

Curvas-Guia Operacionais de Reservatório Sergipano Derivadas por Otimização Estocástica Implícita e Regressão Não Linear

José Amaury de Sousa Santos*, Alcigeimes B. Celeste*

Resumo

Este artigo apresenta o desenvolvimento e aplicação de curvas-guia operacionais de reservatórios de abastecimento, usando como estudo de caso a barragem do rio Poxim, em Sergipe, por meio da metodologia de otimização estocástica implícita suportada por análises de regressão (OEI-REG). O desempenho da OEI-REG é comparado com os da política de operação padrão de reservatórios (SOP: *standard operating policy*), da otimização determinística perante previsão perfeita de aflúências futuras (ODPP) e da programação dinâmica estocástica (PDE). A princípio, são empregados cem cenários de cem anos de vazões mensais para a calibração do modelo. Posteriormente, lança-se mão de cem novas séries de aflúências visando a validação dos quatro procedimentos estudados. Os resultados indicam a viabilidade da utilização da OEI, tendo em vista sua menor vulnerabilidade em relação à SOP, assim como a proximidade de suas operações com as da ODPP. Comparando-se a OEI-REG com a PDE, percebe-se a curta distância entre os valores advindos de ambas, inclusive operações menos vulneráveis por meio da OEI-REG, justificando a adoção desta, por sua matemática simplificada em comparação com a PDE.

Palavras-chave

Otimização Estocástica; Operação de Reservatórios; Curvas-guia; Regressão.

Operational Rule Curves of a Reservoir in Sergipe Derived by Implicit Stochastic Optimization and Nonlinear Regression

Abstract

This paper presents the development and application of operational rule curves for water supply reservoirs, using as a case study the Poxim river dam, Sergipe, by means of implicit stochastic optimization supported by regression analysis (ISO-REG). The performance of ISO-REG is compared with those of the standard reservoir operating policy (SOP), perfect-forecast deterministic optimization (PFDO) and stochastic dynamic programming (SDP). At first, a hundred 100-year monthly inflow scenarios are used for the model calibration. Later, a hundred new inflow series are applied for validation of the four procedures. The results indicate the feasibility of using ISO in view of its less vulnerability when compared to the SOP as well as the proximity of its operations with those from the PFDO. The comparison of ISO-REG with SDP shows small differences between both, including less vulnerable operations by ISO-REG, justifying its adoption for its simplified mathematics as compared to SDP.

Keywords

Stochastic Optimization; Reservoir Operation; Rule curves; Regression.

I. INTRODUÇÃO

Demandas hídricas gradativamente maiores e períodos de seca prolongados estão exigindo cada vez mais dos reservatórios brasileiros, ocorrendo até mesmo casos de utilização de seus volumes mortos [1], [2], [3], [4]. A situação torna-se ainda mais grave no semiárido brasileiro, onde a má gestão hídrica alia-se a um cenário climático desfavorável, caracteri-

zado por altas taxas de evaporação, variação espacial e temporal das chuvas, além de baixas intensidades pluviométricas, o que, por sua vez, provocam transtornos sociais, econômicos e ambientais. Deste modo, percebe-se a necessidade da adoção, por parte dos gestores de recursos hídricos, de políticas sustentáveis para a operação das obras hidráulicas existentes, particularmente dos reservatório de abastecimento, visando a racionalização dos insumos disponíveis, tendo em vista a impossibilidade de efetiva interferência nas condicionantes impostas pela natureza.

* Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Civil
email: amaury.civil@gmail.com, geimes@yahoo.com

A operação de reservatórios de abastecimento é geralmente norteada pelas chamadas curvas-guia, as quais definem os requisitos sazonais de armazenamento e estipulam as ações que devem ser tomadas condicionadas ao estado atual do

sistema. Técnicas matemáticas de otimização podem auxiliar no processo de construção das curvas uma vez que possuem a habilidade de examinar implicitamente todas as alternativas possíveis e procurar pela decisão ótima. Ao longo das últimas décadas, vários autores apresentaram o estado da arte da otimização matemática aplicada à operação de reservatórios [5], [6], [7]. Um dos trabalhos mais recentes foi publicado por [8].

A incorporação das incertezas hidrológicas, particularmente das aflúências futuras, na otimização da operação de reservatórios é comumente realizada através da programação dinâmica estocástica (PDE), um tipo de otimização estocástica explícita (OEE) que incorpora modelos probabilísticos de vazão diretamente no problema de otimização [9]. A despeito das muitas décadas de pesquisa destinadas à aplicação destas técnicas na operação de reservatórios, muitos operadores ainda são adversos ao uso de PDE ou OEE por serem procedimentos matematicamente complexos e mais difíceis de serem compreendidos em comparação com os de simulação [5]. Como consequência, outras pesquisas têm-se centrado em técnicas alternativas tais como a otimização estocástica implícita (OEI), que, além de ser capaz de incorporar a estocasticidade das aflúências e de fornecer curvas-guia, é matematicamente mais simples do que a PDE [10].

