Quantificação dos efeitos do ENOS em vazões do rio Iguaçu via decomposição CEEMDAN e séries sintéticas ARMA

Samyr De Rocco Guérios[1]; Daniel Henrique Marco Detzel[2]; Marcelo Rodrigues Bessa[3]

Palavras-Chave – El Niño–Oscilação Sul (ENOS), Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise (CEEMDAN), Auto-regressive moving average (ARMA).

INTRODUÇÃO

O El Niño–Oscilação Sul (ENOS), fenômeno climático de escala global composto pelas fases quente (El Niño) e fria (La Niña) do Oceano Pacífico, exerce influência significativa sobre os regimes hidrológicos de diversas regiões do planeta. Apesar de sua relevância, a caracterização quantitativa de seus efeitos sobre a variabilidade hidrológica regional permanece um desafio, uma vez que isolar o sinal de ENOS dentro de séries de vazão é dificultado pela sobreposição de múltiplos processos climáticos e hidrológicos (Amarasekera *et al*., 1997; NOAA, 2026b).

Para contornar essa limitação, o presente estudo emprega o método CEEMDAN (*Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise*), proposto por Torres *et al*. (2011) e aprimorado por Colominas *et al*. (2014), para decompor uma série de vazão exemplo em componentes modais intrínsecas (IMFs), que, segundo Antico *et al*. (2016), podem ser utilizados para identificar a contribuição processos natural distintos, operando em uma escala de tempo característica. Dessa forma, é possível isolar os modos associadas ao ENOS com maior objetividade.

O objeto de estudo são as vazões naturais afluentes mensais do rio Iguaçu na UHE Foz do Areia. Os modos são modelados e simulados individualmente por modelos da família ARMA (*Auto-Regressive Moving Average*) e posteriormente agregadas para reconstituir N sinais de ENOS e N sinais restantes. Essa abordagem híbrida, de decomposição empírica adaptativa com modelos estocásticos, tem demonstrado eficácia na modelagem de séries hidrológicas (Wang *et al*., 2015), justificando sua adoção. A análise das estatísticas das simulações permite quantificar a contribuição do ENOS na amplitude e variância da série de vazão.

METODOLOGIA

A UHE Foz do Areia (ou GBM) é a primeira grande barragem do rio Iguaçu. Seus dados de vazão natural afluente em escala mensal são disponibilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2025), com período selecionado de jan./1969 a dez./2023 (660 observações mensais).

O método CEEMDAN decompõe séries não-lineares e não-estacionárias em modos (Funções de Modo Intrínseco ou IMFs) que podem ser utilizados para identificar processos compositores do sinal original (Antico *et al*., 2016). Os parâmetros do método são estimados conforme Wu & Huang (2004) e as frequências características pelo máximo da função de Densidade Espectral de Potência (PSD).

As séries sintéticas dos modos são geradas por modelos da família ARMA, com coeficientes estimados pelo método da máxima verossimilhança. A seleção de ordem é feita de modo iterativo para ordem máxima 10 através da minimização de BIC (Bayesian Information Criterion). São

1) Afiliação: Universidade Federal do Paraná, samyr.guerios@ufpr.br
2) Afiliação: Universidade Federal do Paraná, detzel@ufpr.br
3) Afiliação: Universidade Federal do Paraná, marcelo.bessa@ufpr.br

simuladas 5.000 séries para cada modo, com iniciação em sua respectiva média observada e com período de aquecimento de 25%, para evitar interferência determinística do ponto de início.

Como dados de vazão são não-negativos e assimétricos, assumiu-se um modelo multiplicativo $Q = \prod_{i=1}^{N} IMF_i \cdot R$ ou simplificadamente $Q = W \cdot E \cdot T \cdot R$, sendo Q a série original, E a multiplicação dos IMFs caracterizados como ENOS, W a multiplicação dos IMFs restantes, com exceção de T, o IMF de tendência/menor frequência, e R o resíduo da decomposição. Foi escolhido por manter T constante ao longo das simulações, para fins de comparação mais próxima com o histórico. Nessa formulação, o logaritmo da série original se torna um modelo aditivo compatível com a aplicação de CEEMDAN e, quando simulado por modelos ARMA, não gera vazões negativas na escala original, já que a exponenciação das séries sintéticas gera mínimo em zero.

