável.

de forma efetiva as variações do consumo e da produção. Este sistema utiliza o armazenamento de energia mecânica-potencial, através da transferência de água entre reservatórios (de um inferior para um superior) usando energia elétrica barata nos períodos de vazio, podendo depois utilizar esta capacidade armazenada na geração de eletricidade na barragem nos períodos de maior necessidade. Esta tecnologia permite uma capacidade de armazenamento relativamente elevada, tipicamente na gama de 20 MWh a 10 GWh, e com tempos de descarga aproximados entre 1 e 20 dias. O tempo de descarga relaciona-se com o rácio entre a capacidade e a potência característica de cada tecnologia.

Na tecnologia de compressão de ar, utiliza-se a eletricidade nos períodos de excesso de produção para acionar compressores, armazenando-se o ar comprimido em cavernas subterrâneas ou em depósitos superficiais, utilizando-se posteriormente esse ar para acionar turbinas e produzir eletricidade. A tecnologia já é utilizada e tem potencialidade, mas ainda tem baixa penetração no mercado. A compressão de ar permite também elevadas capacidades de armazenamento (tipicamente de 5 MWh a 1 GWh) e um tempo de resposta relativamente lento, compreendido entre algumas horas e alguns dias. Uma variante desta tecnologia é a liquefação de ar, que é armazenado em depósitos e posteriormente vaporizado e expandido para acionar turbinas.

A tecnologia de volantes de inércia armazena energia na forma de energia cinética, através de rotores com velocidade rotacional muito elevada e baixo atrito. As principais características são a elevada potência e baixa capacidade de energia (com tempos de resposta rápidos, entre milissegundos até pouco mais de 1 minuto), sendo uma tecnologia muito útil no controlo de potência e de frequência. O seu principal constrangimento é o elevado custo.

Armazenamento químico

No armazenamento químico, a energia elétrica é convertida em energia química através de reações induzidas ou fomentadas pela energia fornecida. Nesta classe, o hidrogénio assume papel relevante. O hidrogénio é um vetor energético capaz de transportar energia de uma fonte para outra, com grande capacidade de implementação devido à enorme flexibilidade de produção, de armazenamento, de utilização, e com grande potencial de integração às fontes de energia renovável, nomeadamente no sistema electroprodutor. As tecnologias *power-to-gas*, como o hidrogénio, permitem grandes capacidades de armazenamento, que podem atingir gamas de 1 GWh até mais de 1 TWh, e tempos de descarga muito variáveis desde algumas horas até mais de 1 mês. Estas características tornam estas tecnologias muito adaptáveis ao armazenamento maciço de grandes quantidades de energia, mas não são adequadas à resposta rápida exigida para garantir segurança de abastecimento e qualidade de serviço.

O armazenamento por hidrogénio é muito flexível, tanto na forma como pode ser produzido como no armazenamento, no transporte, na distribuição e na utilização final:

- Produção do H_2 : através de eletrolise da água, usando as diferentes tecnologias disponíveis (PEM, alcalina, de alta temperatura); por reforma a vapor de gás natural ou outros hidrocarbonetos; por gaseificação da biomassa.
- Armazenamento do H_2 : em depósitos de baixa ou elevada pressão; em cavernas de maciços salinos; a baixa temperatura como hidrogénio líquido; em meios sólidos na forma de hidreto metálico.
- Utilização do H_2 : na produção de eletricidade usando turbinas a H_2 ou pilhas de combustível, e sua aplicação em edifícios, em comunidades de energia e na indústria (incluindo calor e eletricidade, quando aplicável); em motores de combustão a H_2 ; na indústria, como reagente em diversos processos químicos; na mobilidade, através dos veículos com motores elétricos alimentados por células de combustível; utilização através da injeção na rede de gás natural.

No armazenamento químico, a energia elétrica é convertida em energia química através de reações induzidas ou fomentadas pela energia fornecida. Nesta classe, o hidrogénio assume papel relevante. O hidrogénio é um vetor energético capaz de transportar energia de uma fonte para outra, com grande capacidade de implementação devido à enorme flexibilidade de produção, de armazenamento, de utilização, e com grande potencial de integração às fontes de energia renovável.

Pelas suas características e versatilidade, o hidrogénio será certamente um pilar importante do futuro da energia limpa e segura. Apesar das tecnologias estarem disponíveis no mercado, há, contudo, ainda um longo caminho a percorrer, na melhoria e otimização das variadas componentes da produção, armazenamento, transporte e utilização, seja na eficiência dos equipamentos, nas fontes de água disponível (para a eletrólise), na disponibilidade e durabilidade de materiais, nos custos, entre muitos outros tópicos.