Este artigo descreve o emprego da otimização estocástica implícita auxiliada por análises de regressão aplicada na derivação de curvas-guia operacionais ótimas tendo como estudo de caso o reservatório formado pela recém construída barragem do rio Poxim, no estado de Sergipe. As regras operacionais derivadas pela OEI são comparadas com operações conduzidas pela política de operação padrão de reservatórios, por programação dinâmica estocástica, e por um modelo de otimização determinística considerando previsão perfeita de aflúências.

II. MATERIAL E MÉTODOS

A. Otimização Estocástica Implícita

A otimização estocástica implícita emprega um modelo de otimização determinística para operar o reservatório sob vários cenários de aflúências igualmente prováveis e, em seguida, examina o conjunto resultante de dados operacionais ótimos a fim de estabelecer as curvas-guia [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16]. Os cenários de aflúência podem ser selecionados a partir dos registros históricos (quando a série é suficientemente longa), mas são geralmente obtidos por modelos de geração de vazões sintéticas. Para cada uma das realizações de aflúência, uma política de operação diferente é encontrada. Normalmente, os resultados ótimos de operação são agrupados por mês (janeiro a dezembro) e uma correlação entre a alocação mensal do reservatório em função do armazenamento no início do mês e da aflúência esperada no mês é buscada.

Neste trabalho, o procedimento de OEI utilizado para a construção de curvas-guia mensais foi conduzido da seguinte forma:

- 1) Gerar 100 cenários, cada um com 110 anos de aflúências mensais por meio do modelo Thomas-Fiering [17], verificado em outras pesquisas como sendo um procedimento eficiente para geração sintética de vazão em rios

nordestinos, particularmente rios sergipanos [18], [19], [20];

- 2) Para cada sequência de 110 anos, achar as liberações ótimas de água a partir de um modelo de otimização determinística sob previsão perfeita de aflúências (Seção II-A.1). Descartar os primeiros e últimos cinco anos de dados para evitar a influência de condições iniciais e finais de armazenamento;
- 3) Subdividir o conjunto obtido de dados operacionais ótimos em subconjuntos para cada mês do ano (janeiro até dezembro);
- 4) Para cada subconjunto contendo um total de 10000 dados ($100 \text{ cenários} \times 100 \frac{\text{anos}}{\text{cenário}}$), correlacionar a alocação de cada mês t do ano, $R(t)$, com o volume armazenado no início do mês, $S(t-1)$, e a aflúência esperada para o mês, $I(t)$:

$$R(t) = \psi(S(t-1), I(t)) \quad (1)$$

Tipicamente, técnicas de regressão linear e não linear são empregadas para estabelecer a função ψ que correlaciona as variáveis. Esta pesquisa utilizou o procedimento detalhado na Seção II-A.2.

1) *Modelo de Otimização Determinística:* O modelo de otimização determinística, utilizado no passo 2 do procedimento acima, assume que o principal objetivo da operação é satisfazer as demandas o máximo possível sem comprometer o sistema, encontrando as alocações ótimas mensais de água do reservatório. O objetivo é minimizar a soma dos desvios quadráticos entre liberações e demandas obedecendo a equação do balanço hídrico do reservatório e as restrições de domínio, que definem limites inferiores e superiores para armazenamentos, liberações e vertimentos. O problema de otimização é formulado como segue:

$$\text{minimizar } \sum_{t=1}^N \left[\frac{D(t) - R(t)}{D(t)} \right]^2 \quad (2)$$

sujeito a

$$S(t) = S(t-1) + I(t) - E(t) - R(t) - Sp(t), \quad \forall t \quad (3)$$

$$0 \leq R(t) \leq D(t), \quad \forall t \quad (4)$$

$$S_{\min} \leq S(t) \leq S_{\max}, \quad \forall t \quad (5)$$

$$Sp(t) \geq 0, \quad \forall t \quad (6)$$

onde N é o horizonte de operação em meses; $R(t)$ e $D(t)$ são, respectivamente, alocação e demanda no mês t ; $I(t)$ e $E(t)$ são, respectivamente, o volume aflúente ao reservatório e o volume evaporado no mês t ; $S(t)$ é o volume do reservatório no final do mês t ; $S(t-1)$ é o volume do reservatório no final do mês anterior; S_{\max} é a capacidade máxima de armazenamento do reservatório; S_{\min} é o volume morto do reservatório; e $Sp(t)$ é o volume vertido no mês t . A função objetivo (2) é o somatório dos quadrados das taxas de vulnerabilidade $\alpha(t) = [D(t) - R(t)] / D(t)$ ao longo de todos os meses t do horizonte operacional de N meses.

