



## XIV ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE

### **DERIVAÇÃO DE UMA REGRA DE PROTEÇÃO PARA OPERAÇÃO MENSAL DO SISTEMA HÍDRICO CUREMA-MÃE D'ÁGUA**

*Flavia Nascimento Gomes<sup>1</sup> ; Camilo Allyson Simões de Farias<sup>2</sup>*

**RESUMO:** *Uma solução para o gerenciamento adequado de reservatórios é o uso de regras práticas e otimizadas de operação, que buscam, dentre outros objetivos, reduzir as inseguranças associadas ao excesso e à escassez de água. Neste estudo, aplicou-se Otimização Estocástica Implícita (OEI) e regressão não-linear com o objetivo de derivar uma regra de proteção para operação mensal do sistema hídrico Curema-Mãe D'Água, localizado no semiárido Paraibano. Para gerar a regra, seguiu-se as seguintes etapas: (1) simular cenários de vazões pelo Método dos Fragmentos (Svanidze, 1980); (2) usar um modelo determinístico para otimizar a operação do sistema, minimizando a vulnerabilidade (Hashimoto et al., 1982); e (3) relacionar as alocações e as disponibilidades hídricas otimizadas por meio de regressão não-linear. A regra OEI foi aplicada ao sistema hídrico considerando novas séries de vazões, totalmente independentes, e comparada com os resultados do modelo determinístico. Os racionamentos (hedging) proporcionados pela OEI foram similares aos encontrados pelo modelo determinístico sob previsão perfeita de vazões. Diferentemente do modelo determinístico, a regra OEI mostrou-se prática, pois necessita apenas da disponibilidade hídrica corrente para determinar as alocações.*

**Palavras-Chave** – Otimização estocástica implícita, vulnerabilidade, semiárido.

#### **INTRODUÇÃO**

Inserido no semiárido nordestino, um complexo hídrico de domínio federal destaca-se por sua capacidade volumétrica. O sistema Curema-Mãe D'Água, formado pelos açudes Coremas e Mãe D'Água, representa 33% da capacidade hídrica da Paraíba. Juntos, eles abastecem vários municípios da Paraíba e do Rio Grande do Norte, tendo um papel crucial no desenvolvimento socioeconômico da região (ANA, 2016).

Mesmo sendo composto por dois grandes reservatórios, o sistema Curema-Mãe D'Água tem enfrentado longos períodos de escassez hídrica, a exemplo da recente seca de 2012-2017. Em fevereiro de 2017 os açudes Coremas e Mãe D'Água entraram em colapso, com apenas 2,39% e 2,65% de suas capacidades hídricas, respectivamente (AESA, 2021). Contando com demandas para diversos usos e usuários, o sistema sofre com conflitos pela utilização da água escassa, ocorrendo, com frequência, a restrição dos consumos não prioritários (ANA, 2019; BRASIL, 1997).

---

1) Mestranda, Programa de Pós-Graduação em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Universidade Federal de Campina Grande, Rua Luiz Grande, S/N, Frei Damião, Sumé-PB, CEP: 58540-000, Fone: (83) 3353-1850, E-mail: gomflavia@gmail.com

2) Professor Associado III, Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Rua Jário Vieira Feitosa, nº 1770, Campus Universitário, Pombal-PB, CEP: 58.840-000, Fone: (83) 3431-4000, E-mail: camilo.allyson@professor.ufcg.edu.br



O uso de regras operacionais de reservatórios obtidas por Otimização Estocástica Implícita (OEI) apresenta-se como uma alternativa para mitigar os prejuízos decorrentes das secas. O procedimento consiste em otimizar a operação do reservatório sob diversos cenários sintéticos de vazões afluentes; e em definir regras operacionais por meio de modelos de regressão, normalmente relacionando valores otimizados de alocação e de disponibilidade hídrica (Carneiro e Farias, 2013; Celeste *et al.*, 2005; Willis, Finney e Chu, 1984; Young Jr, 1967).

