

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

PREVISÃO DE VAZÕES DE CURTO E MÉDIO PRAZO PARA UHEs DO SIN A PARTIR DE MODELO HIDROLOGICO CONCENTRADO E ASSIMILAÇÃO DE DADOS

Cléber Henrique de A. Gama¹; Rodrigo C. D. de Paiva²

Abstract: This study proposed and evaluated the application of a concentrated hydrological model with data assimilation for short to medium-term daily streamflow forecasting, encompassing 144 hydroelectric power plants (HPPs) within the National Interconnected System (SIN). Using an automatic calibration algorithm (SCE-UA), satisfactory calibrations were performed for all HPPs, yielding a good performance with Kling-Gupta Efficiency (KGE) values ranging from 0.49 to 0.96. When assessing the model's performance in forecast mode, utilizing actual rainfall data as input and the Ensemble Kalman Filter data assimilation method to correct state variables, it was observed that the model's accuracy, measured by the Nash-Sutcliffe coefficient, gradually improved until the fifth day of forecasting, maintaining a median value of approximately 0.77 (similar to the median obtained during calibration, 0.76). However, for some HPPs, it was noted that the assimilation method degraded the forecasts beyond a certain forecasting horizon, suggesting the need for refinement through calibration or sensitivity analysis of assimilation parameters and state variable errors. The next steps of the study involve comparing the performance of short to medium-term forecasts obtained with the proposed methodology to the forecasts of a post-processed continental-scale model, as well as the operational results from the National Electric System Operator (ONS). It is expected that these findings will contribute to improving the operational streamflow forecasting process in Brazil, optimizing the operation of SIN's power plants in electricity production.

Resumo: Este estudo propôs e avaliou a aplicação de um modelo hidrológico concentrado com assimilação de dados para a previsão de vazões diárias em curto-médio prazo, abrangendo 144 usinas hidroelétricas do Sistema Interligado Nacional (SIN). Utilizando um algoritmo de calibração automática (SCE-UA), foram realizadas calibrações e obtido um bom desempenho com valores de KGE variando entre 0,49 e 0,96. Ao avaliar o desempenho do modelo em modo de previsão, utilizando dados reais de chuva como entrada e o método de assimilação de dados Ensemble Kalman Filter para corrigir as variáveis de estado, constatou-se que a precisão do modelo, medida pelo coeficiente de Nash-Sutcliffe, apresentou uma melhoria gradual até o quinto dia de previsão, mantendo-se em torno da mediana de 0,77 (aproximadamente a mesma mediana encontrada durante a calibração, 0,76). Os próximos passos do estudo envolvem a comparação do desempenho das previsões de curto-médio prazo obtidas com a metodologia proposta com as previsões de um modelo de escala continental pós-processado, bem como com os resultados operacionais do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Espera-se que esses resultados contribuam para a melhoria do processo de previsão operacional de vazões no Brasil, otimizando a operação das usinas do SIN na produção de energia elétrica.

1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Fractal Engenharia e Sistemas – cleber.hag@gmail.com

2) Universidade Federal do Rio Grande do Sul - rodrigo.paiva@ufrgs.br

Palavras-Chave – Ensemble Kalman Filter, previsão operacional, SOPREVA Hydrological Model

INTRODUÇÃO

A previsão de vazões desempenha um papel fundamental na gestão eficiente, seja na mitigação de riscos associados a eventos extremos ou na operação de reservatórios de usinas hidroelétricas (UHEs). A capacidade de prever com precisão as vazões de água em curto e médio prazo é possibilitada pelo planejamento adequado das atividades relacionadas à geração de energia, incluindo o despacho hidrotérmico e a coordenação das UHEs no Sistema Interligado Nacional (SIN).

Diante da importância estratégica dessas previsões, esforços contínuos têm sido feitos para melhorar os métodos existentes, seja por meio de modelos físicos, estatísticos ou de inteligência artificial. A constante busca por aprimoramentos é impulsionada pela necessidade de reduzir a incerteza associada às previsões hidrológicas, possibilitando uma tomada de decisão mais precisa e confiável.

