DISCUSSÕES ACERCA DA ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE EXTREMOS E SEUS IMPACTOS EM USINAS EXISTENTES. ESTUDO DE CASO DA UHE CASTRO ALVES

Henrique Degraf 1 [1] *; Beatriz Sepulveda Pires* [2]

Palavras-Chave – Hidrologia Estatística, Distribuições de Probabilidade, Eventos Extremos.

INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas fundamentais para a geração de energia, a regularização de rios e a captação de água. Sua segurança, além das características construtivas, está diretamente relacionada à capacidade de suportar eventos hidrológicos extremos, cuja ocorrência tem recebido crescente atenção diante das recentes mudanças no comportamento das cheias.

Nos últimos anos, eventos extremos têm sido observados com maior frequência (MOECKE et al., 2024; SOUZA NETO et al., 2025; ARAÚJO et al., 2026), destacando-se as cheias ocorridas no Rio Grande do Sul em 2023 e 2024, que provocaram impactos severos em grande parte do estado, especialmente nas barragens da cascata do Rio Antas.

Nesse contexto, a avaliação hidrológica e hidráulica dos sistemas extravasores é essencial para garantir a segurança das estruturas. No setor elétrico brasileiro, a estimativa de vazões extremas em aproveitamentos hidrelétricos segue, em grande parte, as orientações estabelecidas pela Eletrobras (2000), que recomendam, para empreendimentos com séries históricas de vazões médias diárias, a análise probabilística dos máximos anuais e a seleção da distribuição de probabilidades em função da assimetria amostral.

Embora a atualização periódica dos estudos hidrológicos seja necessária, o aumento das séries históricas e a ocorrência de novos eventos extremos podem alterar significativamente as vazões de projeto. Como consequência, estruturas existentes podem demandar intervenções para ampliação da capacidade dos sistemas extravasores ou aumento da borda livre. Entretanto, tais atualizações podem não constituir soluções definitivas caso novos eventos extremos continuem sendo incorporados às séries históricas.

Nesse cenário, questiona-se se a aplicação contínua dos métodos convencionais de frequência estatística é suficiente para representar adequadamente as vazões extremas. A estimação dos parâmetros, as limitações das distribuições de probabilidade, o comportamento de suas caudas (VOGEL et al., 2024) e a possível não estacionariedade dos processos hidrológicos (WOSNIACK et al., 2026) podem resultar em estimativas progressivamente maiores, nem sempre compatíveis com a realidade física das bacias hidrográficas.

Diante disso, este trabalho busca discutir a adequação da metodologia atualmente empregada na estimativa de vazões extremas e avaliar seus efeitos sobre o dimensionamento de estruturas hidráulicas. Como estudo de caso, considera-se a barragem de Castro Alves, na qual a incorporação de eventos recentes alterou significativamente as vazões de projeto e resultou em obras de readequação do sistema extravasor.

1) CPFL Renováveis, degraf.henrique@gmail.com
2) CPFL Renováveis, beatriz.pires@cpfl.com.br

O estudo avalia três aspectos principais: (i) o efeito do aumento da série histórica nos ajustes estatísticos; (ii) as limitações dos métodos convencionais de extrapolação; e (iii) os efeitos associados à possível não estacionariedade dos processos hidrológicos.

METODOLOGIA

A partir dos dados disponíveis no portal SINTEGRE, do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), foram obtidas as séries de vazões diárias naturalizadas da UHE Castro Alves, referentes ao período de 1941 a 2024.

Para avaliar o efeito do crescimento da série histórica e da incorporação de eventos extremos recentes, as análises de frequência foram inicialmente realizadas para o período de 1941 a 2015. Posteriormente, a série foi ampliada de forma incremental, com a inclusão de um ano por vez até 2024, totalizando 10 séries. A partir das vazões diárias, foram obtidas as respectivas séries de vazões máximas anuais, às quais foram ajustadas as distribuições Lognormal de dois parâmetros (LN 2P), Generalizada de Valores Extremos (GEV) e Gumbel, utilizando os métodos dos Momentos (MOM), Máxima Verossimilhança (MLE) e Momentos-L. A estabilidade das estimativas foi avaliada a partir da evolução das vazões associadas aos diferentes tempos de retorno à medida que novos anos eram incorporados à série, permitindo analisar a sensibilidade das distribuições e dos métodos de estimação à atualização dos dados históricos.

Além do efeito da extensão da série histórica, foram avaliadas as limitações associadas às distribuições de probabilidade, com ênfase no comportamento de suas caudas e em suas implicações nas extrapolações para elevados tempos de retorno. Conforme discutido por VOGEL et al. (2024), na distribuição GEV a existência dos momentos estatísticos está condicionada ao valor do parâmetro de forma ξ. A média, variância, terceiro e quarto momentos são finitos, respectivamente, para $\xi < 1$, $\xi < 1/2$, $\xi < 1/3$ e $\xi < 1/4$. Nesse sentido, calculou-se o parâmetro de forma ξ para cada série e método de estimação, buscando avaliar sua influência sobre os ajustes e as extrapolações da GEV. A distribuição de Gumbel, por representar o caso particular da GEV com $\xi = 0$, não apresenta essa limitação. Para a LN 2P, todos os momentos são definidos para quaisquer valores admissíveis de seus parâmetros, enquanto o parâmetro σ influencia a dispersão, a assimetria e o comportamento da cauda da distribuição, podendo afetar significativamente as extrapolações para elevados tempos de retorno.

