XVIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE
XVIII ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE

EFEITOS DA REGULARIZAÇÃO DE VAZÕES SOBRE A FREQUÊNCIA DE CHEIAS EM SISTEMAS HIDRELÉTRICOS EM CASCATA: ESTUDO DE CASO DAS UHEs PASSO FUNDO E MONJOLINHO

Leonardo de Souza Lisboa [1] ; Thiago Liberato de Veiras [2] ; Rodolfo Rosendo de Carvalho [3]& Joaquim Monteiro Garcez Duarte[4]

RESUMO – Reservatórios hidrelétricos em cascata promovem alterações significativas no regime hidrológico, influenciando a magnitude e a frequência das vazões extremas. Este estudo avaliou os efeitos da regularização de vazões nas UHEs Passo Fundo e Monjolinho, por meio da comparação entre séries naturalizadas e afluentes disponibilizadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Foram realizadas análises de frequência das vazões máximas anuais utilizando a distribuição de Gumbel e a avaliação dos principais eventos extremos observados entre 2000 e 2025. Os resultados indicaram redução consistente das vazões afluentes em relação às naturalizadas, especialmente para eventos frequentes. As curvas de frequência evidenciaram alterações na recorrência das cheias, enquanto a análise dos principais eventos demonstrou mudanças na representatividade e na ordem de magnitude dos extremos ao longo da série histórica. Os resultados ressaltam a importância de considerar os efeitos da regularização em estudos hidrológicos realizados em sistemas de reservatórios em cascata.

ABSTRACT– Hydropower reservoirs arranged in cascade significantly modify the hydrological regime, affecting both the magnitude and frequency of extreme streamflows. This study evaluated the effects of flow regulation in the Passo Fundo and Monjolinho hydropower plants through the comparison of naturalized and inflow series provided by the Brazilian National System Operator (ONS). Frequency analyses of annual maximum flows were performed using the Gumbel distribution, together with an assessment of the main extreme events observed between 2000 and 2025. The results showed consistent reductions in inflow discharges compared to naturalized flows, particularly for frequent events. Frequency curves revealed changes in flood recurrence, while the analysis of major floods demonstrated modifications in the ranking and representativeness of extreme events throughout the historical record. The findings highlight the importance of considering flow regulation effects in hydrological studies conducted in cascade reservoir systems.

Palavras-Chave – Vazões extremas; Reservatórios em cascata; Regularização hidrológica.

[1]) G5 Engenharia, R. Nunes Machado nº 68 Curitiba, (41) 3402-1707 e lsl@g5engenharia.br
[2]) G5 Engenharia, R. Nunes Machado nº 68 Curitiba, (41) 3402-1707 e tl@g5engenharia.com.br
[3]) G5 Engenharia, R. Nunes Machado nº 68 Curitiba, (41) 3402-1707 e rrc@g5engenharia.com.br
[4]) G5 Engenharia, R. Nunes Machado nº 68 Curitiba, (41) 3402-1707 e jd@g5engenharia.com.br

1. INTRODUÇÃO

A presença de reservatórios em sistemas hidrelétricos em cascata promove alterações significativas no regime hidrológico natural dos cursos d'água, especialmente na propagação e magnitude das vazões de cheia. A operação desses reservatórios tende a atenuar os picos de vazão, redistribuindo os volumes ao longo do tempo e reduzindo a frequência de ocorrência de eventos extremos a jusante (WANG *et al*., 2017). Embora esse efeito seja amplamente reconhecido, sua quantificação em sistemas em cascata ainda demanda análises integradas que considerem simultaneamente diferentes escalas espaciais e temporais.

Em sistemas hidrelétricos encadeados, as vazões regularizadas a montante passam a constituir as condições de contorno para os empreendimentos a jusante, podendo alterar não apenas a magnitude das cheias, mas também sua frequência de ocorrência e representatividade ao longo da série histórica. Nesse contexto, a comparação entre séries naturalizadas e afluentes constitui importante ferramenta para compreender os impactos da operação hidráulica sobre o regime de cheias, permitindo identificar efeitos de amortecimento, deslocamento de frequência e desacoplamento hidrológico entre diferentes pontos da bacia (COLLISCHONN e TUCCI, 2001; LOUCKS *et al.*, 2005).

