

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

WILLIAN GUILHERME RIBEIRO DOS SANTOS AZEVEDO

**BATERIAS GRAVITACIONAIS NO PARANÁ: VIABILIDADE TÉCNICA E
ECONÔMICA PARA ARMAZENAMENTO DE ENERGIA RENOVÁVEL**

Curitiba – PR

2025

WILLIAN GUILHERME RIBEIRO DOS SANTOS AZEVEDO

BATERIAS GRAVITACIONAIS NO PARANÁ: VIABILIDADE TÉCNICA E
ECONÔMICA PARA ARMAZENAMENTO DE ENERGIA RENOVÁVEL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao MBA
em Gestão Estratégica em Energias Naturais
Renováveis da Universidade Federal do Paraná
como requisito parcial para obtenção do título de
especialista.

Orientador: Prof. Dhyogo Miléo Taher

Curitiba – PR

2025

RESUMO

A crescente demanda por soluções sustentáveis no setor elétrico, impulsionada pela expansão das fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica, evidencia a necessidade de sistemas de armazenamento de energia que garantam estabilidade, confiabilidade e flexibilidade à matriz energética brasileira. As baterias gravitacionais, baseadas na elevação e posterior liberação de massas para gerar eletricidade, são uma alternativa promissora frente aos sistemas convencionais, como as baterias químicas e as usinas reversíveis. Este estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica e econômica dessa tecnologia no contexto brasileiro, com foco em aplicações em diferentes escalas (5 MW, 25 MW e acima de 50 MW), observando aspectos como eficiência energética, durabilidade, custos de implantação e operação (CAPEX e OPEX), e impactos ambientais dos materiais utilizados (aço reciclado, concreto etc.). A metodologia adotada envolve desde bibliográfica técnico-científica até a análise comparativa com tecnologias de armazenamento concorrentes. Como diferencial, explora-se a aplicação regional no estado do Paraná, considerando sua diversidade climática, presença de polos industriais e crescente inserção de fontes distribuídas. O estudo também analisa lacunas regulatórias, com destaque para a falta de diretrizes específicas para armazenamento no marco da microgeração (Lei nº 14.300/2022) e oportunidades para políticas públicas que incentivem soluções sustentáveis. Os resultados esperados reforçam o potencial das baterias gravitacionais como estratégia de longo prazo para garantir a transição energética, promover segurança elétrica descentralizada.

Palavras-chave: armazenamento de energia; baterias gravitacionais; sustentabilidade; transição energética; Paraná.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable solutions in the electricity sector, driven by the expansion of intermittent renewable sources such as solar and wind energy, highlights the need for energy storage systems that ensure stability, reliability, and flexibility within the Brazilian power matrix. Gravitational batteries, which operate through the elevation and subsequent release of masses to generate electricity, emerge as a promising alternative to conventional systems such as chemical batteries and pumped hydro storage. This study aims to assess the technical and economic feasibility of gravitational energy storage technologies in Brazil, with an emphasis on applications across multiple scales (5 MW, 25 MW, and over 50 MW), considering factors such as energy efficiency, durability, implementation and operation costs (CAPEX and OPEX), and the environmental footprint of materials used (e.g., recycled steel and concrete). The methodology includes a technical-scientific literature review, simplified scenario modeling, and comparative analysis with competing storage technologies. As a distinguishing feature, the study explores the regional applicability in the state of Paraná, analyzing its climatic diversity, industrial hubs, and the growing integration of distributed generation. The work also examines regulatory gaps—especially the lack of specific guidelines for storage systems within the framework of microgeneration (Law No. 14,300/2022)—and highlights opportunities for public policies that promote sustainable solutions. The expected outcomes underscore the potential of gravitational batteries as a long-term strategy to ensure energy transition, enhance decentralized energy security.

Keywords: energy storage; gravitational batteries; sustainability; energy transition; Paraná.

Sumário

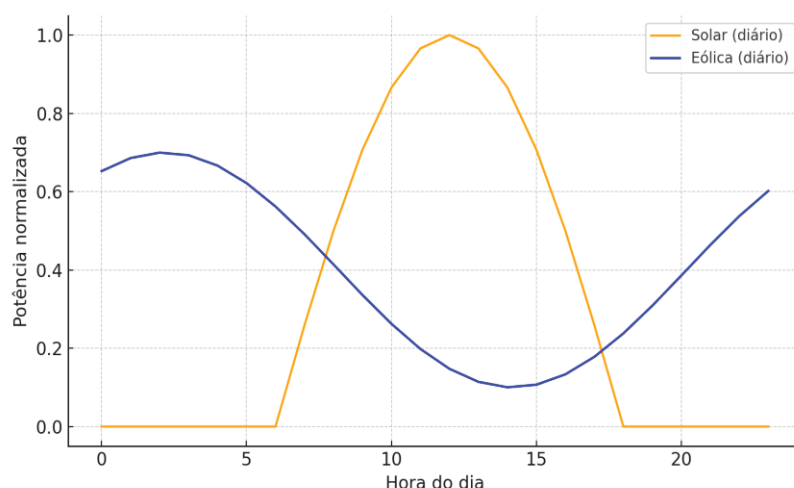
1. INTRODUÇÃO	6
1.1 Contextualização da Matriz Elétrica e o Desafio da Intermitência	6
1.2 O Armazenamento de Energia e o Vácuo Regulatório Brasileiro	7
1.3 Baterias Gravitacionais: Uma Alternativa Inovadora e Sustentável	7
1.4 Justificativa e Ineditismo do Estudo: O Foco no Estado do Paraná	8
1.5 Objetivos e Estrutura do Artigo	9
2 DESENVOLVIMENTO.....	10
2.1 Fundamentos Técnicos das Baterias Gravitacionais	10
2.2 Comparativo com Outras Tecnologias de Armazenamento.....	12
2.3 Avaliação Técnica e Econômica Multiescalar (5 MW, 25 MW e acima de 50 MW)	16
2.4 Aspectos Ambientais e Sustentabilidade.....	18
2.5 Regulatória e Propostas de Diretrizes	21
2.6 Viabilidade Regional no Paraná.....	23
3. Conclusão	24
REFERÊNCIAS.....	26

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização da Matriz Elétrica e o Desafio da Intermitência

A matriz elétrica brasileira, historicamente fundamentada em uma forte base hidrelétrica, passa por uma transformação estrutural acelerada. Impulsionada por compromissos ambientais e vantagens econômicas, a participação de fontes renováveis intermitentes, principalmente solar fotovoltaica e eólica, cresce de forma exponencial. Conforme projeções do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2032), mais de 75% da nova capacidade de geração até 2032 será proveniente dessas fontes, com a solar liderando esse crescimento (EPE, 2023). Na figura 1, vemos como essas fontes são variáveis.