Armazenamento eletroquímico

No armazenamento eletroquímico utilizam-se baterias (células recarregáveis), que convertem energia elétrica em energia química, que é armazenada por um certo período, sendo depois descarregada através de um processo reversível nos períodos de maior procura. Os principais sistemas de baterias são as de chumbo-ácido, as de sódio, as de íões de lítio e as de fluxo redox, podendo utilizar-se baterias de várias dimensões e tipologias, desde as aplicações estacionárias de pequena dimensão, para residências e pequenas comunidades, até às de grande dimensão associadas diretamente aos sistemas de geração PV e eólica, e ainda as aplicações móveis, designadamente os veículos elétricos. Estes últimos constituirão, no futuro, um importante componente do sistema de armazenamento de eletricidade, desde que a carga seja realizada nos períodos de menor procura, nomeadamente durante a noite.

As baterias de íões de lítio são atualmente as mais importantes dentro do conjunto das células eletroquímicas disponíveis no mercado. As suas excelentes propriedades eletroquímicas, nomeadamente a elevada tensão (3.5-4 V por célula), densidade de energia e de potência, superiores a todos os outros sistemas, tornaram-nas a melhor solução disponível, particularmente para os sistemas móveis. Nas aplicações estacionárias, há outras soluções competitivas, nomeadamente as baterias de chumbo-ácido, as de Na-S e as de fluxo redox (de vanádio). Contudo, também nas aplicações estacionárias de grande dimensão, nomeadamente na associação à geração de eletricidade renovável para a rede, os sistemas baseados em lítio estão a fazer o seu caminho e já há experiências de aplicação prática em curso.

Quanto à capacidade de armazenamento, as baterias também permitem gamas relativamente alargadas, tipicamente entre 10 kWh e 10 MWh, através de associações em série e paralelo de milhares de células individuais. Contudo, a capacidade é claramente inferior às tecnologias *power-to-gas*. Quanto aos custos, o armazenamento eletroquímico ainda pode e deve evoluir no sentido da sua diminuição, para se tornar mais competitivo.

Armazenamento térmico

No armazenamento térmico utilizam-se transformações físico-químicas de materiais e as correspondentes variações de calor associadas para armazenar energia. A fonte primária de energia pode ser diversa. Pode-se converter eletricidade em calor (através de resistências ou bombas de calor) ou usar uma fonte direta de calor (e.g. aquecimento solar ou calor industrial). O calor gerado pode utilizar-se para aquecer (calor sensível), mudar de fase (calor latente) ou ativar uma transformação química (calor de reação) de uma determinada substância ou material. Exemplos de armazenamento de energia térmica podem ser encontrados na gestão de calor e frio industrial e

em fachadas de edifícios para promover a sua eficiência energética. Contudo, esta classe de armazenamento de energia também pode ser associada ao sistema electroprodutor; nas centrais de concentração solar (CSP – *concentrating solar power*). Nestas centrais, dá-se o aquecimento de um fluido num sistema de espelhos coletores que concentram a radiação solar; podendo esse fluido quente (por exemplo, uma mistura de sais inorgânicos fundidos) armazenar o calor por um determinado período de tempo (normalmente algumas horas), e posteriormente permutar o calor armazenado para um bloco de potência, produzindo vapor que aciona uma turbina de geração de eletricidade. As centrais CSP, embora sejam atualmente ainda residuais dentro dos sistemas electroprodutores renováveis, têm potencialidade de crescimento, principalmente porque permitem integrar estes sistemas de armazenamento de energia térmica, tecnicamente fiáveis e com custos mais competitivos do que a maioria dos outros sistemas de armazenamento.

Armazenamento elétrico

Nesta classe destacam-se os supercondensadores e as bobinas magnéticas supercondutoras, que se destacam pela sua capacidade de resposta rápida, tanto na carga como na descarga. Esta tecnologia ainda necessita de evolução e de comprovação prática.