Utilizando um procedimento de linearização da curva área-volume do reservatório para o cálculo da evaporação, esse modelo torna-se um problema de programação quadrática (PQ), no qual a função objetivo é quadrática e as restrições são funções lineares. [21] propuseram resolver este modelo de

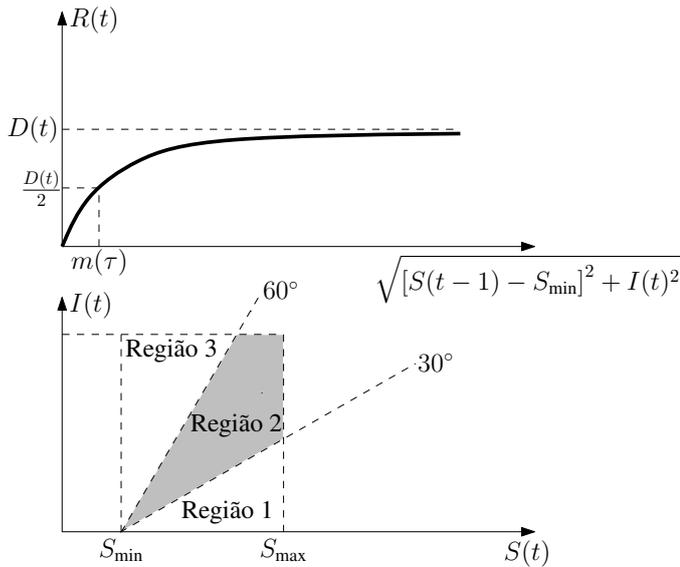


Fig. 1. Modelo OEI-REG.

modo que não ocorra vertimento quando o nível de armazenamento no reservatório estiver menor que sua capacidade.

Para um cenário pré-definido de aflúencias, i.e., com valores de $I(t)$ conhecidos para todos os meses $t = 1, \dots, N$, tem-se um modelo de otimização determinística sob previsão perfeita (ODPP).

2) *Derivação das Curvas-Guia*: Neste trabalho, a correlação entre alocação $R(t)$, armazenamento inicial $S(t - 1)$ e aflúencia $I(t)$ foi formulada segundo a equação

$$R(t) = \frac{D(t)\sqrt{[S(t-1) - S_{\min}]^2 + I(t)^2}}{m(\tau) + \sqrt{[S(t-1) - S_{\min}]^2 + I(t)^2}} \quad (7)$$

que representa uma hipérbole na qual a alocação $R(t)$ tende a se aproximar da demanda $D(t)$ à medida em que a combinação de volume útil $S(t - 1) - S_{\min}$ e de aflúencia $I(t)$ cresce (ver Figura 1). O parâmetro $m(\tau)$ define a curvatura da hipérbole e corresponde ao valor da abscissa quando a ordenada (alocação) é igual a metade da demanda. A estimativa deste parâmetro foi realizada por regressão não linear através do método dos mínimos quadrados, sendo o mesmo calibrado para cada mês do ano $\tau = 1$ (janeiro), 2 (fevereiro), ..., 12 (dezembro).

De forma a considerar outras não linearidades, o domínio bidimensional $S(t-1) \times I(t)$ foi dividido em três regiões, conforme ilustrado na Figura 1. Portanto, os valores de $m(\tau)$ para cada região foram calculados independentemente. Por conta disso, todos os meses tiveram três parâmetros $m(\tau)$, um para cada região. Pelo fato da OEI ter sido usada conjuntamente com regressão não linear, o modelo foi chamado de OEI-REG.

B. Estudo de Caso

O reservatório utilizado como estudo de caso desta pesquisa é formado pela barragem do rio Poxim, localizada no município de São Cristóvão, Sergipe. O reservatório foi inaugurado em 2013, tornando-se o maior do estado com capacidade de acumular até 32 milhões de metros cúbicos de água (ver Figura 2). A demanda mensal de água foi assumida como sendo a vazão média de longo período (MLP) de 1,56 m³/s.



Fig. 2. Localização da barragem do rio Poxim na sub-bacia hidrográfica do rio Poxim (Fonte: Base de Dados Geoespacial de Sergipe (SEMARH-SE)).

