

Diretrizes metodológicas para avaliação preliminar de modernização e repotencialização de usinas hidrelétricas no Brasil

Jorge Eduardo Teles de Azevedo¹, Ivan Felipe da Silva Santos², Dieimys Santos Ribeiro³, Carlos Barreira Martinez⁴

RESUMO: Este artigo apresenta uma proposta de sistematização metodológica para a avaliação preliminar de projetos de modernização e repotencialização de usinas hidrelétricas no Brasil. A discussão parte do reconhecimento de que a geração hidráulica continua desempenhando papel estruturante no sistema elétrico nacional, ao mesmo tempo em que a expansão por novos empreendimentos enfrenta restrições ambientais, regulatórias e econômicas crescentes. Nesse contexto, intervenções em ativos já existentes surgem como alternativa tecnicamente consistente para elevar eficiência, confiabilidade e, em determinados casos, capacidade instalada. O trabalho sintetiza conceitos e critérios. Propõe-se uma abordagem integrada, de caráter qualitativo-quantitativo, que articula diagnóstico do ativo, análise técnica do conjunto turbina-gerador, avaliação econômico-financeira e apreciação ambiental-regulatória. Como resultado, o artigo consolida um roteiro de apoio à tomada de decisão aplicável à fase inicial de estudos de *retrofit*, modernização e repotencialização, com ênfase na coerência entre ganhos hidráulicos, desempenho eletromecânico, restrições operativas e viabilidade econômica.

ABSTRACT: This paper presents a methodological framework for the preliminary assessment of modernization and repowering projects in hydropower plants in Brazil. The discussion starts from the recognition that hydropower continues to play a structuring role in the national electricity system, while the expansion through new projects faces increasing environmental, regulatory, and economic constraints. In this context, interventions in existing assets emerge as a technically consistent alternative to increase efficiency, reliability, and, in certain cases, installed capacity. The work synthesizes concepts and criteria. A qualitative-quantitative integrated approach is proposed, articulating asset diagnosis, technical analysis of the turbine-generator unit, economic-financial evaluation, and environmental-regulatory appraisal. As a result, the paper consolidates a decision-support roadmap applicable to the initial phase of retrofit, modernization, and repowering studies, with an emphasis on the coherence between hydraulic gains, electromechanical performance, operational constraints, and economic feasibility.

Palavras-chave: usinas hidrelétricas; modernização; repotencialização; eficiência energética; turbinas hidráulicas; *retrofit*.

Keywords: hydropower plants; modernization; repowering; energy efficiency; hydraulic turbines; retrofit.

1 MPEH / UNIFEI, Av. BPS, 1303. Itajubá / MG. e-mail: jetaazevedo@gmail.com.

2 PPG-EEL / UNIFEI & MPEH / UNIFEI, Av. BPS, 1303. Itajubá / MG. e-mail: dieimys@unifei.edu.br.

3 MPEH / UNIFEI, Av. BPS, 1303. Itajubá / MG. e-mail: ivanfelipe@unifei.edu.br.

4 PPG-EME / MPEH / UNIFEI & PPGMEC / UFMG. Av. BPS, 1303. Itajubá / MG. e-mail: cmartinez@unifei.edu.br.

INTRODUÇÃO

A geração hidrelétrica permanece como um dos principais pilares do sistema elétrico brasileiro. Mesmo com a expansão acelerada das fontes eólica e solar nas últimas décadas, as usinas hidrelétricas continuam exercendo papel decisivo na produção de energia e na prestação de serviços operacionais essenciais ao Sistema Interligado Nacional (SIN), como controle de frequência, suporte de tensão, resposta rápida à variação de carga e compensação da variabilidade das fontes intermitentes. Essa centralidade está associada tanto à disponibilidade hídrica historicamente aproveitada no país quanto à flexibilidade operativa das unidades hidráulicas e, em muitos casos, à presença de reservatórios de acumulação. No caso brasileiro, os dados setoriais confirmam a permanência da fonte hidráulica como principal componente da matriz elétrica nacional, mesmo em um contexto de crescente diversificação (EPE, 2025).