A validação do modelo é feita pela comparação de estatísticas descritivas das simulações com as do histórico. Os parâmetros de avaliação do impacto da ENOS são o intervalo de confiança das séries sintéticas de E e o índice de sensibilidade de primeira ordem de Sobol (1993), que mede o quanto da variância de um modelo é explicada por uma variável. O índice de Sobol S_i de uma variável X_i de um modelo $Y = g(\boldsymbol{X})$ é:

$$S_i = \frac{\mathrm{Var}_{X_i}\left\{\mathbf{E}_{X_{-i}}\left[g(\boldsymbol{X})\middle|X_i\right]\right\}}{\mathrm{Var}[g(\boldsymbol{X})]} \quad (1)$$

No caso, busca-se descobrir o quanto a variância de E impacta Q. Como são geradas M séries sintéticas, definimos S_{ENOS} pelo índice médio:

$$S_{ENOS} = \sum_{m=1}^{M} \frac{\mathbf{E}\left[T \cdot R \cdot W^{(m)}\right]^2 \mathrm{Var}\left[E^{(m)}\right]}{\mathrm{Var}\left[T \cdot R \cdot W^{(m)} \cdot E^{(m)}\right]} \quad (2)$$

RESULTADOS

O método CEEMDAN resulta em oito IMFs (Figura 1) das quais, pela frequência característica de ENOS de 2-7 anos (NOAA, 2026b), as IMF4 e IMF5 são selecionadas para descrever o fenômeno. A correlação entre W e E é -0,04, mas sem significância (p-valor = 0,286), validando a suposição de independência entre as séries. A correlação entre o índice Niño 3.4 e precipitações na região do estudo é na ordem de 0,20 para os anos de 1981-2010 (NOAA, 2026a), já a correlação cruzada entre E e Niño 3.4 resulta em 0,48 (p-valor < 0,001) para defasagem de 5 meses nos mesmos anos.

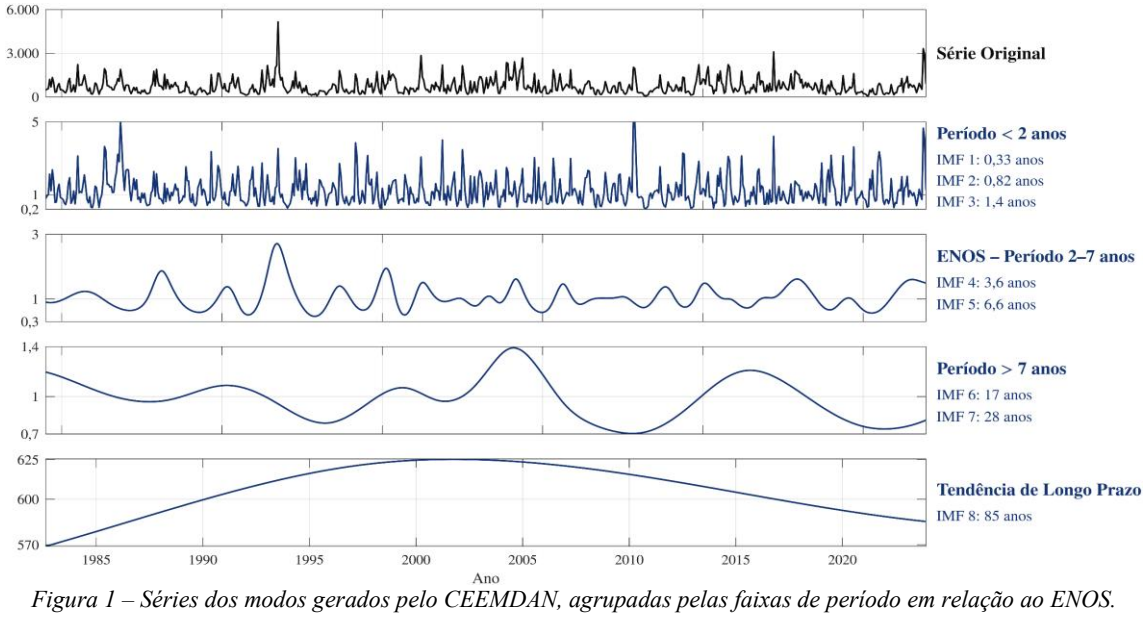


Figura 1 – Séries dos modos gerados pelo CEEMDAN, agrupadas pelas faixas de período em relação ao ENOS.