Atualmente, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) utiliza modelos concentrados para realizar previsões operacionais das vazões. Embora esses modelos sejam amplamente utilizados e tenham contribuído para avanços significativos, ainda não é feita por exemplo a aplicação de métodos de pós-processamento ou utilização de técnicas avançadas de assimilação de dados para corrigir as variáveis de estado e melhorar as previsões. Essa lacuna ainda pode limitar o desempenho e a confiabilidade das previsões geradas por esses modelos.

Recentemente, um estudo realizado por Kolling et al. (2023) demonstrou um desempenho semelhante ao do ONS na previsão de vazões em curto e médio prazo. Neste trabalho foi utilizado, contudo, um modelo hidrológico de escala continental e aplicando o pós-processamento com um modelo autoregressivo. Neste sentido, entende-se que ainda há espaço para melhoria das previsões geradas por modelos específicos, calibrados para cada UHE.

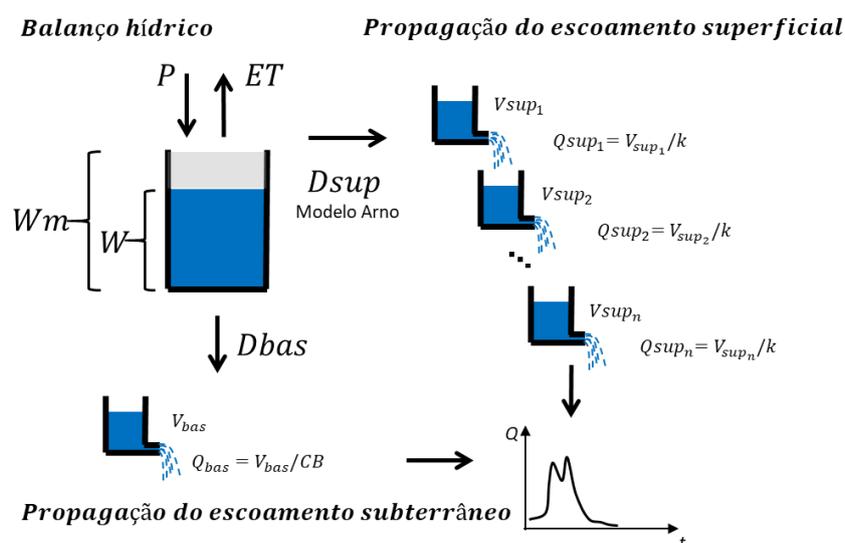
Com base nesse contexto, este trabalho tem como objetivo investigar técnicas para melhorar o desempenho das previsões de vazões em curto e médio prazo, utilizando um modelo hidrológico concentrado e calibrado especificamente para cada UHE. Sugere-se a utilização do Ensemble Kalman Filter como técnica de assimilação de dados, com o intuito de aprimorar as estimativas de vazão por meio da incorporação de informações observadas em tempo real.

A partir da implementação dessas técnicas avançadas de previsão, espera-se que os resultados obtidos possam contribuir para uma gestão mais eficiente e segura dos reservatórios de UHEs, proporcionando uma base sólida para o planejamento e a operação do Sistema Interligado Nacional e contribuir com metodologias para outros sistemas de previsão operacional de vazões.

METODOLOGIA

O modelo hidrológico avaliado neste trabalho é o SOPREVA (Gama, 2019), um modelo conceitual concentrado baseado em uma simplificação do modelo MGB (Modelo de Grandes Bacias). O SOPREVA dispõe de uma técnica de assimilação de dados, o Ensemble Kalman Filter (EnKF, Evensen, 2003 e 2004), para correção das variáveis de estado do modelo com base em observações de vazões e, com isso, melhora da acurácia das previsões do modelo, sobretudo nos instantes iniciais de previsão. A Figura 1 apresenta a ilustração do esquema de formulação do modelo.