Visando reduzir a vulnerabilidade hídrica na região abastecida pelos açudes Coremas e Mãe D'Água, este estudo propõe uma regra prática, via Otimização Estocástica Implícita (OEI) e regressão não-linear, para operação mensal do referido sistema hídrico.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de Estudo

O sistema hídrico Curema-Mãe D'Água é formado pela junção dos açudes Coremas e Mãe D'Água, que se tornam um só reservatório quando atingem a cota de 237 m. Abastecido pelos rios Aguiar, Piancó e Emas, os reservatórios buscam atender às demandas de abastecimento humano e industrial, pecuária, irrigação, aquicultura e vazão ecológica, que totalizam 7,99 m<sup>3</sup>/s (ANA, 2004; ANA, 2016). Neste estudo, os dados mensais de vazões afluentes, evaporação e precipitação foram obtidos no sistema HidroWeb (ANA, 2022) e em Lima (2004).

Como observado em Celeste *et al.* (2009), a implementação matemática do sistema hídrico foi simplificada, assumindo os dois açudes como um só reservatório equivalente com volumes mínimo e máximo iguais a 46,8 hm<sup>3</sup> e 1.159 hm<sup>3</sup>, respectivamente (ANA, 2014). A curva área × volume foi obtida a partir da Nota Técnica Conjunta nº 02/2014/SRE/SUM-ANA (ANA, 2014).

### Metodologia

A regra de proteção foi determinada com base em Otimização Estocástica Implícita (OEI) por meio dos seguintes passos: (1) simular  $M$  meses de vazões sintéticas (estocásticas); (2) aplicar um modelo determinístico (DET) para otimizar a operação do sistema; e (3) relacionar alocações e disponibilidades hídricas otimizadas via regressão não-linear.

A simulação estocástica de vazões foi conduzida pelo Método dos Fragmentos (Svanidze, 1980), que tem sido empregado com sucesso em regiões semiáridas (Carneiro e Farias, 2013).

Na sequência, otimizou-se a operação mensal do reservatório equivalente, considerando como entradas as vazões sintéticas. O modelo determinístico deste estudo tem como objetivo a minimização da vulnerabilidade hídrica do sistema (Hashimoto *et al.* 1982), dada pela Equação 1.

$$\min VUL = \sum_{t=1}^M \left[ \frac{R(t) - D(t)}{D(t)} \right]^2 \quad (1)$$

onde  $M$  é o horizonte mensal de operação;  $R(t)$  é a liberação de água (alocação) no mês  $t$ ; e  $D(t)$  é a demanda total do reservatório no mês  $t$ .

O balanço hídrico da operação foi representado por:

$$\begin{aligned} V(1) &= V(0) + Q(1) - R(1) - Vert(1) - E(1) + P(1) \\ V(t) &= V(t-1) + Q(t) - R(t) - Vert(t) - E(t) + P(t); \forall t = 2, \dots, M. \end{aligned} \quad (2)$$



em que  $V(0)$  é o volume inicial do reservatório equivalente,  $Q(t)$  é a vazão afluente no mês  $t$ ;  $Vert(t)$  é o eventual vertimento em  $t$ ; e  $E(t)$  e  $P(t)$  são os volumes evaporados e precipitados na superfície líquida do reservatório durante o mês  $t$ , respectivamente.

As alocações, os volumes e os vertimentos foram restritos às seguintes inequações:

$$0 \leq R(t) \leq D(t); \forall t \quad (3)$$

$$V_{min} \leq V(t) \leq V_{max}; \forall t \quad (4)$$

$$Vert(t) \geq 0; \forall t \quad (5)$$

com  $V_{min}$  e  $V_{max}$  sendo os volumes mínimo (ou morto) e máximo do reservatório equivalente, respectivamente.

Após a obtenção dos valores otimizados de  $R(t)$  e  $V(t)$ , para  $t = 1, \dots, M$ , procedeu-se para a calibração da regra de proteção OEI. Para isso, as alocações ótimas foram relacionadas com as disponibilidades hídricas, conforme a Equação 6, adaptada de Porto *et al.* (2002).

$$R(t) = \alpha[V(t-1) - V_{min} + Q(t)]^\beta \quad (6)$$

em que  $\alpha$  e  $\beta$  são os parâmetros de ajuste, a serem calibrados por meio de regressão não-linear.