A seleção dos modelos ARMA os IMFs pelo BIC resultou na ordem AR(6) para todos os modos, menos IMF1, com ARMA(2,4), e IMF3, com AR(7). A caracterização das 5.000 séries sintéticas (Tabela 1) sugere, pela proximidade das estatísticas descritivas, que a metodologia empregada conseguiu reproduzir satisfatoriamente as principais características de ENOS e da série total nas séries sintéticas. Observa-se como tendência das simulações o aumento sistêmico de todas as estatísticas, com exceção de reduções na assimetria e na curtose das séries simuladas de ENOS, o que pode ser um indicativo que o modelo subestima estruturalmente seus valores extremos.

Série		Mediana	Média	Desvio Padrão	Assimetria	Curtose	IC $(1-\alpha = 95\%)$ Inf.	Sup.
W	Obs.	568,8	708,1	462,0	1,500	5,375	178,3	1.939
	Sim.	582,2	702,0	472,0	2,192	11,88	130,7	2.505
ENOS	Obs.	0,9920	1,036	0,3615	1,392	6,488	0,5340	1,815
	Sim.	1,000	1,055	0,3522	0,8817	4,055	0,5042	1,994
TOTAL	Obs.	596,6	726,8	536,5	2,197	12,39	148,5	2.089
	Sim.	581,7	740,5	580,7	2,585	15,28	107,1	2.922

Tabela 1 – Estatísticas descritivas na escala original para comparação das séries sintéticas com o histórico. Estatísticas das séries sintéticas são valores médios. W, ENOS e Total têm unidade $(m^3/s)^{5/8}$, $(m^3/s)^{2/8}$ e m^3/s, respectivamente.

A Figura 2 demonstra o processo simulado de ENOS. À esquerda, observa-se que o envelope do intervalo de confiança para um nível de 95% captura adequadamente a variabilidade da série observada e que a sua amplitude é expressiva, indicando um impacto significativo da variabilidade de ENOS na vazão. Ainda nesse painel, é possível identificar o sentido e a magnitude da anomalia induzida pelo fenômeno, ou seja, se há incremento ou redução de vazão, ao comparar série observada e sua contraparte sem o sinal de ENOS. Além disso, a posição da série observada em relação aos limites do envelope fornece uma medida qualitativa da raridade do evento. No painel direito, as densidades de probabilidade revelam que as distribuições simulada e observada de ENOS e série total são coerentes entre si, corroborando a conclusão da comparação de estatísticas descritivas.

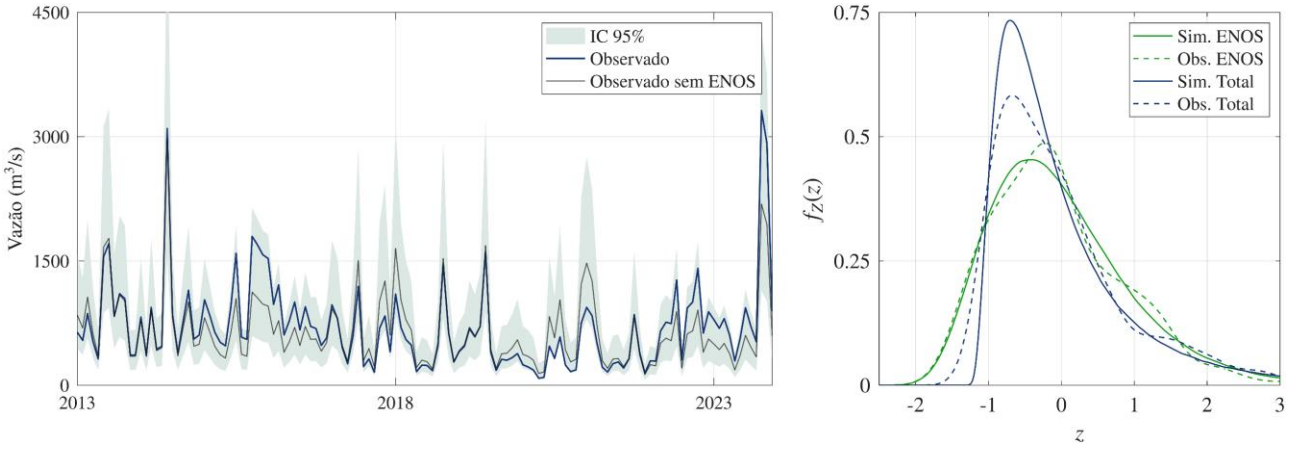


Figura 2 – A esquerda, envelope de incerteza (nível de 95%) da série total reconstruída com as simulações de ENOS para o período de 2013 a 2023. A direita, as distribuições empíricas suavizadas e normalizadas de ENOS e da série reconstruída.

