



**XXIV SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GOP/02

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO - IX**

**GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GOP**

**ESTIMATIVA DE HIDROGRAMAS AFLUENTES A RESERVATÓRIOS UTILIZANDO O FILTRO DE KALMAN  
POR ENSEMBLE**

**João Paulo Lyra Fialho Brêda(\*)  
IPH / UFRGS**

**Anderson Nascimento de Araujo  
COPEL – IPH / UFRGS**

**Franciele Zanandrea  
IPH / UFRGS**

**Germano Gondim Ribeiro Neto  
IPH / UFRGS**

**Rodrigo Cauduro Dias de Paiva  
IPH / UFRGS**

**RESUMO**

A estimativa da vazão afluente a reservatórios é de grande importância para a operação hidráulica em tempo real, bem como para o planejamento da operação de usinas hidrelétricas. Um método bastante usual para determinação da vazão afluente é o que utiliza a equação do balanço hídrico, no entanto resulta em séries ruidosas devido às incertezas na obtenção das informações de nível de água, vazão defluente e curva cota x volume. Nesse contexto, o presente trabalho propõe um método para contornar este problema, baseado no Filtro de Kalman por Ensemble, com grande potencial para geração de séries de afluência mais consistentes.

**PALAVRAS-CHAVE**

Incertezas na vazão afluente, Filtro de Kalman por Ensemble, Hidrograma Afluente

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A vazão afluente é a principal variável para a tomada de decisão da operação hidráulica de reservatórios, pois a partir dela são definidas as políticas de operação tanto para a maximização da geração de energia elétrica quanto para o controle de cheias (Deng et al. 2015a; Gragne et al., 2015). Para obtenção da vazão afluente a um reservatório, além da precipitação sobre o mesmo, é necessário também conhecer a vazão a montante oriunda do rio principal e dos demais afluentes. Normalmente a vazão do rio principal é monitorada por postos fluviométricos, porém a contribuição total da bacia incremental raramente é quantificada, tornando desconhecida a vazão total de entrada em um grande reservatório (Deng et al., 2015a; Deng et al., 2015b).

Outro processo para determinação da vazão afluente é a partir do método do balanço hídrico, baseado na conservação de massa. Basicamente o método do balanço hídrico estima a vazão afluente por meio da vazão defluente e da variação do volume armazenado, sendo que este é estimado pela relação cota x volume do reservatório. Este método é bastante utilizado para monitoramento das vazões afluentes aos reservatórios do Sistema Interligado Nacional (SIN) de Energia Elétrica, e são insumos para a operação hidráulica e programação energética dos aproveitamentos hidrelétricos. Conforme Buba et al. (2011), uma das vantagens do método do balanço hídrico é que no cálculo estão embutidas as contribuições da precipitação e as perdas por evaporação na superfície do reservatório.

Um problema encontrado nas séries de afluências obtidas por balanço hídrico é a oscilação das vazões ao longo do tempo, podendo ser associadas às incertezas na obtenção do nível de água do reservatório, na curva cota x volume, na curva de descarga dos vertedores ou até mesmo na curva de rendimento das máquinas. As manobras nas

(\*) Av. Bento Gonçalves, n° 9500 – Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS – CEP 91.501-970, Porto Alegre, RS, – Brasil Tel: (+55 51) 3308-7511 – Fax: (+55 51) 3308-7509 – Email: joaopaulofb@gmail.com

comportas dos vertedores são obtidas em tempo real diretamente a partir da vazão afluente e do nível de água, e devido às incertezas, pode acarretar em manobras desnecessárias ou até mesmo insuficientes para o controle operacional do reservatório durante cheias. Em períodos de estiagens as incertezas das variáveis que compõem o balanço hídrico poderão acarretar em vazões afluentes até mesmo negativas, devendo ser consistidas para serem usadas como variável de entrada para o planejamento da operação do aproveitamento hidrelétrico.

Para atenuar as oscilações das séries de vazão afluente comumente são utilizadas médias móveis de quatro horas, porém este método pode não ser suficiente para suavizar o hidrograma e, em alguns casos onde ocorre chuva direta na superfície do reservatório, os picos de afluência reais poderão ser subestimados. As médias móveis também são adotadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para consistência das séries de afluências a reservatórios e para atualização de séries históricas de vazões naturais (ONS, 2015). O objetivo da consistência das vazões naturais incrementais realizadas pelo ONS é a eliminação e/ou minimização de valores negativos e a suavização de grandes oscilações que forem incompatíveis com a natureza da bacia (ONS, 2011).

Uma alternativa para incorporar as incertezas das variáveis na estimativa das vazões afluentes a reservatórios e eliminar problemas de ruído dos resultados é a utilização do Filtro de Kalman por Ensemble (EnKF), como apresentado por Deng et al. (2015b). Os autores alcançaram resultados satisfatórios na obtenção de séries de vazões afluente mais suaves em reservatórios localizados na China, quando comparado ao método convencional por balanço hídrico. No entanto, o modelo adotado pelos autores, que considera a vazão persistente com erros aditivos, produziu uma resposta lenta a variações de vazão, e ocasionou em defasagem no hidrograma afluente, o que torna o método ineficaz durante períodos de cheia. Sendo assim, o presente trabalho propõe adaptações e melhorias a metodologia apresentada por Deng et al. (2015b), como a inclusão de erro multiplicativo da vazão e correção de viés, no intuito de reduzir o atraso do hidrograma afluente decorrente do uso do EnKF.

