

## DEZ ANOS DE ANÁLISES NA ESTACIONARIEDADE DAS VAZÕES AFLUENTES ÀS USINAS DO SIN: O QUE MUDOU?

Daniel Henrique Marco Detzel<sup>1</sup>  
Victor Gabriel Monteiro<sup>1</sup>  
Marcelo Bessa<sup>1</sup>  
Mauricio Pereira Cantão<sup>1</sup>  
Emerson Luís Alberti<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Universidade Federal do Paraná*  
<sup>2</sup>*Centrais Elétricas do Rio Jordão S.A.*

DOI: 10.47168/rbe.v28i4.756

### RESUMO

Estudos sobre a estacionariedade das séries de vazões afluentes às usinas hidrelétricas (UHEs) do Sistema Interligado Nacional (SIN) ganharam notoriedade no início da década de 2010, quando foram mostrados empreendimentos com tendências de aumento e redução nas vazões em diferentes regiões. No entanto, esta mesma década foi marcada por um severo período de estiagem que impactou diretamente diversas atividades ligadas ao planejamento e à operação do SIN. Assim sendo, este trabalho tem por objetivo apresentar uma análise atualizada nas tendências das séries de vazões afluentes às usinas do SIN, bem como mostrar uma comparação com o cenário de dez anos atrás. Os resultados mostram que 77 UHEs (48% do total) apresentaram tendência, sendo que em 24 delas (31%) foi detectada redução nas vazões e, em 53 (69%), aumento. Na análise comparativa entre 1931-2010 e 1931-2020, percebeu-se um aumento substancial no número de UHEs cujas séries apresentaram redução nas vazões. Em séries com tendências de aumento, mostra-se que a intensidade do sinal reduziu pela primeira vez desde o início dos estudos sobre não estacionariedade nas usinas do SIN.

Palavras-chave: Não estacionariedade; Tendências; Mann-Kendall; Usinas hidrelétricas.

### ABSTRACT

Studies on the stationarity of the National Interconnected System (SIN) hydropower plants' (HPPs) streamflow time series gained notoriety in the early 2010s when increasing and decreasing trends were shown. However, this last decade was marked by a severe drought period that

directly impacted several activities related to the planning and operation of the SIN. Therefore, this paper aims to present an updated trend analysis of the SIN power plants' streamflows series and to show a comparison with the scenario ten years ago. The results exhibit that 77 HPPs (48% of the total) presented trends; a reduction was detected in 24 of them (31%), while an increase was identified in 53 (69%). In the comparative analysis between 1931-2010 and 1931-2020, there was a substantial increase in the number of HPPs which series showed a reduction in streamflows. In series with increasing trends, it is shown a decrease in the signal strength for the first time since the beginning of studies on non-stationarity in SIN hydropower plants.

Keywords: Nonstationarity; Trends; Mann-Kendall; Hydropower plants.

## 1. INTRODUÇÃO

A partir da década de 1990, a questão das mudanças climáticas começou a ganhar força na comunidade científica, o que fez com que hidrólogos passassem a analisar a estacionariedade de séries de chuva e vazão com o propósito de entender alguma possível consequência do fenômeno. Nesse contexto, Müller et al. (1998) e Genta et al. (1997) foram trabalhos relevantes publicados no final da década de 1990 que apontaram aumento em séries de vazão de regiões localizadas na bacia incremental da usina de Itaipu e em partes da América do Sul, respectivamente.

No início da década de 2000, Guetter e Prates (2002) apontaram o chamado “degrau climático” como uma possível explicação para as tendências de aumento de vazões que foram detectadas no Sul do Brasil a partir da década de 1970. Esse período ficou conhecido na região como a data de início do aumento das vazões de diversas bacias, principalmente localizadas nos estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e sul de São Paulo. De acordo com Tucci (2007), esse aumento foi potencializado por alterações no uso do solo, principalmente para a criação de áreas agrícolas e de pasto, as quais ocorreram também a partir de 1970.

