

POTENCIAL DO ARMAZENAMENTO BOMBEADO EM HIDRELÉTRICAS BRASILEIRAS: DESAFIOS, APLICAÇÕES E VIABILIDADE

Nathalia Lima Deodato¹ (EG), Rogério José da Silva¹ (PQ)

¹ Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Usinas Reversíveis, Sustentabilidade, Eficiência Energética. Armazenamento de Energia.

Introdução

O armazenamento de energia é essencial para garantir o crescimento do uso da energia solar e da energia eólica, em função das suas características de intermitência. Nas discussões sobre mudanças climáticas em busca de uma matriz mais limpa e sustentável, é essencial o armazenamento de energia solar gerada durante o dia para o uso noturno, e também o armazenamento da energia gerada por eólicas, para o uso nos momentos de maior consumo. No caso brasileiro, com grande dependência na geração hidrelétrica, os períodos de seca trazem impactos diretos na capacidade de produção energética, principalmente pela grande capacidade instalada com hidrelétricas a fio d'água. Grandes usinas a fio d'água foram instaladas na Região Amazônica e regiões próximas, como Jirau, Santo Antônio, Belo Monte, Colider, Teles Pires, São Manuel, Estreito, Lajeado, São Salvador, e Cana Brava. Tais usinas ficam sujeitas por não terem reservatório de armazenamento ficam sujeitas às vazões variáveis com as estações do ano. Um exemplo claro é a Usina de Belo Monte, localizada no Rio Xingu, no estado do Pará. Em 27 de agosto de 2024, a usina enfrentou uma queda significativa em sua produção devido ao período de estiagem, conforme relatado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2024). Embora a usina tenha uma capacidade instalada de 11.233,1 MW, a geração foi de apenas 82,83 MW nesse dia. Esse declínio acentuado pode ser atribuído às condições de seca, que afetam severamente a operação de usinas hidrelétricas a fio d'água, principalmente da Região Norte. Por outro lado a geração eólica na Região Nordeste tem sofrido restrições de operação durante o período da “safra dos ventos”, por falta de linhas para o escoamento da energia, sendo que parte da energia elétrica gerada poderia ser armazenada para uso nos horários de maior consumo.

Nesse contexto, a tecnologia de Armazenamento Hidrelétrico por Bombeamento (*Pumped Storage Hydropower*), conhecida como PSH, se destaca como uma solução eficiente para garantir a estabilidade e equilíbrio do sistema elétrico, especialmente em momentos de escassez hídrica. O funcionamento do

armazenamento por bombeamento acontece em duas fases: durante períodos de baixo consumo, a eletricidade excedente é utilizada para bombear água de um reservatório inferior para um reservatório superior. Quando a demanda de energia aumenta, a água armazenada é liberada do reservatório superior para o reservatório inferior, passando por turbinas que geram eletricidade. Esse sistema além de equilibrar a oferta e a demanda de energia, também permite a integração de fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica, ao sistema elétrico. O funcionamento da PSH é ilustrada na Figura 1, que apresenta uma representação esquemática de uma usina de armazenamento bombeado.

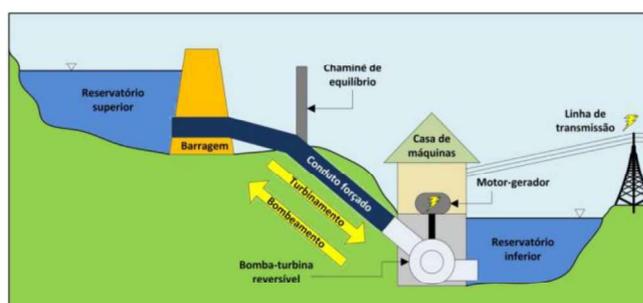


Figura 1 – Funcionamento de uma usina de armazenamento bombeado.

Fonte: CANALES et al. 2015.