Por fim, investigou-se a possível presença de não estacionariedade nas séries de vazões máximas anuais. Ressalta-se, contudo, que esse conceito deve ser empregado com cautela, uma vez que séries hidrológicas observadas são finitas e representam apenas recortes temporais de um processo físico contínuo (DEGRAF; DETZEL, 2021; KOUTSOUYANNIS, 2006). Nesse contexto, foram empregados os testes de Mann-Kendall (KENDALL, 1975), para identificação de tendências monotônicas, e de Pettitt (PETTITT, 1979), para identificação de possíveis mudanças de comportamento ao longo da série. A presença de tendências ou mudanças estruturais pode indicar que as características estatísticas das vazões máximas anuais não permanecem constantes ao longo do período analisado, constituindo evidência de possível não estacionariedade.

RESULTADOS

Após o ajuste das distribuições de probabilidade, verificou-se que a distribuição Lognormal, com parâmetros estimados pelo método da máxima verossimilhança, apresentou a melhor aderência aos dados segundo o critério de Akaike (AIC). A Figura 1 apresenta a comparação entre as extrapolações estatísticas obtidas para as séries parciais entre 2015 e 2024. Observa-se que o aumento do comprimento da série histórica, associado à inclusão de eventos extremos recentes, resultou em elevação progressiva das vazões extrapoladas, alterando as recorrências associadas às condições de projeto. Como comparação, a vazão decamilenar de projeto é da ordem de 9.011 m³/s, enquanto a atualizada é de 14.922 m³/s.

Em relação às demais distribuições, avaliou-se a evolução da vazão decamilenar ao longo das atualizações anuais da série. Destaca-se o comportamento da distribuição GEV, que apresentou maior sensibilidade à incorporação dos eventos de 2023 e 2024, correspondentes aos dois maiores eventos do histórico analisado. A inclusão desses eventos alterou significativamente o comportamento da cauda superior da distribuição, resultando em extrapolações substancialmente superiores às obtidas pelas demais distribuições para elevados tempos de retorno. Um dos efeitos da inclusão desses eventos foi o aumento do parâmetro de forma ξ estimado pelo MLE, que apresentou valor superior a 1, condição na qual a média teórica da distribuição GEV não é definida. Por outro lado, para o MOM e Momentos-L o parâmetro ξ permaneceu inferior a 1/4, indicando a existência dos momentos até a quarta ordem. A GEV apresentou AIC superior às demais distribuições, mas resultou em estimativas substancialmente maiores para os tempos de retorno mais elevados, o que evidencia sua maior sensibilidade à incorporação dos eventos extremos e as diferenças entre as distribuições quanto à extrapolação da cauda superior.

Por fim, os testes de Mann-Kendall e Pettitt indicaram rejeição da hipótese nula, sugerindo a presença de tendência crescente nas vazões e uma mudança estrutural na série, com ponto de quebra identificado em 1982. Com base nesse resultado, aplicou-se a correção da não estacionariedade por meio do método da Curva Acumulativa de Vazões (DETZEL et al.,2011). A partir da série corrigida, realizou-se novo ajuste das distribuições de probabilidade, conforme mostra a Figura 2, observando-se que as vazões extrapoladas superaram aquelas obtidas com a série original. Esse resultado sugere que a consideração explícita da não estacionariedade pode amplificar ainda mais as estimativas de eventos extremos, reforçando a complexidade envolvida na atualização de estudos hidrológicos.

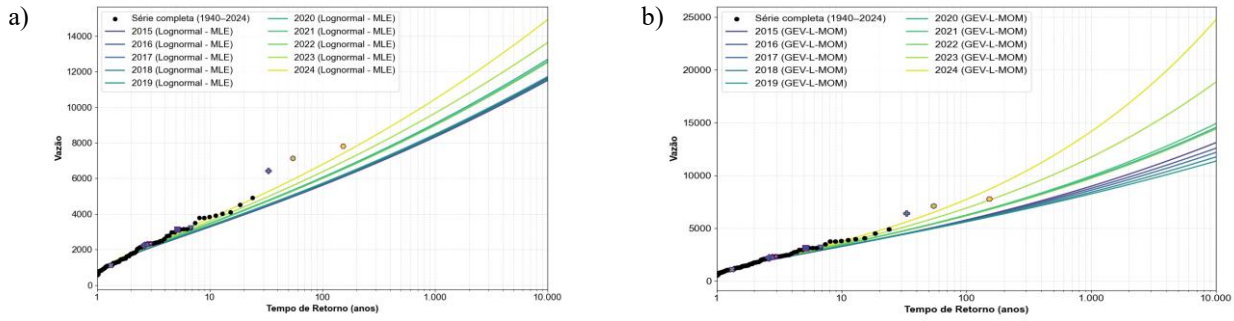


Figura 1. Comparação entre as extrapolações estatísticas ano a ano. a) Distribuições com o melhor ajuste. b) Distribuição GEV – Momentos L. Fonte: autoria própria.