Figura 1 – VARIABILIDADE HORÁRIA E SAZONAL DE SOLAR E EÓLICA NO BRASIL



FONTE: Adaptado de *Energy Vault* (2022).

Esta transição, embora essencial para a descarbonização do setor, introduz complexidades operacionais inéditas para o Sistema Interligado Nacional (SIN). A natureza variável e não-despachável dessas fontes, dependente de condições climáticas, gera desafios significativos para o equilíbrio instantâneo entre oferta e demanda, impactando a estabilidade de frequência, a regulação de tensão e a confiabilidade do sistema como um todo (ONS, 2024; IEA, 2023). Em cenários de baixa geração renovável, o operador é obrigado a acionar usinas termelétricas, mais

caras e poluentes, para garantir a segurança do suprimento, elevando o custo marginal da operação e as emissões de gases de efeito estufa.

1.2 O Armazenamento de Energia e o Vácuo Regulatório Brasileiro

Os SAEs (Sistemas de Armazenamento de Energia) são capazes de absorver o excedente de energia gerado em períodos de alta oferta e baixa demanda e injetá-lo na rede quando necessário. Além dessa função primária, fornecem serviços auxiliares cruciais, como controle de frequência, reserva de potência e suporte à inércia, tornando a rede mais resiliente (IEA, 2023).

Apesar de sua importância reconhecida globalmente, o arcabouço regulatório brasileiro mostra-se inadequado e omissor. A Lei nº 14.300/2022, que institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, não contempla de forma clara e específica a figura do armazenamento de energia, seja como agente independente ou integrado a sistemas de geração. A Nota Técnica nº 040/2022-SRD da ANEEL, embora reconheça a questão, não avança na criação de mecanismos concretos de remuneração, enquadramento tarifário ou regras de conexão para essas tecnologias (ANEEL, 2022). Esta ausência normativa gera insegurança jurídica para investidores, impede a participação de SAEs em leilões de energia e desincentiva projetos-piloto, atrasando a inovação e a modernização do sistema elétrico nacional.

1.3 Baterias Gravitacionais: Uma Alternativa Inovadora e Sustentável

Entre as tecnologias de armazenamento, as baterias gravitacionais emergem como uma alternativa promissora frente as soluções convencionais. Seu princípio de funcionamento baseia-se na conversão de energia elétrica excedente em energia potencial gravitacional, por meio da elevação de massas pesadas (blocos de concreto ou aço reciclado, por exemplo). Quando necessário, a massa é liberada de forma controlada, acionando um gerador que reconverte a energia potencial em eletricidade (Lewis et al., 2022).

Esta simplicidade conceitual esconde vantagens competitivas significativas: vida útil extensa (superior a 40 anos), baixíssima degradação ao longo de ciclos sucessivos, dispensa de minerais críticos (como lítio e cobalto) e utilização de

materiais amplamente disponíveis e recicláveis, o que reduz a pegada ambiental e os riscos associados à cadeia de suprimentos (IRENA, 2023; Energy vault, 2023). Projetos-piloto internacionais, como os da Gravitricity, no Reino Unido, e da Energy Vault, na Suíça e China, validaram a viabilidade técnica da tecnologia, demonstrando eficiências energéticas na faixa de 70% a 85% e tempos de resposta inferiores a um segundo, aptos para a prestação de serviços auxiliares (Gravitricity, 2022; IEA, 2023).

1.4 Justificativa e Ineditismo do Estudo: O Foco no Estado do Paraná

A escolha do Paraná como recorte regional se justifica por um conjunto de fatores técnicos e institucionais que tornam o estado especialmente favorável à implementação de baterias gravitacionais. Sua geografia, marcada por planaltos e vales, além da presença de minas desativadas e estruturas industriais ociosas, cria oportunidades de reaproveitamento com custos reduzidos de infraestrutura. Essas condições físicas diferenciam o estado em relação a outros no Brasil e reforçam seu potencial como território estratégico para a testagem de tecnologias emergentes em armazenamento de energia.

O crescimento acelerado da geração solar distribuída — que passou de cerca de 200 MW em 2019 para mais de 1 GW em 2024 (ANEEL, 2024) — coloca pressão sobre a rede elétrica paranaense, exigindo soluções de armazenamento que garantam estabilidade e confiabilidade. Ao mesmo tempo, a economia industrial diversificada do estado, que abrange setores como automotivo, agroindustrial e papel e celulose, demanda fornecimento elétrico contínuo e sustentável. Nesse contexto, sistemas gravitacionais podem atuar como alternativa de suporte à rede, conciliando flexibilidade operacional com ganhos ambientais e competitividade industrial.

Além disso, o Paraná possui um ambiente institucional favorável, com políticas públicas de incentivo à inovação energética e a presença da COPEL como agente estratégico, atuando em toda a cadeia elétrica. O ineditismo do presente estudo está justamente em explorar o estado como laboratório natural para a viabilidade de baterias gravitacionais, preenchendo uma lacuna na literatura nacional, que até agora não realizou análises regionais específicas. Assim, o trabalho contribui tanto para a

compreensão técnica da tecnologia quanto para a formulação de políticas públicas adaptadas à realidade brasileira.

Outro ponto importante é o protagonismo da COPEL, a presença de instituições como a UFPR e UTFPR fortalecem a capacidade regional de inovação, fazendo do estado um cenário privilegiado para validar soluções de armazenamento de energia em escala real.

1.5 Objetivos e Estrutura do Artigo

Diante do exposto, este artigo tem como objetivo geral avaliar a viabilidade técnica e econômica da implantação de baterias gravitacionais como solução de armazenamento de energia no Brasil, com foco especial em sua aplicação no estado do Paraná, considerando dimensões ambientais, regulatórias e de sustentabilidade.

