TRATAMENTO DE RUÍDOS DE BALANÇO HÍDRICO EM SÉRIES DE VAZÃO AFLUENTE PARA SUPORTE À OPERAÇÃO DE UHES

Maria Fernanda Dames dos Santos Lima [1]; Danieli Mara Ferreira [2]; José Eduardo Gonçalves [3]; Rafael Schinoff Mercio Pereira [4]; Camila Freitas [5]; Cassia Silmara Aver Paranhos [6] & Mônica Irion Almeida [7]

Palavras-Chave – Balanço hídrico; Filtragem de dados; Previsão hidrológica.

INTRODUÇÃO

A operação de reservatórios hidrelétricos depende de previsões hidrológicas confiáveis, especialmente em sistemas de suporte à decisão em tempo real. Nessas aplicações, a qualidade da condição inicial dos modelos é determinante para o desempenho das previsões, tornando essencial o uso de séries consistentes de vazão afluente.

Nesse contexto, o Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (SIMEPAR) desenvolveu o Sistema de Simulação e Previsão Hidrológica (SISPSHI), baseado no modelo hidrológico Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC-SMA) e alimentado por previsões meteorológicas em ensemble do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). O sistema fornece previsões hidrológicas com horizonte de até quinze dias para 21 pontos distribuídos nas bacias dos rios Iguaçu, Tibagi e Capivari, abrangendo aproveitamentos hidrelétricos operados pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL).

Para o monitoramento e a calibração do sistema, as vazões são obtidas tanto em estações hidrológicas com monitoramento em tempo real quanto nos barramentos das usinas da COPEL. Nestes últimos, a vazão afluente é estimada indiretamente por meio do balanço hídrico do reservatório.

Entretanto, essas estimativas estão sujeitas a incertezas associadas às medições de nível do reservatório, à curva cota-volume e a outras inconsistências operacionais, produzindo oscilações artificiais, picos espúrios e valores negativos fisicamente incompatíveis, principalmente em séries horárias (BRAVO et al., 2014). Como essas séries são utilizadas para definir a condição inicial dos modelos hidrológicos, tais inconsistências podem se propagar ao longo do horizonte de previsão e degradar o desempenho operacional do sistema.

Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar estratégias de tratamento de ruídos em séries de vazão afluente estimadas por balanço hídrico, visando obter séries mais consistentes para a definição da condição inicial em sistemas operacionais de previsão hidrológica.

METODOLOGIA

O estudo utilizou séries temporais contínuas de vazão afluente estimada por balanço hídrico, abrangendo o período de janeiro a dezembro de 2025. Os dados foram obtidos junto ao banco de dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2026) para as UHEs operadas pela COPEL.

[1]) Simepar, maria.dames@simepar.br
[2]) Simepar, danieli.ferreira@simepar.br
[3]) Simepar, jose.eduardo@simepar.br
[4]) Copel, rafael.pereira@copel.com
[5]) Copel, camila.freitas@copel.com
[6]) Copel, cassia.aver@copel.com
[7]) Copel, monica.irion@copel.com

Como as inconsistências inerentes ao balanço hídrico, tais como erros de leitura do nível do reservatório e incertezas associadas à curva cota-volume, são introduzidas na resolução horária, todas as etapas de detecção e tratamento dos ruídos foram realizadas nessa escala temporal. Essa estratégia foi adotada para evitar que a agregação para intervalos de seis horas mascarasse inconsistências pontuais presentes na série original. Após o tratamento, as séries foram reamostradas para a resolução operacional de 6 horas utilizada pelo SISPSHI.

Inicialmente, foi avaliada uma abordagem de correção física simples, na qual valores de vazão negativos, considerados inconsistentes, foram substituídos por valores ausentes (NaN), permitindo avaliar o efeito dessa correção após a reamostragem temporal.

Na sequência, foram avaliadas três configurações do filtro de Hampel, utilizando uma janela móvel de 25 observações (aproximadamente 24 horas) e o Desvio Absoluto da Mediana (MAD) como estimador robusto de dispersão (HAMPEL, 1974). No Hampel Direto, os valores identificados como outliers foram substituídos pela média dos vizinhos temporais adjacentes. No Hampel Assimétrico, foram adotados limiares distintos para picos positivos e deflexões negativas, buscando representar a natureza assimétrica dos ruídos observados nas séries. No Hampel no Resíduo, a tendência de baixa frequência foi inicialmente estimada por meio de uma mediana móvel de 49 observações (aproximadamente 48 horas), sendo o filtro aplicado apenas ao componente residual antes da recomposição da série.

Após a agregação para a escala de 6 horas, foi aplicada uma média móvel retrospectiva de quatro intervalos (24 horas) como método de suavização de referência, permitindo comparar o desempenho de uma técnica amplamente empregada operacionalmente com os métodos de detecção de outliers.

