

ESTUDO DO IMPACTO DA TRANSPOSIÇÃO DE VAZÕES E DO USO DE VAZÕES DIÁRIAS SOBRE O POTENCIAL ENERGÉTICO E ECONÔMICO DE PCHS

Lucas Rodrigues Chiaradia, Ivan Felipe Silva dos Santos, Hellen Ohana Silva Almeida
Candido e Geraldo Lúcio Tiago Filho

d2020006435@unifei.edu.br, ivanfelipe@unifei.edu.br, hellen.ohana.candido@unifei.edu.br e gliagofilho@gmail.com

INTRODUÇÃO

No contexto brasileiro, a energia elétrica - fundamental no desenvolvimento econômico e social, se acentua devido à elevada participação da fonte hidrelétrica na matriz energética nacional. A hidreletricidade, classificada como uma fonte renovável de energia, destaca-se por apresentar alta eficiência na conversão de energia potencial da água em energia elétrica, baixa emissão de gases de efeito estufa e longa vida útil das instalações, além de operar com custos relativamente baixos após sua implantação (SANTOS et al., 2021).

De acordo com dados do Ministério de Minas e Energia (MME, 2024), aproximadamente 57% da eletricidade gerada no Brasil em 2023 foi proveniente de usinas hidrelétricas, como mostrado pela Figura 1. Esse número evidencia a forte dependência do país em relação à disponibilidade hídrica para fins de geração energética.

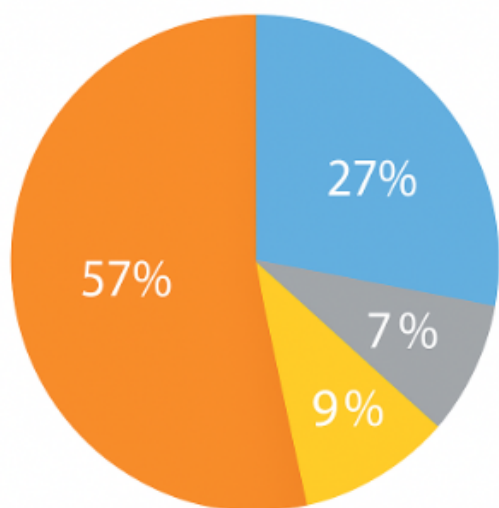


Figura 1 - Contribuição das Fontes Renováveis na Matriz Energética em 2023. Fonte: MME, 2024.

Essa expressiva participação da energia hidráulica na matriz energética se justifica pelas

características hidrográficas do território nacional. O Brasil é cortado por diversas bacias hidrográficas de grande porte, como as dos rios Paraná, São Francisco, Tocantins-Araguaia e Amazonas, que possuem elevada disponibilidade hídrica e topografia favorável para o aproveitamento do desnível natural, resultando em um potencial estimado de 172 GW, dos quais mais de 60 % já foram aproveitados (EPE, 2024). Ao longo das últimas décadas, o país investiu maciçamente em infraestrutura de geração hidrelétrica, consolidando-se como uma das maiores potências mundiais no setor, ocupando o terceiro lugar no ranking global de potencial hidráulico, atrás apenas da Rússia e da China (AMBIENTE BRASIL, 2024).

No entanto, a forte dependência desse recurso impõe uma série de desafios, principalmente diante da variabilidade climática e da ocorrência de eventos extremos, como estiagens prolongadas ou enchentes, que impactam diretamente a operação dos reservatórios e a regularidade do fornecimento de energia. Em 2024, por exemplo, reservatórios estratégicos do Sudeste ficaram abaixo de 50 % da capacidade, como Furnas, que atingiu apenas 35 % (TRATAMENTO DE ÁGUA, 2024). Nesse contexto, a hidrologia emerge como ciência essencial para garantir a segurança e a eficiência dos empreendimentos hidrelétricos, apoiando o planejamento da operação e a gestão integrada dos recursos hídricos (MME, 2024).

