



INSTITUTO DE
PESQUISAS HIDRÁULICAS



COPEL
Geração e Transmissão



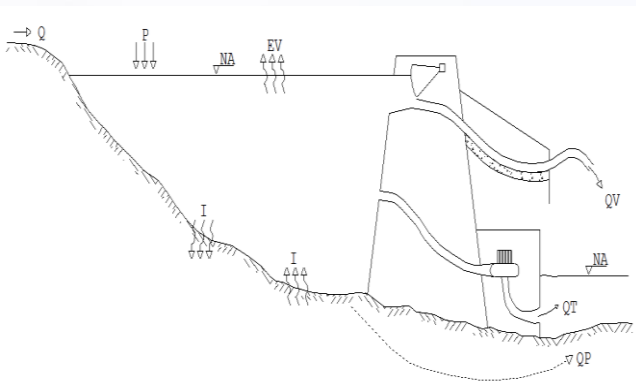
Seminário Nacional de Produção e
Transmissão de Energia Elétrica

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

Anderson N. de Araujo

Grupo 09 - GOP

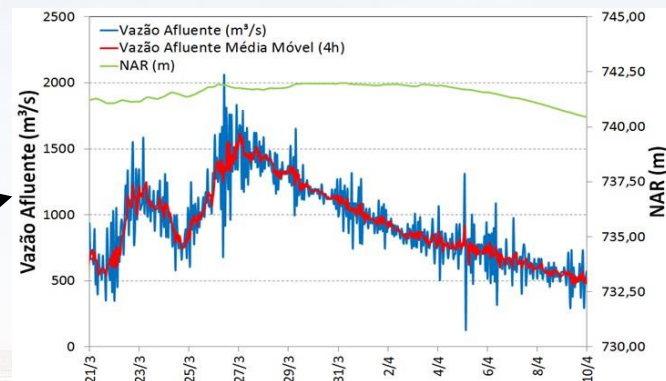
1. INTRODUÇÃO



Reservatório: Nível de água, curva cota x volume, curvas de descarga das estruturas de descarga e curva colina das máquinas

$$Q_A = Q_D + \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

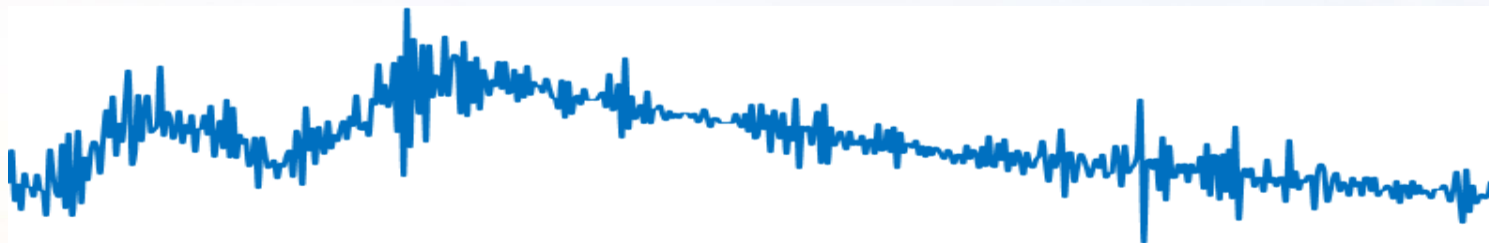
Equação do Balanço hídrico: Vazão afluente, Vazão vertida, vazão turbinada e variação de armazenamento de água no reservatório



Vazões afluentes: séries ruidosas em função das incertezas na estimativa das variáveis do balanço hídrico e das oscilações do nível de água do reservatório

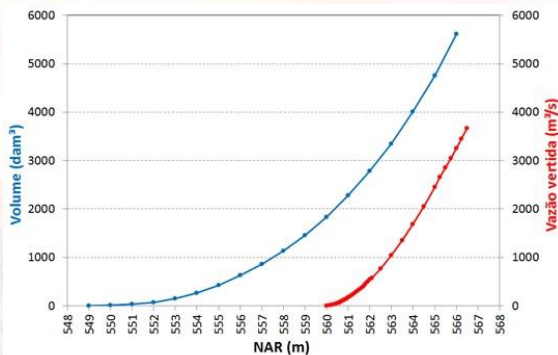
1. INTRODUÇÃO

Implicações das séries de afluências ruidosas:



- **Operação hidráulica:** manobras desnecessárias ou insuficientes nas estruturas de descarga;
- **Despacho das máquinas:** incompatibilidade da geração com a afluência ou problemas na programação de geração;
- **Inconsistência de séries:** por exemplo vazões negativas em períodos de estiagem ou picos falsos mesmo sem a ocorrência de chuva.

(a) **Hipotético:** adotado um hidrograma sintético “perfeitamente” suavizado;



(b) **UHE GBM (Foz do Areia):** Iguaçu, área de drenagem de 29.900 km², área inundada de 139 km², volume de 5.779 hm³ e potência de 1.676 MW;

(c) **UHE GJC (Mauá):** Tibagi, área de drenagem de 15.423 km², área inundada de 65,8 km², volume de 2.137 hm³ e potência de 361 MW.





Filtro de Kalman por Ensemble (EnKF): técnica de assimilação de dados Evensen (1994), que combina respostas de um modelo com observações no intuito de diminuir as incertezas do sistema e fazer uma estimativa ótima das variáveis.