Apesar da relevância do tema, muitos estudos concentram-se na análise isolada de reservatórios ou em abordagens puramente estatísticas, sem explorar de forma integrada a relação entre eventos extremos observados e suas alterações probabilísticas. A análise conjunta das curvas de frequência e dos eventos máximos observados possibilita uma compreensão mais abrangente do comportamento hidrológico em sistemas regulados, contribuindo para estudos de segurança de barragens, planejamento energético e gestão de recursos hídricos. Além disso, a compreensão dessas alterações possui aplicação direta na definição de vazões de projeto e na avaliação de riscos hidrológicos em bacias reguladas.

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar os efeitos da regularização de vazões em um sistema hidrelétrico em cascata, por meio da comparação entre os regimes naturalizado e afluente das Usinas Hidrelétricas Passo Fundo e Monjolinho. Especificamente, busca-se analisar as alterações na magnitude e frequência das vazões máximas, bem como investigar a correspondência e a reorganização dos principais eventos extremos ao longo das séries históricas, evidenciando os efeitos de amortecimento e sua propagação ao longo da cascata.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo compreende o sistema hidrelétrico em cascata formado pelas Usinas Hidrelétricas Passo Fundo e Monjolinho, inseridas na sub-bacia do rio Passo Fundo, afluente da margem esquerda do rio Uruguai, na região Sul do Brasil. A UHE Passo Fundo está localizada no rio Passo Fundo, enquanto a UHE Monjolinho situa-se a jusante, no rio homônimo, integrante da mesma sub-bacia e hidraulicamente influenciado pelas descargas provenientes da usina a montante. A bacia apresenta regime hidrológico predominantemente pluvial, com precipitações relativamente bem distribuídas ao longo do ano e ocorrência de cheias associadas, em geral, a eventos de chuva persistente. Do ponto de vista fisiográfico, a região é caracterizada por relevo ondulado a fortemente ondulado, com uso do solo majoritariamente voltado à agropecuária e presença de remanescentes de vegetação nativa. A configuração em cascata e a operação dos reservatórios promovem alterações relevantes no regime de vazões, especialmente na atenuação dos picos de cheia, aspecto central analisado neste estudo. A localização das usinas, dos cursos d'água associados e da sub-bacia hidrográfica é apresentada na Figura 1.