## 2.0 - MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do presente estudo para utilização do EnKF na obtenção de séries de vazão afluente mais consistentes é aplicada em três estudos de caso: (a) reservatório hipotético: admitido um reservatório representado por uma curva cota x volume e uma curva de descarga, e adotado um hidrograma sintético suavizado para teste; (b) reservatório da UHE Bento Munhoz da Rocha Netto (Foz do Areia) e (c) reservatório da UHE Governador Jayme Canet Júnior (Mauá), ambas considerando séries horárias de vazão afluente obtidas por balanço hídrico, vazão defluente, nível de água e curva cota x volume. Os três reservatórios são apresentados detalhadamente no item 2.1.

Nos estudos de caso foram aplicados dois modelos com atualização de estado por EnKF: (i) vazão afluente igual ao passo de tempo anterior (persistente), adotando erro aditivo, como considerado por Deng et al. (2015b); (ii) vazão afluente persistente adotando erro multiplicativo e correção de viés. A formulação do EnKF e a descrição detalhada dos modelos é apresentada no item 2.2.

Nos casos dos reservatórios de Foz do Areia e Mauá, os resultados do EnKF são comparados com as séries resultantes do balanço hídrico (BH) e da média móvel (MM). Já em relação ao reservatório hipotético, os hidrogramas resultantes do EnKF são comparados também com a série de vazão afluente sintética, tratada neste trabalho como "real". As métricas utilizadas para avaliação do desempenho do método proposto estão descritas em 2.3 e os parâmetros utilizados no filtro estão descritos no item 2.4.

### 2.1 Áreas de Estudo

#### 2.1.1. Reservatório Hipotético

O objetivo da utilização do reservatório hipotético e o seu respectivo hidrograma sintético perfeitamente suavizado é a validação do método proposto em uma situação onde previamente é conhecida a série de afluência "real", diferentemente dos estudos de caso. O hidrograma "real" horário, com 720 horas, pode ser visualizado na Figura 3, item 3.1.

A partir do hidrograma sintético ("real"), foram obtidos por balanço hídrico os respectivos níveis de água e volumes "reais" do reservatório com um passo de tempo de 1 min. O hidrograma sintético e os dados de nível e volume utilizados para comparar com os modelos propostos foram representados em escala temporal horária. As observações de nível de água do reservatório foram geradas atribuindo erros ao nível "real" do reservatório que seguem uma distribuição Normal aditiva com desvio padrão de 6 cm.

#### 2.1.2. Reservatório de Foz do Areia

O reservatório da UHE Governador Bento Munhoz da Rocha Netto, denominado Foz do Areia, está localizado no trecho médio da bacia hidrográfica do rio Iguaçu. A área de drenagem na seção da barragem é de 29.900 km<sup>2</sup> e a área inundada pelo reservatório no nível máximo Normal é de 139 km<sup>2</sup>. O reservatório possui volume total de 5.779

hm<sup>3</sup> e útil de 3.805 hm<sup>3</sup>, sendo as cotas operacionais iguais a 742 m para o nível máximo Normal e 700 m para o nível mínimo operativo. Foz do Areia tem capacidade máxima de geração de 1.676 MW e o reservatório possui vertedor de superfície com 4 comportas do tipo segmento, com vazão de projeto de 10.030 m<sup>3</sup>/s.

### 2.1.3. Reservatório de Mauá

O reservatório da UHE Governador Jayme Canet Júnior (Mauá) está localizado no trecho médio do rio Tibagi, na divisa entre os municípios paranaenses de Telêmaco Borba e Ortigueira. A sua área de drenagem é igual a 15.423 km<sup>2</sup> e a área inundada no nível máximo normal é de 65,8 km<sup>2</sup>. O reservatório possui volume total de 2.137 hm<sup>3</sup> e útil de 664 hm<sup>3</sup>, sendo as cotas operacionais iguais a 635 m para o nível máximo Normal e 626 m para o nível mínimo operativo. Mauá tem capacidade de geração de 361 MW e o reservatório possui vertedor de superfície com 4 comportas do tipo segmento, com vazão de projeto de 7.173 m<sup>3</sup>/s. Assim como Foz do Areia, a UHE Mauá também é operada pela Copel Geração e Transmissão S.A.

### 2.2 EnKF

O Filtro de Kalman por Ensemble é uma técnica de assimilação de dados que combina estimativas de um modelo com observações no intuito de diminuir as incertezas do sistema e fazer uma estimativa ótima das variáveis. A técnica desenvolvida por Evensen (1994) faz uso de um conjunto de simulações (Ensemble) geradas pela perturbação das variáveis/parâmetros do modelo para estimar as covariâncias entre as variáveis de estado e assim atualizar os dados a cada novo conjunto de observações.

