

O PAPEL DAS USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS NA INTEGRAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS INTERMITENTES

Suele Maria de Sousa¹ (EG), Rogério José da Silva (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Energias Renováveis Intermitentes. Integração Energética. Usinas Hidrelétricas Reversíveis.

Introdução

Embora seja amplamente reconhecido o elevado potencial energético, os impactos adversos associados à produção de energia a partir de fontes de combustíveis fósseis e nucleares são amplamente aceitos. Por esta razão, as fontes de energia renovável, como a energia solar fotovoltaica, eólica, hídrica, geotérmica, biomassa, marés, biocombustíveis e ondas, são consideradas o caminho futuro para os sistemas de energia, conforme destacado por Ma, Yang e Lu (2014). Contudo, a natureza intermitente inerente das fontes solar e eólica desafia a confiabilidade do sistema elétrico.

Com o intuito de aprimorar a estabilidade da rede elétrica e atenuar os efeitos adversos das flutuações na produção de energia a partir de fontes renováveis, o armazenamento de energia tem emergido como uma alternativa viável e amplamente adotada, sobretudo em contextos de fornecimento de energia em áreas remotas ou desconectadas da rede principal.

O sistema de armazenamento de energia hidrelétrica bombeada opera ao acumular energia na forma de potencial hídrico, por meio do bombeamento de água de um reservatório de baixa altitude para um reservatório em uma elevação superior. Nesse processo, a eletricidade de custo reduzido (tipicamente fora dos horários de pico) é empregada para acionar as bombas, impulsionando a transferência de água do reservatório inferior para o superior. Quando há uma demanda elevada por eletricidade, a água armazenada é liberada através de turbinas hidráulicas, gerando assim energia elétrica.

Dado que o armazenamento bombeado é frequentemente considerado a tecnologia mais promissora para facilitar a integração de fontes de energia renovável intermitente nos sistemas de energia, este artigo visa explorar o potencial dos sistemas de armazenamento hidrelétrico bombeado na incorporação de fontes de energia renovável de geração intermitente.

Metodologia

A metodologia adotada envolveu a pesquisa do tema

utilizando a plataforma ScienceDirect, através dos seguintes termos de busca: pumped storage hydropower. Essa combinação proporcionou os resultados mais relevantes relacionados ao tópico, com base em informações contidas nos títulos, resumos e palavras-chave. Durante a análise, notou-se uma ampla diversidade de áreas relacionadas nos documentos apresentados. Portanto, restringiu-se a pesquisa ao campo da Energia nos últimos 5 anos, o que resultou na identificação de 344 documentos pertinentes. Como resultado, optou-se por selecionar 14 artigos para uma revisão minuciosa e detalhada.

Resultados e discussão

Conforme o relatório divulgado em 2022 pela International Hydropower Association (IHA), a capacidade global de geração hidrelétrica instalada aumentou em 26 GW, alcançando um total de 1360 GW em 2021. Nesse mesmo ano, foram integrados à rede elétrica 4,7 GW de usinas hidrelétricas de armazenamento bombeado, três vezes mais do que o valor acrescentado em 2020. Contudo, o relatório conclui que esse crescimento não é suficiente para cumprir as metas de zero emissões líquidas até 2050.

Erik Solheim, ex-diretor executivo do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, enfatizou que o Relatório de Status de Energia Hidrelétrica da IHA destaca a necessidade urgente de adotar práticas mais sustentáveis na energia hidrelétrica, a fim de facilitar uma transição bem-sucedida para sistemas de energia totalmente renovável no futuro. Solheim também enfatizou que essa ação não pode ser postergada, exortando os governos a responderem a esse chamado à ação, ou correremos o risco de um futuro energético incerto e instável.