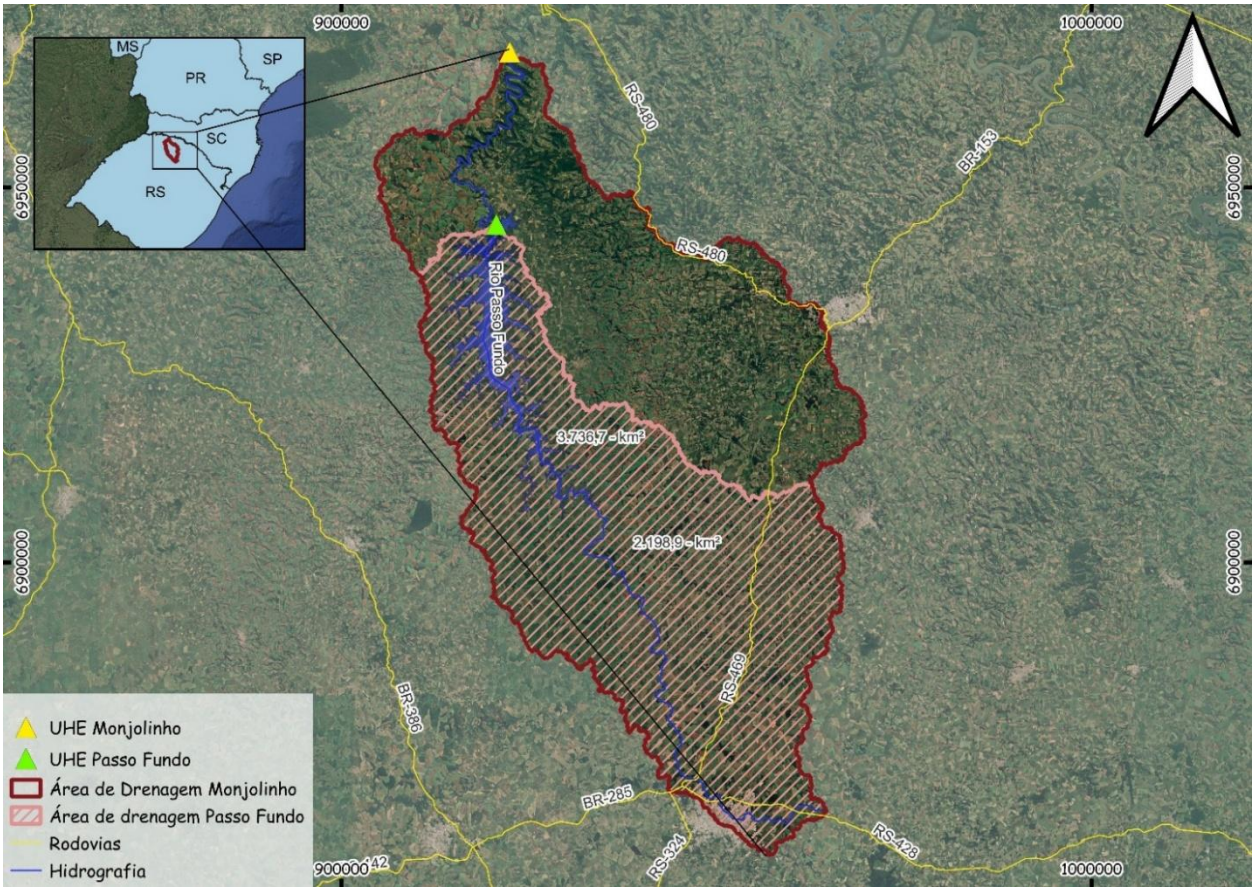


Figura 1 – Localização das UHEs Passo Fundo e Monjolinho na sub-bacia do rio Passo Fundo, bacia do rio Uruguai.

As análises foram desenvolvidas com base em séries de vazões naturalizadas e regularizadas disponibilizadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2025), obtidas para ambas as usinas em estudo. Com o objetivo de garantir consistência estatística e comparabilidade entre os resultados, foi adotado um período comum de análise correspondente à interseção temporal das quatro séries (natural e regularizada para cada usina), abrangendo o maior intervalo contínuo de dados disponível simultaneamente para todas elas (período de janeiro de 2000 até dezembro de 2025). As vazões naturalizadas representam condições hidrológicas sem influência de regularização por reservatórios, enquanto as vazões regularizadas incorporam os efeitos operacionais dos empreendimentos existentes a montante, conforme práticas consolidadas no setor elétrico brasileiro.

Para a caracterização dos eventos extremos, foram extraídas as séries de máximas anuais de vazão para cada conjunto de dados, conforme abordagem clássica de análise de extremos em hidrologia (CHOW *et al*., 1988; TUCCI, 2009). Em seguida, procedeu-se ao ajuste da distribuição de probabilidade de Gumbel, amplamente empregada na modelagem de cheias devido à sua adequação à representação de valores máximos (GUMBEL, 1958; ELETROBRAS, 2000). A partir dos parâmetros ajustados, foram estimadas as vazões associadas a diferentes tempos de retorno (TR), incluindo valores representativos de eventos frequentes e extremos (TR = 10, 50, 100 e 1000 anos).

Com base nessas estimativas, foram construídas curvas de frequência para os regimes natural e regularizado em cada usina, permitindo a comparação direta das magnitudes das vazões associadas a um mesmo tempo de retorno. Adicionalmente, foi realizada a análise do deslocamento de frequência por meio da determinação do tempo de retorno equivalente no regime regularizado para vazões associadas a tempos de retorno específicos no regime natural. Essa abordagem permite quantificar a alteração na frequência de ocorrência de picos de vazão decorrente da regularização, sendo amplamente utilizada em estudos de impacto hidrológico de reservatórios (COLLISCHONN e TUCCI, 2001; LOUCKS *et al*., 2005).