Neste trabalho, o modelo é representado pela estimativa inicial das vazões afluentes ( $Q$ ), e as observações pelos dados de nível d'água no reservatório ( $Z$ ); sendo que ambas variáveis são perturbadas para obtenção de um Ensemble. Assumindo que a vazão defluente ( $O$ ) é conhecida, a vazão afluente é então utilizada para calcular o volume do reservatório ( $V$ ) com o uso da equação do balanço hídrico. Na sequência, o nível de água do reservatório ( $H$ ) é obtido por meio da curva cota x volume. Esse nível estimado ( $H$ ) é comparado com uma nova observação perturbada ( $Z$ ) e, através de operações algébricas considerando a covariância resultante do Ensemble, atualiza-se a vazão afluente e o volume, que são variáveis de estado do modelo. O fluxograma abaixo ilustra um resumo da metodologia apresentada.

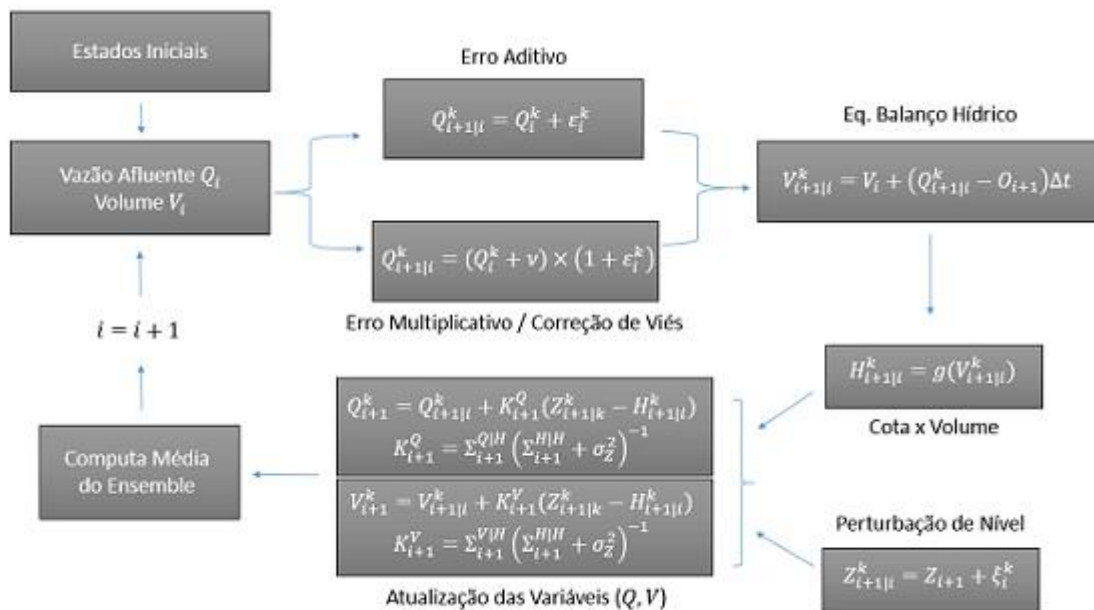


FIGURA 1 – Fluxograma explicativo da metodologia

No fluxograma anterior,  $H = g(V)$  é uma função que representa a curva cota x volume do reservatório;  $\Delta t$  é o intervalo de tempo;  $v$  representa a correção de viés que é comentada adiante;  $\Sigma^{XY}$  representa a covariância entre os elementos dos conjuntos  $X$  e  $Y$ , assim como  $\sigma_X^2$  representa a variância de  $X$ . O termo  $K$  é um ponderador que depende dos erros envolvidos (variâncias e covariâncias), conhecido na literatura como ganho de Kalman. Os termos  $\epsilon$  e  $\xi$  equivalem aos erros aleatórios que seguem uma distribuição normal de média zero ( $\epsilon \sim N(0, \sigma)$ ) da vazão ( $Q$ ) e do nível ( $Z$ ) respectivamente; e  $k$  está relacionado ao termo do Ensemble.

No trabalho de Deng et al. (2015b), foi considerada a hipótese de que a vazão afluente em um intervalo de tempo é igual a vazão afluente no intervalo de tempo anterior, uma suposição válida quando é adotado um pequeno intervalo

de tempo, da ordem de minutos. Os autores perturbaram a vazão adicionando um erro aleatório no processo de atualização, conforme a equação abaixo. Essa configuração foi denominada nesse trabalho como modelo de vazão persistente (EnKF\_P).

$$Q_{i+1|i}^k = Q_i^k + \varepsilon_i^k$$

No entanto, como comentado anteriormente, o modelo de vazão persistente apresentou um hidrograma afluente significativamente atrasado em relação ao hidrograma real. No intuito de diminuir essa defasagem é proposta uma adaptação do modelo considerando erro multiplicativo e correção de viés (EnKF\_V). Esse método utiliza as três últimas médias das correções da vazão afluente para adicionar um viés médio à vazão e considera um erro multiplicativo que suaviza o hidrograma em vazões baixas e prioriza a correção do atraso em vazões mais altas. As adaptações estão apresentadas nas equações a seguir:

$$viés(i) = K_i^Q \times \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (Z_i^k - H_i^k)$$

em que  $K$  representa o ganho de Kalman,  $Z$  é o nível de água perturbado,  $H$  o nível de água estimado pelo modelo,  $i$  o índice indicativo do tempo e  $k$  representa o termo do Ensemble. Se as variáveis  $viés$  dos três intervalos de tempo anteriores apresentarem o mesmo sinal (+ ou -), então:

$$v = \frac{1}{3}(viés(i) + viés(i-1) + viés(i-2))$$

$$Q_{i|i+1} = (Q_i + v) \times (1 + \varepsilon)$$

Caso contrário, esse modelo equivale ao modelo de vazão persistente (EnKF\_P).