Desde então, cresceu o interesse em estudar quais seriam as eventuais consequências de aumentos (ou reduções) nas séries de vazão para os diversos setores usuários dos recursos hídricos. Dentro desse contexto, pode-se apontar o setor elétrico como um dos principais interessados na questão. Detzel et al. (2011), publicaram um dos primeiros trabalhos preocupados em avaliar a não estacionariedade em nível nacional, com foco específico em todas as usinas hidrelétricas (UHEs) em operação no Sistema Interligado Nacional (SIN) até então. Os resultados mostraram que 75 das 146 usinas (51%) apresentavam

não estacionariedade, em sua grande maioria na forma de tendências de aumento nas vazões. Todas operavam também nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. Resultados similares foram obtidos em estudos posteriores feitos pelo mesmo grupo de pesquisa (DETZEL et al., 2017; DETZEL et al., 2018).

O tema foi também estudado por Chagas e Chaffe (2018), que identificaram tendências de aumento nas vazões de rios da bacia do Iguaçu e Uruguai. Da mesma forma, Silva et al. (2019) detectaram aumentos nas afluições de rios das bacias do Paraná na região da usina de Itaipu.

Entretanto, a década de 2010 foi notadamente marcada por períodos de seca que afetaram diferentes regiões brasileiras. Esses períodos foram de tal severidade que se sugeriu uma possível alteração no período crítico das vazões afluentes às usinas dos subsistemas Norte, Nordeste e partes do Sudeste/Centro-Oeste (DETZEL et al., 2019). Séries com evidências de não estacionariedade trazem reflexos importantes no planejamento e operação do SIN, que vão desde alterações em curvas de regularização de reservatórios até aumento do risco de falha de estruturas de segurança em barragens. Motivado por esses efeitos e pelo histórico de resultados anteriormente citados, o presente artigo tem como objetivo revisar e atualizar o estudo sobre tendências de longo termo nas séries de vazões afluentes às UHEs atualmente em operação no SIN.

## 2. MÉTODO DE ANÁLISE

No presente estudo, aplica-se o teste de Mann-Kendall (MK) para a verificação de tendências de longo termo. Trata-se de uma inferência bem difundida na literatura para a detecção de tendências em séries de fenômenos naturais. Além da independência entre os elementos de uma amostra, o teste se baseia no pressuposto de que a probabilidade de ocorrência desses elementos é a mesma.

O fundamento do teste está na comparação da grandeza entre os elementos da amostra  $z_t$  ( $t=1, \dots, n$ ), contabilizando os sinais resultantes das subtrações entre eles. Em outras palavras, fixando-se um ano  $i$ , verificam-se quantos elementos posteriores ( $j, j+1, j+2, \dots$ ) são maiores ou menores do que ele. A equação 1 define matematicamente o procedimento (YUE et al., 2002):

$$MK = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}[z_j - z_i] \quad (1)$$

onde  $sgn[\ ]$  é o sinal resultante da operação entre colchetes ao qual se associa -1, 0 ou 1, de acordo com o resultado da equação 2:

$$sgn[z_j - z_i] = \begin{cases} 1, & se (z_j - z_i) > 0 \\ 0, & se (z_j - z_i) = 0 \\ -1, & se (z_j - z_i) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Para amostras com mais de oito elementos, a estatística  $MK$  possui distribuição aproximadamente normal com  $E[MK]=0$  e variância calculada pela equação 3:

$$VAR[MK] = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

A variável normal padrão é, por fim, calculada de acordo com a expressão 4:

$$\Phi = \begin{cases} \frac{MK - 1}{\sqrt{VAR[MK]}}, & se MK > 0 \\ 0, & se MK = 0 \\ \frac{MK + 1}{\sqrt{VAR[MK]}}, & se MK < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Para um teste bilateral, a hipótese nula de série sem tendência é rejeitada quando  $|\Phi| > \Phi_{1-\alpha/2}$ , sendo  $\alpha$  o nível de significância adotado.