De forma complementar, foi conduzida a análise dos principais eventos extremos observados nas séries temporais. Para cada série (natural e regularizada, em ambas as usinas), foram identificados os dez maiores eventos de vazão registrados ao longo do período de análise, considerando suas respectivas datas de ocorrência. Esses eventos foram organizados em função de sua magnitude, possibilitando a comparação entre os regimes hidrológicos e entre as usinas em cascata.

A partir dessa análise, foram avaliados aspectos como a coincidência temporal dos picos de vazão, alterações no posicionamento relativo dos eventos no ranking de máximas e modificações na

representatividade dos eventos ao longo da cascata. Essa abordagem permite identificar efeitos de amortecimento, redistribuição temporal e desacoplamento hidrológico entre os regimes natural e regularizado.

Por fim, os resultados das análises de frequência e dos eventos de cheia foram integrados, permitindo uma avaliação conjunta das alterações na magnitude, frequência e ocorrência das cheias, bem como da propagação desses efeitos ao longo do sistema em cascata.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de frequência das vazões máximas foi realizada com o objetivo de avaliar as diferenças entre os regimes naturalizado e afluente nas UHEs Passo Fundo e Monjolinho. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1, na qual são indicadas as vazões associadas a diferentes tempos de retorno (TR) para ambos os regimes, considerando o período comum de análise (2000–2025).

Tabela 1 – Vazões máximas associadas a diferentes tempos de recorrência para as UHEs Passo Fundo e Monjolinho, considerando os regimes naturalizado e afluente.

Tempo de Recorrência (anos)	Vazão UHE Passo Fundo (m³/s)				Vazão UHE Monjolinho (m³/s)			
	Máxima Média Diária		Máxima Instantânea		Máxima Média Diária		Máxima Instantânea	
	Natural	Afluente	Natural	Afluente	Natural	Afluente	Natural	Afluente
2	504	495	691	677	792	661	996	876
5	813	721	1165	1035	1258	1163	1631	1539
10	1017	871	1478	1271	1566	1494	2051	1979
25	1275	1060	1874	1570	1956	1914	2582	2534
50	1467	1201	2168	1792	2245	2225	2976	2945
100	1657	1340	2460	2012	2532	2534	3367	3354
200	1846	1479	2750	2232	2818	2842	3756	3761
500	2096	1662	3134	2521	3195	3248	4270	4299
1000	2285	1800	3423	2740	3480	3554	4659	4705
10000	2912	2260	4385	3466	4427	4573	5948	6053

De modo geral, observa-se redução das vazões no regime afluente em relação ao naturalizado para ambas as usinas, evidenciando a influência da regularização promovida pelos reservatórios. Esse comportamento é mais expressivo para eventos frequentes, especialmente na UHE Monjolinho, onde as reduções para TR de 2 anos atingem aproximadamente 17% para as vazões médias diárias e 12% para as instantâneas. Na UHE Passo Fundo, embora as reduções sejam menos acentuadas, a diminuição das vazões permanece consistente ao longo de toda a faixa de tempos de recorrência analisada.

À medida que o tempo de recorrência aumenta, a diferença entre os regimes tende a diminuir, indicando redução da capacidade relativa de atenuação para eventos mais severos. Esse comportamento é particularmente evidente na UHE Monjolinho, onde as vazões afluentes tornam-se praticamente equivalentes às naturalizadas para tempos de recorrência próximos de 100 anos e passam a apresentar valores ligeiramente superiores para eventos mais raros. Esse resultado sugere que, sob condições extremas, a capacidade de armazenamento e regularização dos reservatórios se torna progressivamente menos efetiva.