Materiais e armazenamento

Os materiais desempenham um papel fundamental no desenvolvimento das tecnologias da energia, tanto nos processos de conversão como de armazenamento. O sucesso das energias renováveis está muito dependente dos avanços tecnológicos dos materiais, facto reconhecido nos vários planos, roteiros e estratégias da área da energia. A investigação tem sido intensa neste domínio, e tem visado vários tópicos, de que se destacam os seguintes:

- Desenvolver materiais funcionais mais eficientes e com melhores desempenhos;
- Avaliar e promover a durabilidade e mitigar os efeitos da corrosão e outras formas de fragilização dos materiais;
- Privilegiar a circularidade de materiais, promovendo a substituição de materiais críticos, a reutilização e a reciclagem;
- Diminuir os custos das matérias-primas e dos materiais incorporados nos componentes das tecnologias.

Uma das questões mais relevantes é a disponibilidade de materiais. Sabe-se que os recursos europeus de muitos dos materiais necessários para as tecnologias da energia são escassos ou mesmo inexistentes. Algumas tecnologias usam materiais que, pela sua raridade e por outros fatores de risco de fornecimento associados a questões geopolíticas, são considerados críticos para UE. Contudo, não são só os metais críticos que merecem atenção: no limite, todos os recursos são finitos, mesmo os mais abundantes, sendo necessário que em toda a cadeia de valor associada sejam aplicados critérios de sustentabilidade.

Nas tecnologias de conversão de energia, há vários materiais particularmente sensíveis. Na conversão fotovoltaica, o silício de alta pureza (nas células de Si), o índio e o gálio (nas células de filmes finos) são elementos críticos. Na conversão eólica são os elementos de terras-raras dos ímãs permanentes (neodímio, disprósio) que causam maior preocupação pelo risco de fornecimento.

As tecnologias de armazenamento também estão sujeitas a problemas da mesma natureza, umas mais que outras. Podemos destacar as tecnologias do hidrogénio, nomeadamente os eletrolisadores e as células de combustível, que nos seus dispositivos contêm alguns materiais considerados críticos, como os metais do grupo da platina, que constituem os componentes dos catalisadores, e também a grafite. Nas baterias de iões de Li, a correta gestão dos materiais dos cátodos (cobalto, níquel, lítio) é muito relevante, nomeadamente o cobalto, que é um metal de elevada criticidade,

razão pela qual os sistemas mais recentes (NMC, NCA) têm evoluído no sentido de diminuir o seu teor. O lítio, não sendo classificado como crítico, pode passar a sê-lo com o progressivo aumento exponencial da sua procura, que já se observa.

A utilização criteriosa destes materiais críticos, a sua substituição quando possível, o prolongamento da sua vida útil, a adoção de soluções de reutilização e segunda-vida, e a reciclagem em fim-de-vida, são processos que têm necessariamente que ser implementados para permitir a sustentabilidade do crescimento das energias renováveis, onde a integração de soluções de armazenamento de energia são um pilar fundamental.

Nota final

Numa perspetiva de descarbonização da nossa sociedade, garantir que a nossa atividade é 100% não poluente em 2050, mas atendendo à intermitência de algumas fontes de energia como o vento e o sol, este desígnio está fortemente condicionado ao adequado *mix* energético e à capacidade de armazenamento de energia, com características de rápida entrada em serviço. Quando necessário essa capacidade instalada depende fortemente dos materiais para as diferentes formas de armazenamento e da sua cadeia de valor que permita investimentos em soluções rentáveis e, portanto, viáveis.

É nessa pesquisa que temos apostado no LNEG aumentando as nossas competências para responder às necessidades da economia e apoiar as políticas públicas em linha com o Acordo de Paris e mais recentemente o *Green Deal* da Comissão Europeia.

Referências

- [1] EASE/EERA, *European Energy Storage Technology Development Roadmap towards 2030*, 2017.
- [2] European Commission, *Energy storage – the role of electricity. Commission Staff Working Document – SWD(2017) 61 final*, 2017.
- [3] European Commission, *The Strategic Energy Technology Plan – at the heart of energy research and innovation in Europe*, DG Research and Innovation & DG Energy, 2018.
- [4] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, J. Clarke, *Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation*, *Applied Energy*, 137, 2015, p. 511–536. [rm](#)





PUB.



dossier sobre armazenamento de energia

- › 7 lições aprendidas de projetos de armazenamento de energia comercial
- › armazenamento de energia: tecnologias e abordagens para a transição energética
- › o estado da arte e o mercado em Portugal
- › tecnologias de armazenamento de energia e disponibilidade de materiais
- › PNEC e Estratégia Nacional para o Hidrogénio: o caminho da próxima década

especial sobre eólica

- › os lubrificantes como fatores importantes na gestão dos parques eólicos

vozes de mercado

- › como gerir o excedente da produção de energia solar