Figura 1 – Esquema de formulação do modelo hidrológico SOPREVA



A calibração do modelo hidrológico foi realizada a partir de uma calibração automática pelo método mono objetivo SCE-UA (Duan et al., 1992) utilizando o coeficiente de Kling-Gupta (KGE) como função objetivo, e os dados observados utilizados referem-se à base de vazões naturais fornecidas pelo ONS para todas as UHEs do SIN a partir do portal SINTEGRE (ONS, 2021).

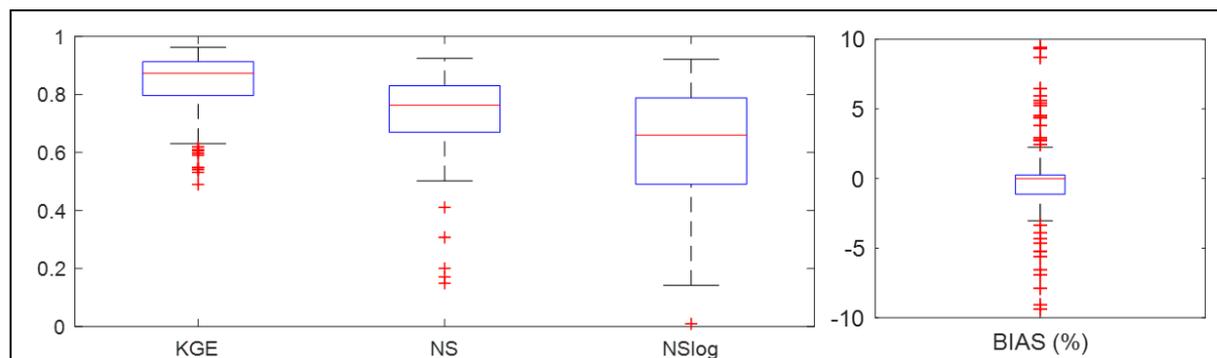
Os dados de precipitação referem-se aos mesmos dados utilizados por Koling et al (2023) na análise de previsões nas UHEs do SIN utilizando a versão continental do modelo MGB (MGB-SA, Siqueira et al., 2018). Para os dados históricos é então utilizado os dados do MSWEP v1.1 concatenado pelos dados do GPM a partir de 2015. Para compatibilização da chuva a ser utilizada no modelo concentrado, foi calculada a chuva média registradas para as bacias no modelo MGB. Desta forma, considera-se que a comparação entre os resultados dos modelos será feita de forma justa e homogênea para todas as usinas. Para calibração também foi utilizado o período de 1979 a 2014, comum ao período do MSWEP e apresentado por Siqueira et al. (2018).

As análises apresentadas a seguir representam uma avaliação da calibração do modelo hidrológico para 144 UHEs do SIN (excluídos os pontos artificiais); em seguida é apresentado o desempenho do modelo em modo previsão utilizando chuva real. Desta forma é possível avaliar o impacto da técnica de assimilação de dado na acurácia das previsões e sem interferências das incertezas das previsões do modelo meteorológico.

RESULTADOS

O modelo hidrológico SOPREVA foi calibrado utilizando o algoritmo de calibração automática SCE-UA, com o KGE como função objetivo, para o período de 1979 a 2014. Os resultados da etapa de calibração são apresentados na Figura 2, a partir dos boxplots de KGE, NS, NSlog e BIAS. As medianas para estas métricas foram, respectivamente, 0,87, 0,76, 0,66 e 0%. Os valores de KGE (função objetivo da calibração automática) variaram entre 0,49, na UHE Euclides da Cunha, e 0,96 na UHE Pimental.