A comparação entre as usinas evidencia o efeito da cascata. Para eventos frequentes, as reduções observadas em Monjolinho são superiores às verificadas em Passo Fundo, indicando intensificação da atenuação ao longo do sistema. Entretanto, para eventos extremos, essa diferença diminui significativamente, refletindo a limitação da capacidade de regularização frente a grandes volumes afluentes.

Por fim, as vazões máximas instantâneas apresentam valores superiores às máximas médias diárias em ambos os regimes, como esperado. Observa-se ainda que a relação entre os valores instantâneos e médios permanece relativamente constante ao longo da distribuição, indicando que a regularização atua principalmente na redistribuição temporal dos volumes escoados, sem alterar de forma significativa a forma geral da distribuição de extremos.

A análise das vazões máximas instantâneas evidencia comportamentos distintos entre as duas usinas. Em Passo Fundo, as vazões afluentes permanecem inferiores às naturalizadas para toda a faixa de tempos de recorrência analisada, indicando redução sistemática dos picos de cheia e deslocamento da frequência de ocorrência dos eventos extremos. Como exemplo, a vazão naturalizada associada ao TR de 100 anos passa a corresponder aproximadamente a um evento com TR da ordem de 400 anos no regime afluente, evidenciando a diminuição da frequência de ocorrência de cheias de determinada magnitude.

Com o objetivo de avaliar visualmente os efeitos da regularização sobre a frequência e a magnitude das vazões extremas, a Figura 2 apresenta as curvas de frequência ajustadas para as vazões máximas instantâneas naturalizadas e afluentes das UHEs Passo Fundo e Monjolinho.