Em outro estudo realizado por Child et al. (2018) um modelo de otimização linear multimodal foi elaborado com o propósito de examinar o papel desempenhado pelas tecnologias de armazenamento na transição em direção a um sistema de energia totalmente baseado em fontes renováveis na Europa. Mediante simulações

utilizando um modelo resolvido por hora, eles identificaram as funções das tecnologias de armazenamento em um arranjo de sistema que minimiza os custos. O escopo da investigação incluiu diversas tecnologias de armazenamento, como baterias, armazenamento hidrelétrico bombeado, armazenamento de energia de ar comprimido adiabático, armazenamento de energia térmica e tecnologia power-to-gas. O objetivo era determinar a combinação ótima de usinas necessárias para atingir um sistema de energia totalmente baseado em fontes renováveis até 2050, levando em conta os custos presumidos e o estado tecnológico de todas as tecnologias envolvidas.

Os resultados obtidos sugerem que a consecução de um sistema de energia 100% renovável na Europa antes de 2050 é viável. Notavelmente, a energia hidrelétrica e o armazenamento hidrelétrico bombeado permanecem fundamentais em regiões onde essas tecnologias estão disponíveis. Em conjunto com a biomassa, esses recursos e tecnologias flexíveis e prontamente acionáveis desempenham um papel crucial no equilíbrio do sistema, capaz de complementar a natureza intermitente das fontes solares e eólicas, tanto em curto prazo quanto ao longo das estações do ano.

Sivakumar et al., (2013) enfatizam que o armazenamento bombeado é o único esquema comprovado de armazenamento de energia em grande escala (>100 MW) para a operação eficaz do sistema elétrico. Além disso, de acordo com informações fornecidas pela Sandia National Laboratory e IHA (2020, p.13), a capacidade global das usinas hidrelétricas reversíveis atingiu aproximadamente 160 GW, o que representa mais de 95% da capacidade total de todas as formas de armazenamento de energia atualmente disponíveis. Esses dados refletem o reconhecimento por parte de muitos países da viabilidade dessa tecnologia, levando-os a planejar a expansão da capacidade de armazenamento bombeado em seus sistemas elétricos, especialmente para facilitar a integração de fontes de energia renovável.

Adicionalmente, de acordo com o Relatório Técnico do Departamento de Energia dos EUA, é previsto que a capacidade global aumente para 240 GW até o ano de 2030 com 65% dos novos projetos na China, 19% nos Estados Unidos e 10% na Austrália e Indonésia. A China lidera em termos de implantações planejadas a curto prazo, com projeções indicando que, no período de 2020 a 2026, o país deverá instalar mais de 35 GW de UHR, frequentemente em usinas de grande porte. Um exemplo notável é a Usina Hidrelétrica Reversível de Fengning, localizada na província de Hebei, com uma capacidade de 3,6 GW. Essa instalação é composta por 12 grupos geradores de bombas reversíveis, cada um com capacidade de 300 MW, e tem uma capacidade de

geração de energia a partir do armazenamento de 6,612 bilhões de kWh. A usina está conectada à rede elétrica VSC-HVDC de Zhangbei e à rede elétrica de 500 kV do norte da China. De acordo com a empresa State Grid, a usina hidrelétrica bombeada desempenhará o papel de uma usina de pico, contribuindo para a operação segura e estável da rede elétrica, ao equilibrar o fornecimento intermitente de energia proveniente de grandes parques eólicos e solares localizados no norte de Hebei e na Mongólia Interior.



Figura 1 – A Fengning Pumped Storage Power Station.
Fonte: State Grid Corp da China

Destaca-se que por quase duas décadas, a usina hidroelétrica reversível de Bath County, localizada no estado da Virgínia, nos Estados Unidos, ocupou a posição de ser a usina de maior capacidade instalada em sua categoria, com 3003 MW distribuídos em seis turbinas-bombas do tipo Francis. Operando em um sistema de circuito aberto, esta usina possui uma capacidade de armazenamento de energia de 24000 MWh. Sua contribuição mais significativa reside na capacidade de monitorar a demanda e mitigar a imprevisibilidade na geração de energia a partir de fontes eólicas e solares.