A hidrologia estuda o ciclo da água, suas interações com o ambiente físico e suas manifestações em diferentes escalas temporais e espaciais. No âmbito das usinas hidrelétricas, a compreensão dos processos hidrológicos – como precipitação, infiltração, escoamento superficial, evapotranspiração e armazenamento – é fundamental para o planejamento da operação dos reservatórios, a previsão de vazões, o despacho de energia e o controle de cheias (TUCCI, 2008).

Em face do contexto acima apresentado, este trabalho avalia a viabilidade hidrológica e

energética para implantação de usinas hidrelétricas, por meio da transposição de séries históricas de vazão dos postos fluviométricos P1, P2 e P3 para um posto base (PB) de referência. A partir das respectivas áreas de drenagem, estimam-se as vazões em locais sem medições diretas, permitindo a comparação entre as séries transpostas e a série do posto base. Com essas vazões, são elaboradas curvas de permanência de vazão e de potência, em bases diária e mensal, para analisar a regularidade do recurso hídrico e o potencial de geração ao longo do tempo. O objetivo final é identificar, entre P1, P2 e P3, qual apresenta maior potencial para a instalação de uma usina, bem como os desvios obtidos pelo uso das bases diária e mensal de vazões com a metodologia de transposição, com base na frequência de ocorrência das potências geradas e no benefício líquido esperado.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente artigo analisa a representatividade hidrológica de séries estimadas a partir da transposição de vazões dos postos fluviométricos P1, P2 e P3 para um posto base (PB), considerando o período de 30 anos entre 1992 e 2022 (valor superior aos 25 anos mínimos sugeridos pela Eletrobrás, 2000). A metodologia adotada utiliza o método das áreas de drenagem para estimar as vazões nos postos sem dados observados, complementada pela construção de curvas de permanência. Essa abordagem permite avaliar a similaridade entre as séries transpostas e a observada no posto base, com foco na consistência temporal e no potencial de aproveitamento hidrelétrico.

Segundo Tucci (2008), a transposição de vazão é uma prática comum quando não há dados disponíveis no local onde a obra será implantada. Nesse caso, os dados de vazão do posto base são transferidos para o ponto de interesse, considerando a relação entre as áreas de drenagem dos dois locais. Para que esse procedimento seja válido, os postos devem estar relativamente próximos e apresentar características semelhantes, como área de drenagem, topografia, geologia e cobertura vegetal.

Foram adotados alguns critérios para a escolha do posto base e dos postos que terão as vazões transpostas. Nesse sentido, a escolha dos postos deve ter como base a localização na mesma sub-bacia, possuir uma série histórica ampla, apresentar dados consistentes, com o menor número possível de falhas e ter uma área de

drenagem cuja relação com a área do posto base esteja entre 0,25 e 4. A relação de área entre 0,25 e 4, é sugerida por Eletrobrás (2000). Para o cálculo de transposição de vazão, utiliza-se a Equação 1.

$$Q_{PCH} = Q_{PB} \cdot \frac{A_{PCH}}{A_{PB}} \quad (1)$$

Onde: QPCH é a vazão transposta para o ponto da PCH, em m³/s; QPB é a vazão do posto base, em m³/s; APCH é a área de drenagem da PCH, em km²; APB é a área de drenagem do posto base, em km².