### 2.3 Análise de Desempenho

O desempenho dos modelos foi avaliado por meio de índices e coeficientes estatísticos: Índice de Volume do Balanço Hídrico, Raiz do Erro Médio Quadrático, Coeficiente de Kling-Gupta e Índice de Ruído. Além disso é feita análise visual nos casos dos reservatórios reais pois não se conhece o hidrograma “verdadeiro” para comparação.

O Índice de Volume do Balanço Hídrico (IVBH) é utilizado para verificar se existe conservação de massa no sistema. O IVBH é o único coeficiente aplicado tanto no caso do reservatório hipotético quanto nos reservatórios de Foz do Areia e Mauá, pois não há necessidade de um dado “real” para comparação. O seu equacionamento é apresentado a seguir:

$$IVBH = \frac{(V_e - V_s) - \Delta V}{\bar{V}}$$

Em que  $V_e$  e  $V_s$  são, respectivamente, o volume de entrada (somatório da vazão afluente) e o volume de saída (somatório da vazão defluente) no reservatório,  $\Delta V$  corresponde à variação no armazenamento do reservatório e  $\bar{V}$  é a média do volume armazenado.

Para o caso do reservatório hipotético foram realizadas também análises estatísticas a fim de avaliar com maior precisão o desempenho de cada modelo, sendo a Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) e o coeficiente de Kling-Gupta (KGE em Gupta et al. 2009).

Para avaliação da suavidade do hidrograma, é utilizado o Índice de Ruído (IR) que é calculado pela média da autocorrelação das primeiras 5 horas, ou seja, o IR é dado pela média das correlações das vazões afluentes com ela mesma defasada em 1, 2, 3, 4 e 5 horas. Quanto mais perto de 1, mais suave é o hidrograma. Esse fator é elevado a 10 para facilitar o entendimento do desempenho dos métodos.

$$IR = \left( \frac{(r(Q_0, Q_1) + r(Q_0, Q_2) + r(Q_0, Q_3) + r(Q_0, Q_4) + r(Q_0, Q_5))}{5} \right)^{10}$$

É importante ressaltar que para os casos reais não é conhecido o hidrograma afluente “verdadeiro”, logo não se pode fazer uma quantificação da exatidão dos métodos. Por isso a análise tomada nesse trabalho é principalmente visual.

### 2.4 Parametrização do Método

Os parâmetros utilizados na formulação do Filtro de Kalman por Ensemble estão relacionados aos erros que perturbam a variável de estado vazão afluente e as observações de nível de água. Os erros aleatórios são gerados a partir de uma distribuição normal com média zero e desvio padrão a definir.

No caso do reservatório hipotético, foi atribuído um erro aleatório com desvio padrão de 6 cm para perturbação do nível, assim como o erro utilizado para geração das observações sintéticas (item 2.1.1). Dessa forma, foi assumido que a distribuição dos erros das observações era conhecida. Já os erros de vazão afluente adotados para o modelo de vazão permanente (EnKF\_P) e de correção de viés (EnKF\_V) foram de 4 m<sup>3</sup>/s e 4% respectivamente, sendo a média da vazão desse hidrograma pouco maior que 100 m<sup>3</sup>/s.

Para o reservatório de Foz do Areia, o desvio padrão do erro aleatório para o nível de água foi de 3 cm, conforme a diferença média entre dois postos limimétricos existentes no reservatório. Já o desvio padrão da vazão foi de 200 m<sup>3</sup>/s e 10%, respectivamente, para o EnKF\_P e EnKF\_V, sendo a média do período analisado (entre 06/2011 e 01/2016) da ordem de 900 m<sup>3</sup>/s.

Para o reservatório de Mauá, foi assumido um erro de nível de água igual a 3 cm, e erros de 80 m<sup>3</sup>/s e 10%, respectivamente, para as vazões do modelo EnKF\_P e EnKF\_V. O período analisado corresponde a 10/2012 a 03/2016, com vazão média de 400 m<sup>3</sup>/s.

Nota-se que foi admitido um desvio padrão relativo maior na vazão para os casos reais, pois nestes casos, todas as fontes de erros não são conhecidas (curva cota x volume, curva de descarga do vertedouro, etc.) e assim eles são considerados indiretamente na perturbação da vazão.

### 3.0 - RESULTADOS

#### 3.1 Reservatório Hipotético

Para o reservatório hipotético foi avaliado o desempenho dos métodos tomando como base um hidrograma sintético "Real" com 720 horas. A Tabela 1 expõe os índices de desempenho dos métodos.