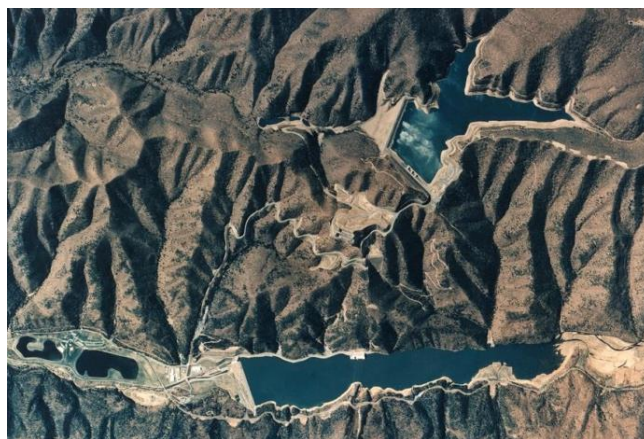


Figura 2 – Usina Hidroelétrica Reversível de Bath County.

Mahfoud et al. (2023) apresentaram uma revisão significativa e estruturada sobre o funcionamento ideal de sistemas de energia baseados em armazenamento hidrelétrico bombeado.

O estudo revelou que o armazenamento hidroelétrico bombeado pode ser eficazmente combinado com uma, duas ou múltiplas fontes de energia para criar um sistema energético eficiente, oferecendo aos operadores uma multiplicidade de escolhas com base nos recursos disponíveis e nas condições operacionais. A incorporação de múltiplas fontes de energia renováveis como fontes primárias, juntamente com as Usinas Hidrelétricas Reversíveis, aumentaria enormemente a flexibilidade do sistema e reduziria a dependência de geradores baseados em combustíveis fósseis.

Em um estudo conduzido por Zohbi et al. (2016), foi realizado um experimento que envolveu a integração de múltiplas turbinas eólicas a um sistema de armazenamento hidroelétrico bombeado, com o propósito de aumentar a geração de eletricidade no Líbano, aproveitando o excesso de energia eólica. Inicialmente, uma análise foi realizada para identificar as localizações mais apropriadas para a implantação das turbinas eólicas em todo o país. Os resultados apontam que cinco áreas se destacam como sendo particularmente adequadas para esse fim: Daher El Baydar, Klaiaat, Quaraoun, Cedars e Marjyoun.

Contudo, a geração de energia eólica apresenta desafios, pois é variável e em parte imprevisível. Assim, tornou-se necessário prever o sistema de energia de maior flexibilidade. Embora as fontes de energia eólica não possam fornecer energia de forma consistente por si só, elas podem ser combinadas para criar um sistema de armazenamento hidroelétrico bombeado que atenda às demandas de maneira colaborativa. Sob esse aspecto, a barragem de Chanrouh se destacou como a opção mais economicamente viável para abrigar o sistema.

De acordo com os resultados obtidos, a integração da energia eólica com o sistema de armazenamento hidráulico bombeado pode representar uma solução crucial para resolver a crise de eletricidade no Líbano.

Conclusões

O estudo realizado nos permitiu chegar à conclusão de que as usinas hidrelétricas reversíveis apresentam uma série de vantagens significativas no contexto da transição energética global. Estas usinas se destacam por sua notável flexibilidade operacional, o que significa que podem ajustar sua produção de energia de forma rápida e eficiente de acordo com a demanda.

Uma das principais contribuições das usinas hidrelétricas

reversíveis é a capacidade de resposta quase instantânea às variações na demanda por eletricidade. Quando a geração de energia a partir de fontes renováveis intermitentes diminui, essas usinas podem rapidamente compensar a diferença, fornecendo energia confiável de forma contínua. Isso é fundamental para evitar interrupções no fornecimento de energia.

Além disso, essas usinas também desempenham um papel facilitador fundamental na transição para uma matriz energética mais sustentável. À medida que nos afastamos dos combustíveis fósseis, a integração de fontes de energia renovável intermitente se torna um desafio importante devido à natureza variável dessas fontes. As usinas hidrelétricas reversíveis ajudam a superar esse desafio, pois podem armazenar energia quando a oferta é alta e liberá-la quando a demanda é alta ou quando a geração de energia renovável é limitada.