Essa demanda corresponde a uma garantia de atendimento de apenas 74%, mas foi assumida porque era desejado observar várias situações de escassez e comparar como os modelos se comportariam perante as mesmas.

C. Validação das Curvas-Guia

A fim de validar as regras derivadas pelo modelo OEI-REG, outros 100 conjuntos de 110 anos de aflúencias mensais foram gerados. Após sua definição, as curvas-guia foram aplicadas para operar o reservatório sob esses cenários. Como na calibração, os resultados dos primeiros e últimos cinco anos foram descartados de forma que, para cada cenário, $N = 100 \text{ anos} \times 12 \frac{\text{meses}}{\text{ano}} = 1200 \text{ meses}$.

Para comparação, a ODPP (ver Seção II-A.1) também foi utilizada para operar o sistema perante as mesmas séries. A operação do sistema em face da previsão perfeita fornece as alocações ideais que deveriam ser empregadas para todos os meses do horizonte operacional de 1200 meses, uma vez que, nesta situação, o modelo tem conhecimento de todos os influxos futuros mensais. Assim, as soluções da ODPP foram tomadas como referência.

Além da ODPP, foram utilizadas para comparação regras operacionais derivadas da chamada política de operação pa-

drão de reservatórios (SOP: *standard operating policy*) e da programação dinâmica estocástica.

A SOP especifica a vazão defluente total do reservatório em função da água disponível (armazenamento útil + afluência – evaporação). Quando a água disponível é menor do que a demanda, todo o armazenamento é liberado e a demanda não é atendida por completo. Do contrário, o excesso de água é armazenado até que vertimento ocorra.

A programação dinâmica estocástica (PDE) é a técnica mais utilizada para operar reservatórios perante incertezas. PDE incorpora a distribuição de probabilidades das vazões afluentes históricas diretamente no problema de otimização. Neste trabalho, a função recursiva (detalhes em [9]) do modelo de PDE utilizada foi:

$$F_t^n(S(t-1), I(t)) = \underset{S(t) \text{ viável}}{\text{minimizar}} \left\{ [\alpha(t)]^2 + \sum_{I(t+1)} P_{I(t+1)} F_{t+1}^{n-1}(S(t), I(t+1)) \right\} \quad (8)$$

onde t é o mês atual e n é o número total de meses remanescentes (até o horizonte N). O armazenamento inicial $S(t-1)$ e a afluência atual $I(t)$ são as variáveis de estado, enquanto que o armazenamento final $S(t)$ é a variável de decisão. $\alpha(t)$ é a taxa de vulnerabilidade no mês t e $P_{I(t+1)}$ é a probabilidade incondicional da vazão afluente (sem correlação entre afluências consecutivas). Para a calibração do modelo de PDE, as afluências históricas e o armazenamento foram discretizados em 100 valores.

O índice abaixo, igual a vulnerabilidade média quadrática ao longo de todos os N meses de operação, foi utilizado para comparar as diferentes abordagens:

$$\alpha = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [\alpha(t)]^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left[\frac{D(t) - R(t)}{D(t)} \right]^2 \quad (9)$$

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 mostra um exemplo da curva-guia ajustada aos dados operacionais ótimos do mês de maio pelo modelo OEI-REG. As curvas para os outros meses foram semelhantes [22]. É possível notar muita dispersão nos dados ótimos, significando que a liberação não é função apenas do armazenamento inicial e da afluência do mês, mas também da disposição das afluências dos próximos meses [10]. Contudo, a correlação apenas destas três variáveis deixa o modelo bastante simples e eficiente.

Os valores de vulnerabilidade (Equação 9) para todas as séries de validação são mostrados na Figura 4. A Figura 5 mostra a comparação entre as vulnerabilidades médias encontradas por todos os modelos. Para exemplificar umas destas operações, os resultados para um dos 100 cenários são mostrados nas Figuras 6–9.

A Figura 6 mostra que a SOP, embora satisfaça grande parte da demanda, possui alta vulnerabilidade nos períodos de seca visto que não considera reter água para minimizar o efeito da escassez. De forma a mitigar os déficits extremos de água, a ODPP (ver Figura 7) é capaz de prever as secas e restringir a liberação de água através de racionamento. Isso é, de fato, o objetivo da ODPP (ver função objetivo (2)), ou seja, minimizar