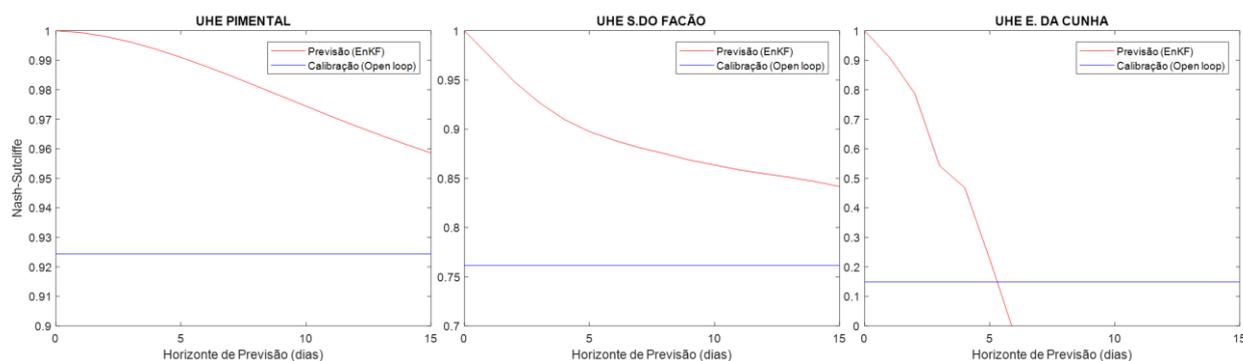
Figura 2 – Boxplot com métricas de calibração do modelo SOPREVA para o período de 1979-2014



Conforme mencionado anteriormente, com o uso da técnica de assimilação de dados para correção das variáveis de estado no modelo no momento inicial da previsão a partir de uma observação de vazão, espera-se que a acurácia da previsão seja melhorada em relação ao desempenho obtido em modo simulação (open loop). Para visualizar esse comportamento, na Figura 3 é apresentado os valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) em função do horizonte de previsão para 3 UHEs (Pimental, Serra do Facão e Euclides da Cunha). Essas UHEs representam, respectivamente, os valores de KGE máximo, mediano e mínimo obtidos durante a calibração dos modelos.

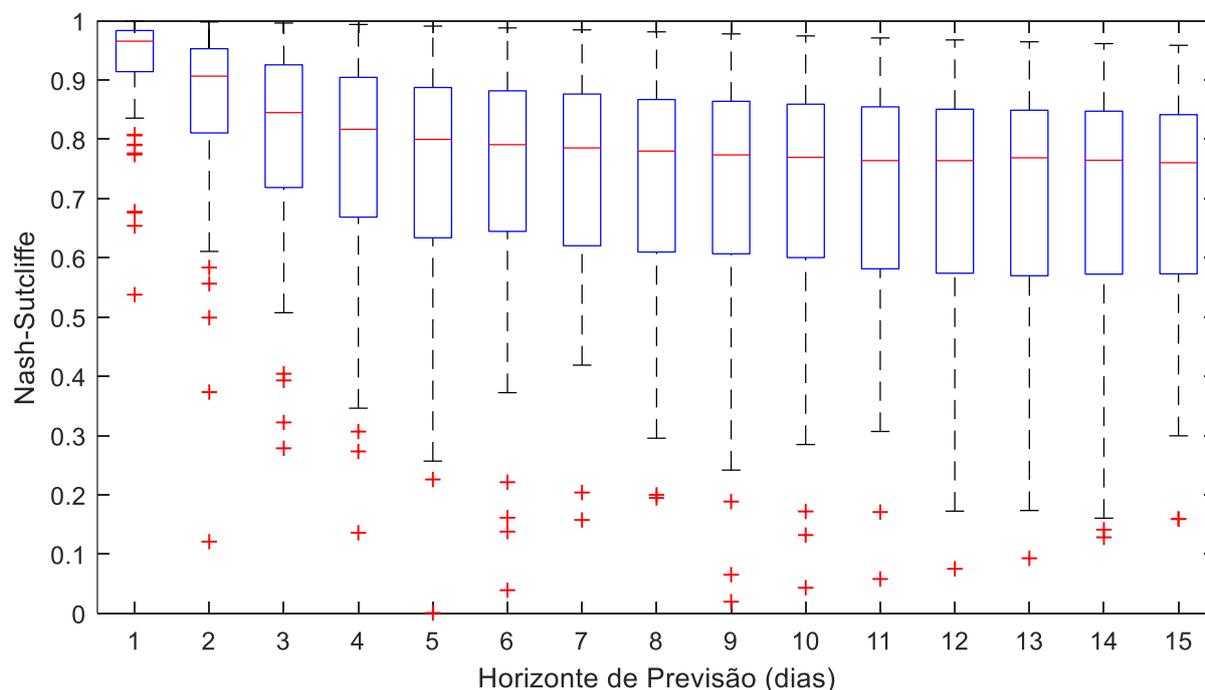
Em azul é apresentado o valor de NS obtido na calibração (equivalente à simulação open loop) e em vermelho é apresentado o desempenho com assimilação de dados. Observa-se, sobretudo para os primeiros dias de previsão uma melhoria significativa na acurácia dos modelos e, à medida que se aumenta o horizonte, o desempenho é degradado. É esperado que com o aumento do horizonte de previsão a eficiência com assimilação de dados tenda a se aproximar do desempenho em modo open loop. Contudo, para Euclides da Cunha, observa-se que, aproximadamente a partir do sexto (6º) dia de previsão, o desempenho com assimilação de dados se torna inferior ao desempenho em open loop. Esse resultado, todavia, pode ser justificado pela simplificação adotada neste trabalho em utilizar estimativas de erros das variáveis de estado e demais parâmetros de assimilação fixos para todas as UHEs. No entanto, esse resultado demonstra que o desempenho das previsões ainda pode possivelmente ser melhorado mediante calibração ou análise de sensibilidade desses parâmetros.