Os objetivos específicos do trabalho consistem em sintetizar os fundamentos técnico-operacionais e o estado da arte das baterias gravitacionais, destacando suas vantagens frente a tecnologias convencionais; analisar a viabilidade econômica de projetos de 5 MW, 25 MW e acima de 50 MW por meio de CAPEX, OPEX e LCOS, contextualizados para o Paraná; identificar e avaliar criticamente barreiras regulatórias à implementação no sistema elétrico brasileiro, propondo diretrizes para superá-las; e explorar o potencial de aplicação da tecnologia na região, considerando aspectos geográficos, industriais e energéticos. A pesquisa é exploratória e aplicada, fundamentando-se em revisão bibliográfica sistemática, análise documental de normativos e planos energéticos e modelagem econômica simplificada.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Fundamentos Técnicos das Baterias Gravitacionais

As baterias gravitacionais constituem uma tecnologia emergente de armazenamento de energia baseada na conversão de energia potencial gravitacional em energia elétrica. Seu princípio físico é relativamente simples: durante períodos de excedente de geração elétrica, massas sólidas — geralmente blocos de concreto, aço

ou materiais reaproveitados — são elevadas por meio de guindastes, torres ou sistemas mecânicos. Posteriormente, quando a demanda aumenta ou há escassez de produção renovável, essas massas são liberadas, movimentando cabos e geradores elétricos que convertem o movimento descendente em eletricidade. Trata-se de um processo parecido com o usado nas usinas hidrelétricas reversíveis, mas que utiliza massa sólida em vez de água, dispensando reservatórios e grandes áreas alagadas (Zhu et al., 2021; Koomey; Brown, 2022).

Do ponto de vista tecnológico, três modelos principais vêm sendo testados. O primeiro são as torres gravitacionais, exemplificadas pelo projeto da empresa suíça Energy Vault, que utiliza guindastes automatizados para empilhar blocos de concreto em grandes estruturas verticais. O segundo modelo aproveita minas desativadas ou poços subterrâneos, explorando o desnível natural do terreno para movimentar pesos em cabos. Esse conceito tem sido desenvolvido pela britânica Gravitricity, com testes em minas de carvão desativadas no Reino Unido. O terceiro modelo envolve sistemas de trilhos inclinados, em que vagões carregados descem e sobem colinas, funcionando como grandes contrapesos. Essa diversidade de arranjos demonstra a flexibilidade da tecnologia e sua possibilidade de adaptação a diferentes contextos geográficos (Martins; Pereira, 2021).

Em termos de desempenho, as baterias gravitacionais apresentam eficiência energética de 70 a 85%, valores próximos aos das usinas reversíveis (75 a 85%). A degradação estrutural também é mínima: blocos de concreto e cabos de aço possuem vida útil superior a 25 anos, em contraste com baterias químicas, que perdem capacidade após 10 a 15 anos. Isso confere maior longevidade operacional e reduz a necessidade de substituições frequentes, um aspecto relevante para reduzir custos de ciclo de vida (Hunt et al., 2020; IRENA, 2022).

Outro diferencial está na segurança operacional. Ao contrário das baterias químicas, que envolvem riscos de incêndios e dependem de cadeias produtivas concentradas em minerais críticos (os já citados lítio, níquel e cobalto), as baterias gravitacionais utilizam materiais abundantes e recicláveis, como concreto e aço. Essa

característica amplia seu potencial de sustentabilidade e de inserção em políticas de economia circular, sobretudo em países em desenvolvimento que enfrentam altos custos de importação de insumos tecnológicos. Além disso, a operação mecânica reduz a necessidade de sistemas complexos de refrigeração ou gestão térmica (Kooimey; Brown 2022).

No Brasil, a tecnologia encontra um contexto favorável, principalmente pela complementaridade com a geração renovável intermitente (solar e eólica), cuja expansão já supera 30 GW de capacidade instalada. Sistemas gravitacionais poderiam ser integrados a microrredes, parques solares ou eólicos — como o caso do Parque Barigui, que já integra uma mini hidrelétrica e um projeto de painéis solares, configurando-se como um excelente candidato para projetos-piloto. O país também possui abundância de estruturas potenciais para reaproveitamento, como silos, armazéns e minas abandonadas, que poderiam ser adaptadas com menor custo de capital inicial. Essas condições diferenciam a viabilidade brasileira em relação a outros países, permitindo explorar arranjos híbridos entre geração renovável e armazenamento (EPE, 2023; IEA, 2022).

Já do ponto de vista estratégico, as baterias gravitacionais se apresentam como uma solução de médio e longo prazo. Sua robustez estrutural, baixa dependência de importações críticas e capacidade de operar em múltiplas escalas — de 5 MW em comunidades isoladas até acima de 50 MW em polos industriais — posicionam a tecnologia como uma alternativa promissora para apoiar a transição energética. Apesar dos desafios de maturidade tecnológica e de Insegurança operacional, a tendência é que a curva de aprendizado e o ganho de escala reduzam rapidamente o CAPEX, tornando esses sistemas mais competitivos frente a outras opções de armazenamento.

2.2 Comparativo com Outras Tecnologias de Armazenamento

O armazenamento de energia pode ser realizado por meio de diferentes tecnologias, cada uma com características próprias de eficiência, custo, tempo de resposta e impactos ambientais. Entre as opções mais consolidadas estão as baterias

de íons de lítio, as usinas hidrelétricas reversíveis (pumped hydro storage – PHS) e, claro, as baterias gravitacionais. A comparação entre essas alternativas é essencial para compreender os nichos de aplicação envolvidos, especialmente em países em desenvolvimento, onde restrições financeiras e territoriais exercem forte influência sobre decisões de investimento (IRENA, 2022; IEA, 2023).

As baterias de íons de lítio consolidaram-se como padrão no setor de armazenamento de curta e média duração, devido à alta eficiência energética (90–95%), tempos de resposta de milissegundos e capacidade modular. No entanto, apresentam problemas relevantes: degradação da vida útil em ciclos intensivos, dependência de cadeias de suprimentos internacionais concentradas em poucos países (China, Congo, Chile, Austrália) e impactos ambientais ligados à mineração de lítio, cobalto e níquel. O gerenciamento térmico é outro desafio, uma vez que riscos de superaquecimento e incêndios exigem sistemas robustos de controle, elevando custos operacionais e de segurança (Kooimey; Brown, 2022).