Após o cálculo das vazões transpostas, foi feito um estudo energético para cada posto, sendo calculado os valores de potência e energia para as vazões diárias e mensais. Com isso, é possível realizar um estudo do benefício líquido de uma implementação de uma usina hidrelétrica, de forma a verificar para qual valor de potência o empreendimento teria maior rentabilidade. A equação 2 é utilizada para determinação do benefício líquido (Santos et al., 2016).

$$BL = E \cdot T_m - P(C_{un} \cdot FRC) - C_{om} \quad (4)$$

Onde:

BL: benefício líquido anual;

E: energia gerada anualmente [kWh/ano];

P: potência instalada;

Cun: custo unitário [R\$/kW], considera-se 9000 R\$/kW segundo a PDE 2034;

Com: custos de operação e manutenção, tendo um valor médio de 60 R\$/kW*ano segundo a PDE 2034;

Encargos médios: Com um valor de 160 R\$/kW*ano segundo a PDE 2034;

FRC: fator de recuperação do capital, considerando uma taxa de juros de 8%;

Tm: Preço médio da energia elétrica com um valor de 220 R\$/kWh, segundo dados médios da PDE 2034

RESULTADOS

A análise das curvas de Potência x Energia para os postos P1, P2 e P3, comparados ao posto base (Figuras 2 e 3), foi realizada separadamente para dados diários e mensais. No caso dos dados diários, observa-se que há maior dispersão entre as curvas, com destaque para o posto P3, que apresenta valores de energia superiores em diversos intervalos de potência. Já P1 se mantém mais próximo ao posto base, enquanto P2 ocupa uma posição intermediária. Esse comportamento demonstra que os erros de transposição aliados à variabilidade das vazões diárias impactam diretamente no formato da curva e, consequentemente, na energia produzida.

Nos dados mensais, por outro lado, as curvas apresentam-se mais suavizadas e próximas entre si, revelando menor divergência em relação ao posto base. Ainda que P3 continue indicando maior produção de energia, a diferença é menos acentuada do que no caso diário. Tanto P1 quanto P2 apresentam curvas mais consistentes, acompanhando de forma mais próxima o posto base.

Dessa forma, conclui-se que os erros de transposição e a variabilidade das vazões têm impacto mais intenso nos dados diários, gerando maior dispersão no formato das curvas e diferenças significativas na energia estimada. Entre os postos analisados, o efeito é mais expressivo em P3, sendo este o que mais se distancia do posto base, principalmente na escala diária. Nos dados mensais, esse efeito é atenuado, resultando em curvas mais próximas e em uma estimativa de energia menos sensível aos erros de transposição.