A aplicação de inferências estatísticas como o teste MK requer que as séries atendam a certas premissas, dentre elas a de independência temporal. Em séries de fenômenos naturais, principalmente hidrológicos, essa premissa raramente se verifica. Portanto, é necessário adotar procedimentos metodológicos que permitam com que os resultados dos testes expressem as significâncias estatísticas adequadas. Para este trabalho, utiliza-se uma técnica conhecida por *prewhitening*, na qual a dependência temporal da série é removida antes da execução do teste. Os detalhes e equacionamentos pertinentes são retirados de Hamed (2009).

Os resultados apresentados neste artigo seguem duas premissas importantes. A primeira é que as séries submetidas ao teste esta-

tístico são em escala anual. A razão para essa escolha é que o que se investiga aqui são eventuais tendências advindas de fenômenos de grande escala. Além disso, a sazonalidade é um fator que não é levado em consideração pelo método proposto. A segunda premissa é que o nível de significância considerado é de 5%. Assim sendo, p-valores inferiores a esse percentual indicam não estacionariedade.

### 3. DADOS UTILIZADOS

As análises foram aplicadas a todas as 161 UHEs em operação com data base de janeiro de 2022. Os dados foram coletados diretamente do *deck* de preços disponibilizado pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica e se referem a vazões naturais médias anuais entre 1931 e 2020. Inicialmente, os testes foram aplicados a todo o histórico, permitindo a caracterização da condição de estacionariedade de todas as UHEs estudadas na data mais atual disponível. Posteriormente, fez-se uma análise comparativa entre os períodos de 1931-2010 e 1931-2020, com intenção de verificar o possível impacto da forte crise hídrica observada na última década.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.1 Condição atual

A Figura 1 exibe o resultado do teste MK aplicado a todas as usinas do SIN. No mapa, os círculos azuis indicam tendência de aumento, vermelhos sugerem tendências de redução e brancos apontam séries sem tendência significativa. Além disso, a dimensão dos círculos está atrelada à intensidade da tendência, a qual é mensurada de acordo com a magnitude da estatística  $\Phi$  do teste (ver equação 4).

Os resultados exibem uma evidente separação das regiões Sul e sul do Sudeste e Centro-Oeste em relação às demais regiões do país. Enquanto as primeiras exibem séries com tendências de aumento nas vazões, as últimas se dividem em séries sem tendência e com tendência de redução. As UHEs com séries sem tendência (parte alta da bacia do rio Paraná, nos estados de Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso) aparentam separar os agrupamentos de UHEs com tendências de aumento ou de redução.

Considerando as UHEs com tendências de redução, é notável a semelhança dos resultados mostrados no mapa da Figura 1 com os encontrados por Detzel et al. (2019). No citado estudo, os autores avaliaram uma possível alteração no período crítico de aflúências das usinas do SIN. Os resultados mostraram que muitas das UHEs que tiveram o período crítico alterado são as mesmas que apresentaram

tendências de redução de vazão. Tratam-se, portanto, de resultados coerentes.

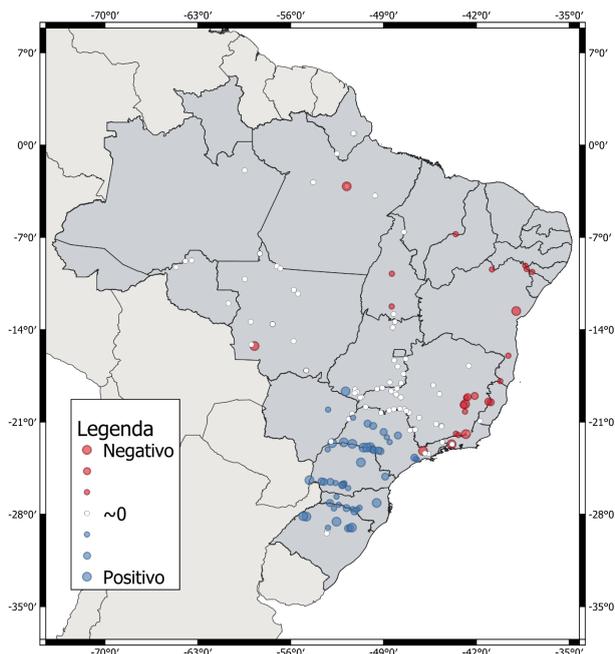


Figura 1 – Tendências de longo termo das séries de vazões médias anuais afluentes às usinas do SIN, para o período 1931 a 2020

No caso das UHEs com tendências de aumento, os resultados são similares a diversos estudos anteriormente apresentados para a região. De fato, o fenômeno do aumento das vazões no Sul do país é conhecido desde final da década de 1990 (MÜLLER et al., 1998), sendo atribuído principalmente às mudanças de uso do solo que as bacias sofreram após da década de 1970 (TUCCI, 2007). Percebe-se que esse padrão de aumento vem se mantendo ao longo dos anos.