Tabela 1 – Desempenho dos métodos para o reservatório hipotético

Método	IVBH (%)	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	KGE	IR
EnKF_V	2.82	3.56	0.9988	0.8948
Balanco Hídrico	-0.14	10.62	0.9877	0.7560
Média Móvel	6.14	5.67	0.9973	0.9061
EnKF_P	5.62	4.71	0.9981	0.9034

Como o método do balanço hídrico é baseado na conservação da massa, naturalmente esse método resultou em melhor IVBH, coeficiente que considera o balanço do que entra, o que sai e a variação de volume no sistema. Já para os demais índices o modelo do balanço hídrico (BH) teve a pior performance. Percebe-se por meio do coeficiente IR (Índice de Ruído) que a média móvel (MM) apresentou o hidrograma mais suave. No entanto a média móvel apresentou também a série mais defasada em relação ao hidrograma "Real", com cerca de 1,5 horas de atraso (Figura 2). Já os métodos baseados no EnKF resultaram em ruído bem parecido com a MM e um menor atraso, sendo a defasagem do EnKF\_V praticamente nula (Figura 3).

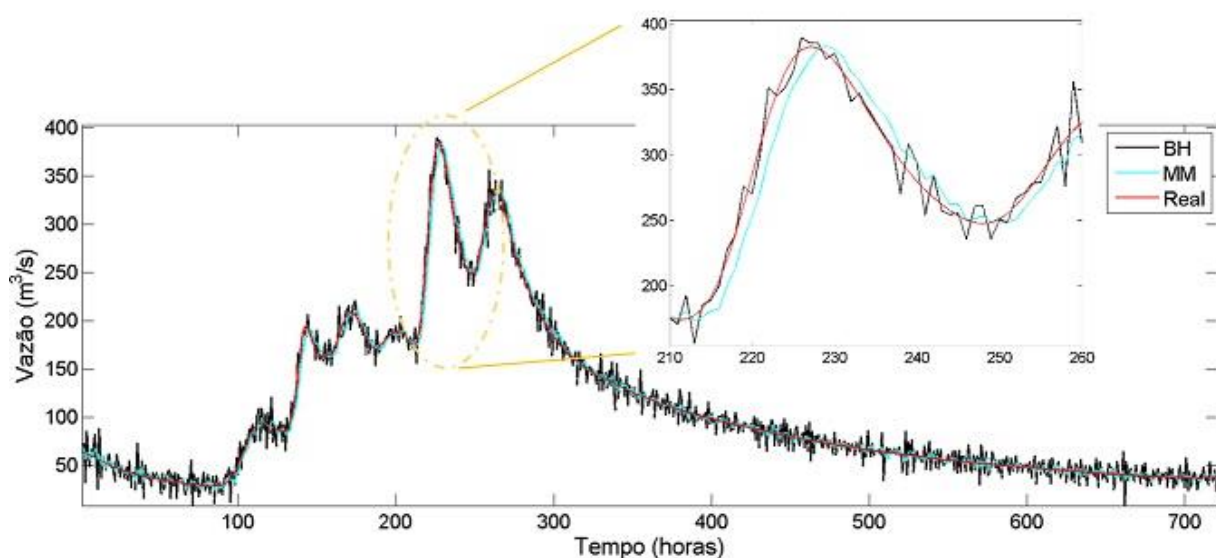


FIGURA 2 – Comparação entre o hidrograma "real" e os hidrogramas obtidos por Média Móvel (MM) e Balanço Hídrico (BH) para o reservatório hipotético

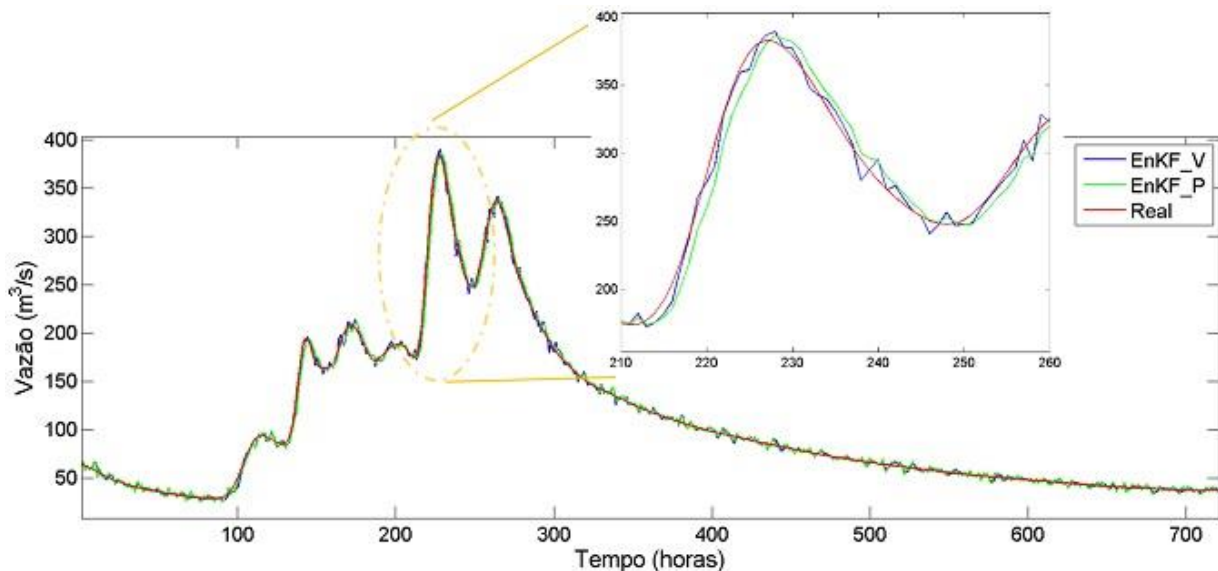


FIGURA 3 – Comparação entre o hidrograma “real” e os hidrogramas obtidos pelos modelos EnKF\_V e EnKF\_P para o reservatório hipotético