A avaliação dos métodos foi realizada por meio da comparação entre as séries tratadas e a série original reamostrada para 6 horas, utilizando o coeficiente de correlação de Pearson (r), o erro absoluto médio (MAE), o erro percentual absoluto médio (MAPE), a razão entre os desvios-padrão e o desvio volumétrico percentual (ΔVolume), este último utilizado para verificar se o processo de filtragem preserva o volume total estimado pelo balanço hídrico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 1 e 2 apresenta a comparação entre as séries originais e as séries filtradas para as UHEs Foz do Areia e Segredo, durante o mês de outubro de 2025. Esses empreendimentos foram selecionados por representarem comportamentos hidrológicos distintos. Enquanto Foz do Areia apresenta uma série de vazão afluente relativamente estável e sem ocorrência de vazões negativas no período analisado, Segredo corresponde à vazão incremental entre reservatórios, caracterizada por elevada variabilidade e maior suscetibilidade aos ruídos provenientes do balanço hídrico.

Em Foz do Areia, observa-se que todos os filtros de Hampel preservaram praticamente toda a estrutura temporal da série, realizando apenas correções pontuais em oscilações consideradas espúrias. Em contraste, a média móvel promoveu uma suavização contínua da série, reduzindo a amplitude de picos e introduzindo atraso na resposta hidrológica. Embora as diferenças visuais entre as variantes do filtro de Hampel sejam pequenas nessa usina, o método aplicado ao resíduo apresentou o menor erro absoluto (MAE = 1,20 m³/s), seguido do Hampel Direto (1,34 m³/s), ambos mantendo coeficientes de correlação superiores a 0,999 e desvio volumétrico inferior a 0,1%.

Na série incremental de Segredo, as diferenças entre os métodos tornam-se mais evidentes. A elevada frequência de oscilações bruscas e valores negativos faz com que a média móvel apresente intensa suavização da série, reduzindo significativamente sua variabilidade natural. Em contrapartida, os filtros de Hampel corrigiram apenas anomalias locais, preservando a dinâmica

temporal dos eventos hidrológicos. O Hampel Assimétrico mostrou maior preservação visual dos picos positivos ao utilizar limiares distintos para valores acima e abaixo da mediana. Entretanto, essa característica resultou em maior alteração do volume acumulado da série (ΔVolume = 4,81%) quando comparado ao Hampel Direto (0,59%) e ao Hampel aplicado ao resíduo (0,55%).

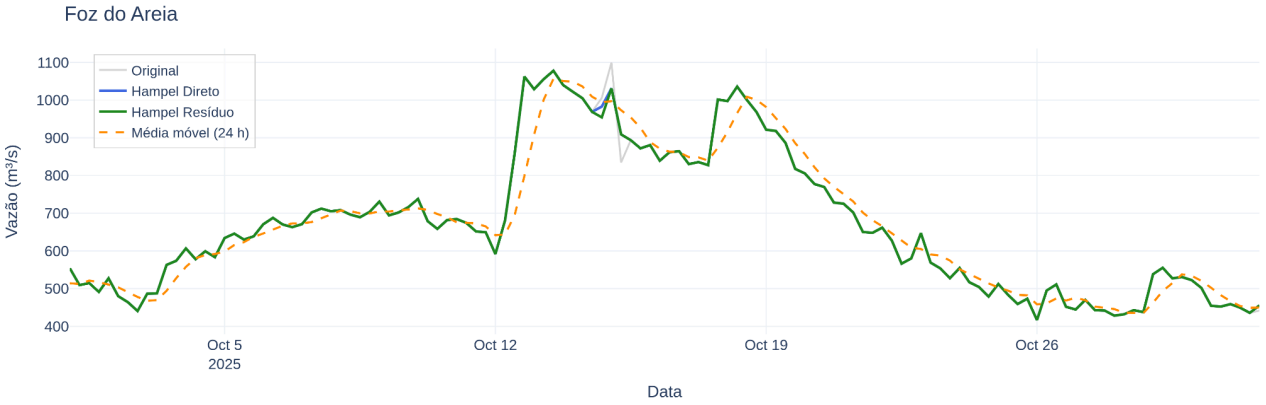


Figura 1. Comparação entre a série original e as séries filtradas para a UHE Foz do Areia durante outubro de 2025