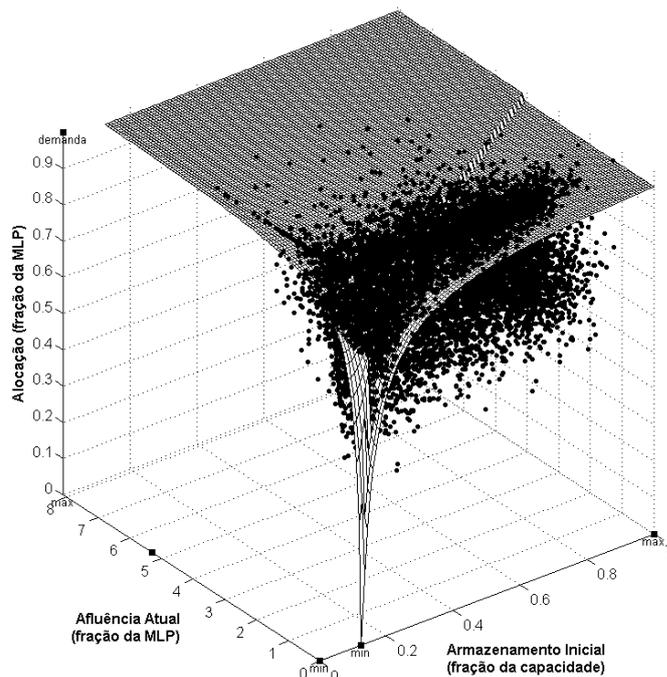


Fig. 3. Curva-guia ajustada aos dados operacionais ótimos do mês de maio pelo modelo OEI-REG.

a vulnerabilidade total. A PDE e a OEI-REG também têm como objetivo minimizar a vulnerabilidade e, como esperado, apresentaram um desempenho melhor do que o da SOP (ver Figuras 8 e 9, respectivamente).

Considerando a média das vulnerabilidades obtidas para todos os cenários, observou-se que a SOP apresentou-se em torno de 180,37% mais vulnerável do que a ODPP, enquanto que, para os modelos PDE e OEI-REG, essa taxa foi de 55,45% e 52,07%, respectivamente.

Um aspecto importante a se observar é o fato de os modelos OEI-REG e PDE terem apresentado resultados muito próximos, como observado nas Figuras 4 e 5. Aliás, para o estudo de caso avaliado, a OEI-REG forneceu inclusive menores vulnerabilidades, em média, do que a PDE. Devido à complexidade matemática da PDE, muitos operadores de reservatório preferem usar estratégias de simulação, que são de fácil compreensão. Os resultados deste estudo mostram que a OEI-REG pode ser uma boa alternativa, uma vez que é um modelo simples que produz regras de liberação equivalentes as geradas pela PDE.

IV. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma comparação de um modelo de otimização estocástica implícita auxiliado por análises de regressão (OEI-REG) com outro de otimização estocástica explícita (PDE) aplicados para a operação de um reservatório localizado no estado de Sergipe. A política operacional padrão (SOP) também foi usada para comparação e operações geradas por otimização determinística sob previsão perfeita de vazões futuras (ODPP) foram tomadas como ideais. As regras mensais desenvolvidas por todos os modelos foram aplicadas para operar o sistema perante 100 cenários distintos de afluências e a vulnerabilidade de cada modelo foi medida para todos os cenários.