Os índices de maior relevância, ou seja, que medem os erros relacionados aos modelos (RMSE e KGE), apontaram o método do EnKF\_V com o melhor desempenho, seguido do EnKF\_P, enquanto o balanço hídrico teve uma performance significativamente pior que os demais. Pode-se notar no pico do hidrograma, representado na ampliação da Figura 3, o hidrograma com ruído gerado pelo modelo EnKF\_V, e o hidrograma com defasagem gerado pelo modelo EnKF\_P, ambos com desempenho melhor que a média móvel (Figura 2). O RMSE do EnKF\_V foi três vezes menor que o erro do balanço hídrico e o KGE muito próximo ao valor unitário.

### 3.2 Reservatórios de Foz do Areia e Mauá

Para os reservatórios reais a principal forma de avaliação do método proposto foi por critérios visuais. Embora os índices tenham sido calculados para um período de três anos e meio para o reservatório de Mauá e quatro anos e meio para o reservatório de Foz do Areia, as figuras apresentadas neste trabalho abrangem apenas o ano de 2014, dando destaque ao evento de cheia ocorrida no mês de junho.

Nota-se que o método EnKF\_P (em azul) resultou em hidrograma significativamente mais defasado do que o obtido pela média móvel (verde) para o reservatório de Mauá (Figura 5) e apresentou praticamente a mesma defasagem que a MM para o reservatório de Foz de Areia (Figura 4). A média móvel, devido a sua concepção de assumir a média do balanço hídrico de 3 tempos anteriores e o tempo atual, apresenta um atraso de 1,5 hora em relação à vazão afluente supostamente “verdadeira”. Logo, deve-se avaliar a viabilidade do uso do EnKF\_P para operação em tempo real de reservatórios considerando que seu atraso é maior do que o hidrograma obtido com a MM.

No entanto, o método EnKF\_P gera um hidrograma afluente bem suavizado, tanto em vazões baixas quanto em altas. Observa-se, principalmente no reservatório de Mauá, que o hidrograma gerado pelo EnKF\_P tem poucas oscilações comparado aos demais. O atraso e a suavização do hidrograma alcançados por este método estiveram de acordo com os resultados apresentados por Deng et al. (2015).

Já o método EnKF\_V apresentou desempenho mais consistente, com menor ruído e atraso equivalente à MM. Observa-se na Figura 4, para o reservatório de Foz do Areia, que em vazões altas o EnKF\_V (preto) acompanha a subida do hidrograma, praticamente sem defasagem se comparado com o balanço hídrico, e em vazões baixas, o método apresentou trechos muito suaves, embora mais defasados. Já no caso de Mauá a performance visualmente parece ter sido um pouco inferior, ainda assim com um atraso menor que a MM em vazões altas. Essa diferença entre vazões altas e baixas ocorre justamente devido ao erro relativo adotado pelo método, e o fato do EnKF\_V acompanhar a subida do hidrograma pode estar relacionado à correção do viés.

Percebe-se então que existe uma relação clara entre o atraso e a suavização do hidrograma, que podem ser ajustados conforme o erro atribuído à vazão afluente. Ao assumir erros maiores para o modelo (estimativa de vazão), o método EnKF reduz o atraso, porém aumenta o ruído do hidrograma. Dessa forma, ao utilizar o método é necessário entender previamente os efeitos dos parâmetros e definir qual o balanço ideal entre suavidade e defasagem buscado para operação do reservatório.