As usinas reversíveis (PHS) constituem a forma mais difundida e madura de armazenamento em larga escala (principalmente no Paraná onde temos a gigante Itaipu), respondendo por mais de 90% da capacidade instalada mundial. Sua eficiência gira em torno de 75 a 85%, e sua vida útil supera 40 anos, o que as torna extremamente confiáveis para operação contínua em sistemas elétricos. Entretanto, sua dependência de grandes reservatórios e infraestrutura hidráulica limita novas expansões em países com restrições territoriais e ambientais. No Brasil, apesar da forte cultura no setor, a expansão de usinas reversíveis esbarra em custos elevados de licenciamento ambiental, desapropriações e restrições de uso da água em períodos de escassez hídrica (EPE, 2023; IEA, 2022).

Já as baterias gravitacionais estão em estágio intermediário de maturidade. Embora sua eficiência seja ligeiramente inferior à das baterias de lítio, como pode ser visto na Tabela 1, destacam-se pela longevidade estrutural, segurança operacional e uso de materiais abundantes. Seu custo de implantação ainda é incerto, mas estudos internacionais indicam CAPEX competitivo em médio prazo, principalmente quando

há reaproveitamento de estruturas existentes, como minas desativadas e torres industriais. Diferentemente das usinas reversíveis, não requerem alagamentos nem áreas extensas, o que representa uma vantagem ambiental e social muito importante (Hunt et al., 2020).

TABELA 1 – COMPARAÇÃO ENTRE TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO

Critério	Gravitacional	Íon-Lítio	Hidrelétrica Reversível
Princípio	Elevação/liberação de massas	Reações eletroquímicas	Bombeamento entre reservatórios
Eficiência (%)	70–85%	90–95%	75–85%
Vida útil (anos)	≥ 25	10–15	≥ 40
Tempo de resposta	Segundos a minutos	Milissegundos a segundos	Minutos
CAPEX	Moderado	Alto	Muito alto
OPEX	Baixo	Baixo a moderado	Baixo
Impacto ambiental	Baixo	Moderado a alto (extração e descarte)	Moderado (uso de grandes áreas e ecossistemas)

FONTE: elaboração a partir de *Lewis et al. (2022)*, *Malhotra et al. (2023)*, *IEA (2023)*, *IRENA (2023)*

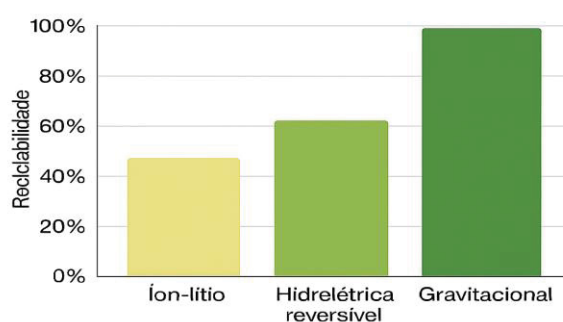
As baterias de lítio apresentam valores entre 140 e 200 USD/MWh em aplicações comerciais, enquanto usinas reversíveis ficam entre 50 e 120 USD/MWh em grandes projetos. As baterias gravitacionais, por estarem em desenvolvimento, variam de 130 a 250 USD/MWh, mas projeções indicam queda significativa com a escalabilidade e o aprendizado tecnológico (IRENA, 2022). Assim, em um horizonte

de médio prazo, a competitividade econômica tende a se aproximar dos demais sistemas, especialmente em aplicações estacionárias de média e longa duração.

Baterias de lítio se destacam com milissegundos, ideais para serviços de regulação de frequência. As usinas reversíveis operam em minutos, adequadas para deslocamento de carga em horas. As baterias gravitacionais, dependendo do arranjo (torres ou minas), podem atuar em segundos, tornando-se competitivas em aplicações de suporte rápido e prolongado, conciliando serviços de curto e médio prazo. Essa característica reforça sua aplicabilidade em sistemas híbridos de energia, como microrredes que combinem geração solar, eólica e armazenamento.

As baterias de lítio enfrentam forte crítica pela pegada de carbono da mineração e pelo descarte de resíduos tóxicos. As usinas reversíveis apresentam grandes impactos locais, como deslocamento populacional e alteração de ecossistemas. Já as baterias gravitacionais, ao utilizarem materiais reciclados e estruturas existentes, têm potencial de apresentar uma das menores pegadas ambientais entre as tecnologias analisadas, alinhando-se a princípios de economia circular e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU (Koomey; Bronw, 2022; EPE, 2023).

Figura 2 – RECICLABILIDADE DA TECNOLOGIA



FONTE: Adaptado de IRENA (2023), World Bank (2020), EPE (2021), Battery2030+ (EU).

No Brasil, a inserção dessas três tecnologias pode ser analisada sob a ótica de complementaridade. Baterias de lítio serão fundamentais para microrredes urbanas e aplicações de resposta ultrarrápida. Usinas reversíveis seguirão desempenhando papel estratégico em grandes interconexões regionais, aproveitando a experiência acumulada no setor hidrelétrico. Enquanto as baterias gravitacionais poderão ocupar o espaço intermediário com forte potencial para projetos-piloto em áreas industriais, comunidades rurais e polos agroindustriais, muito presentes em solo paranaense. Essa complementaridade pode reduzir custos sistêmicos e aumentar a resiliência da matriz elétrica (EPE, 2023; IEA, 2022).

As baterias gravitacionais devem ser vistas como tecnologia complementar e não substitutiva (ao menos, por enquanto). Seu diferencial está na capacidade de unir durabilidade, sustentabilidade e adaptabilidade geográfica. A comparação com lítio e usinas reversíveis demonstra que, a depender do contexto, a escolha tecnológica pode variar, e o maior ganho é visível a partir da sinergia entre soluções. Nesse sentido, o Brasil encontra-se em posição estratégica para explorar a coexistência desses modelos, alinhando eficiência econômica, segurança energética e sustentabilidade ambiental.

2.3 Avaliação Técnica e Econômica Multiescalar (5 MW, 25 MW e acima de 50 MW)

A avaliação de sistemas de armazenamento gravitacional deve ser feita considerando diferentes escalas de potência, pois a aplicabilidade técnica e a viabilidade econômica variam significativamente conforme o porte do empreendimento. No presente estudo, a análise é estruturada em três níveis principais: 5 MW, 25 MW e acima de 50 MW, que correspondem, respectivamente, a contextos de microrredes e comunidades isoladas, integração com polos industriais e suporte a centros urbanos e redes elétricas de maior porte. Essa abordagem multiescalar permite identificar vantagens e desafios específicos em cada cenário (IRENA, 2022; EPE, 2023).