Ao mesmo tempo, a expansão da oferta por meio de novos grandes aproveitamentos tem se tornado progressivamente mais complexa. Restrições ambientais, exigências regulatórias mais rigorosas, custos elevados de implantação e limitações logísticas, especialmente em áreas ambientalmente sensíveis, reduziram o espaço relativo para novos empreendimentos com reservatórios expressivos. Nesse cenário, ganha relevância o melhor aproveitamento do parque gerador existente, por meio da substituição, reconfiguração ou atualização tecnológica de componentes principais e auxiliares. Assim, diante da maior complexidade técnica, institucional e econômica associada à implantação de novos empreendimentos, intervenções em ativos já existentes passam a representar alternativa coerente para ampliar a oferta com menor prazo de implantação e impactos mitigados (EPE, 2025; EPE, 2020).

Essa discussão se torna ainda mais importante no contexto brasileiro, onde grande parte do parque hidrelétrico opera há várias décadas. Muitas unidades geradoras foram concebidas com critérios, materiais e recursos de projeto compatíveis com o estado da arte das décadas de 1950, 1960 e 1970. Desde então, ocorreram avanços significativos em turbomáquinas, materiais, modelagem numérica, isolamento elétrico, automação, proteção e sistemas de supervisão. Nesse contexto, a permanência de ativos antigos em operação abre espaço para intervenções capazes de recuperar rendimento, ampliar confiabilidade, prolongar a vida útil e, em situações específicas, elevar a capacidade instalada sem a necessidade de novas estruturas civis de grande porte. Mosonyi (1991) observa que muitas centrais hidrelétricas do século XX refletem limitações tecnológicas do período em que foram projetadas, enquanto Gordon *et al.*, (2004) apontam que o aproveitamento de estruturas hidráulicas existentes pode constituir alternativa eficiente para ampliar geração em sistemas maduros. Além disso, parcela significativa do parque hidrelétrico brasileiro já ultrapassa 35 anos de operação, o que reforça a pertinência de estratégias de modernização e repotencialização (EPE, 2008; EPE, 2019).

Nesse contexto, o presente artigo tem por objetivo apresentar, em formato sintético e aplicado, diretrizes metodológicas para a avaliação preliminar de projetos de modernização e repotencialização de usinas hidrelétricas. O foco recai sobre a organização de uma sequência analítica coerente, capaz de apoiar decisões técnicas e gerenciais na fase inicial dos estudos, integrando critérios hidráulicos, mecânicos, elétricos, econômicos e ambientais. O argumento central é que a avaliação de intervenções em usinas existentes deve ser conduzida de forma

integrada, articulando variáveis técnicas, econômico-financeiras, regulatórias e operacionais, em vez de tratá-las de maneira isolada.

MODERNIZAÇÃO E REPOTENCIALIZAÇÃO: CONCEITOS E COMPLEMENTARIDADES

Embora frequentemente mencionadas em conjunto, modernização e repotencialização não são sinônimos. Em termos gerais, a modernização está associada à atualização tecnológica, à substituição de componentes degradados ou obsoletos e à adequação funcional dos sistemas às exigências contemporâneas de operação, proteção e controle. Seu foco principal recai sobre o aumento da confiabilidade, da disponibilidade e da segurança operacional, bem como sobre a redução de falhas e a extensão da vida útil dos ativos. Nessa perspectiva, modernizar não significa apenas substituir equipamentos, mas recuperar desempenho operacional e adaptar a usina a novos requisitos de supervisão, automação e controle (EPE, 2019).

A repotencialização, por sua vez, está voltada ao aumento do desempenho do aproveitamento, seja pela elevação da potência instalada, seja pelo incremento da eficiência energética do conjunto turbina-gerador em faixas operativas relevantes. Na prática, pode envolver substituição integral ou parcial de rotores, reprojeto hidráulico, redimensionamento de geradores, ajustes em sistemas de excitação e governadores, além de adequações mecânicas e elétricas necessárias para suportar novos níveis de potência ou maior flexibilidade operativa. Esse tipo de intervenção permite ampliar capacidade e eficiência sem exigir expansão expressiva da infraestrutura hidráulica existente, o que ajuda a explicar sua relevância em sistemas hidrelétricos maduros. Essa interpretação encontra suporte em Gordon *et al.*, (2004), ao indicar que o aproveitamento de estruturas hidráulicas existentes pode representar alternativa eficiente para ampliar a geração, o trabalho de Mosonyi (1991), destaca que muitas centrais do século XX foram concebidas sob limitações tecnológicas hoje superáveis por meio da atualização de componentes eletromecânicos.