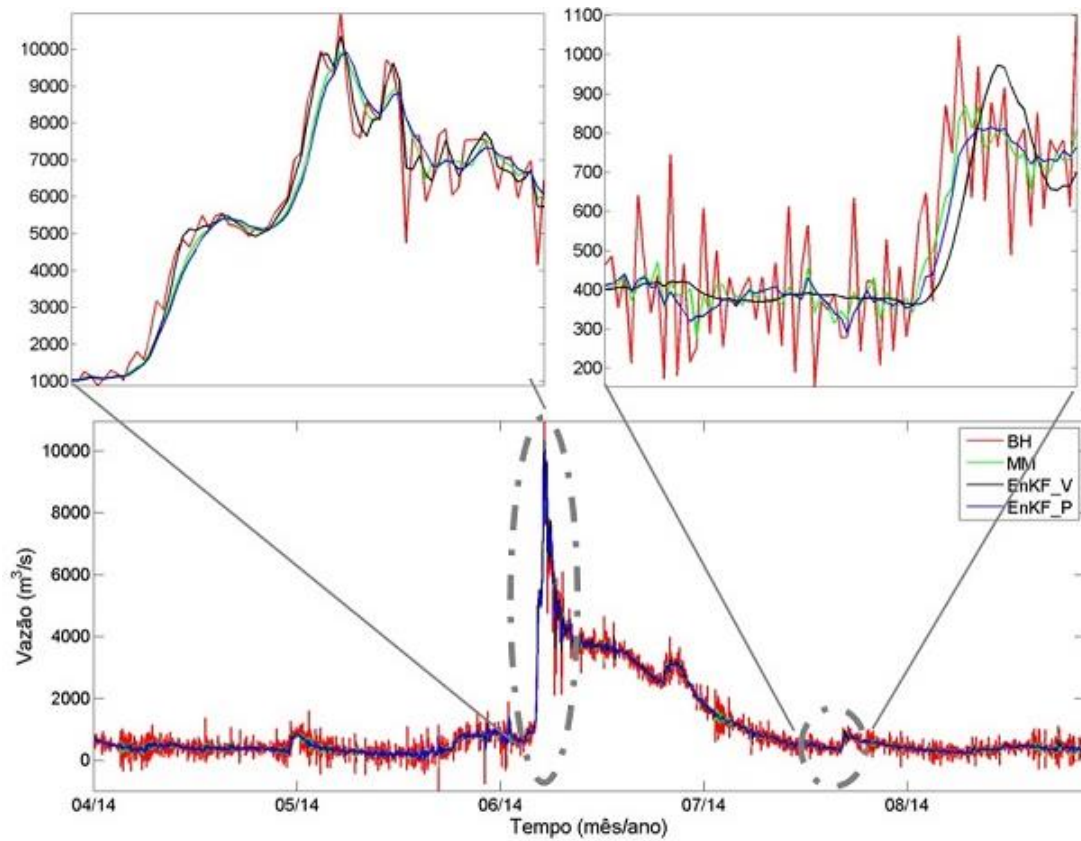


FIGURA 4 – Comparação entre os hidrograma obtidos por Balanço Hídrico (BH), Média Móvel (MM), EnKF\_V e EnKF\_P para o reservatório de Foz do Areia

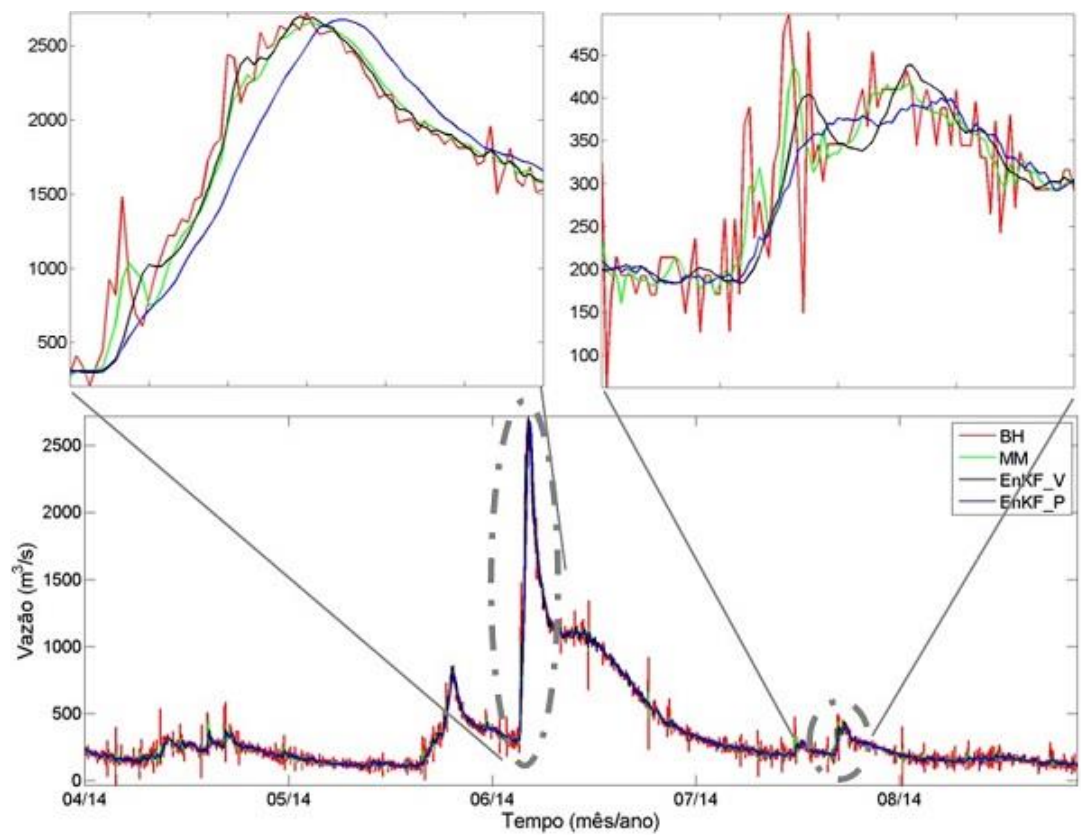


FIGURA 5 – Comparação entre os hidrograma obtidos por Balanço Hídrico (BH), Média Móvel (MM), EnKF\_V e EnKF\_P para o reservatório de Mauá

A Tabela 2 apresenta os índices IVBH e IR dos métodos propostos para estimativas de vazão afluente para os reservatórios de Foz do Areia e Mauá. Como comentado no item anterior, o erro de volume do balanço hídrico é praticamente nulo, devido a essência de sua formulação. Quanto aos demais métodos, os erros IVBH são baixos, normalmente menores que 1 %. Os Índices de Ruído (IR) confirmam a maior suavidade do hidrograma gerado pelo EnKF\_P para os dois reservatórios. Verifica-se que o IR do EnKF\_V é maior que o IR da MM; isso se deve principalmente porque na maior parte do período avaliado a vazão é baixa, logo o trecho do hidrograma gerado pelo EnKF\_V é bem suavizado.