2.2 EnKF

Modelos com atualização de estado por **EnKF**:

(a) vazão afluente igual ao passo de tempo anterior (**persistente**), adotando **erro aditivo**, como considerado por Deng et al.(2015b), denominado **EnKF_P**:

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

(b) vazão afluente **persistente** adotando **erro multiplicativo e correção de viés**, denominado **EnKF_V** :

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

$$v = \frac{1}{3} (viés(i) + viés(i-1) + viés(i-2))$$
$$Q_{i|i+1} = (Q_i + v) \times (1 + \varepsilon)$$

2.3 ANÁLISES DE DESEMPENHO

- Raiz do Erro Médio Quadrático:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P - O)^2}$$

- Índice de Volume do Balanço Hídrico:

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

- Coeficiente de Kling-Gupta:

$$KGE = 1 - \sqrt{(1 - r)^2 + \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_o}\right)^2 + \left(1 - \frac{\mu_m}{\mu_o}\right)^2}$$

- Índice de Ruído:

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

2.4 PARAMETRIZAÇÃO

Os erros aleatórios (no nível de água e na vazão afluente) são gerados a partir de uma distribuição normal com média zero e **desvio padrão**:

Reservatório	Nível de água (cm)	Vazão afluente		
		EnKF_P (m³/s)	EnKF_V (%)	Média (m³/s)
Hipotético	6	4	4	100
Foz do Areia	3	200	10	900
Mauá	3	80	10	100

3. RESULTADOS

Reservatório hipotético:

Método	IVBH (%)	RMSE (m ³ /s)
EnKF_V	2.82	3.56
Balanço Hídrico	-0.14	10.62
Média Móvel	6.14	5.67
EnKF_P	5.62	4.71

Método	KGE	IR
EnKF_V	0.9988	0.8948
Balanço Hídrico	0.9877	0.7560
Média Móvel	0.9973	0.9061
EnKF_P	0.9981	0.9034

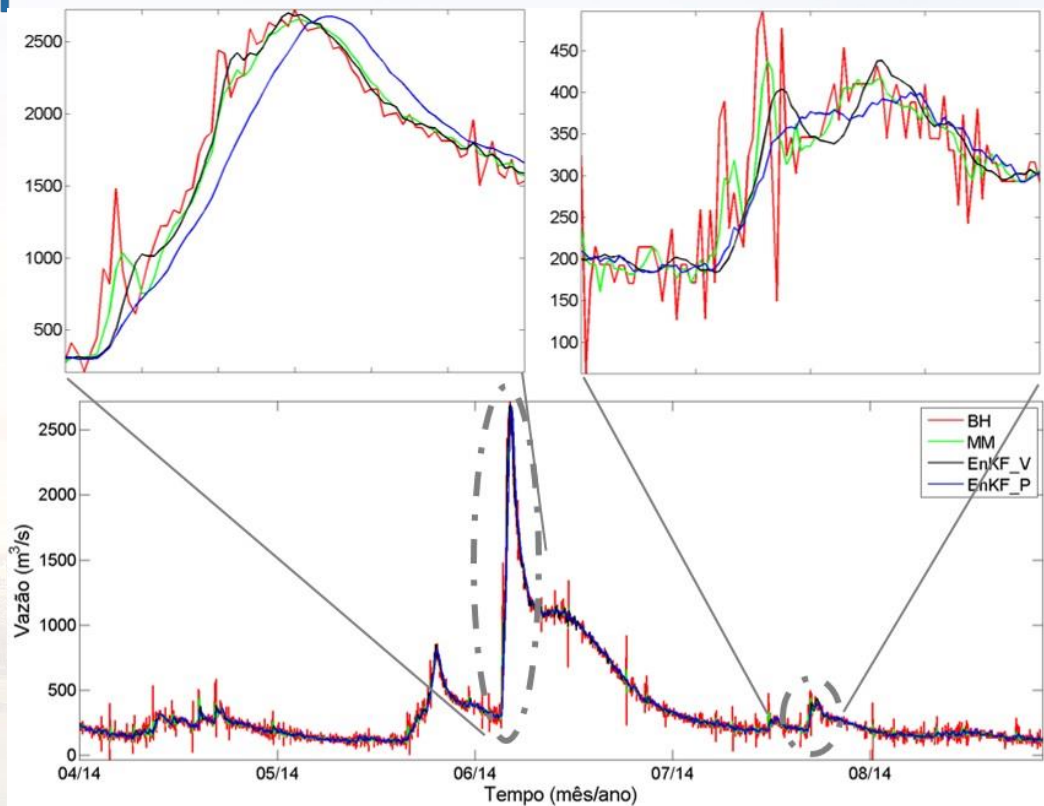
3. RESULTADOS

Reservatórios reais:

Método	Foz do Areia	
	IVBH (%)	IR
EnKF_V	-1.18	0.9481
Balanço Hídrico	0.02	0.3982
Média Móvel	-0.21	0.9147
EnKF_P	0.15	0.9532

Método	Mauá	
	IVBH (%)	IR
EnKF_V	-0.30	0.9595
Balanço Hídrico	0.01	0.7398
Média Móvel	-0.07	0.9438
EnKF_P	0.68	0.9765

3. RESULTADOS



UHE GJC (Mauá):

BH (Balanço Hídrico)
x MM (Média Móvel) x
EnKF_V (remoção de viés) x
EnKF_P (persistente)

- Em um **caso real**, assumindo erro apenas no nível de água, ambos modelos propostos superaram a performance da média móvel de 4 horas;
- Os erros atribuídos às variáveis de estado na geração do Ensemble influenciam tanto a **suavidade** quanto a **defasagem** do hidrograma.


5. 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>.

Anderson N. de Araujo

 (41) 3331-3326

 (41) 99192-7789

 anderson.araujo@copel.com

 www.copel.com