Na prática, porém, modernização e repotencialização tendem a ocorrer de forma articulada. A modernização frequentemente cria a base técnica e funcional necessária para intervenções mais ambiciosas de repotencialização, enquanto a repotencialização, por sua vez, costuma exigir sistemas de controle, supervisão, proteção e automação compatíveis com novos patamares de desempenho. Por isso, uma avaliação preliminar consistente deve tratar essas duas frentes como dimensões complementares de uma mesma estratégia de valorização do ativo hidrelétrico.

Sob essa ótica, a extensão da vida útil e a melhoria do desempenho, precisam ser compreendidas no âmbito de uma política integrada de gestão de ativos, que combine análise de risco, custos de ciclo de vida, indicadores de desempenho e sustentabilidade (EPE, 2019). Em termos estratégicos, a integração entre modernização e repotencialização contribui para prolongar a vida útil das unidades, reduzir custos operacionais, aumentar a produtividade e ampliar a aderência do parque hidrelétrico às exigências de flexibilidade impostas pela diversificação da matriz elétrica.

No contexto brasileiro, essa discussão assume importância ainda maior. Em um sistema no qual a geração hidráulica continua exercendo papel estruturante, mesmo com a expansão das energias eólica e solar, a recuperação de desempenho de ativos existentes pode ampliar a energia disponível,

e elevar a confiabilidade e reforçar a capacidade de resposta do sistema sem reproduzir a complexidade associada à implantação de novos grandes aproveitamentos (EPE, 2025; EPE, 2020). Além disso, parte significativa do parque hidrelétrico nacional já ultrapassou três ou quatro décadas de operação contínua, o que torna essas intervenções particularmente pertinentes no cenário atual (EPE, 2019).

Em termos práticos, isso significa que a decisão de intervir ou não em um ativo hidrelétrico deve ir além da simples reposição de equipamentos. Ela precisa incorporar a análise do ganho energético potencial, da confiabilidade sistêmica e da geração de valor ao longo do tempo, articulando desempenho técnico, restrições operativas e viabilidade econômico-financeira (Paish, 2002; EPE, 2020; EPE, 2019).

ABORDAGEM METODOLÓGICA PROPOSTA

A avaliação preliminar de um projeto de modernização ou repotencialização não deve se limitar ao ganho nominal de potência. O valor efetivo da intervenção resulta da interação entre variáveis hidráulicas, mecânicas, elétricas, operativas e econômicas, além do enquadramento ambiental e regulatório do aproveitamento. Assim, a abordagem metodológica adotada combina revisão bibliográfica, análise documental, consulta a bases setoriais e interpretação técnico-operacional do ativo. Essa perspectiva está alinhada à literatura que trata a modernização de usinas hidrelétricas como problema multidimensional, e não como simples substituição de componentes (EPE, 2019; Gordon et al., 2004).

O ponto de partida da metodologia é o diagnóstico do empreendimento. Nessa etapa, levantam-se histórico de operação, idade das unidades, falhas registradas, intervenções anteriores, desempenho observado, limitações construtivas, condições civis e restrições operativas. O objetivo é verificar se o ativo apresenta apenas obsolescência tecnológica e perda de eficiência ou se há condicionantes mais amplas capazes de limitar intervenções futuras. Essa leitura inicial orienta o escopo da análise e a seleção de alternativas promissoras, aproximando-se da visão de Mosonyi (1991), para quem muitas usinas antigas carregam limitações ligadas ao contexto tecnológico em que foram concebidas.

A etapa seguinte corresponde à análise técnica do conjunto turbina-gerador e de seus sistemas auxiliares. Busca-se identificar componentes com maiores perdas de rendimento, potencial de substituição com melhor custo-benefício e restrições físicas permanentes do aproveitamento. Devem ser avaliados parâmetros hidráulicos, curvas de rendimento, queda disponível, canal de fuga, regime de operação, limites de cavitação, condições elétricas do gerador e capacidade dos sistemas de controle. Essa abordagem é compatível com Gordon et al. (2004), que interpretam o desempenho hidrelétrico como resultado da interação entre circuitos hidráulicos, equipamentos eletromecânicos e condições reais de operação.