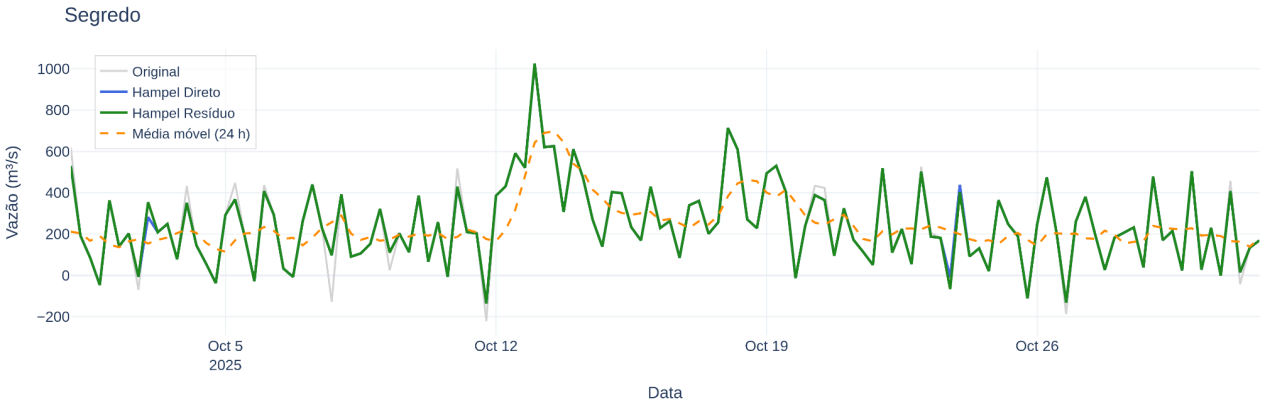


Figura 2. Comparação entre a série original e as séries filtradas para a vazão incremental da UHE Segredo durante outubro de 2025.

Os resultados quantitativos (Tabela 1) corroboram a análise visual. Em Foz do Areia, a média móvel apresentou MAE de 27,68 m³/s, aproximadamente vinte vezes superior aos métodos baseados no filtro de Hampel. Em Segredo, essa diferença foi ainda mais expressiva, com MAE de 131,79 m³/s para a média móvel, enquanto os filtros de Hampel apresentaram erros próximos de 10 m³/s e coeficientes de correlação em torno de 0,99. Esses resultados evidenciam que a suavização por média móvel modifica não apenas os ruídos, mas também parte da variabilidade hidrológica da série.

De forma geral, os três métodos baseados no filtro de Hampel apresentaram desempenho semelhante e substancialmente superior à média móvel. Entre eles, o Hampel aplicado ao resíduo apresentou, de forma consistente, o melhor compromisso entre redução de ruídos, preservação da variabilidade natural e manutenção do volume acumulado da série, características desejáveis para a utilização das vazões como condição inicial em modelos de previsão hidrológica.

Tabela 1 – Comparação das métricas de desempenho dos métodos de filtragem avaliados em relação à série original de vazão (6 horas).

Usina	Método	Métricas				
		Correlação (r)	MAE (m³/s)	MAPE (%)	Δ Volume (%)	Razão Desvio Padrão
Foz do Areia	Média Móvel 24h	0,984	27,68	6,70	0,04	0,989
	Truncamento	0,998	0,76	1,32	0,16	0,998
	Hampel Direto	0,999	1,34	0,54	-0,06	0,998
	Hampel Direto Assimetrico	0,999	1,34	0,54	0,08	0,999
	Hampel Resíduo	0,999	1,20	0,51	-0,04	0,998
Segredo	Média Móvel 24h	0,621	131,79	200,55	0,78	0,633
	Truncamento	0,847	88,81	255,48	57,15	0,811
	Hampel Direto	0,991	10,23	12,38	0,59	0,959
	Hampel Direto Assimetrico	0,989	12,83	27,31	4,81	0,949
	Hampel Resíduo	0,991	10,20	17,52	0,55	0,959

CONCLUSÕES

Os resultados demonstram que o filtro de Hampel é uma alternativa eficiente para a remoção de ruídos em séries de vazão afluente por balanço hídrico, preservando a dinâmica e o volume hidrológico após agregação para 6 horas. Em comparação à média móvel, os métodos baseados no filtro de Hampel apresentaram erros inferiores e melhor preservação da variabilidade natural, evitando suavizações excessivas. Entre as variantes, o Hampel Direto e o aplicado ao resíduo mostraram maior consistência; a versão assimétrica, embora preserve melhor picos positivos, pode alterar o volume acumulado. Conclui-se que o método é promissor para o pré-processamento de dados de entrada em modelos de previsão, com estudos futuros direcionados à avaliação de seu desempenho em tempo real.

REFERÊNCIAS

BRAVO, J. M. et al. Data assimilation of reservoir inflows for real-time operation. Journal of Hydrologic Engineering, v. 19, n. 10, 2014.

HAMPEL, F. R. The influence curve and its role in robust estimation. Journal of the American Statistical Association, v. 69, n. 346, p. 383-393, 1974.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). Dados hidrológicos horários por usina hidrelétrica. Rio de Janeiro: ONS, 2026. Disponível em: <https://dados.ons.org.br/dataset/dados_hidrologicos_ho>. Acesso em: 21 jun. 2026.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (SIMEPAR) pelo apoio e agradecem a Companhia Paranaense de Energia (COPEL) pela oportunidade de realização deste estudo.