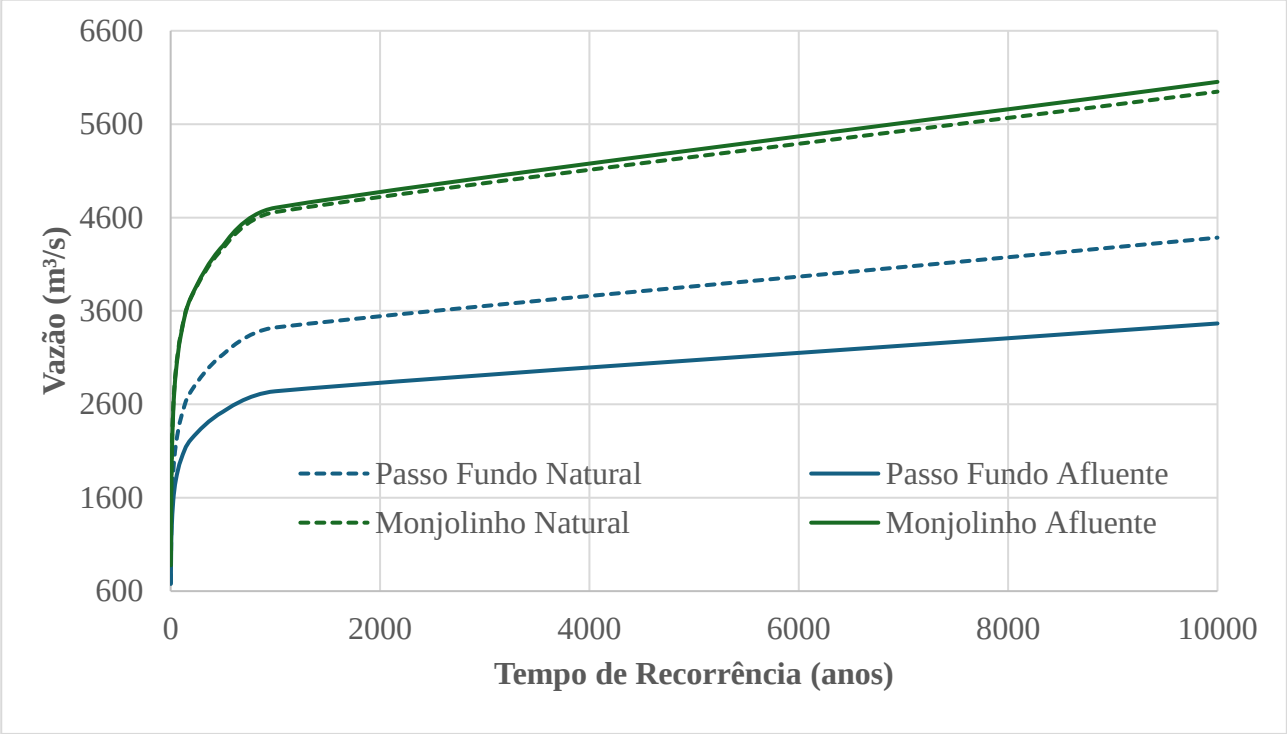


Figura 2 – Curvas de frequência das vazões máximas instantâneas naturalizadas e afluentes nas UHEs Passo Fundo e Monjolinho.

Na UHE Monjolinho, observa-se redução das vazões afluentes para eventos mais frequentes, porém essa diferença diminui progressivamente com o aumento do tempo de recorrência, tornando-se praticamente nula para eventos extremos e apresentando leve inversão para os maiores TRs analisados. Esse comportamento sugere que os efeitos da regularização a jusante são influenciados não apenas pela operação dos reservatórios, mas também pelas contribuições incrementais da bacia e pela propagação das cheias ao longo da cascata.

De forma geral, os resultados indicam que a regularização altera significativamente a frequência associada aos eventos extremos, de maneira mais consistente em Passo Fundo e mais complexa em Monjolinho. Além disso, demonstram que a utilização exclusiva de séries observadas em bacias reguladas pode conduzir a interpretações distintas daquelas obtidas a partir das condições hidrológicas naturais, aspecto relevante para estudos de frequência de cheias, segurança de barragens e planejamento de recursos hídricos.

A Tabela 2 apresenta os dez principais eventos de cheia observados no período comum de análise (2000–2025), considerando as vazões naturalizadas e afluentes nas UHEs Passo Fundo e Monjolinho. A comparação permite avaliar como a regularização influencia não apenas a magnitude das cheias, mas também a representatividade dos eventos extremos ao longo da série histórica.

Tabela 2 – Principais eventos de cheia na série natural e respectivas vazões no regime afluente (2000–2025).

Data	Passo Fundo			Monjolinho		
	Q Natural (m^3/s)	Q Afluente (m^3/s)	Dif (%)	Q Natural (m^3/s)	Q Afluente (m^3/s)	Dif (%)
Mai/2024	1.356	1.221	-11%	1.950	2.141	9%
Jun/2014	1.154	777	-49%	1.937	2.108	8%
Nov/2023	1.100	908	-21%	1.778	1.722	-3%
Jun/2005	1.058	1.052	-1%	1.681	728	-57%
Jun/2025	874	600	-31%	—	—	—
Mai/2017	779	726	-7%	1.236	1.473	19%
Out/2000	735	735	0%	1.030	430	-58%
Dez/2015	733	696	-5%	1.103	1.425	29%
Jul/2011	688	665	-3%	1.071	1.144	7%
Jul/2020	668	626	-6%	1.041	572	-45%
Set/2002	—	—	—	1.001	605	-40%

Os resultados indicam elevada correspondência temporal entre os eventos extremos observados nas duas usinas, com apenas uma diferença entre os conjuntos analisados, evidenciando forte coerência hidrológica entre montante e jusante. Em Passo Fundo, observa-se redução consistente das vazões no regime afluente, com diferenças mais expressivas nos eventos de maior magnitude, confirmando a atuação da regularização sobre os picos de cheia. Em Monjolinho, por outro lado, o comportamento é mais variável, com ocorrência tanto de reduções quanto de incrementos nas vazões afluentes. Esse padrão reflete a combinação entre a operação dos reservatórios a montante e as contribuições incrementais ao longo da bacia, resultando em respostas menos uniformes a jusante.