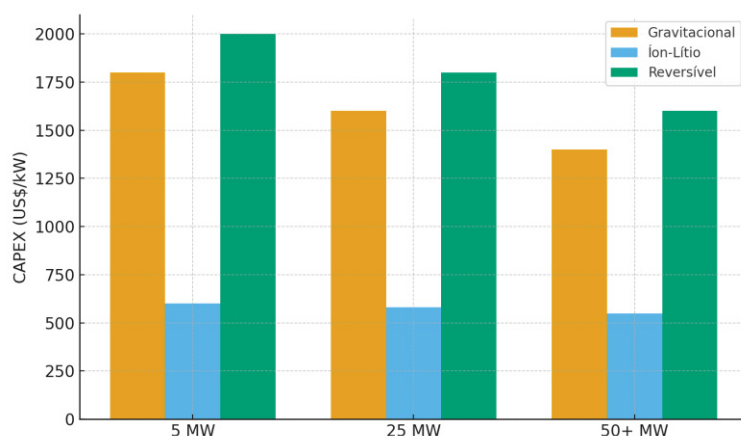
Na escala de 5 MW, os sistemas gravitacionais apresentam elevado potencial de aplicação em comunidades rurais, microrredes isoladas e pequenos centros urbanos. A principal função nessa configuração é prover estabilidade para geração distribuída solar e eólica, armazenando excedentes em períodos de baixa demanda e liberando energia em horários de pico. Os custos iniciais (CAPEX) tendem a ser relativamente elevados por conta da falta de economia de escala, situando-se entre 1750 e 2.700 USD/kW, mas a operação (OPEX) é baixa, uma vez que não há degradação química e a manutenção estrutural é simples. Essa escala também apresenta impacto positivo na autonomia energética de comunidades vulneráveis, reduzindo a dependência de diesel ou outras fontes poluentes em localidades isoladas do estado (Hunt et al., 2020).

No patamar de 25 MW, os sistemas gravitacionais tornam-se competitivos como solução para polos industriais e parques energéticos híbridos, muito presentes na capital paranaense. Essa faixa de potência permite ganhos de escala, reduzindo custos de implantação para aproximadamente 1600 a 2.000 USD/kW, dependendo da disponibilidade de estruturas reaproveitáveis (minas, silos ou torres industriais). Além disso, nessa escala, as baterias gravitacionais podem oferecer serviços auxiliares ao sistema elétrico, como regulação de frequência, controle de tensão e reserva de capacidade, contribuindo para maior confiabilidade da rede. O tempo de resposta de segundos coloca a tecnologia em vantagem em relação às usinas reversíveis, tornando-a adequada para apoiar tanto processos industriais sensíveis quanto a integração de fontes renováveis intermitentes em redes locais (Koomey; Brown, 2022).

Nos sistemas de 50 MW ou mais, as baterias gravitacionais ganham escala suficiente para competir diretamente com usinas reversíveis de médio porte e parques de baterias de íons de lítio. Nesse patamar, os custos de implantação podem cair para cerca de 1.400 a 1.800 USD/kW, com expectativa de redução adicional à medida que a tecnologia amadureça e seja replicada em maior número de projetos. A durabilidade estrutural (vida útil acima de 30 anos) e os baixos custos de manutenção tornam essa

escala interessante para integração em redes de transmissão, atuando como “*buffer*” (sistema de armazenamento que serve de reserva temporária) em grandes interconexões regionais. Adicionalmente, sistemas acima de 50 MW podem ser projetados para fornecer suporte em situações de contingência, como blecautes ou secas prolongadas, ampliando a resiliência da matriz elétrica do Paraná (IEA, 2023).

Figura 3 CAPEX POR ESCALA



FONTE: IRENA (2020)

A análise econômica das três escalas (visto na figura 3) também deve considerar o custo nivelado de armazenamento (LCOS). Em sistemas de 5 MW, o LCOS tende a ser mais alto (100–200 USD/MWh), mas os benefícios sociais e ambientais compensam o investimento inicial, principalmente em áreas isoladas. Em projetos de 25 MW, o LCOS pode cair para a faixa de 120–160 USD/MWh, enquanto em plantas acima de 50 MW, os custos podem se aproximar de 100 USD/MWh, tornando a tecnologia competitiva frente as soluções convencionais. Esse resultado reforça que, quanto maior a escala, maior a atratividade econômica e a competitividade em relação às baterias de lítio e às usinas reversíveis (IRENA, 2022; EPE, 2023).

Um aspecto fundamental é a integração territorial. Projetos de 5 MW têm caráter descentralizado, impactando positivamente comunidades e microrredes. Sistemas de 25 MW podem ser aplicados em polos industriais, como os existentes no

Paraná, onde há concentração de indústrias automotivas, metalúrgicas e agroindustriais. Já as instalações acima de 50 MW assumem papel estratégico no sistema interligado nacional (SIN), apoiando a expansão de renováveis variáveis e fortalecendo a resiliência contra os choques climáticos e sazonais. A escolha da escala, portanto, deve levar em conta tanto a viabilidade econômica quanto o contexto territorial e social da aplicação (Hunt et al., 2020).

2.4 Aspectos Ambientais e Sustentabilidade

O debate sobre a sustentabilidade das baterias gravitacionais exige uma análise comparativa em relação às tecnologias concorrentes, especialmente no que se refere à pegada ecológica, ao reaproveitamento de estruturas existentes e à inserção em uma lógica de economia circular. Esses três elementos são decisivos para determinar se a tecnologia pode ser considerada não apenas economicamente viável, mas também social e ambientalmente vantajosa em relação às alternativas convencionais.