Uma vez calibrada, a regra OEI ficou apta para determinar alocações mensais, dependendo apenas da disponibilidade hídrica atual. Nesta aplicação, a regra OEI foi testada para a operação do reservatório considerando novas séries de vazões, totalmente independentes. As alocações geradas foram comparadas com as obtidas pela aplicação do modelo DET. Registra-se que o modelo DET conhece todo o horizonte de vazões e, portanto, possui recursos para definir as melhores alocações.

## Aplicação

O Método dos Fragmentos foi calibrado com base nas vazões mensais observadas nos postos hidrológicos de Aguiar, Emas e Piancó, usando o período de 2005 a 2020 (16 anos). Para derivar a regra OEI, o modelo de otimização determinístico foi aplicado considerando 504 anos de vazões mensais geradas pelo Método dos Fragmentos. O volume inicial do reservatório equivalente foi assumido como 21,8% da sua capacidade máxima, correspondente à média dos volumes observados no início do mês de janeiro. Os dois primeiros e últimos anos dos resultados foram excluídos para evitar problemas com condições de contorno. Deste modo, o procedimento disponibilizou 500 anos ( $M = 6.000$  meses) de dados de vazão e de valores otimizados de alocação e volume disponível.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma comparação das propriedades estatísticas calculadas para a série sintética de vazões (500 anos) com àquelas provenientes da série histórica (2005-2020) está disponível na Figura 1. Assim como em Carneiro e Farias (2013) e Farias et al. (2016), o Método dos Fragmentos reproduziu adequadamente as médias, os desvios e as distorções para cada mês do ano.

Após a otimização da operação do reservatório equivalente pelo modelo DET, calibrou-se os parâmetros da regra OEI, obtendo-se  $\alpha = 234.311,7700$  e  $\beta = 0,2170$ . A representação da regra OEI e dos dados otimizados de alocação e disponibilidade hídrica estão dispostos na Figura 2.

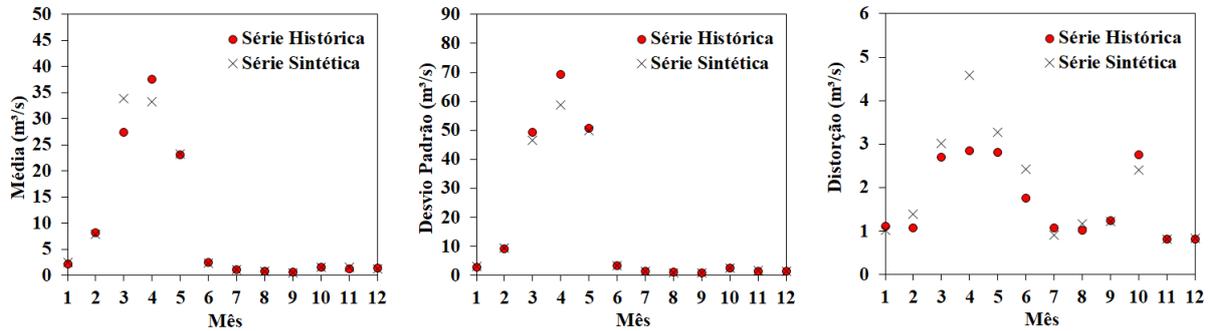


Figura 1 – Comparação das propriedades estatísticas das séries de vazões histórica e sintética.

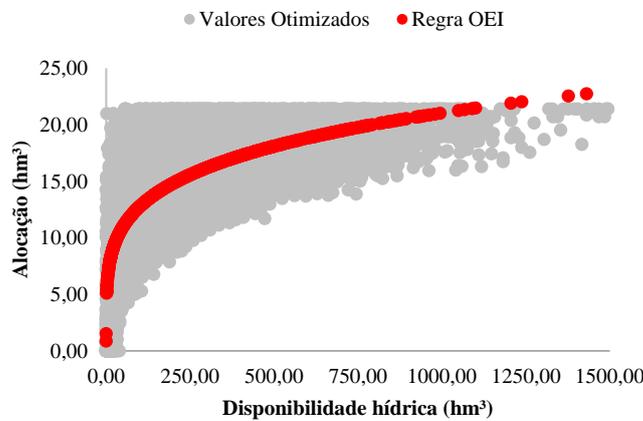


Figura 2 – Ajuste da regra OEI

Para validação da modelagem, foram realizadas 10 novas simulações, cada uma com 24 anos de vazões sintéticas geradas pelo Método dos Fragmentos e totalmente independentes das usadas na calibração da regra OEI. Para contemplar as condições de contorno, os dois anos iniciais e finais de cada simulação foram desconsiderados, resultando em 20 anos de dados. Na Tabela 1 estão dispostas as vulnerabilidades médias mensais para as dez simulações, em que é possível verificar a compatibilidade entre os valores obtidos pelo modelo DET e pela regra OEI.