O principal resultado dessa análise é a quantificação do impacto da ENOS sobre a série original. O intervalo de confiança das simulações indica que ENOS pode provocar um aumento em até 99% ou uma redução de até 50% do sinal de vazão do rio Iguaçu em 95% dos meses. A média dos índices de sensibilidade de primeira ordem de Sobol indica que a variância associada ao ENOS explica (18,48 ± 0,13)% da variância total da série, para significância de $\alpha = 5\%$. Esse valor é compatível com a literatura: Amarasekera *et al*. (1997), por exemplo, reportaram que cerca de 20–25% da variabilidade do rio Paraná é modulada pelo ENOS.

CONCLUSÕES

A decomposição CEEMDAN da série de vazões médias mensais do rio Iguaçu, no ponto da UHE Foz do Areia, gerou oito modos de frequência distintas em escala logarítmica, das quais duas foram identificadas como associadas ao ENOS pelas suas frequências características. A falta de significância da correlação entre a série de ENOS agregada e os demais modos evidencia a eficácia do método em isolar o sinal do fenômeno e correlação significativa entre a série de ENOS agregada e o índice Niño 3.4 corrobora que o sinal extraído possui correspondência física com o fenômeno.

A modelagem dos modos por modelos ARMA de diversas ordens, ajustados pelo método da máxima verossimilhança e selecionados pelo menor BIC, permitiu a geração de 5.000 séries sintéticas. A comparação entre as estatísticas descritivas das séries simuladas e as da série histórica indica que a metodologia empregada é capaz de reproduzir os modos extraídos pelo CEEMDAN de forma satisfatória. Contudo, observa-se uma tendência das séries sintéticas associadas ao ENOS de subestimar a assimetria e a curtose, o que podem comprometer a representação de eventos extremos nas simulações.

Do ponto de vista aplicado, a estrutura metodológica proposta permite gerar cenários sintéticos condicionados à fase do ENOS, com potencial uso no planejamento da operação energética e na quantificação de risco hidrológico.

REFERÊNCIAS

AMARASEKERA, K. N.; LEE, R. F.; WILLIAMS, E. R.; ELTAHIR, E. A. B. (1997). “ENSO and the natural variability in the flow of tropical rivers”. Journal of Hydrology, v.200, n.1–4, p.24–39.

ANTICO, A.; TORRES, M. E.; DIAZ, H. F. (2016). “Contributions of different time scales to extreme Paraná floods”. Natural Hazards, v.91, n.3, p.1391–1407.

COLOMINAS, M. A.; SCHLOTTHAUER, G.; TORRES, M. E. (2014). “Improve complete ensemble EMD: A suitable tool for biomedical signal processing”. Biomedical Signal Processing and Control, v.14, p.19–29.

NOAA CLIMATE PREDICTION CENTER (2026a). "Climate Prediction Center". Disponível em: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/. Acesso em: 27 abr. 2026.

NOAA PHYSICAL SCIENCES LABORATORY (2026b). "El Niño Southern Oscillation (ENSO)". Disponível em: https://psl.noaa.gov/enso/. Acesso em: 27 abr. 2026.

SOBOL, I. M. (1993). “Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models”. Mathematical Modelling and Computational Experiment, v.1, p.407–414.

TORRES, M. E.; COLOMINAS, M. A.; SCHLOTTHAUER, G.; FALASCHI, F. (2011). “A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise” in Anais do IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2011), Prague, pp.4144–4147.

WANG, W.; VAN GELDER, P. H. A. J. M.; VRIJLING, J. K.; MA, J. (2015). “Improving forecasting accuracy of annual runoff time series using ARIMA based on EEMD decomposition”. Water Resources Management, v.29, n.8, p.2655–2675.

WU, Z.; HUANG, N. E. (2004). “A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method”. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v.460, n.2046, p.1597–1611.