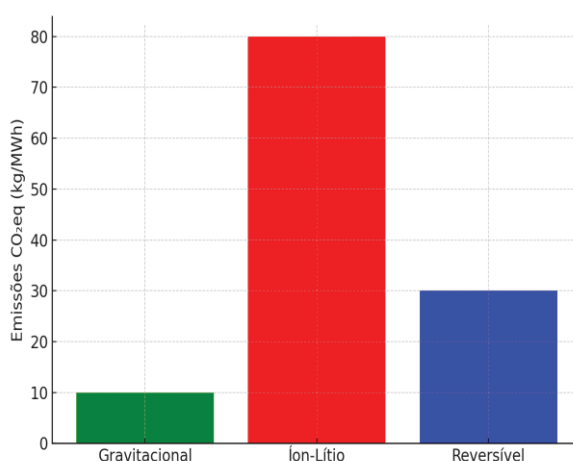
Do ponto de vista da pegada ecológica, as baterias gravitacionais apresentam vantagens significativas em comparação às baterias químicas de íons de lítio e às usinas reversíveis. Enquanto as químicas dependem de cadeias produtivas globais baseadas na extração intensiva de metais críticos como lítio, cobalto e níquel — cujas operações de mineração frequentemente resultam em degradação ambiental e problemas sociais —, os sistemas gravitacionais utilizam majoritariamente materiais comuns e recicláveis, como aço e concreto (H et al., 2020). Além disso, seu ciclo de vida estrutural ultrapassa 30 anos, reduzindo a necessidade de substituição frequente de componentes e diminuindo a geração de resíduos perigosos. Em comparação às usinas reversíveis, os projetos gravitacionais requerem menos intervenção em ecossistemas aquáticos, evitando o alagamento de grandes áreas e os consequentes impactos sobre biodiversidade e populações locais (IRENA, 2022).

Outro ponto relevante é o reaproveitamento de estruturas já existentes, que se mostra como uma vantagem estratégica da tecnologia gravitacional. Minas subterrâneas desativadas, silos de grãos e torres industriais podem ser convertidos

em sistemas de armazenamento, reduzindo custos iniciais de implantação e mitigando impactos ambientais associados à construção de novas infraestruturas. No caso brasileiro, e particularmente no Paraná, a existência de minas de carvão e calcário desativadas, além de estruturas industriais ociosas, representa uma oportunidade concreta para a criação de projetos-piloto com baixo CAPEX e elevada aceitação social (EPE, 2023).

A análise da economia circular também reforça o potencial sustentável das baterias gravitacionais. Ao contrário de sistemas químicos, cuja desmobilização gera resíduos tóxicos de difícil reaproveitamento, os sistemas gravitacionais podem ser quase integralmente reciclados ao fim de sua vida útil, outra vantagem ambiental não tão visível são as emissões de CO² por MW (Figura 4). Estruturas metálicas podem retornar às siderúrgicas, o concreto pode ser reaproveitado em obras civis e os sistemas mecânicos podem ser reconicionados. Essa circularidade fortalece os indicadores de sustentabilidade e reduz a pressão sobre cadeias produtivas intensivas em recursos naturais (Ellen Macarthur Foundation, 2019). Além disso, a inserção de sistemas gravitacionais pode estimular indústrias locais de construção civil, metalurgia e serviços de manutenção, fortalecendo economias regionais e reduzindo a dependência de insumos importados.

Figura 4 – EMISSOES DE CO² por MWh



FONTE: IRENA (2023)

Então, enquanto a produção e descarte de baterias de lítio impõem desafios ambientais significativos, como a contaminação de solos e águas por metais pesados, os sistemas gravitacionais se apresentam como uma solução de baixo risco ambiental.

Por fim, observamos que a integração da sustentabilidade como pilar central dessa tecnologia está alinhada às metas globais de transição energética e aos compromissos brasileiros no âmbito do Acordo de Paris. Ao proporcionar um modelo de armazenamento limpo, durável e circular, as baterias gravitacionais reforçam a conexão entre inovação tecnológica, segurança energética e proteção ambiental. Essa convergência não apenas fortalece o papel da tecnologia como solução de longo prazo, mas também a posiciona como uma alternativa estratégica em políticas públicas voltadas à descarbonização da matriz elétrica nacional (IEA, 2023).

2.5 Regulatória e Propostas de Diretrizes

A ausência de um marco regulatório específico para tecnologias de armazenamento de energia no Brasil constitui um dos principais entraves para a difusão das baterias gravitacionais e de outras soluções inovadoras. Atualmente, a legislação reconhece parcialmente o armazenamento em dispositivos híbridos (geração mais armazenamento), mas não contempla de forma explícita a remuneração de serviços ancilares ou a comercialização de energia armazenada de forma independente (ANEEL, 2022). A Lei nº 14.300/2022, que instituiu o marco da micro e minigeração distribuída, por exemplo, não inclui dispositivos claros sobre armazenamento, limitando-se à compensação de créditos de energia. Da mesma forma, o Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2032, publicado pela EPE, reconhece a importância crescente do armazenamento, mas ainda trata a questão de forma incipiente, sem propor metas ou mecanismos específicos para tecnologias não convencionais (EPE, 2023).

Assim, uma síntese crítica do marco atual revela lacunas importantes: ausência de classificação jurídica para sistemas de armazenamento independentes; falta de modelos de remuneração claros para serviços de estabilização de rede (controle de

frequência, reserva de capacidade, deslocamento de carga); incertezas quanto ao enquadramento tarifário de unidades de armazenamento conectadas à rede; e escassez de incentivos fiscais e financeiros direcionados a projetos-piloto. Essa ausência de diretrizes cria insegurança jurídica para investidores, limita o acesso a financiamentos de longo prazo e retarda a consolidação do armazenamento como elemento central da matriz elétrica nacional (MME, 2023).

Para superar isso, é necessário avançar em propostas de normatização específicas. Em primeiro lugar, a ANEEL poderia criar uma categoria regulatória própria para armazenamento de energia, distinguindo-o de geração e consumo. Isso permitiria definir regras claras para conexão à rede, cobrança de tarifas de uso e remuneração pelos serviços prestados. Além disso, a inclusão explícita do armazenamento no próximo ciclo do PDE (2033-2042) poderia estabelecer metas quantitativas para sua expansão, alinhadas aos compromissos climáticos do Brasil no âmbito do Acordo de Paris. Outra medida seria a criação de chamadas públicas de P&D reguladas pela ANEEL voltadas a projetos-piloto com tecnologias gravitacionais, estimulando consórcios entre universidades, empresas e governos locais.

Do ponto de vista das políticas públicas e incentivos, recomenda-se a criação de linhas de financiamento específicas para projetos de armazenamento sustentável, com prioridade para soluções de baixo impacto ambiental, como as baterias gravitacionais. Bancos públicos como BNDES e BRDE poderiam estruturar programas de crédito de longo prazo para tecnologias de demonstração, replicando modelos já aplicados em mobilidade elétrica e eficiência energética. Além disso, políticas estaduais, como as desenvolvidas no Paraná, poderiam oferecer incentivos fiscais (redução de ICMS sobre equipamentos e componentes recicláveis), apoio em licenciamento simplificado e facilitação de parcerias público-privadas (PPPs).