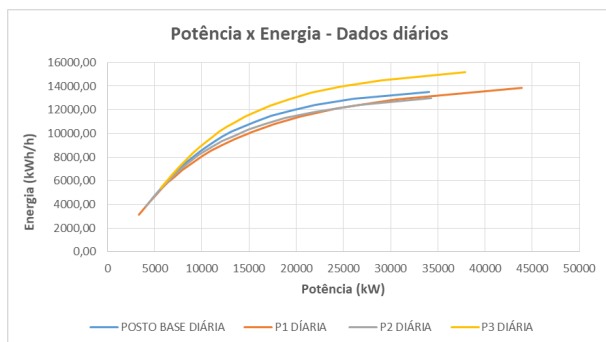


Figura 2 - Curva de permanência para potência diária x energia

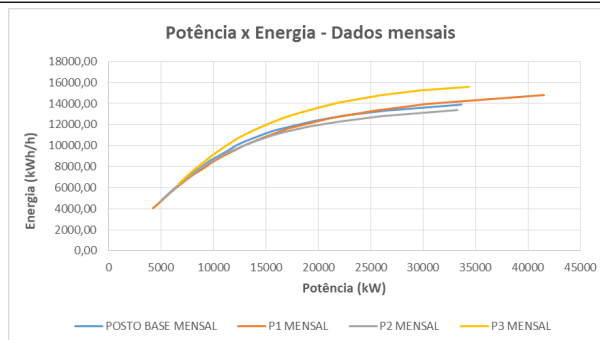


Figura 3 - Curva de permanência para potência mensal x energia

Já a avaliação do benefício líquido em função da potência (Figuras 4 e 5) foi realizada para os postos P1, P2 e P3, comparados ao posto base, considerando tanto os dados diários quanto os mensais. Nos dados diários, observa-se que as curvas apresentam comportamento típico de maximização seguido de declínio, refletindo o ponto ótimo de potência. O posto P3 apresenta os maiores valores de benefício líquido (R\$ 7.459.030,63/ano), superando inclusive o posto base (R\$ 6.396.023,67/ano), o que indica impacto positivo na estimativa de energia e receita. P1 e P2, por outro lado, apresentam valores menores (R\$ 5.377.818,20/ano e R\$ 5.900.771,66/ano, respectivamente), aproximando-se mais do posto base, mas ainda com diferenças significativas. Esse comportamento demonstra que os erros de transposição, aliados à variabilidade das vazões diárias, impactam diretamente no formato da curva de benefício líquido, alterando o ponto ótimo de operação e os resultados financeiros.

Na análise mensal, as curvas mostram-se mais suavizadas e próximas entre si. O posto P3 novamente se destaca, alcançando benefício líquido de R\$ 8.009.371,50/ano, acima do posto base mensal (R\$ 6.831.225,87/ano). Já P1 e P2 apresentaram valores de R\$ 6.162.783,60/ano e R\$ 6.386.218,13/ano, respectivamente, bastante próximos do posto base, evidenciando maior consistência e menor divergência em relação ao cenário diário. Esse resultado indica que a agregação temporal reduz a influência das variações hidrológicas e dos erros de transposição, resultando em estimativas mais estáveis e representativas.

Com relação à intensidade dos erros, nota-se que os efeitos observados estão diretamente relacionados à escala temporal: os dados diários são mais sensíveis às flutuações de vazão e ampliam as diferenças entre os postos. A relação de área entre postos pode potencializar esses desvios quando está distante do intervalo 0,25–4, mas,

neste caso, a principal diferença se deve à própria variabilidade das séries diárias.

A comparação final mostra que os resultados mensais se aproximam mais do posto base, principalmente em P1 e P2, que apresentaram valores bastante próximos de benefício líquido e energia. Já nos dados diários, a dispersão é maior e o posto P3 se distancia consideravelmente, alcançando valores superiores ao posto base. Assim, conclui-se que a escala mensal reduz os impactos dos erros de transposição e gera resultados mais consistentes para a avaliação do benefício líquido. A Tabela 1 apresenta um resumo dos resultados para potência ótima, vazão ótima, energia produzida, investimento necessário e benefício líquido para cada posto, considerando as duas escalas temporais.

P3 – Diári	11874,27	40,46	88928,25	106868395,39	7459030,63
Posto Base – Mensal	11413,01	38,89	83937,19	102717068,03	6831225,87
P1 – Mensal	10874,68	37,06	78404,26	97872076,16	6162783,60
P2 – Mensal	10167,23	34,64	76141,67	91505059,60	6386218,13
P3 – Mensal	12634,46	43,05	94952,40	113710095,79	8009371,50