Destaca-se que os eventos com maior redução de vazão em Monjolinho coincidem com situações em que as diferenças observadas em Passo Fundo são pequenas ou praticamente inexistentes, sugerindo que parte significativa do controle dos picos ocorre no trecho compreendido entre as duas usinas. Esse comportamento evidencia o efeito cumulativo da cascata e ajuda a explicar a ocorrência de eventos em que as vazões afluentes se tornam substancialmente inferiores às naturalizadas a jusante. Por outro lado, a presença de eventos com aumento de vazão afluente em Monjolinho, associada à reordenação e à ausência de alguns eventos entre os principais rankings, demonstra que a regularização altera não apenas a magnitude das cheias, mas também sua representatividade relativa ao longo da série histórica. Em conjunto, os resultados indicam que a resposta hidrológica a montante é relativamente uniforme, enquanto a jusante ela passa a refletir a interação entre a operação dos reservatórios e a dinâmica hidrológica da bacia, reforçando a importância de análises integradas em sistemas hidrelétricos em cascata.

4. CONCLUSÃO

A comparação entre as séries naturalizadas e afluentes das UHEs Passo Fundo e Monjolinho evidenciou alterações significativas na magnitude e na frequência das vazões máximas em decorrência da regularização promovida pelos reservatórios. Os resultados indicaram redução consistente das vazões afluentes em relação às naturalizadas, especialmente para eventos mais frequentes, além de deslocamentos nas curvas de frequência que resultaram em aumento dos tempos de recorrência equivalentes para cheias de determinada magnitude. Adicionalmente, a análise dos principais eventos extremos demonstrou que a operação dos reservatórios modifica não apenas a magnitude das cheias, mas também sua representatividade relativa ao longo da série histórica, promovendo reordenação dos eventos e respostas distintas entre montante e jusante.

Os resultados obtidos reforçam a importância de considerar os efeitos da regularização em estudos hidrológicos realizados em bacias reguladas, particularmente em sistemas de reservatórios em cascata. Embora o estudo tenha sido desenvolvido em um sistema hidrelétrico localizado na região Sul do Brasil, os mecanismos identificados possuem aplicação potencial em outras regiões, uma vez que a alteração da frequência e da magnitude das cheias constitui um processo inerente à operação de reservatórios. Nesse contexto, os resultados podem contribuir para estudos de segurança de barragens, definição de vazões de projeto, planejamento de recursos hídricos e avaliação dos impactos hidrológicos associados à operação de sistemas regulados.

Por fim, ressalta-se que os resultados apresentados estão sujeitos às incertezas inerentes às análises hidrológicas e estatísticas, incluindo limitações associadas à extensão das séries históricas, à representatividade dos eventos observados e aos ajustes probabilísticos empregados. Dessa forma, os valores obtidos devem ser interpretados como estimativas do comportamento hidrológico do sistema. Estudos futuros poderão aprofundar a análise da propagação das cheias ao longo da cascata por meio da avaliação de hidrogramas, defasagens temporais e diferentes condições operacionais dos reservatórios, contribuindo para uma compreensão mais abrangente dos efeitos do controle hidrológico promovido pelos reservatórios sobre eventos extremos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à G5 Engenharia pelo apoio e incentivo ao aprendizado contínuo, à participação em eventos técnico-científicos e à produção e publicação de estudos e pesquisas.

REFERÊNCIAS

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1988.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Simulação hidrológica de grandes bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 6, n. 1, 2001, p. 5-20.

ELETROBRAS. *Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas*. Rio de Janeiro, 2000.

LOUCKS, D.P.; VAN BEEK, E.; STEDINGER, J.R.; DIJKMAN, J.P.M.; VILLARS, M.T. *Water Resources Systems Planning and Management*. Paris: UNESCO, 2005.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). *Séries históricas de vazões naturalizadas e afluentes*. Rio de Janeiro: ONS, 2025. Disponível em: https://www.ons.org.br.

TUCCI, C.E.M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 4 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

WANG, W.; LEUNG, L.R.; VOISIN, N.; HEJAZI, M.; WARD, D.S.; ZHAO, J. *Nonlinear filtering effects of reservoirs on flood frequency curves at the regional scale. Water Resources Research*, v. 53, n. 10, 2017, p. 8277-8292.