Por apresentar valores intermediários de vulnerabilidade média, a Sim#10 foi escolhida para a avaliação do comportamento das alocações e dos volumes do reservatório no tempo. Os resultados para a Sim#10, considerando a regra OEI e o modelo DET, podem ser observados na Figura 3.

Tabela 1 – Vulnerabilidade média mensal para os modelos DET e OEI nas 10 simulações de 20 anos.

Simulação	DET	OEI	Simulação	DET	OEI
Sim#1	0,1213	0,1398	Sim#6	0,0358	0,0582
Sim#2	0,1548	0,1766	Sim#7	0,1195	0,1443
Sim#3	0,1213	0,1394	Sim#8	0,1070	0,1353
Sim#4	0,0339	0,0502	Sim#9	0,1265	0,1390
Sim#5	0,2004	0,2275	Sim#10	0,0727	0,0928

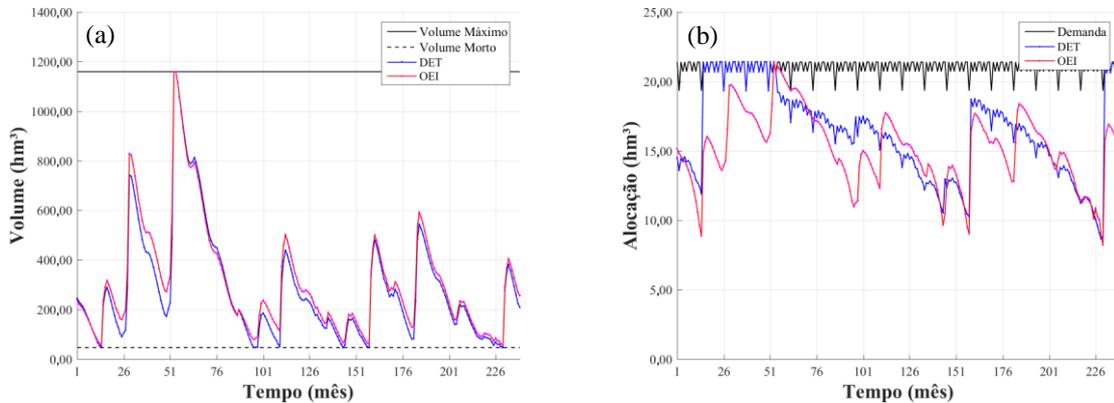


Figura 3 – Comportamento do (a) volume do reservatório equivalente e das (b) alocações na Sim#10.

O modelo DET, que tem informações sobre o cenário futuro de vazões, racionaliza as liberações para minimizar a vulnerabilidade total do sistema. Observa-se, pela Figura 4, que a regra OEI produz comportamentos de alocação e de volume similares aos verificados no modelo DET, ou seja, as liberações ocorrem com o intuito de reduzir os déficits hídricos mais severos. Desempenhos semelhantes para outro sistema hídrico foram encontradas por CELESTE et al. (2005) e FARIAS (2009). Diferentemente do modelo DET, a regra OEI é prática e simples, já que necessita apenas da disponibilidade hídrica corrente e da aplicação de uma única equação.

## CONCLUSÃO

Este estudo apresentou uma regra de proteção (regra OEI) baseada em Otimização Estocástica Implícita e regressão não-linear para operação mensal do sistema hídrico Curema-Mãe D'Água, localizado no semiárido Paraibano.

A regra OEI foi ajustada para relacionar dados otimizados de alocação e de disponibilidade hídrica, obtidos a partir da aplicação de um modelo de otimização determinístico (DET). O modelo DET tinha como função minimizar a vulnerabilidade do sistema hídrico sob cenários sintéticos de vazões gerados pelo Método dos Fragmentos.