Em números, 77 UHEs (48% do total) apresentaram tendência, sendo que em 24 delas (31%) foi detectada redução nas vazões, e em 53 (69%), aumento. As 84 UHEs restantes não apresentaram tendências estatisticamente significativas.

#### 4.2 Comparação 1931-2010 e 1931-2020

A Figura 2 mostra o resultado da análise de tendências de longo termo para o período 1931-2010. Na comparação com a Figura 1,

percebe-se um aumento substancial no número de UHEs cujas séries apresentaram redução nas vazões. Estas estão localizadas na porção norte e nordeste do subsistema Sudeste/Centro-Oeste, e subsistemas Norte e Nordeste, com destaque para a bacia do rio São Francisco.

Para as regiões anteriormente identificadas com tendências de aumento nas vazões, mostra-se que foram mantidas as características. Contudo, a intensidade das tendências perdeu força, o que fica evidente pela menor dimensão dos círculos marcadores no mapa da Figura 1. Este é um resultado importante e pode ser apontado como inédito desde o início dos estudos de não estacionariedade voltados a séries do SIN.

Em todos os casos, pode-se associar os resultados encontrados à crise hídrica da última década, que se manifestou em regiões e anos distintos. Dentre outros, a seca foi relatada na região metropolitana da cidade de São Paulo entre 2013 e 2015 (FREITAS, 2020), na bacia do rio São Francisco entre 2012 e 2017 (DE JONG et al., 2018) e na região Sul do Brasil entre 2019-2020 (GRIMM et al., 2020). De acordo com os resultados mostrados neste artigo, percebe-se que os eventos foram de tal severidade que afetaram as tendências de longo termo da grande maioria das séries de vazão afluente às usinas do SIN.

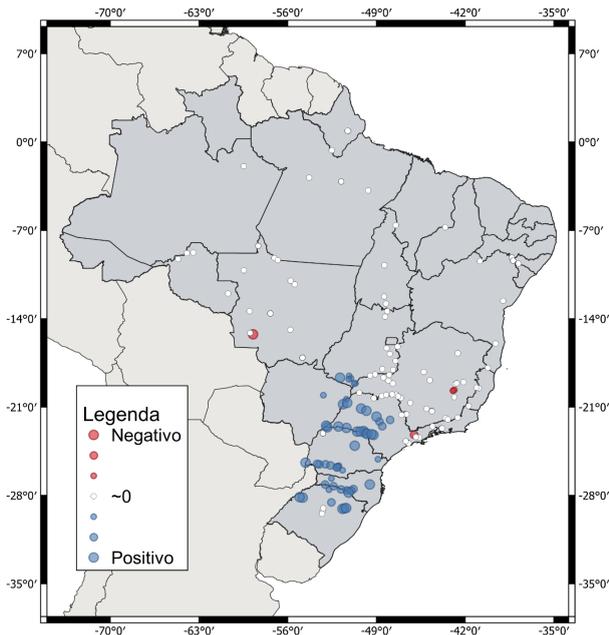


Figura 2 – Tendências de longo termo das séries de vazões médias anuais afluentes às usinas do SIN, para o período 1931-2010

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados aqui mostrados permitem concluir que diversas séries hidrológicas atualmente consideradas no planejamento do SIN apresentam características de não estacionariedade. Muito embora essa constatação não seja nova, uma comparação entre os períodos de 1931-2010 e 1931-2020 permitiu evidenciar dois resultados principais: (i) aumento no número de UHEs cujas séries apresentam tendências significativas de decrescimento e (ii) perda na intensidade da tendência positiva de UHEs cujas séries já vinham apresentando tendências de crescimento em estudos anteriores. Ambos os resultados podem ser atribuídos à severa estiagem observada em diferentes regiões do Brasil durante a década de 2010.