Outro caminho seria a criação de mecanismos de precificação de serviços, permitindo que projetos de armazenamento sejam remunerados não apenas pela energia armazenada, mas também pelo suporte sistêmico que oferecem à rede. Essa lógica já é adotada em países como Estados Unidos e Alemanha, onde o

armazenamento é considerado ativo essencial para a segurança energética (IEA, 2023). No Brasil, sua adoção representaria uma mudança estrutural, aproximando o setor elétrico de práticas internacionais e dando viabilidade econômica a projetos gravitacionais em múltiplas escalas.

A articulação entre os níveis federal, estadual e municipal será fundamental para o sucesso da regulamentação. Municípios podem funcionar como laboratórios de inovação regulatória, testando novos modelos tarifários e esquemas de comercialização de energia armazenada em projetos locais, enquanto o governo federal estabelece as diretrizes nacionais. Essa coordenação em múltiplas escalas pode acelerar a consolidação de um marco regulatório robusto e garantir que o Brasil acompanhe o ritmo internacional da transição energética.

2.6 Viabilidade Regional no Paraná

O estado do Paraná apresenta um conjunto de condições únicas que o qualificam como território estratégico para a implementação de sistemas de armazenamento gravitacional. A diversidade topográfica, com destaque para planaltos e áreas de declividade, permite o aproveitamento de minas desativadas, pedreiras e estruturas industriais ociosas como locais para instalação de torres ou poços verticais, reduzindo custos de implantação e impacto ambiental (Costa et al., 2021). Além disso, a matriz energética estadual é altamente diversificada, combinando hidrelétricas de pequeno e médio porte, geração fotovoltaica distribuída em rápido crescimento e polos industriais de grande consumo energético. (ANEEL, 2024; IEA, 2022).

Na região Oeste, especialmente em municípios como Cascavel, Toledo e Medianeira, a forte presença da agroindústria associada à elevada penetração de energia fotovoltaica distribuída gera picos de injeção diurna e gargalos em redes rurais. A utilização de sistemas gravitacionais na faixa de 5 a 25 MW poderia atuar como “*buffer*” para absorver excedentes solares ao meio-dia, estabilizar a tensão em alimentadores e garantir confiabilidade para processos críticos como refrigeração, processamento de grãos e irrigação (EPE, 2023; Gravitricity, 2022). Já nos Campos

Gerais, em cidades como Ponta Grossa, Guarapuava e Ortigueira, setores de papel e celulose, madeira e logística apresentam demanda contínua e custos elevados com demanda de ponta. Nesse ponto, arranjos gravitacionais de 25 MW podem contribuir com *peak-shaving* (reduzir os picos de consumo de energia em determinado) no período vespertino, reduzir *curtailment* (limitação na geração de energia, mesmo com capacidade disponível) de usinas renováveis próximas e otimizar custos de consumidores livres (ACL), além de oferecer suporte reativo às subestações regionais (IEA,2022;Bloombergnef,2023).

Na Região Metropolitana de Curitiba (RMC), a concentração de indústrias automotivas, químicas e de tecnologia da informação, incluindo *data centers* (centrais de dados) impõe a necessidade de fornecimento altamente confiável e resiliente. A instalação de sistemas acima de 50 MW em áreas industriais desativadas poderia garantir serviços de maior complexidade, como reserva girante sintética, *black start* (reinício de um sistema elétrico sem dependência de fontes externas) de cargas críticas e arbitragem energética em bases diárias ou semanais, reforçando a segurança elétrica metropolitana (Energy Vault, 2022). Esse modelo se alinha às tendências de cidades inteligentes (combinando com o título dado a Curitiba) e à crescente demanda por soluções de flexibilidade energética em ambientes urbanos densos (IRENA, 2022; COPEL, 2023). Além disso, a modularidade desses sistemas facilita a adaptação a diferentes espaços, sem exigir grandes áreas livres.

Outro diferencial relevante é a governança e a disponibilidade de instrumentos financeiros no estado. A articulação entre a Companhia Paranaense de Energia (COPEL), universidades, municípios e programas de P&D (Pesquisa e desenvolvimento) da ANEEL pode acelerar a validação de pilotos modulares, encurtando o ciclo entre pesquisa, licenciamento e comercialização (COPEL, 2023; ANEEL, 2022). O apoio de linhas de crédito e de instrumentos de crédito de carbono oferece condições favoráveis para o financiamento de plantas demonstrativas (BRDE, 2022). Ao mesmo tempo, o Paraná possui políticas estaduais pró-energia limpa, como o programa Paraná Energia Sustentável, que reforçam o compromisso institucional com a inovação. Essa combinação de condições geográficas, industriais e políticas

coloca o estado em posição de destaque como polo pioneiro da tecnologia no Brasil, com potencial de replicação nacional (EPE, 2023; IRENA, 2022).

3. Conclusão

Diante dos avanços técnicos e do cenário energético brasileiro, conclui-se que as baterias gravitacionais despontam como uma solução promissora para o armazenamento de energia, especialmente frente à crescente presença de fontes renováveis intermitentes. Com características como durabilidade, baixo impacto ambiental e desempenho compatível com as exigências do sistema elétrico, essa tecnologia se consolida como alternativa complementar — e, em certos contextos, competitiva — às opções convencionais.

No campo econômico, a nível Brasil, verificou-se que os custos de implantação e operação variam de acordo com a escala, mas tendem a ser compensados pelo prolongado tempo de vida útil e pelos benefícios indiretos, como a redução da dependência de termelétricas em períodos críticos e a diminuição da exposição a cadeias produtivas internacionais. Embora os valores de CAPEX ainda sejam significativos, o potencial de reaproveitamento de estruturas ociosas, como minas desativadas, apresenta-se como diferencial relevante para o contexto brasileiro, reduzindo barreiras de entrada.

Sob a ótica regulatória, ficou evidente a necessidade de avanços normativos. A ausência de regras claras para o enquadramento e a remuneração do armazenamento limita a viabilidade de projetos em grande escala. A superação dessas barreiras passa pela atualização de legislações, como a Lei nº 14.300/2022, e pela inclusão dos sistemas de armazenamento em instrumentos de planejamento, leilões e programas de incentivo.