Diante disso, o objetivo desta pesquisa é discutir as usinas reversíveis, analisando sua utilidade, localização e os avanços na capacidade instalada em vários países, enquanto compara essas informações com a realidade atual do Brasil. O foco será nas experiências de países como Alemanha, Espanha, Portugal e Suíça, onde o armazenamento por bombeamento já se consolidou como uma alternativa viável e eficaz na gestão de energia. A análise da situação brasileira em comparação com os progressos já alcançados em outros países é essencial, pois a tecnologia de usinas hidrelétricas reversíveis ainda é relativamente nova no país. Em diversas partes do mundo, a tecnologia de PSH é utilizada com sucesso para equilibrar a oferta e a demanda de energia, especialmente em sistemas elétricos que incorporam fontes renováveis intermitentes (QUEIROZ et al., 2013). Examinar as

operações internacionais fornece uma base sólida para entender como o Brasil pode se beneficiar da adoção dessa tecnologia, particularmente em regiões com características geográficas favoráveis.

Além de destacar os desafios que o Brasil enfrenta, este artigo busca ressaltar as oportunidades que podem ser exploradas para melhorar a eficiência energética e reduzir a vulnerabilidade da matriz elétrica nacional. A relevância desta pesquisa é ainda mais evidente em um momento em que o mundo enfrenta uma crescente demanda por energia e a necessidade de soluções que integrem sustentabilidade e segurança energética. Por fim, compreender as tecnologias de armazenamento de energia é fundamental para a formulação de políticas que visem um futuro energético mais equilibrado e resiliente.

Metodologia

A pesquisa foi realizada em duas etapas principais. Na primeira, foi feito um levantamento detalhado de usinas reversíveis em operação ao redor do mundo, coletando suas especificações técnicas, capacidades instaladas e eficiências. A coleta de dados foi realizada por meio de artigos científicos, relatórios de instituições governamentais e bases de dados internacionais de energia, como a International Hydropower Association e a International Energy Agency (IEA, 2023). Esse levantamento foi necessário para estabelecer uma base sólida de informações sobre o funcionamento dessas usinas em diferentes contextos. Na segunda etapa, a pesquisa teve como foco as condições específicas do Brasil para uma possível implementação da PSH.

Foram observados aspectos como geografia, infraestrutura e regulamentação. A escolha das usinas estudadas concentrou-se naquelas que apresentam capacidade significativa e eficiência comprovada na operação, além de serem relevantes no contexto internacional. A pesquisa levantou dados sobre localização, tipo de turbina, capacidade instalada, altura de queda e data de operação das usinas. Os métodos de pesquisa incluíram uma análise comparativa das usinas reversíveis, observando tanto seu desempenho quanto às políticas que facilitam sua operação em outros países. Além disso, foram coletados dados sobre a geração de energia e os impactos das secas nos sistemas elétricos, especialmente no Brasil, para entender melhor a situação atual e as oportunidades de avanço que a implementação da tecnologia em questão pode gerar.

O estudo também levou em conta a literatura existente sobre a implementação de tecnologias de armazenamento em países que já adotaram o PSH. A literatura de Meyer

destacou a importância das tecnologias de armazenamento de energia para sistemas elétricos, oferecendo um panorama sobre os princípios e aplicações da PSH (MEYER, 2019). Assim, a busca por publicações acadêmicas e estudos de caso foi fundamental para compreender as melhores práticas e os desafios enfrentados em cada contexto. Assim, o trabalho não se limitou à coleta de dados, mas também abrangeu uma análise crítica das informações disponíveis. A metodologia adotada garante uma abordagem abrangente, considerando tanto os avanços em outros países quanto às particularidades do Brasil. Essa abordagem permite um entendimento mais profundo das dinâmicas envolvidas na implementação de usinas reversíveis, servindo como base para discutir como essa tecnologia poderia ser adotada no Brasil, proporcionando um olhar otimista para o futuro energético do país.

Resultados e discussão

A pesquisa revela que a tecnologia de armazenamento por bombeamento (PSH) tem grande potencial para ser implementada no Brasil, especialmente em regiões montanhosas, como Minas Gerais e Paraná. Experiências internacionais, como as usinas reversíveis na Alemanha e Espanha, mostram como esses países têm aproveitado suas condições geográficas para construir instalações altamente eficientes. A Usina de Goldisthal, na Alemanha, por exemplo, tem uma capacidade instalada de 1.060 MW e uma eficiência de conversão de energia de até 80% (IEA, 2023). Além de fornecer energia de forma confiável, essa usina desempenha um papel crucial na estabilização do sistema elétrico durante os picos de demanda. A Usina de Alto Lindoso, em Portugal, com capacidade de 1.070 MW, também exemplifica a importância desse tipo de tecnologia para integrar fontes renováveis, como a energia eólica e solar, ao sistema elétrico de forma eficiente.