Figura 3 – Exemplos de eficiência das previsões em função do horizonte de previsão para as UHEs com KGE máximo, mediano e mínimo na etapa de calibração.



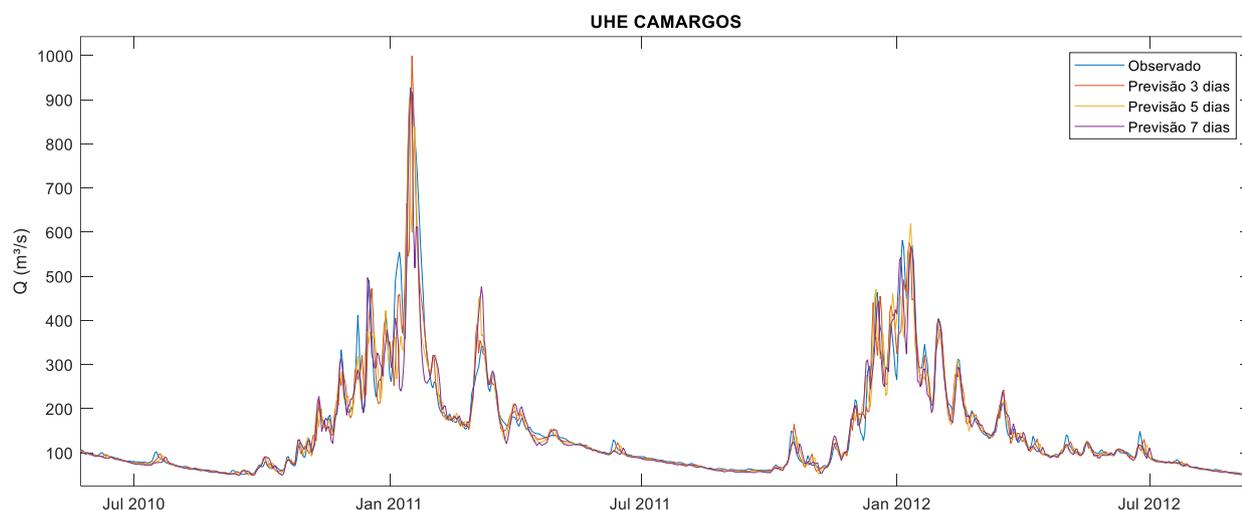
Para visualização geral desse comportamento de melhoria do desempenho (conforme coeficiente de Nash-Sutcliffe) nos primeiros dias de previsão com o uso da assimilação de dados, a Figura 4 apresenta os boxplots dos valores de NS para as 144 UHEs em relação à antecedência da previsão. Observa-se maiores valores de NS nos primeiros dias de previsão e a tendência de desempenho uniforme a partir do quinto dia de previsão.