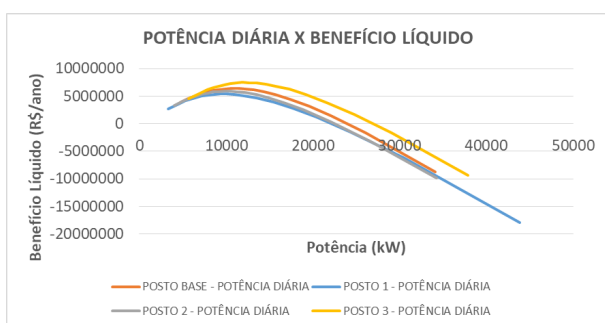


Figura 4 - Curvas para os postos de potência diária x BL

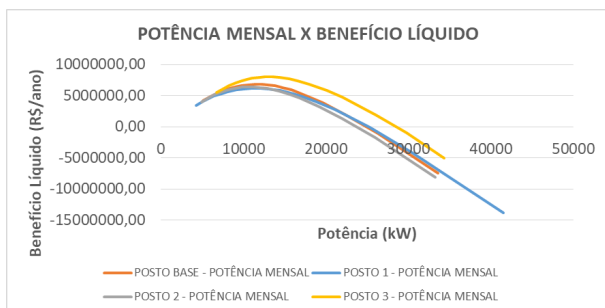


Figura 5- Curvas para os postos de potência mensal x BL

Tabela 1 - Tabela comparativa dos resultados obtidos

Posto / Escala	Potência Ótima (kW)	Vazão Ótima (m³/s)	Energia Produzida (MWh/ano)	Investimento Necessário (R\$)	Benefício Líquido (R\$/ano)
Posto Base	10577,63	36,04	78087,97	95198640,65	6396023,67
P1 – Diári	9306,01	31,71	67567,29	83754120,01	5377818,20
P2 – Diári	9711,52	33,09	71823,39	87403644,00	5900771,66

CONCLUSÕES

A análise comparativa entre as curvas de potência x energia e potência x benefício líquido demonstrou que o uso de dados diários não resultou em maior proximidade com o posto base. Pelo contrário, a variabilidade hidrológica diária ampliou os erros de transposição e aumentou a dispersão das curvas, principalmente no posto P3, que apresentou resultados significativamente distintos em relação ao posto base. Já os dados mensais mostraram-se mais consistentes, suavizando as diferenças e proporcionando maior proximidade entre os postos transpostos (P1 e P2) e o posto base.

A transposição de vazões afetou a qualidade dos resultados, especialmente nos cenários com dados diários. No entanto, mesmo com a aplicação da metodologia de transposição, os postos mantiveram aproximação razoável com o posto base, em especial nas análises mensais. Os postos cuja relação de área está mais distante do intervalo recomendado entre 0,25 e 4 tenderam a apresentar maior discrepância, reforçando a importância desse critério para a confiabilidade da transposição.

Entre os cenários avaliados, a estratégia com dados mensais foi a que gerou resultados mais robustos e consistentes, aproximando os valores de energia e benefício líquido dos obtidos no posto base. O posto P3 apresentou o maior benefício líquido anual (R\$ 8.009.371,50/ano), ainda que com maior investimento necessário, enquanto P1 e P2 mostraram maior semelhança com o posto base em termos de regularidade e proximidade de valores.

Considerando os resultados obtidos, a PCH analisada poderia gerar um lucro anual na ordem de R\$ 8 milhões, a depender da estratégia de transposição adotada e da escolha do posto de referência.

Para trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar a análise considerando cenários de mudanças climáticas, que podem alterar a disponibilidade hídrica regional; avaliar a influência de reservatórios a montante e usos múltiplos da água (como irrigação e abastecimento); além de aplicar metodologias alternativas de transposição, como modelos hidrológicos distribuídos e técnicas estatísticas de regionalização. A inclusão de séries mais recentes e a análise de incertezas associadas também se mostram essenciais para aprimorar a confiabilidade das estimativas.

EXEMPLO DE REFERÊNCIAS

AMBIENTE BRASIL. Matriz Energética Mundial: Potencial Hidráulico. Disponível em: <https://ambientes.ambientebrasil.com.br>. Acesso em: 10 ago. 2025.

ELETROBRÁS. Manual de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2000.

MME – Ministério de Minas e Energia. Relatório Síntese da Matriz Energética Brasileira. Brasília: MME, 2024.

SANTOS, I. F. S. et al. Estudo da viabilidade econômica em aproveitamentos hidrelétricos. Revista Brasileira de Energia, v. 22, n. 2, p. 45–60, 2016

SANTOS, J. V. et al. Energia hidráulica no Brasil: panorama e desafios. Revista de Energias Renováveis, v. 10, p. 115–128, 2021.

TRATAMENTO DE ÁGUA. Situação dos Reservatórios Brasileiros. Disponível em: <https://www.tratamentodeagua.com.br>. Acesso em: 10 ago. 2025.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS Editora, 2008.