As análises aqui exibidas sugerem que resultados de estudos sobre tendências de séries hidrológicas não devem ser considerados como definitivos. Sempre que possível, recomenda-se que tais análises sejam feitas nos momentos em que as atualizações dos registros históricos são publicadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B. The role of land cover in the propagation of rainfall into streamflow trends. *Water Resources Research*, v. 54, p. 5986–6004, 2018.

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. Estacionariedade das Afluências às Usinas Hidrelétricas Brasileiras. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 16, n. 3, p. 95–111, 2011.

DETZEL, D. H. M.; MEDEIROS, L. de.; MARCILIO, D. C.; OENING, A. P.; TOSHIOKA, F. Estacionariedade estatística das Energias Naturais Afluentes aos subsistemas brasileiros. In *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 22., 2017, Florianópolis. Anais... Porto Alegre: ABRHidro, 2017, p. 1-7.

DETZEL, D. H. M.; MEDEIROS, L. de.; KOWALCZUK, B. C.; KARLY, M. V.; BESSA, M. R.; GEUS, K. de. O comportamento (não) estacionário das vazões afluentes às UHEs do SIN. In *CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO*, 11., 2018. Cuiabá. Anais... Itajubá: SBPE, 2018, p. 1-10.

DETZEL, D. H. M.; MARTINI FILHO, L. R.; RANGEL, L. M. A.; BESSA, M. R.; GEUS, K. de. Acerca do período crítico das usinas hidrelétricas brasileiras. In SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23., 2019. Foz do Iguaçu. Anais... Porto Alegre: ABRH, 2019, p. 1–10.

FREITAS, G. N. de. São Paulo drought: trends in streamflow and their relationship to climate and human-induced change in Cantareira watershed, Southeast Brazil. *Hydrology Research*, v. 51, n. 4, p. 750–767, 2020.

GENTA, J. L.; PEREZ-IRIBARREN, G.; MECHOSO, C. R. A. Recent increasing trend in the streamflow of rivers in Southeastern South America. *Journal of Climate*, v. 11, p. 2858–2862, 1997.

GRIMM, A. M.; ALMEIDA, A. S.; BENETI, C. A. A.; LEITE, E. A. The combined effect of climate oscillations in producing extremes: the 2020 drought in Southern Brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 25, e48, 2020.

GUETTER, A. K.; PRATES, J. E. Degrau climático nas séries de vazões das bacias brasileiras. In CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002. Foz do Iguaçu. Anais... Rio de Janeiro: SBMET, 2002, p. 2099-2110.

HAMED, K. H. Enhancing the effectiveness of prewhitening in trend analysis of hydrologic data. *Journal of Hydrology*, v. 368, p. 143–155, 2009.

de JONG, P., TANAJURA, C. A. S., SÁNCHEZ, A. S., DARGAVILLE, R., KIPERSTOK, A., Torres, E.A. Hydroelectric production from Brazil's São Francisco River could cease due to climate change and inter-annual variability. *Science of the Total Environment*, v. 634, p. 1540-1553, 2018.

MÜLLER, I. I. KRÜGER, C. M.; KAVISKI, E. Análise de estacionariedade de séries hidrológicas na bacia incremental de Itaipu. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 3, n. 4, p. 51–71, 1998.

SILVA, W. L., XAVIER, L. N. R., MACEIRA, M. E. P., ROTUNNO, O. C. Climatological and hydrological patterns and verified trends in precipitation and streamflow in the basins of Brazilian hydroelectric plants. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 137, p. 353–371, 2019.

TUCCI, C. E. M. Mudanças climáticas e impactos sobre os recursos hídricos no Brasil. *Ciência & Ambiente*, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, pp.137-156, 2007.

YUE, S., PILON, P., PHINNEY, B., CAVADIAS, G. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*, v. 16, n. 9, p. 1807–1829, 2002.