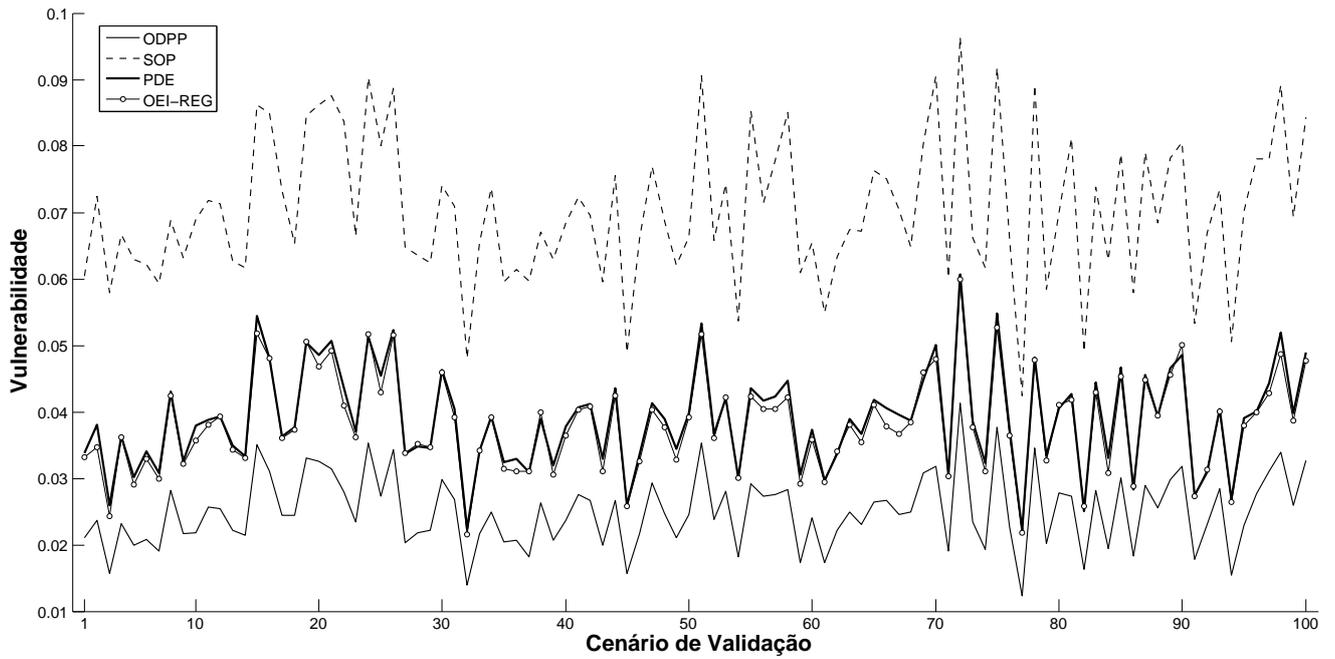


Fig. 4. Comparação de vulnerabilidades para todos os modelos e cenários de validação.

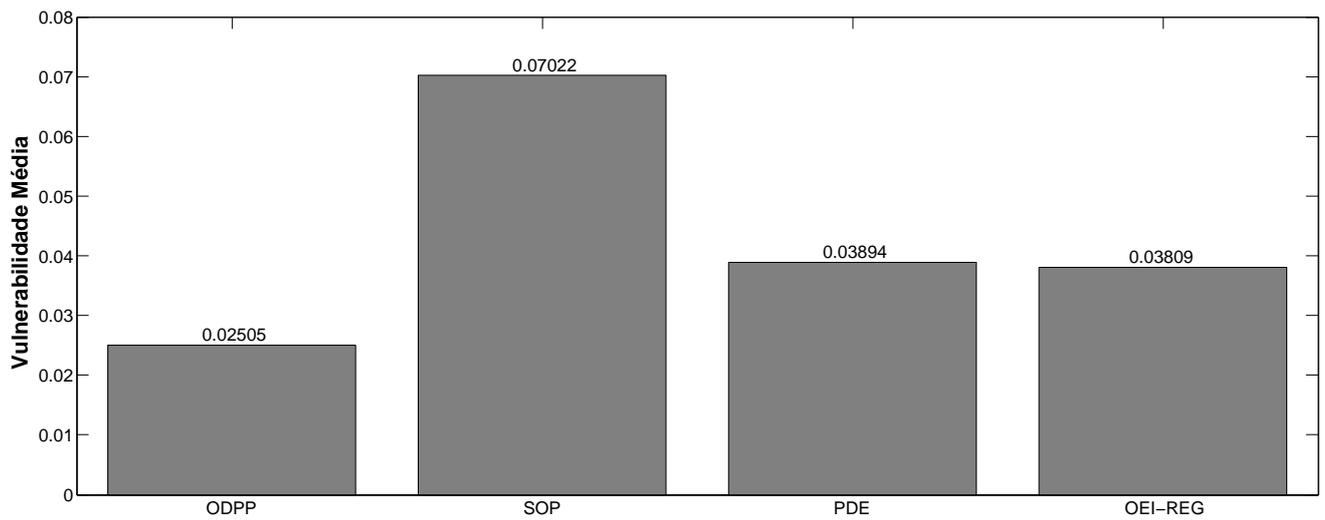


Fig. 5. Comparação de vulnerabilidades médias encontradas por todos os modelos.

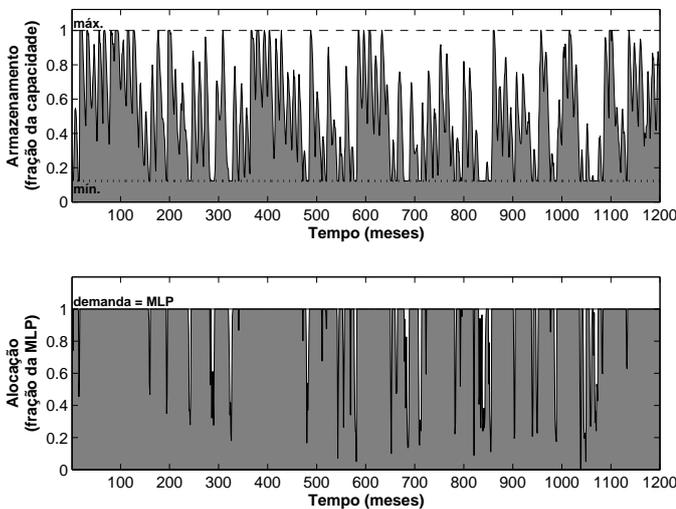


Fig. 6. Operação do reservatório via SOP.