Superada essa triagem técnica, a metodologia requer uma avaliação econômico-financeira preliminar. Nessa fase, não se pretende construir um modelo financeiro complexo, mas estimar se os ganhos projetados apresentam plausibilidade econômica diante dos custos de investimento, do tempo de parada, da energia não gerada durante a intervenção, do custo de capital e do ambiente

de comercialização da energia. Trata-se de uma etapa decisiva, pois um ganho técnico aparente pode não se converter em valor econômico caso o benefício energético efetivo seja reduzido ou o investimento financeiro necessário se mostre desproporcional. Nessa perspectiva, os estudos EPE (2019) e IEA (2021) ressaltam a importância dessa análise para verificar a atratividade do empreendimento e orientar a alocação racional de recursos em um setor intensivo em capital e marcado por longos períodos de amortização.

Por fim, a apreciação ambiental e regulatória funciona como um filtro de viabilidade institucional. Mesmo em projetos apoiados em infraestrutura já implantada, podem surgir exigências relacionadas ao licenciamento, a alterações nas condições operativas, a impactos hidráulicos a jusante, a interfaces com a segurança de barragens e ao enquadramento regulatório de eventual aumento de capacidade. A incorporação prévia dessas condicionantes é fundamental para evitar a superestimação da viabilidade do projeto. Assim, a metodologia proposta não se limita a verificar se a intervenção é tecnicamente possível, mas procura responder se ela também é economicamente justificável, ambientalmente admissível e institucionalmente exequível.

A Figura 1 sintetiza essa sequência lógica de análise ao organizar o processo em quatro blocos principais; I - diagnóstico do empreendimento, II - análise técnica, III - avaliação econômico-financeira e IV - análise ambiental e regulatória. Convergindo para uma etapa final de síntese e verificação de viabilidade. Essa representação reforça que a decisão não deve se apoiar em um único critério, como o ganho nominal de potência, mas na integração entre histórico operacional, desempenho do conjunto turbina-gerador, plausibilidade econômica da intervenção e condicionantes institucionais do aproveitamento. Dessa forma, a abordagem metodológica assume caráter sistêmico e se consolida como instrumento de apoio à triagem inicial e à tomada de decisão.