Falando na viabilidade no estado, o Paraná se destaca como um dos estados mais estratégicos do Brasil para a implementação de projetos-piloto de baterias gravitacionais, graças às suas condições técnicas, financeiras e ambientais favoráveis, além de uma economia diversificada e um ambiente institucional voltado à

inovação. Com alta demanda energética e capacidade de oferecer subsídios replicáveis em outras regiões, o estado não apenas valida a aplicabilidade prática do estudo, como também se posiciona como referência nacional na formulação de políticas públicas e estratégias voltadas à transição energética.

As baterias gravitacionais têm potencial para fortalecer a transição energética no Brasil, oferecendo maior estabilidade, segurança e sustentabilidade à rede elétrica, especialmente se forem apoiadas por políticas públicas claras e investimentos coordenados. Embora o estudo destaque sua relevância estratégica, ele reconhece limitações metodológicas, como o uso de modelos simplificados e estimativas econômicas genéricas, que ainda não permitem validar plenamente a tecnologia em condições brasileiras. Para superar essas barreiras, recomenda-se a realização de projetos-piloto em diferentes regiões, além de pesquisas voltadas à integração com fontes renováveis e aplicações em microrredes e cidades inteligentes. A construção de parcerias entre universidades, setor produtivo e governo será fundamental para consolidar um ecossistema de inovação capaz de posicionar o Brasil como referência latino-americana em armazenamento gravitacional.

REFERÊNCIAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Banco de Informações de Geração (BIG). Brasília: ANEEL, 2024. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/>. Acesso em: 27 ago. 2025.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Nota Técnica nº 040/2022-SRD. Brasília: ANEEL, 2022.

BANCO MUNDIAL. Global Energy Storage Market Outlook. Washington: World Bank, 2020. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/topic/energy/overview>. Acesso em: 27 ago. 2025.

BLOOMBERGNEF. Energy Storage Market Outlook 2023. Londres: Bloomberg, 2023. Disponível em: <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/2h-2023-energy-storage-market-outlook/>. Acesso em: 27 ago. 2025.

COSTA, L. et al. Potenciais de reaproveitamento de minas desativadas para energias renováveis. *Revista Brasileira de Energia*, v. 27, n. 3, p. 45–60, 2021.

COPEL – Companhia Paranaense de Energia. Relatórios de Sustentabilidade. Curitiba: COPEL, 2023. Disponível em: <https://ri.copel.com/sustentabilidade/relatorios-anuais-e-socioambientais/>. Acesso em: 27 ago. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. The Circular Economy in Energy Systems. 2019. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/>. Acesso em: 27 ago. 2025.

ENERGY VAULT. Gravity-based energy storage technology. Lausanne: Energy Vault SA, 2022. Disponível em: <https://www.energyvault.com/>. Acesso em: 27 ago. 2025.

ENERGY VAULT. Technical White Paper. Lausanne: Energy Vault SA, 2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Armazenamento de Energia no Brasil: Oportunidades e Desafios. Brasília: MME, 2022.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2032. Rio de Janeiro: EPE/MME, 2023.

FIEP – Federação das Indústrias do Estado do Paraná. Inovação Industrial e Sustentabilidade no Paraná. Curitiba: FIEP, 2024.

GRAVITRICITY. Technology Overview. Edinburgh: Gravitricity Ltd., 2022. Disponível em: <https://gravitricity.com/>. Acesso em: 27 ago. 2025.

HUNT, D. et al. Advanced Energy Storage Solutions. *Energy Policy*, 2020.

IEA – International Energy Agency. Energy Storage: Tracking Report 2022. Paris: IEA, 2022.

IEA – International Energy Agency. Energy Storage Report 2023. Paris: IEA, 2023.

IEA – International Energy Agency. World Energy Outlook 2022. Paris: IEA, 2022.

IEA – International Energy Agency. World Energy Outlook 2023. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. Acesso em: 27 ago. 2025.

IRENA – International Renewable Energy Agency. Electricity Storage and

Renewables: Costs and Markets to 2030. Abu Dhabi: IRENA, 2020.

IRENA – International Renewable Energy Agency. Global Energy Storage Market and Trends. Abu Dhabi: IRENA, 2022.

IRENA – International Renewable Energy Agency. Innovation Landscape for a Renewable-Powered Future: Solutions to Integrate Variable Renewables. Abu Dhabi: IRENA, 2023.

IRENA – International Renewable Energy Agency. World Energy Transitions Outlook 2023. Abu Dhabi: IRENA, 2023.

KOOMEY, J.; BROWN, R. Comparative Analysis of Energy Storage Costs. Energy Economics, 2022.

LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Relatórios técnicos em energia e sustentabilidade. Curitiba: LACTEC, 2022.

LEWIS, J. et al. Mechanical Gravity Storage Systems: State-of-the-Art and Outlook. Journal of Energy Storage, v. 52, p. 104–118, 2022.

LEWIS, M. et al. Gravity Energy Storage Systems: Technical and Economic Review. Energy Storage Journal, v. 14, n. 3, p. 223–239, 2022.

MALHOTRA, A. et al. Life Cycle Analysis of Gravitational and Lithium-Ion Storage. Sustainable Energy Journal, v. 18, n. 2, p. 45–61, 2023.

MALHOTRA, R. et al. Design and Evaluation of Gravitational Storage in Urban Areas. Journal of Renewable Energy Engineering, v. 9, n. 1, p. 51–67, 2023.

MARTINS, F.; PEREIRA, G. Aplicações e perspectivas das baterias gravitacionais. Revista Brasileira de Energia, 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Balanço Energético Nacional 2023. Brasília: MME, 2023.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Diretrizes Estratégicas para o Setor Elétrico Brasileiro. Brasília: MME, 2023.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Relatórios de Operação e Planejamento Energético. Brasília: ONS, 2023.

PARANÁ. Governo do Estado. Atlas de Geração Distribuída e Inovação Energética. Curitiba: Governo do Paraná, 2024.

PARANÁ. Governo do Estado. Programa Paraná Energia Sustentável. Curitiba:

Governo do Paraná, 2022.

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Relatório Técnico-Científico em Energias Renováveis. Curitiba: UTFPR, 2024.

ZHU, X. et al. Gravitational Energy Storage: Technology Review. Journal of Energy Storage, 2021.