Em contraste, no Brasil, apesar das discussões sobre a viabilidade da PSH, o país ainda não avançou significativamente na implementação dessas usinas. Isso contrasta fortemente com o cenário europeu, onde a PSH já é amplamente utilizada para otimizar a matriz energética e garantir maior segurança no abastecimento. Um dos principais entraves identificados é a falta de incentivos governamentais e uma política específica para o desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia (ABRAPCH, 2024). Atualmente, o Brasil depende quase exclusivamente de hidrelétricas convencionais, enquanto o investimento em modernização e diversificação da matriz energética permanece limitado. No entanto, do ponto de vista econômico, as usinas de armazenamento por

bombeamento oferecem um excelente custo-benefício a longo prazo. Embora o investimento inicial seja elevado, estudos indicam que essas usinas operam com alta eficiência e têm longa vida útil, com benefícios substanciais ao longo do tempo (SILVA, 2021).

Um exemplo claro disso é a Usina de Goldisthal, que reduz a necessidade de usinas termelétricas durante picos de demanda, ajudando a cortar custos operacionais e a reduzir emissões de gases de efeito estufa. Além disso, a capacidade de armazenar energia em momentos de baixa demanda e utilizá-la em períodos de maior consumo torna o sistema mais resiliente e pode, no futuro, reduzir os custos da energia para os consumidores. No Brasil, regiões montanhosas oferecem oportunidades únicas para a implementação dessa tecnologia, o que poderia gerar benefícios econômicos e ambientais significativos, ao mesmo tempo em que fortalece a segurança energética e acelera a transição para uma matriz mais sustentável. Como mostra a Figura 2: Eficiência e custo inicial por kW instalado das tecnologias de armazenamento de energia elétrica, o armazenamento por bombeamento se destaca em termos de eficiência e competitividade, quando comparado a outras tecnologias.

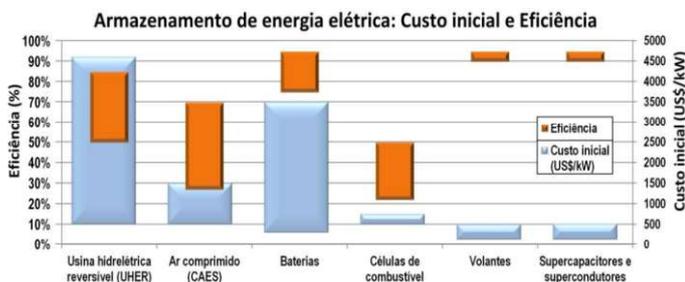


Figura 2 – Eficiência e custo inicial por kW instalado das tecnologias de armazenamento de energia elétrica. Fonte: CANALES et al, 2015.

Comparando o cenário brasileiro com o de países como Alemanha e Suíça, é evidente que esses países já desfrutam dos benefícios das usinas reversíveis. Na Alemanha, por exemplo, a capacidade instalada de armazenamento por bombeamento é de aproximadamente 7GW, enquanto na Europa esse valor chega a cerca de 39,67 GW (Energy Charts, 2024). Enquanto isso, o Brasil permanece atrasado, o que reforça a necessidade urgente de políticas públicas que incentivem o desenvolvimento desse setor.

Além dos resultados apresentados, é importante ressaltar o crescente papel da tecnologia de armazenamento por bombeamento no cenário energético brasileiro. Com o aumento expressivo da geração de energia solar e eólica

no país, especialmente em áreas com alta disponibilidade de luz solar e ventos constantes, surgem novos desafios relacionados à intermitência dessas fontes. A energia solar, por exemplo, só é gerada durante o dia, e a produção eólica pode variar conforme as condições atmosféricas, o que faz com que, em certos momentos, haja mais energia disponível do que o sistema precisa, e em outros, menos.

A tecnologia de Pumped Storage, nesse sentido, oferece uma solução eficaz. Ela permite que o excesso de energia gerado durante os picos de produção seja armazenado e utilizado posteriormente, quando a demanda for maior. Isso ajuda a estabilizar a rede elétrica, promovendo um uso mais eficiente das energias renováveis. Países como Estados Unidos, China e diversos membros da União Europeia já empregam essa tecnologia de forma ampla, o que tem permitido uma maior integração de fontes renováveis em suas matrizes energéticas, garantindo flexibilidade e segurança ao sistema.