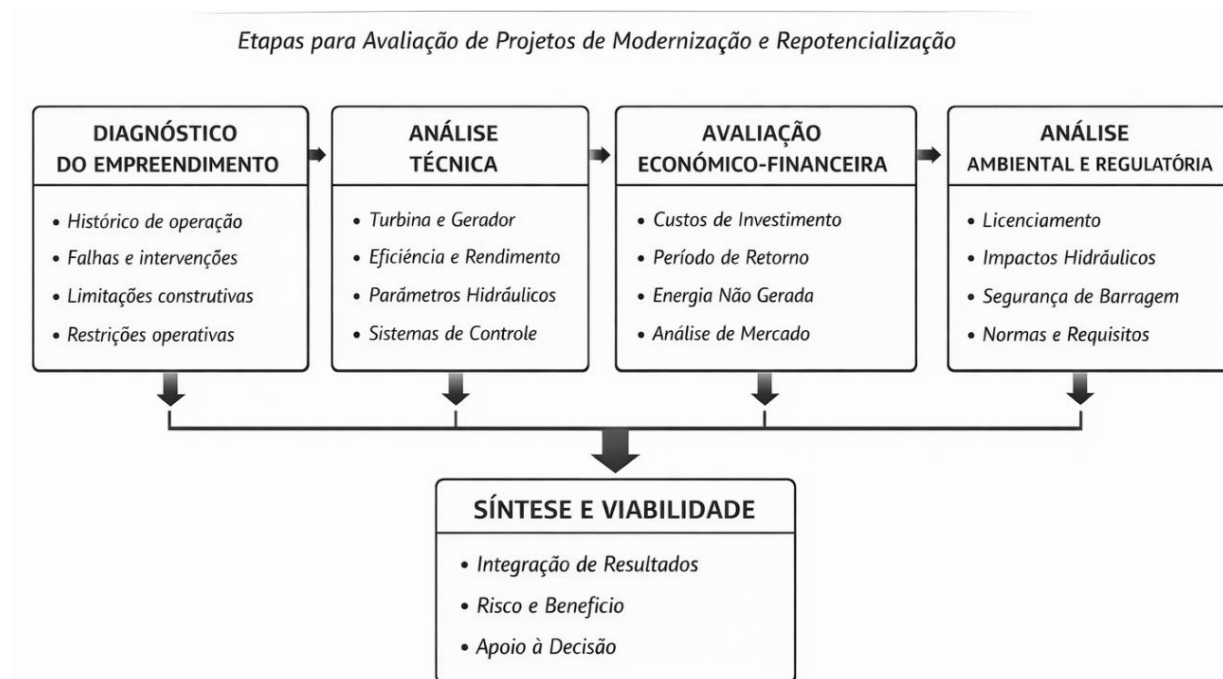


Figura 1 – Abordagem metodológica proposta para a avaliação preliminar de projetos de modernização e repotencialização de usinas hidrelétricas

DISCUSSÃO

A principal contribuição da abordagem proposta está em evitar interpretações simplificadas do problema. Em empreendimentos hidrelétricos maduros, o aumento de desempenho não decorre automaticamente da substituição de um componente isolado. Um ganho hidráulico localizado, por exemplo, pode ser parcialmente neutralizado por restrições no circuito de adução, limitações do canal de fuga, perdas no gerador, indisponibilidade prolongada durante a intervenção ou mesmo por um regime real de operação incapaz de converter potência nominal adicional em geração efetivamente útil ao longo do tempo. Por essa razão, a avaliação de projetos dessa natureza deve considerar o aproveitamento como um sistema integrado, no qual desempenho hidráulico, comportamento eletromecânico, condições operativas e resposta econômica interagem de forma contínua (Gordon *et al.*, 2004; EPE, 2019).

Sob essa perspectiva, a análise integrada adquire valor estratégico porque permite comparar, com maior realismo, projetos que prometem ganhos nominais semelhantes, mas apresentam perfis bastante distintos de risco, custo e retorno. Ela também contribui para diferenciar intervenções cujo benefício principal está na confiabilidade, na redução de falhas e na extensão da vida útil daquelas em que o aumento de potência e energia justifica investimentos mais profundos. Em outras palavras, a metodologia preliminar não substitui os estudos executivos, mas melhora a qualidade da triagem inicial e reduz o risco de decisões baseadas apenas em expectativas tecnológicas.

No contexto brasileiro, essa sistematização se torna ainda mais relevante. A combinação entre o envelhecimento de parcela importante do parque gerador, o crescimento da participação de fontes variáveis e a maior exigência por flexibilidade operativa transforma a modernização e a repotencialização em temas centrais para o planejamento setorial. O aproveitamento mais eficiente de ativos existentes pode elevar a produtividade da infraestrutura já implantada, reduzir a necessidade de novas obras civis de grande porte e contribuir para a resiliência do sistema elétrico com menor exposição socioambiental. Além disso, em um sistema no qual a geração hidráulica continua exercendo papel estruturante, mesmo com a expansão das energias eólica e solar, a melhoria de desempenho das usinas existentes ganha relevância adicional, pois amplia a capacidade de resposta e o suporte à operação integrada do sistema (Paish, 2002; EPE, 2020).

Outro aspecto importante é que a organização do processo decisório em etapas claras favorece a governança dos projetos. Empreendedores, operadores, agentes reguladores e equipes técnicas passam a dispor de uma linguagem comum para discutir escopo, critérios de análise, condicionantes e limites reais de viabilidade. Isso é particularmente importante porque projetos de retrofit, modernização e repotencialização envolvem, simultaneamente, engenharia, regulação, finanças e gestão de ativos. Assim, uma metodologia preliminar bem estruturada não apenas melhora a seleção de alternativas, mas também aumenta a transparência do processo decisório e a consistência técnica das escolhas adotadas, em sintonia com as diretrizes recentes de modernização do setor elétrico e com a necessidade de maximizar o aproveitamento do parque gerador existente (MME, 2019; EPE, 2019).