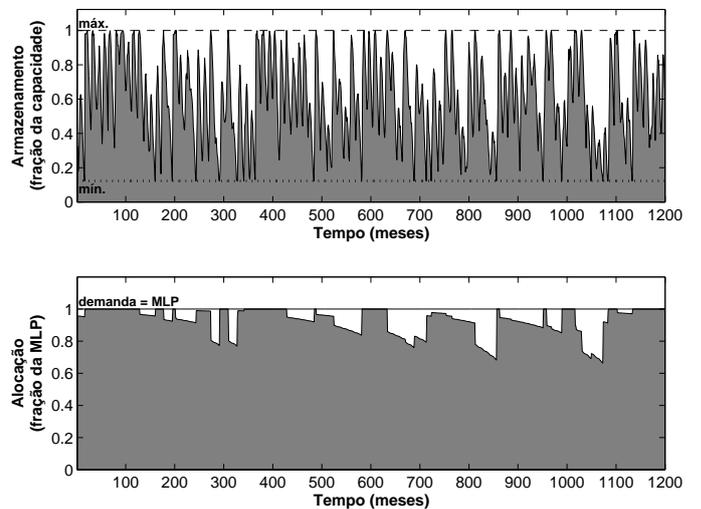


Fig. 7. Operação do reservatório via ODP.

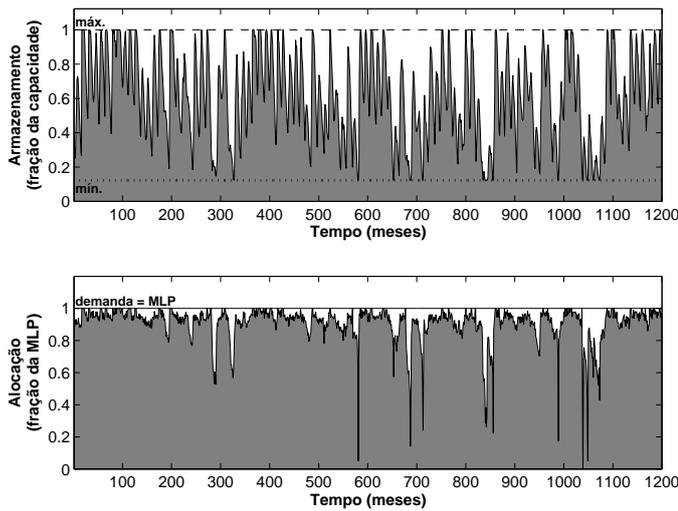


Fig. 8. Operação do reservatório via PDE.

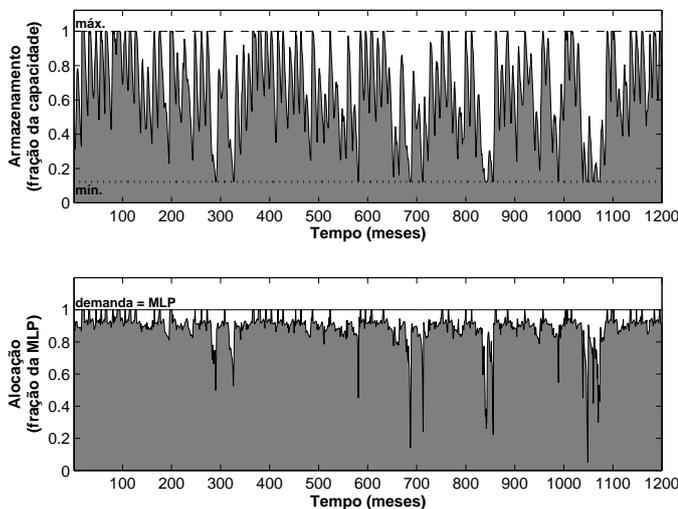


Fig. 9. Operação do reservatório via OEI-REG.

Os resultados mostraram que a PDE e a OEI-REG obtiveram desempenho melhor do que a SOP. Além disso, a OEI-REG forneceu, em média, regras de alocação melhores do que encontradas por PDE. Isto é interessante porque, dada a sua simplicidade, este modelo pode ser mais aceitável por parte dos operadores de reservatórios quando comparado com otimização estocástica explícita.