Figura 4 – Boxplots com valores de Nash-Sutcliffe em função do horizonte de previsão nas 144 UHEs avaliadas na previsão com assimilação de dados



A Figura 5 apresenta uma ilustração de hidrogramas observado (em azul) e previstos com antecedência de 3 dias (vermelho), 5 dias (amarelo) e 7 dias (roxo) para a UHE Camargos.

Figura 5 – Hidrogramas de vazões observadas e previstas com antecedência de 3, 5 e 7 dias para UHE Camargos



CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou e avaliou a aplicação de um modelo hidrológico concentrado com assimilação de dados na previsão de vazões diárias, em um horizonte de curto-médio prazo (até 15 dias), para 144 usinas hidroelétricas (UHEs) do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Com utilização de um algoritmo de calibração automática (SCE-UA), foram obtidas calibrações satisfatórias para todas as usinas, com KGE variando de 0,49 a 0,96.

Ao avaliar o desempenho em modo de previsão, utilizando chuva real como forçante e o método de assimilação de dados Ensemble Kalman Filter para correção das variáveis de estado, observou-se que a acurácia do modelo (avaliada em termos do coeficiente de Nash-Sutcliffe) apresentou a tendência de melhoria até o quinto dia de previsão e posterior manutenção da mediana na ordem de 0,77 (aproximadamente a mediana encontrada durante a calibração, 0,76). Contudo, para algumas UHEs foi observado que o método de assimilação degradou as previsões a partir de determinado horizonte de previsão e, com base nisso, sugere-se um refinamento nas simulações a partir da calibração ou análise de sensibilidade dos parâmetros de assimilação e erros das variáveis de estado (adotados constantes para todas as UHEs nesse trabalho).

A partir dessas análises e dos modelos preparados neste trabalho, posteriormente serão comparados os desempenhos da previsão de curto-médio prazo obtidos com a metodologia apresentada com os desempenhos obtidos com um modelo de escala continental pós-processado e com os resultados obtidos operacionalmente pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Com esses resultados espera-se contribuir para melhoria do processo de previsão operacional de vazões no Brasil e, conseqüentemente, com a otimização da operação das usinas do SIN na produção de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

GAMA, C. H. A. (2019). Previsão operacional de vazões baseada em modelo hidrológico concentrado, assimilação de dados e previsões meteorológicas, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, Brasil.

SIQUEIRA, V. A.; PAIVA, R. C.; FLEISCHMANN A. S.; FAN, F. M.; RUHOFF A. L.; PONTES, P. R.; PARIS, A.; CALMANT, S., COLLISCHONN, W. (2018). Toward continental hydrologic-hydrodynamic modeling in south america, *Hydrology and Earth System Sciences* 22 (9) 4815–4842.

EVENSEN, G. (2003). The Ensemble Kalman Filter: theoretical formulation and practical implementation *Ocean Dynamics*. 53, pg. 343–367.

EVENSEN, G. (2004). Sampling strategies and square root analysis schemes for the EnKF, *Ocean Dynamics*, 54, pg. 539–560.

Duan, Q.; Sorooshian, S.; Gupta, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, vol. 28, n° 4. pg. 1015-1031.

Kolling Neto, A.; Siqueira, V.A.; Gama, C.H.d.A.; Paiva, R.C.D.d.; Fan, F.M.; Collischonn, W.; Silveira, R.; Paranhos, C.S.A.; Freitas, C. (2023). Advancing Medium-Range Streamflow Forecasting for Large Hydropower Reservoirs in Brazil by Means of Continental-Scale Hydrological Modeling. *Water*, 15, 1693.

AGRADECIMENTOS – Agradecemos à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao CNPq pela concessão de fomento e material para o desenvolvimento da pesquisa.