Portanto, podemos concluir que as usinas hidrelétricas reversíveis desempenham um papel essencial na jornada rumo à transição energética global. Sua flexibilidade operacional, capacidade de resposta rápida e capacidade de armazenamento de energia são elementos fundamentais para garantir um fornecimento de energia estável, confiável e sustentável à medida que avançamos em direção a um futuro com menor dependência de combustíveis fósseis.

Agradecimentos

A autora agradece ao Programa de Educação Tutorial – PET pela oportunidade, participação e pela bolsa recebida.

Referências

Gaydaa Al Zohbi, Patrick Hendrick, Christian Renier, Philippe Bouillard, “The contribution of wind-hydro pumped storage systems in meeting Lebanon's electricity demand”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 41, Issue 17, 2016, Pages 6996-7004. Disponível: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915312039>. [Acesso em 15/09/2023].

Gonzalo E. Alvarez”Operation of pumped storage hydropower plants through optimization for power systems”, *Energy*, Volume 202, 2020. Disponível: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054422030904X>. [Acesso em 15/08/2023].

Jannik Haas, Luis Prieto-Miranda, Narges Ghorbani, Christian Breyer, “Revisiting the potential of pumped-hydro energy storage: A method to detect economically attractive sites”, *Renewable Energy*, Volume 181, 2022, Pages 182-193.

Disponível:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148121013070>. [Acesso em 16/09/2023].

Jehanzeb Nasir, Adeel Javed, Majid Ali, Kafait Ullah, Syed Ali Abbas Kazmi, “Capacity optimization of pumped storage hydropower and its impact on an integrated conventional hydropower plant operation”, *Applied Energy*, Volume 323, 2022. Disponível:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626192200873X>. [Acesso em 12/09/2023].

Mann, Margaret, Babinec, Susan, and Putsche, Vicky. “Energy Storage Grand Challenge: Energy Storage Market Report”. United States: N. p., 2020. Web. doi:10.2172/1908714.

Michael Child, Dmitrii Bogdanov, Christian Breyer, “The role of storage technologies for the transition to a 100% renewable energy system in Europe”, *Energy Procedia*, Volume 155, 2018, Pages 44-60. Disponível:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218310221>. [Acesso em 11/09/2023].

Muhammad Shahzad Javed, Tao Ma, Jakub Jurasz, Muhammad Yasir Amin, “Solar and wind power Generation systems with pumped Hydro storage: Review and future perspectives”, *Renewable Energy*, 2020.

N. Sivakumar, Devadutta Das, N.P. Padhy, A.R. Senthil Kumar, Nibedita Bisoyi, “Status of pumped hydro-storage schemes and its future in India”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 19, 2013, Pages 208-213. Disponível:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112006090>. [Acesso em 11/09/2023].

Rabea Jamil Mahfoud, Nizar Faisal Alkayem, Yuquan Zhang, Yuan Zheng, Yonghui Sun, Hassan Haes Alhelou, “Optimal operation of pumped hydro storage-based energy systems: A compendium of current challenges and future perspectives”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 178, 2023. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113267>. [Acesso em 12/09/2023].

Shafiqur Rehman, Luai M. Al-Hadhrami, Md. Mahbub Alam, “Pumped hydro energy storage system: A technological review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 44, 2015, Pages 586-598. Disponível:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115000106>. [Acesso em 11/09/2023].

T. Ma, H. Yang, L. Lu, “Development of a model to simulate the performance characteristics of crystalline silicon photovoltaic modules/strings/arrays”, *Sol. Energy*, 100 (2014), pp. 31-41,

Xiaokui Wang, Olusola Bamisile, Shuheng Chen, Xiao Xu, Shihua Luo, Qi Huang, Weihao Hu, “Decarbonization of China's electricity systems with hydropower penetration and

pumped-hydro storage: Comparing the policies with a techno-economic analysis”, *Renewable Energy*, Volume 196, 2022, Pages 65-83. Disponível:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148122009120>. [Acesso em 16/09/2023].

Yigang Kong, Zhigang Kong, Zhiqi Liu, Congmei Wei, Jingfang Zhang, Gaocheng An, “Pumped storage power stations in China: The past, the present, and the future”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 71, 2017, Pages 720-731. Disponível:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116311509>. [Acesso em 16/09/2023].