No Brasil, apesar de a adoção de Pumped Storage ainda ser limitada, há uma forte expectativa de que, no futuro, essa tecnologia será amplamente aplicada em função do crescimento acelerado da geração de energia solar e eólica. Com o aumento contínuo dessas fontes, torna-se cada vez mais necessário contar com soluções de armazenamento eficientes para lidar com a intermitência e garantir a estabilidade do sistema elétrico. Dessa forma, o Pumped Storage se apresenta como uma alternativa viável e estratégica para o Brasil maximizar o aproveitamento de suas fontes renováveis, preparando-se para um futuro energético mais sustentável e seguro.

Conclusões

As usinas reversíveis (Pumped Storage) têm um enorme potencial para aumentar a eficiência e a estabilidade do sistema elétrico, especialmente em áreas que dependem da geração hidrelétrica. Países como Alemanha, Espanha, Portugal e Suíça têm avançado de forma significativa na capacidade instalada dessas usinas, servindo como exemplos inspiradores. A experiência desses países demonstra como a tecnologia de Pumped Storage pode equilibrar a oferta e a demanda de energia, especialmente em sistemas elétricos que incluem fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica. No Brasil, embora a viabilidade dessas usinas tenha sido amplamente debatida, ainda há uma falta de investimentos e políticas claras que estimulem sua implementação. A análise dos resultados mostra que várias hidrelétricas poderiam ser adaptadas para essa tecnologia, particularmente em Minas Gerais e Paraná. Contudo, a ausência de incentivos governamentais representa um obstáculo significativo. É

fundamental que o Brasil tome medidas concretas para promover as usinas reversíveis, assegurando uma matriz energética mais robusta e resiliente.

Com o aumento expressivo da geração solar e eólica, a necessidade de armazenamento por bombeamento torna-se ainda mais evidente. A adoção dessa tecnologia permitirá uma maior integração das fontes renováveis, ajudando o país a enfrentar o desafio da intermitência e a maximizar seu potencial energético. A combinação dessa tecnologia com o sistema hidrelétrico já consolidado no Brasil pode resultar em uma gestão mais eficiente dos recursos energéticos, contribuindo para a segurança e flexibilidade da rede elétrica. Para que isso ocorra, o Brasil deve aprender com as experiências internacionais e estabelecer políticas públicas que incentivem investimentos e inovação no setor. A implementação de sistemas de Pumped Storage oferece uma oportunidade única para transformar a matriz energética do país, promovendo um futuro mais sustentável e seguro em um cenário de crescente demanda por energia.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha sincera gratidão à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pelo apoio e pela infraestrutura disponibilizada, essenciais para a condução desta pesquisa. Também estendo meus agradecimentos ao PET - Programa de Educação Tutorial pela bolsa de estudo, que foi crucial para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço ainda aos professores e colegas, cujas valiosas contribuições e discussões enriqueceram significativamente o processo de pesquisa e serviram como fonte de inspiração e motivação.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA HIDRELÉTRICA (ABRAPCH). Perspectivas e Desafios do Setor Hidrelétrico no Brasil. Disponível em: <http://www.abrapch.com.br/>. Acesso em: 10 set. 2024.

CANALES, Fausto Alfredo; BELUCO, Alexandre; MENDES, Carlos André Bulhões. *Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicação e perspectivas*. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 19, n. 2, p. 1230-1249, maio-ago. 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/16002>. Acesso em: 25 set. 2024.

ENERGY CHARTS. Storage capacity in Europe. Disponível em: <https://www.energy-charts.info/>. Acesso em: 25 set. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Energy

Storage: Technology Overview. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-storage>. Acesso em: 25 set. 2024.

MEYER, E. Energy Storage Technologies for Power Systems. Wiley-Blackwell, 2019.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). Relatório Mensal de Operação. Disponível em: <http://www.ons.org.br>. Acesso em: 20 set. 2024.

QUEIROZ, R. et al. Pumped storage hydropower in Brazil and the world: application and perspectives. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 13, n. 13, p. 2774-2784, 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/16002>. Acesso em: 15 set. 2024.

SILVA, J. R. da. Análise do Potencial de Armazenamento em Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Brasil. 2021. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br>. Acesso em: 5 set. 2024.