CONCLUSÕES

A análise desenvolvida indica que a modernização e a repotencialização de usinas hidrelétricas constituem alternativas tecnicamente relevantes para recuperar desempenho, ampliar a confiabilidade e, em situações selecionadas, elevar a capacidade instalada de empreendimentos já em operação. Em um contexto marcado pela diversificação da matriz elétrica, pela maior participação de fontes variáveis e pelas restrições crescentes à implantação de novos grandes aproveitamentos, o uso mais eficiente da infraestrutura existente tende a assumir importância estratégica no setor elétrico brasileiro. Nessa perspectiva, a otimização de ativos amortizados e tecnologicamente defasados pode gerar ganhos energéticos, operacionais e econômicos com menor exposição a riscos socioambientais quando comparada à expansão por novos empreendimentos.

O artigo também evidencia que a avaliação preliminar desses projetos deve ser necessariamente integrada. Ganhos hidráulicos, desempenho eletromecânico, custos de investimento, condições reais de operação e condicionantes ambientais e regulatórias precisam ser analisados de forma articulada, sob pena de superestimar benefícios ou subavaliar riscos de implantação. Nesse sentido, a metodologia sintetizada oferece um roteiro aplicável à fase inicial dos estudos, funcionando como instrumento de triagem técnica e de apoio à tomada de decisão, sem pretender substituir os estudos executivos e as análises detalhadas de engenharia.

Como desdobramento, recomenda-se a aplicação da estrutura proposta em estudos de caso com dados reais de operação, bem como o aprofundamento de análises de sensibilidade, risco e viabilidade para diferentes arranjos de modernização e repotencialização. Esse avanço pode contribuir para calibrar com maior precisão os limites de viabilidade técnica e econômico-financeira e para consolidar uma base metodológica mais robusta de planejamento e gestão de ativos hidrelétricos, em consonância com a necessidade de maior eficiência, flexibilidade operativa e aproveitamento racional do parque gerador existente.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Mestrado Profissional em Engenharia Hídrica (MPEH), ao Instituto de Engenharia Mecânica (IEM) ambos da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), ao Laboratório Thermo-Hydroelectro (LTHE/UNIFEI), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao CNPq processo 305059/2022-0 e aos demais órgãos e colaboradores.

REFERÊNCIAS

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Repotenciação e modernização de usinas hidrelétricas: ganhos de eficiência, energia e capacidade instalada**. Rio de Janeiro: EPE, 2019. Disponível em: portal da EPE. Acesso em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-432/EPE-DEE-088_2019_Repotencia%C3%A7%C3%A3o%20de%20Usinas%20Hidrel%C3%A9tricas.pdf 15 abr. 2026.



Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica
Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos
24 a 28 de agosto de 2026 | Niterói - RJ

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2025**. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025> . Acesso em: 01 jun. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050 / Ministério de Minas e Energia**. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050> . Acesso em: 10 jul. 2025.

GORDON, John L.; PENMAN, Hugh; RASDORF, William. **Hydropower Engineering Handbook**. New York: CRC Press, 2004.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Grupo de Trabalho Modernização do Setor Elétrico: relatório do GT Modernização do Setor Elétrico, Portaria MME nº 187**, de 4 de abril de 2019. Brasília: MME, out. 2019. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/modernizacao-do-setor-eletrico-relatorio-final-do-gt-foi-apresentado-nesta-terca-feira-29-no-2/document_0_4886911458239397.pdf . Acesso em: 19 fev. 2026.

MOSONYI, Emil. **Water Power Development: Low Head Power Plants**. Budapest: Akadémiai Kiadó, 1991.

PAISH, Oliver. **Small hydro power: technology and current status**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 6, n. 6, p. 537–556, 2002.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Hydropower special market report: analysis and forecast to 2030**. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org>. Acesso em: 03 set. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Considerações sobre Repotenciação e Modernização de Usinas Hidrelétricas**. Nota Técnica DEN 03/08. Rio de Janeiro: EPE, 2008.