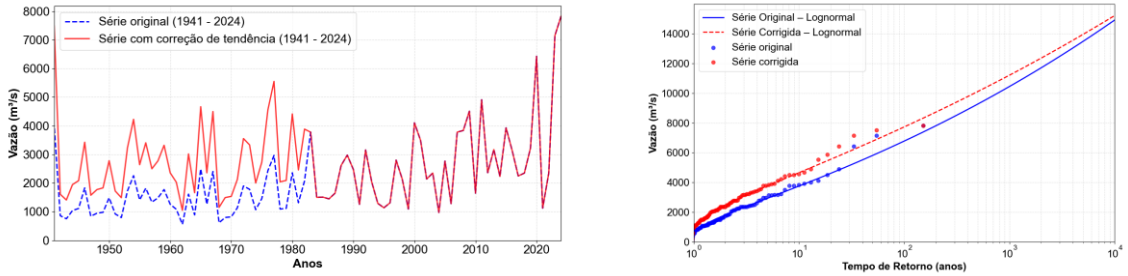


Figura 2. Correção de tendência da série e análise de frequência das vazões extremas. Fonte: autoria própria.

CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas, foi possível evidenciar limitações importantes nas metodologias correntemente empregadas para a atualização de estudos hidrológicos, sob três perspectivas

principais: o aumento do comprimento das séries de vazão, as características das distribuições de probabilidade adotadas e os efeitos associados à não estacionariedade dos processos hidrológicos.

Os resultados demonstram que a interação entre esses fatores torna a avaliação de eventos extremos significativamente mais complexa do que aquela assumida pelas abordagens convencionais. Dessa forma, a atualização de estudos hidrológicos deve ir além da simples reprodução de procedimentos estatísticos consolidados, incorporando uma avaliação mais criteriosa das bases físicas e estatísticas que sustentam as extrapolações de vazões de projeto.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, T. F.; SONE, J. S.; GESUALDO, G. C.; OLIVEIRA, P. T. S. (2026). "*Whiplash and Shifts in Hydrological Regimes: Unfolding Challenges in Water Management Facing Different Futures*". Journal of Hydrologic Engineering, v. 31, n. 4.

DEGRAF, H.; DETZEL, D. H. M. (2021). "*Impactos da Não Estacionariedade na Capacidade de Regularização no Nordeste*". XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

DETZEL, D. H. M.; BESSA, M. R.; VALLEJOS, C. A. V.; SANTOS, A. B.; THOMSEN, L. S.; MINE, M. R. M.; BLOOT, M. L.; ESTRÓCIO, J. P. (2011). "*Estacionariedade das afluências às usinas hidrelétricas brasileiras*". RBRH, 16(3), 95–111. https://doi.org/10.21168/rbrh.v16n3.p95-111 (doi.org in Bing)

ELETROBRAS (2000). *Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas*. Rio de Janeiro: Eletrobras. Capítulo 6 – Estudos Básicos.

KENDALL, M. (1975). Non-parametric tests against trend (4ª ed.). Charles Griffin, San Francisco: Econometrica.

KOUTSOYIANNIS, D. (2006). "Nonstationarity versus scaling in hydrology". Journal of Hydrology, 324, pp. 239–254.

MOECKE, G.; DE LARA, P.; FONSECA, M. E. (2025). "*Gerenciamento de Crise da UHE Dona Francisca: Resposta ao Evento de Cheia Extrema*" in Anais do V Encontro Técnico sobre Acidentes e Incidentes em Barragens – Lições Aprendidas, Porto Alegre, RS, 2025.

PETTITT, A. N. (1979). "*A non-parametric approach to the changepoint problem*". Applied Statistics, 28, pp. 126–135.

SOUZA NETO, P. F. de; DA SILVA, D. F.; ROCHA, L. H. S.; NASCIMENTO, M. R. do; PEREIRA, M. P. S. (2025). "*Eventos extremos de temperatura máxima no Leste do Nordeste do Brasil relacionados ao ENOS*". Revista Brasileira de Climatologia, 36(21), 26–50. https://doi.org/10.55761/abclima.v36i21.18765

VOGEL, R. M.; PAPALEXIOU, S. M.; LAMONTAGNE, J. R.; DOLAN, F. C. (2025). "*When Heavy Tails Disrupt Statistical Inference*". The American Statistician, 79(2), 221–235. https://doi.org/10.1080/00031305.2024.2402898

WOSNIACK, L. M.; DETZEL, D. H. M. (2026). "*Assessing design floods for Brazilian hydropower plants spillways under nonstationarity conditions*". RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 31. DOI: 10.1590/2318-0331.312620250078.