Em simulações com novas vazões sintéticas, a regra OEI, que necessita apenas da disponibilidade hídrica corrente, gerou vulnerabilidades médias mensais e alocações semelhantes às encontradas pelo modelo determinístico sob previsão perfeita. Assim, espera-se que a regra OEI, considerando a praticidade e a eficiência demonstradas neste estudo, seja uma alternativa viável para a operação do sistema hídrico Curema-Mãe D'Água.

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Programa de Pós-Graduação em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), por meio do Projeto CAPES/ANA AUXPE nº 2717/2015, pelo suporte financeiro e técnico-científico.

## REFERÊNCIAS

ANA (2022). Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). Portal HidroWeb. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em 4 de janeiro de 2022.



- ANA (2019). Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). Nota Técnica nº 15/2019/COMAR/ SER. Brasília/DF.
- ANA (2016). Agência Nacional de Águas (Brasil). “*Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu (Resumo Executivo)*”. Brasília/DF.
- ANA (2014). Agência Nacional de Águas (Brasil). Nota Técnica Conjunta nº 2/2014/SRE/SUM-ANA. Brasília/DF.
- ANA (2004). Agência Nacional de Águas (Brasil). “*Resolução nº 687/2004: Marco Regulatório para a Gestão dos Sistema Curema-Açu (...)*”. Brasília/DF.
- BRASIL (1997). Lei nº 9.433/1997. “*Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, Cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (...)*”. Brasília/DF.
- CARNEIRO, T. C.; FARIAS, C. A. S. (2013). “*Otimização Estocástica Implícita e Redes Neurais Artificiais para Auxílio na Operação Mensal dos Reservatórios Coremas - Mãe d’Água*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 18, n. 4, pp. 115-124.
- CELESTE, A. B.; CURI, W. F.; CURI, R. C. (2009). “*Implicit stochastic optimization for deriving reservoir operating rules in semiarid Brazil*”. Pesquisa Operacional, v. 29, n. 1, pp. 223-234.
- CELESTE, A. B.; SUZUKI, K.; KADOTA, A.; SANTOS, V. S. (2005). “*Derivation of reservoir operating rules by implicit stochastic optimization*”. Annual Journal of Hydraulic Engineering, v. 49, n. 2, pp. 1111-1116.
- FARIAS, C. A. S.; MACHADO, E. C. M.; BRASILIANO, L. N. (2016). “*Monthly reservoir operating rules generated by implicit stochastic optimization and self-organizing maps*”. Sustainable Hydraulics in the Era of Global Change: Proc. of the 4th IAHR Europe Congress. CRC Press, pp. 138-144.
- FARIAS, C. A. S. (2009). “*Derivation of Hedging Rules and Forecasts by Artificial Neural Networks for Optimal Real-Time Management of an Integrated Water Resources System*”. Tese de Doutorado. Ehime University, Matsuyama/Japão. 127 p.
- HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J.; LOUCKS, P. (1982). “*Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation*”. Water Resources Research, v. 18. n. 1, pp.14-20.
- LIMA, C. A. G. (2004). “*Análise e sugestões para diretrizes de uso das disponibilidades hídricas superficiais da bacia hidrográfica do Rio Piancó, situada no Estado da Paraíba*”. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, 274 p.
- PORTO, R. L. L. (Org.); LANNA, A. E. L.; BRAGA JR., B. P. F.; CIRILO, ZAHED FILHO, K; J. A.; AZEVEDO, L. G. T.; BARROS, M. T. L.; BARBOSA, P. S. F. (2002). “*Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*”. Porto Alegre/RS: UFRGS, 419 p.
- SVANIDZE, G. G. (1980). “*Mathematical Modeling of Hydrologic Series (for Hydroelectric and Water Resources Computations)*”. Fort Collins: Water Resources Publications.
- WILLIS, R.; FINNEY, B. A.; CHU, W. S. (1984). “*Monte Carlo optimization for reservoir operation*”. Water Resources Research, v. 20, n. 9, pp. 1177-1182.
- YOUNG JR, G. K. (1967). “*Finding reservoir operating rules*”. Journal of the Hydraulic Division, v. 93, n. HY6, pp. 297-321.