AGRADECIMENTOS

O segundo autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

V. BIBLIOGRAFIA

- [1] "Sobradinho chega perto do volume morto e pode voltar a ser sertão," www1.folha.uol.com.br/mercado/2015/12/1723109-sobradinho-chega-perto-do-volume-morto-e-pode-voltar-a-ser-sertao.shtml, Acessado em 7 jan 2016.
- [2] "Compesa inicia obra para captação de volume morto do Sistema Jucazinho," g1.globo.com/pe/caruaru-regiao/noticia/2015/10/compesa-inicia-obra-para-captacao-de-volume-morto-do-sistema-jucazinho.html, Acessado em 7 jan 2016.
- [3] "Boqueirão: Abastecimento com água do volume morto começa este mês," www.resumopb.com/noticia/boqueirao-abastecimento-com-agua-do-volume-morto-comeca-este-mes.html, Acessado em 7 jan 2016.
- [4] "Cantareira sai do volume morto após 535 dias e ganha fôlego para 2016," www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2015/12/1724165-apos-535-dias-cantareira-sai-do-volume-morto-e-tem-folego-para-2016.shtml, Acessado em 7 jan 2016.
- [5] J. W. Labadie, "Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 130, no. 2, pp. 93–111, 2004.
- [6] R. Wurbs, "Reservoir-system simulation and optimization models," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 119, no. 4, pp. 455–472, 1993.
- [7] W. W-G. Yeh, "Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review," *Water Resources Research*, vol. 21, pp. 1797–1818, 1985.
- [8] A. Ahmad, A. El-Ahmad, S. F. M. Razali, and Z. S. Mohamad, "Reservoir optimization in water resources: a review," *Water Resources Management*, vol. 28, no. 11, pp. 3391–3405, 2014.
- [9] M. T. L. Barros, "A programação dinâmica aplicada à engenharia de recursos hídricos," in *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*, R. L. L. Porto et al., Eds., pp. 239–277. Editora Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre, 1997.
- [10] A. B. Celeste and M. Billib, "Improving implicit stochastic reservoir optimization models with long-term mean inflow forecast," *Water Resources Management*, vol. 26, no. 9, pp. 2443–2451, 2012.
- [11] R. Mehta and S. K. Jain, "Optimal operation of a multipurpose reservoir using neuro-fuzzy technique," *Water Resources Management*, vol. 23, no. 3, pp. 509–529, 2009.
- [12] Sh. Momtahan and A. B. Dariane, "Direct search approaches using genetic algorithms for optimization of water reservoir operating policies," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 133, no. 3, pp. 202–209, 2007.
- [13] S. Mousavi, K. Ponnambalam, and F. Karray, "Inferring operating rules for reservoir operations using fuzzy regression and ANFIS," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 158, no. 10, pp. 1064–1082, 2007.
- [14] T. Kim and J-H. Heo, "Application of implicit stochastic optimization in the Han River basin," in *Proc. 4th International Conference on Hydro-Science and -Engineering*, Seoul, Coréia do Sul, Sep 2000, Korean Society of Water Resources.
- [15] M. Karamouz and M. H. Houck, "Annual and monthly reservoir operating rules generated by deterministic optimization," *Water Resources Research*, vol. 18, no. 5, pp. 1337–1344, 1982.
- [16] R. Willis, B. A. Finney, and W-S. Chu, "Monte Carlo optimization for reservoir operation," *Water Resources Research*, vol. 20, pp. 1177–1182, 1984.
- [17] H. A. Thomas and M. B. Fiering, "Mathematical synthesis of stream-flow sequences for the analysis of river basins by simulation," in *Design of Water Resource Systems*, A. Maass et al., Eds., pp. 459–493. Harvard Univ. Press, Cambridge, Massachusetts, 1962.
- [18] A. B. Celeste, D. T. Feitosa, and E. M. Correia, "Análise de métodos para geração de vazões sintéticas no agreste sergipano," in *XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, João Pessoa, 2012, Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH).
- [19] A. B. Celeste, W. F. Curi, and R. C. Curi, "Implicit stochastic optimization for deriving reservoir operating rules in semiarid Brazil," *Pesquisa Operacional*, vol. 29, no. 1, pp. 223–234, 2009.
- [20] A. B. Celeste, W. F. Curi, and R. C. Curi, "Derivação de regras para a operação de reservatórios perante incertezas," in *VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, Gravata, PE, 2006, Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH).
- [21] A. B. Celeste and M. Billib, "The role of spill and evaporation in reservoir optimization models," *Water Resources Management*, vol. 24, pp. 617–628, 2010.
- [22] J. A. S. Santos, "Operação de reservatório via otimização estocástica implícita e análise de regressão," Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão – SE, 2015.