Tabela 2 – Desempenho dos métodos para os reservatórios reais

Método	Foz do Areia		Mauá	
	IVBH (%)	IR	IVBH (%)	IR
EnKF_V	-1.18	0.9481	-0.30	0.9595
Balanço Hídrico	0.02	0.3982	0.01	0.7398
Média Móvel	-0.21	0.9147	-0.07	0.9438
EnKF_P	0.15	0.9532	0.68	0.9765

#### 4.0 - CONCLUSÕES

O Filtro de Kalman por Ensemble demonstrou ter grande potencial para a estimativa de vazão afluente a reservatórios. Em um caso hipotético com erros conhecidos, tanto o modelo de vazão permanente quanto o modelo com correção de viés e erro relativo, tiveram desempenho superior ao obtido com o uso da média móvel de quatro horas.

Em um caso real, existe uma maior complexidade em torno da quantificação dos erros, que envolvem desde erros sistemáticos (curva cota x volume e de descarga do vertedor), quanto erros aleatórios (linígrafos). No entanto, assumindo que existam erros apenas no nível de água do reservatório, os métodos baseados no EnKF resultaram em hidrogramas afluentes conceitualmente interessantes e representativos da realidade. Os erros atribuídos às variáveis de estado na geração do Ensemble influenciaram a suavidade e a defasagem do hidrograma. O método apresentado aqui, com correção de viés e erro multiplicativo, visualmente superou a performance da média móvel de quatro horas nesses aspectos. Dessa forma, o principal benefício desse trabalho foi testar e expor um método alternativo para obtenção de hidrogramas afluentes à reservatórios, considerando as incertezas das variáveis hidrológicas, balanceando suavidade e defasagem com o objetivo de gerar séries mais consistentes para melhorar os processos de planejamento e programação da operação de aproveitamentos hidrelétricos.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BUBA, H., ARAUJO, A. N., OLIVEIRA, A.G. Avanços no monitoramento da operação de reservatórios da Copel. Revista Técnica do Instituto de Engenharia do Paraná, Ano I, Número 3. Jul-Set/2011. ISSN 2236-336X.
- (2) DENG, C., LIU, P., LIU, Y., WU, Z., WANG, D. Integrated hydrologic and reservoir routing model for real-time water level forecasts. Journal of Hydrologic Engineering v. 20, n.9, 2015a.
- (3) DENG, C., LIU, P., GUO, S., WANG, H., WANG, D. Estimation of nonfluctuating reservoir inflow from water level observations using methods based on flow continuity. Journal of Hydrology. v. 529, p.1198-1210, 2015b.
- (4) EVENSEN, G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. Journal of Geophysical Research, v. 99, n. C5, 143-162, 1994.
- (5) GRAGNE, A. S., ALFREDSEN, K., SHARMA, A. Recursively updating the error forecasting scheme of a complementary modelling framework for improved reservoir inflow forecasts. Journal of Hydrology, v. 527, p.967-977, 2015.
- (6) GUPTA, H. V., KLING, H., YILMAZ, K. K., MARTINEZ, G.F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. Journal of Hydrology, v. 377, n. 1-2, p. 80-91, 2009.
- (7) ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Submódulo 9.2: Acompanhamento, análise e tratamento dos dados hidroenergéticos do Sistema Interligado Nacional. Revisão 2.0. Vigência 11/11/2011. Disponível em <http://www.ons.org.br>.
- (8) ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Atualização de séries históricas de vazões – Período 1931 a 2014. ONS 0205/2015. Disponível em <http://www.ons.org.br>.



## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



João Paulo Lyra Fialho Brêda, Maceió – AL, 1991  
 Graduado em Engenharia Ambiental no ano de 2015 pela Universidade Federal de Alagoas e Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental no ano de 2017 pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Doutorando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo IPH/UFRGS.



Anderson Nascimento de Araujo, Curitiba - PR, 1980  
 Graduado em Engenharia Civil (2004) e Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (2006), ambos pela UFPR. Doutorando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela UFRGS.  
 Desde 2010 atua como Engenheiro de Recursos Hídricos na Copel Geração e Transmissão S.A., Divisão de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Centro de Operação da Geração e Transmissão.



Franciele Zanandrea, Caxias do Sul – RS, 1986  
 Graduada em Engenharia Ambiental no ano de 2012 pela Universidade do Vale do Itajaí e Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental no ano de 2016 pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). Doutoranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo IPH/UFRGS.



Germano Gondim Ribeiro Neto, João Pessoa – PB, 1992  
 Graduado em Engenharia Civil no ano de 2015 pela Universidade Federal da Paraíba e Mestrando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.



Rodrigo Cauduro Dias de Paiva, Campo Grande – MS, 1984  
 Engenheiro Civil UFSM 2007, Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo IPH / UFRGS e em Hidrologia pela Université Toulouse III, França. Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS.