

Operação de Reservatório Sergipano via Curvas-Guia Parametrizadas por Modelo de Simulação-Otimização

Itamara Alcântara Oliveira*, Alcigeimes B. Celeste*

Resumo

Este artigo apresenta um estudo sobre políticas de alocação que podem ser empregadas em reservatórios de abastecimento de água. Curvas-guia operacionais são desenvolvidas por meio da metodologia de parametrização-simulação-otimização (PSO) e aplicadas na operação mensal do reservatório da barragem do rio Poxim, em Sergipe. Inicialmente, registros históricos de afluências são usados para a calibração dos parâmetros do modelo. Posteriormente, lança-se mão de cem cenários de afluências sintéticas de cem anos visando a validação do procedimento. Para comparação, outras estratégias de modelagens são utilizadas: a política de operação padrão de reservatórios (SOP: *standard operating policy*), a otimização determinística perante previsão perfeita de afluências futuras (ODPP) e a programação dinâmica estocástica (PDE). Constatou-se que a PSO fornece desempenho próximo ao da ODPP e menores vulnerabilidades em relação à SOP e à PDE, justificando sua adoção por conta da matemática mais simplificada.

Palavras-chave

Operação de Reservatórios; Curvas-guia; Parametrização; Simulação-otimização.

Reservoir Operation in Sergipe via Rule Curves Parameterized by Simulation-Optimization Model

Abstract

This paper presents a study on allocation policies that can be applied to water supply reservoirs. Operational rule curves are developed by means of the parameterization-simulation-optimization (PSO) approach and applied to the monthly operation of the Poxim river dam reservoir, Sergipe. Initially, historical inflow records are used to calibrate the parameters of the model. Later, a hundred 100-year synthetic inflow scenarios are applied to validate the procedure. For comparison purposes, other modeling strategies are utilized: the standard reservoir operating policy (SOP), perfect-forecast deterministic optimization (PFDO) and stochastic dynamic programming (SDP). The results indicate that the PSO provides performance close to the PFDO and vulnerabilities lower than those by SOP and SDP, justifying its adoption for its simplified mathematics.

Keywords

Reservoir Operation; Rule curves; Parameterization; Simulation-optimization.

I. INTRODUÇÃO

Todos sabem o quanto a água é importante não só para sobrevivência dos seres vivos, como também por ter possibilitado o desenvolvimento econômico da humanidade ao longo dos séculos. Na Antiguidade, por exemplo, as grandes civilizações se expandiram e progrediram nas margens dos rios, aproveitando suas cheias através da construção de diques e barragens.

Porém, a utilização desse precioso recurso sempre esteve atrelada a uma exploração predatória, não levando em consideração sua disponibilidade, principalmente em termos de

água doce superficial, a qual, por sua vez, representa menos de 0,3% do volume total da água do planeta [1].

Tal situação propiciou o surgimento de várias problemáticas como as crises no abastecimento dos setores rurais e urbanos, além de disputas entre nações. É, portanto, imprescindível por em prática um gerenciamento hídrico adequado, garantindo desta forma o Desenvolvimento Sustentável a médio e longo prazo [2].

Em todas as obras hidráulicas de grande porte e com vultosos custos, como os reservatórios resultantes da construção de barragens, deve-se ter o envolvimento de diversos profissionais, desde a análise de viabilidade até o dimensionamento e operação dos reservatórios.

A operação de reservatórios é comumente guiada pelas chamadas curvas-guia, cuja finalidade é definir requisitos sazonais de armazenamento e liberação além de estipular ações a serem implementadas com base no estado atual do sistema. Curvas-guia são elaboradas, na maioria das vezes, por modelos

* Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Civil
email: itamarachess@hotmail.com, geimes@yahoo.com

de simulação, sendo a política de operação padrão (SOP: *standard operating policy*) seu mais simples representante. O princípio fundamental da SOP é liberar para atender as demandas imediatas da melhor maneira possível sem considerar as incertezas das aflúências nem eventuais secas futuras. Apesar de não fornecer a solução ótima, procedimentos simuladores permitem avaliar o comportamento hidrológico real do sistema com grande precisão [3], [4], [5].

Devido à grande quantidade de soluções possíveis, pode-se alternativamente utilizar técnicas de otimização matemática para auxiliar na identificação da melhor opção operacional, uma vez que essas técnicas são capazes de examinar todas as alternativas de decisão em busca da escolha ótima [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]. Para lidar com as estocasticidades, a otimização estocástica explícita (OEE) incorpora as incertezas hidrológicas no problema de otimização de maneira direta, através de modelos probabilísticos de vazão. A programação dinâmica estocástica (PDE), bastante empregada no setor hidrelétrico brasileiro, é um exemplo desta prática [13].

Contudo, apesar de proporcionar o melhor desempenho possível, os operadores ainda são muito resistentes quanto ao uso da otimização, optando na maioria das vezes pela simulação [14]. Isso se deve, em parte, a imensa variedade de métodos existentes, as simplificações e aproximações realizadas na resolução dos problemas por otimização, devido muitas vezes às limitações de software e hardware dos computadores, além do caráter complexo dos algoritmos [8], [9].

Diante desse contexto, alguns pesquisadores começaram a empregar a simulação e a otimização de maneira conjunta, fazendo surgir a estratégia de parametrização-simulação-otimização (PSO), uma alternativa capaz de fornecer curvas-guia e de lidar com a estocasticidade de maneira mais simples do que a PDE [9], [15], [16], [17], [18], [19].

Neste artigo, foram desenvolvidas e aplicadas curvas-guia fundamentadas na parametrização-simulação-otimização para auxiliar na operação do reservatório da barragem do rio Poxim, em Sergipe, contemplando a racionalização do uso da água, permitindo, dessa maneira, o atendimento sustentável às demandas ao longo do horizonte de operação. As regras operacionais obtidas foram confrontadas com a política de operação padrão, com a programação dinâmica estocástica e com a otimização determinística sob previsão perfeita de vazões (ODPP, utilizada como referência), a fim de verificar o desempenho dos diversos métodos bem como a viabilidade da PSO.

II. MATERIAL E MÉTODOS

A. Parametrização-Simulação-Otimização

A técnica de parametrização-simulação-otimização utiliza uma curva-guia predefinida controlada por alguns parâmetros [17], [18]. No processo de otimização, uma combinação inicial de parâmetros é assumida e então enviada para o modelo de simulação, guiado pela regra parametrizada e responsável pela operação do reservatório perante uma dada série de aflúências. O valor da função objetivo (isto é, a medida de desempenho obtida durante o processo de simulação) é então devolvido para o modelo de otimização. Em seguida, os parâmetros são alterados a fim de melhorar a função objetivo e o reservatório é operado novamente perante o mesmo cenário. Esse processo

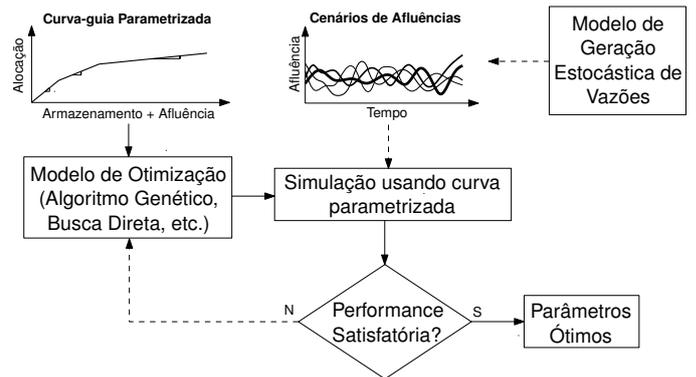


Fig. 1: Parametrização-Simulação-Otimização.

se repete até que seja encontrada uma combinação final de parâmetros que forneça o melhor desempenho operacional. Em suma, o procedimento compreende um modelo responsável por otimizar os parâmetros e um sub-modelo de simulação para operar o reservatório em conformidade com a regra operacional em questão (ver Figura 1).

1) *Modelo PSO Proposto*: O modelo proposto por esta pesquisa, denominado de PSO-2dHDG, assume uma correlação bidimensional entre as variáveis alocação mensal, armazenamento e afluência e contempla uma região de racionamento, a qual depende da situação inicial do sistema antes da decisão operacional. Ou seja, propriedades de proteção são incorporadas.

Essas regras de proteção, também chamadas de *hedging rules*, são responsáveis por resguardar o reservatório quanto à ocorrência de déficits severos em um horizonte futuro. Tal fato é conseguido aceitando déficits na fase de cheia ou de seca ou em ambas as fases de operação [2]. Em outras palavras, restringe-se a liberação imediata de água (racionamento) com o propósito de obter futuramente falhas menores no abastecimento, trazendo menos vulnerabilidade para o sistema.

A Figura 2a ilustra, conceitualmente, a correlação bidimensional entre a alocação $R(t)$ do mês t , o armazenamento no início do mês¹ $S(t-1)$, e afluência esperada para o mês $I(t)$. Para a elaboração da modelagem, utilizou-se efetivamente o gráfico da Figura 2c com $R(t)$ em função da disponibilidade hídrica, representada pelo módulo da resultante formada pelo vetor armazenamento útil e afluência. O armazenamento útil no início do mês t é calculado por $S(t-1) - S_{\min}$, sendo S_{\min} o volume morto do reservatório.

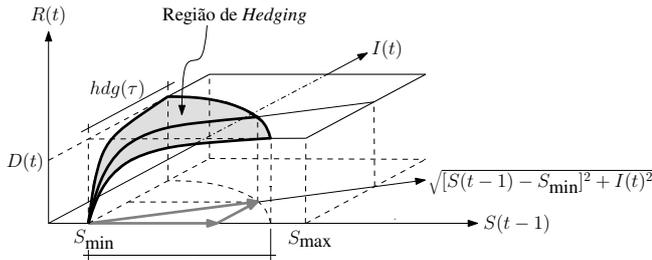
Como ilustrado na Figura 2, *hedging* é acionado quando a disponibilidade hídrica for inferior ou igual ao valor do parâmetro $hdg(\tau)$. Caso o contrário, a demanda $D(t)$ pode ser suprida normalmente. As equações abaixo representam, de maneira sucinta, as duas situações possíveis.

- 1) Aplica-se *hedging* (i.e., alocação menor do que demanda):

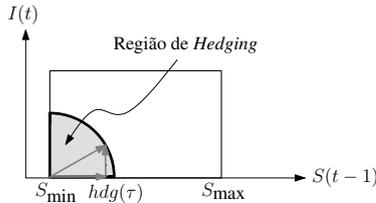
$$\text{Se } \sqrt{[S(t-1) - S_{\min}]^2 + I(t)^2} \leq hdg(\tau), \text{ então:}$$

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

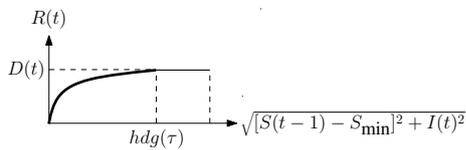
¹ou no final do mês anterior.



(a) Correlação entre as variáveis.



(b) Domínio indicando região de hedging.



(c) Curva-guia equivalente com parâmetro de proteção.

Fig. 2: Modelo PSO-2dHDG.

2) Libera-se a demanda:

$$\text{Se } \sqrt{[S(t-1) - S_{\min}]^2 + I(t)^2} > hdg(\tau), \text{ então:}$$

$$R(t) = D(t) \quad (2)$$

O parâmetro $hdg(\tau)$ determina se haverá ou não hedging. Já o parâmetro $m(\tau)$ define a curvatura da função bidimensional. Estes são os parâmetros a serem calibrados pelo modelo e estão sujeitos as seguintes restrições:

$$hdg(\tau) > 0 \quad (3)$$

$$0 \leq m(\tau) \leq 1 \quad (4)$$

Para a completa caracterização do modelo, 24 parâmetros devem ser calibrados no total, uma vez que tanto $hdg(\tau)$ como $m(\tau)$ devem possuir 12 valores cada, visto que τ representa o mês do calendário ($\tau = 1$ (janeiro), 2 (fevereiro), ..., 12 (dezembro)).

O mínimo valor possível de $\sqrt{[S(t-1) - S_{\min}]^2 + I(t)^2}$ ocorre quando $S(t-1) = S_{\min}$ e $I(t) = 0$. Matematicamente, o máximo valor de $\sqrt{[S(t-1) - S_{\min}]^2 + I(t)^2}$ é infinito, já que o influxo não tem, teoricamente, limite superior. O expoente $m(\tau)$, devido aos valores que assume, faz com que a curva de racionamento tenha concavidade voltada para baixo (i.e., seja côncava).

2) *Calibração dos Parâmetros:* No processo de calibração, optou-se por utilizar a série histórica de vazões afluentes, visto que a mesma é suficientemente representativa das características climáticas e hidrológicas da sub-bacia estudada.

Para a otimização dos parâmetros, empregou-se o método de Busca Padrão (*Pattern Search Method*), o qual possui como principal característica não fazer uso de derivadas. O algoritmo



Fig. 3: Localização da barragem do rio Poxim na sub-bacia hidrográfica do rio Poxim (Fonte: Base de Dados Geoespacial de Sergipe (SEMARH-SE)).

basicamente busca na malha de pontos vizinhos ao ponto atual, aqueles que possuem valores melhores de função objetivo [14].

B. Estudo de Caso

O sistema estudado foi o reservatório formado pela barragem de terra do rio Poxim, ou barragem sindicalista Jaime Umbelino de Souza, situada no município de São Cristóvão em Sergipe, na sub-bacia hidrográfica do rio Poxim [20]. Esse reservatório é o maior do Estado com capacidade de acumular até 32 milhões de metros cúbicos de água (ver Figura 3).

No intuito de verificar como os modelos se comportariam diante das piores situações em termos de falhas, adotou-se como demanda a vazão média de longo período (MLP) de 1,56 m³/s que fornece uma garantia de apenas 74,05%.

C. Validação das Curvas-Guia

Para validar o modelo PSO-2dHDG, o reservatório foi operado perante 100 cenários sintéticos de aflúncias mensais de 110 anos cada. As séries sintéticas foram geradas pelo modelo estocástico de Thomas-Fiering [21]. Após cada operação, os primeiros e últimos cinco anos eram desprezados para evitar a influência das condições de contorno (armazenamentos inicial

e final do reservatório), de forma que, para cada cenário, o horizonte operacional considerado foi de $N = 100 \text{ anos} \times 12 \frac{\text{meses}}{\text{ano}} = 1200$ meses.

Para comparação, a ODPP 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. O modelo de ODPP é formulado como segue:

$$\text{minimizar} \quad \sum_{t=1}^N \left[\frac{D(t) - R(t)}{D(t)} \right]^2 \quad (5)$$

sujeito a

$$S(t) = S(t-1) + I(t) - E(t) - R(t) - Sp(t), \quad \forall t \quad (6)$$

$$0 \leq R(t) \leq D(t), \quad \forall t \quad (7)$$

$$S_{\min} \leq S(t) \leq S_{\max}, \quad \forall t \quad (8)$$

$$Sp(t) \geq 0, \quad \forall t \quad (9)$$

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 afluente 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 (5) 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. Para um cenário predefinido de afluências, 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.

Além da ODPP, foram utilizadas para comparação regras operacionais derivadas da SOP e da PDE. Os resultados da PDE foram extraídos de [13]. O índice abaixo, igual a vulnerabilidade média quadrática ao longo de todos os N meses de operação, foi utilizado para comparar as diferentes abordagens:

$$\alpha = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [\alpha(t)]^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left[\frac{D(t) - R(t)}{D(t)} \right]^2 \quad (10)$$

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4, é apresentado o comportamento da função objetivo ao longo das iterações realizadas pelo algoritmo de Busca Padrão até convergir no seu valor mínimo. Os valores ótimos dos parâmetros $hdg(\tau)$ e $m(\tau)$ obtidos na calibração são apresentados na Tabela I.

Para cada uma das 100 séries de validação, as vulnerabilidades do sistema foram calculadas. Com o propósito de melhor visualizar as diferenças encontradas entre as políticas de alocação, elaboraram-se gráficos comparativos (Figuras 5 e 6).

Observa-se que a ODPP foi responsável por índices de vulnerabilidades menores, culminando em um valor médio de 0,025047. Isso só foi possível porque essa técnica fornece as

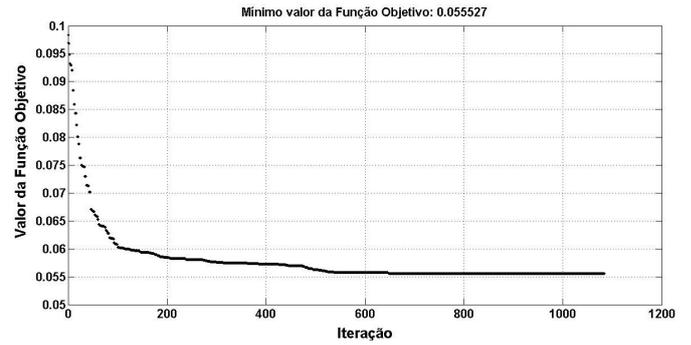


Fig. 4: Calibração do Modelo PSO-2dHDG.

TABELA I: Parâmetros calibrados.

| Mês (τ) | hdg (hm ³) | m |
|----------------|--------------------------|------|
| Janeiro | 31,03 | 0,28 |
| Fevereiro | 30,19 | 0,23 |
| Março | 29,84 | 0,19 |
| Abril | 30,59 | 0,15 |
| Maió | 26,61 | 0,19 |
| Junho | 24,99 | 0,26 |
| Julho | 28,53 | 0,28 |
| Agosto | 30,89 | 0,32 |
| Setembro | 34,94 | 0,31 |
| Outubro | 34,62 | 0,32 |
| Novembro | 33,14 | 0,32 |
| Dezembro | 31,55 | 0,31 |

liberações mensais ideais para todo horizonte de operação. Devido a essa certeza, seus resultados foram adotados como referência (*benchmark*).

Com a SOP, o sistema obteve seu pior desempenho, tendo uma vulnerabilidade média de 0,070224. Portanto, essa política é 180,37% mais vulnerável que a otimização perfeita. Nos casos da PDE (vulnerabilidade média = 0,038937) e PSO-2dHDG (vulnerabilidade média = 0,038011), essa taxa gira em torno de 55,45% e 51,76%, respectivamente.

Logo, a programação dinâmica e a simulação-otimização foram os modelos cujos comportamentos se mostraram satisfatórios além de similares entre si, sendo inclusive o desempenho apresentado pela PSO-2dHDG ligeiramente melhor do que o da PDE.

Na operação do reservatório, foram gerados gráficos relacionando o armazenamento e a alocação em função do tempo (Figuras 7–10). São apresentados aqui apenas os gráficos do cenário de afluências para o qual o modelo PSO-2dHDG forneceu valores de vulnerabilidades mais próximos em relação à ODPP.

A operação via SOP (Figura 7), apesar de atender em vários momentos a demanda, trouxe falhas de grande magnitude para o sistema, incluindo até alocações nulas, chegando o reservatório a alcançar, por vezes, seu valor mínimo de armazenamento (volume morto). Isso se deve a não aplicação do racionamento nos períodos de estiagem. Por não considerar a retenção hídrica, operou no limite em todas as situações geradas.

Como a própria metodologia da ODPP preconiza que as vulnerabilidades devem ser minimizadas, verifica-se uma certa regularidade no fornecimento de água mesmo que a liberação não corresponda à demanda na maior parte do tempo. Nota-se não só na Figura 8 como também em todas as séries, que

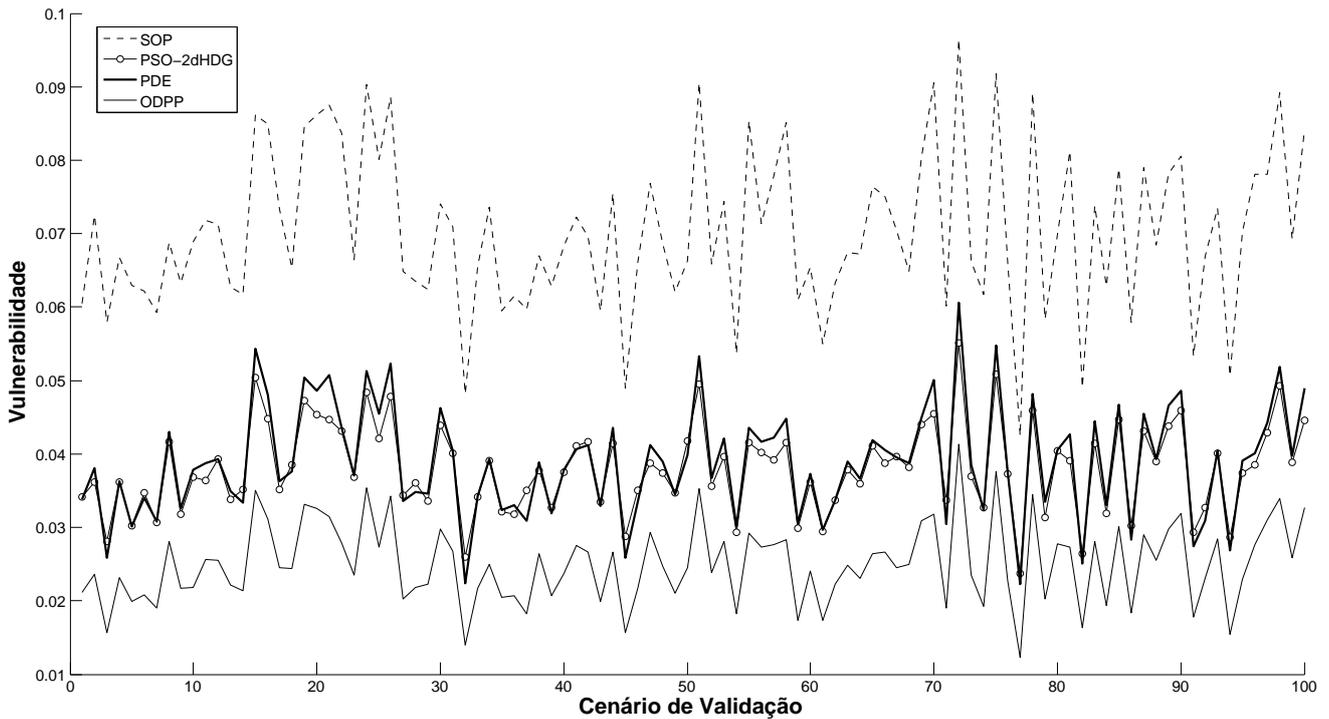


Fig. 5: Comparação de vulnerabilidades para todos os modelos e cenários de validação.

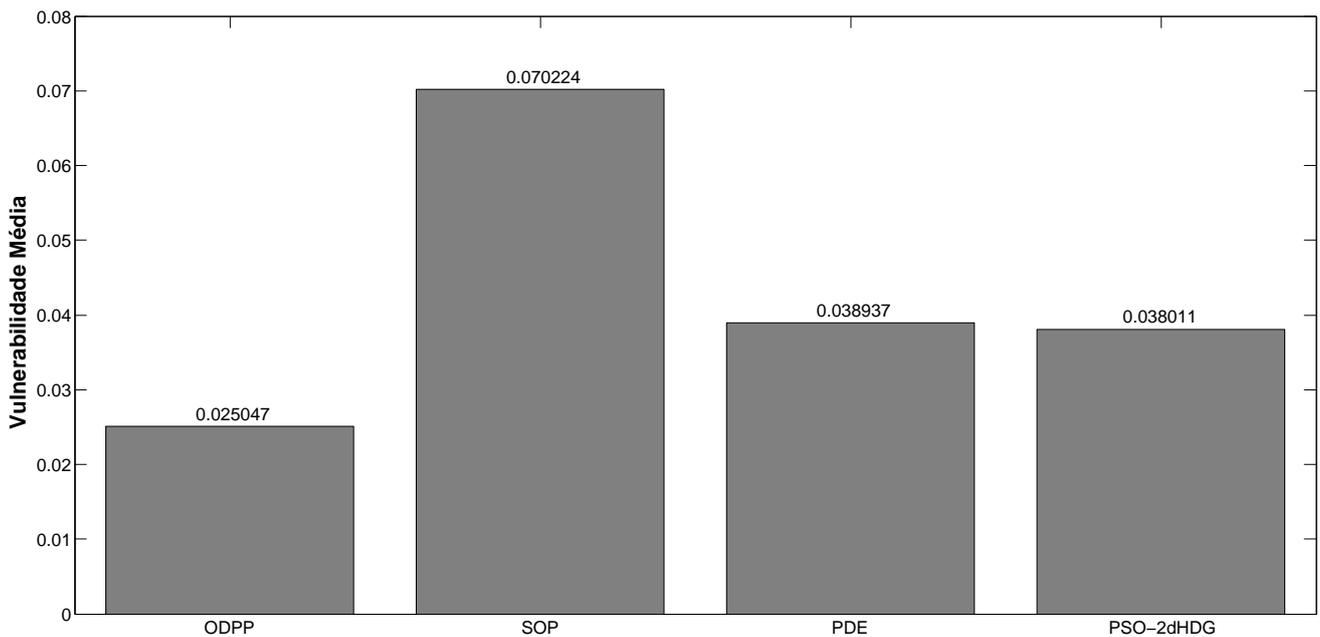


Fig. 6: Comparação de vulnerabilidades médias encontradas por todos os modelos.

a menor vazão alocada não chegou a ser 60% da MLP e as falhas foram atenuadas com uma melhor distribuição ao longo do horizonte operacional.

No modelo PSO-2dHDG (Figura 10), a vulnerabilidade também é minimizada. Na implementação de sua política operacional, só se tem conhecimento das condições iniciais do sistema (afluência do mês atual e o armazenamento no início do período) mas, mesmo assim, seus resultados comparados com os do *benchmark* foram muito bons. Salienta-se que as regras de proteção possibilitaram uma mitigação das falhas. Por fim, os gráficos resultantes dessa operação são praticamente equivalentes, inclusive melhores, do que os obtidos por [13]

usando a programação dinâmica estocástica, diferindo apenas em algumas situações de falhas. Além disso, essas operações baseadas na PDE forneceram alocações nulas para vários meses, conforme mostrado na Figura 9 e verificado para outros cenários. Isso também ocorreu ao se aplicar a PSO, porém sem tanta frequência e em menor proporção, evidenciando, mais uma vez, a superioridade dessa modelagem.

IV. CONCLUSÃO

O presente estudo propôs e aplicou regras operacionais ao sistema formado pelo reservatório da barragem do rio Poxim no Estado de Sergipe, analisando-se um modelo específico de

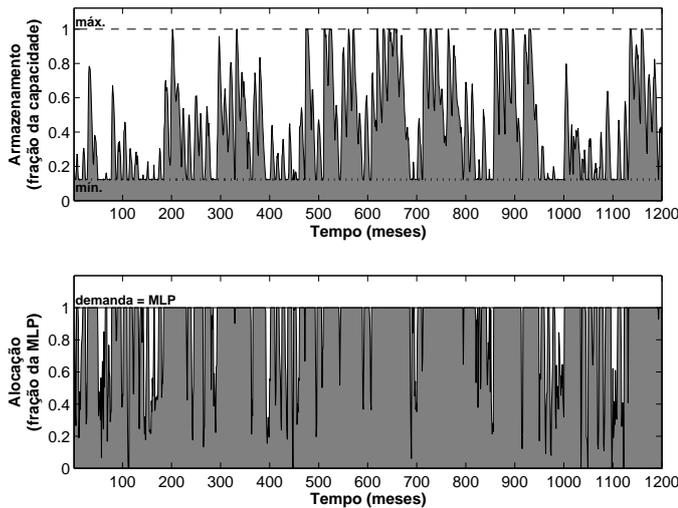


Fig. 7: Operação do reservatório via SOP.

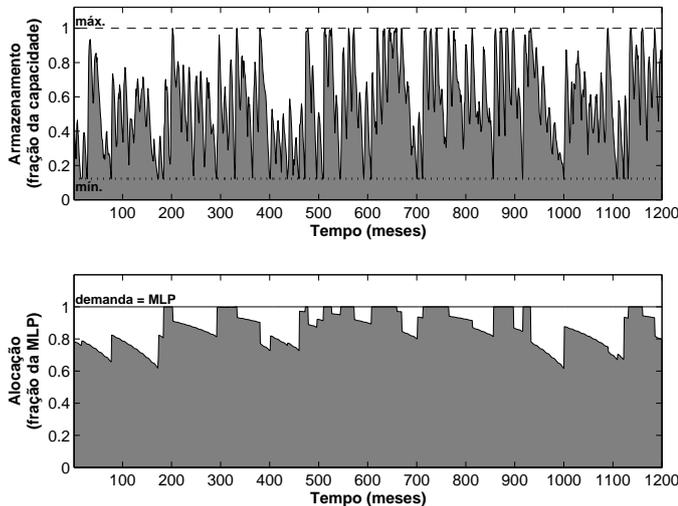


Fig. 8: Operação do reservatório via ODPP.

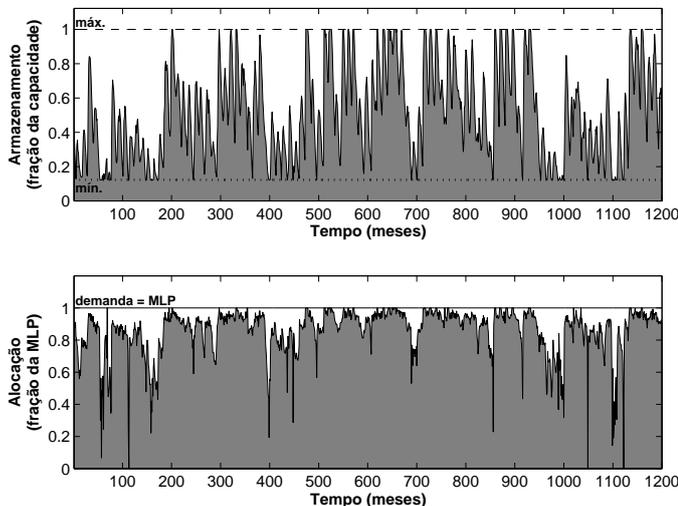


Fig. 9: Operação do reservatório via PDE.

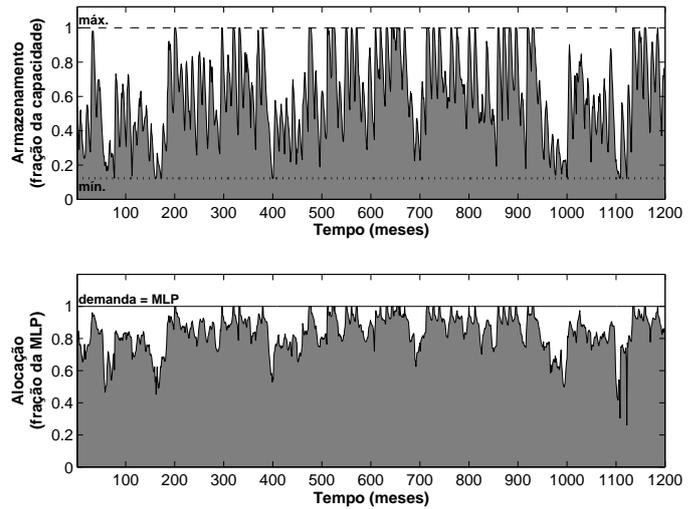


Fig. 10: Operação do reservatório via PSO-2dHDG.

parametrização-simulação-otimização, o PSO-2dHDG, capaz de operá-lo de forma racional e sustentável.

Essa modelagem foi calibrada a partir da série histórica de aflúncias e validada por meio de 100 cenários diferentes. Para fins de comparação, operou-se o reservatório também pela SOP, ODPP e PDE. O índice de vulnerabilidade foi empregado como forma de caracterizar o desempenho do sistema.

Os resultados mostraram que o modelo de otimização perfeita foi o de melhor avaliação, fato esperado em virtude do conhecimento das aflúncias futuras. O pior modelo avaliado foi a SOP, situação também prevista por esta simular na tentativa apenas de fornecer a demanda sem restringir a liberação nas situações de seca.

Convém ressaltar que o método determinístico ODPP é idealizado, nunca podendo ser transportado para o âmbito real. Adicionalmente, a política de operação padrão SOP também se torna inviável por produzir altas vulnerabilidades.

O sistema se apresentou menos vulnerável com a programação dinâmica estocástica e com o modelo de parametrização-simulação-otimização que, apesar de serem métodos diferentes, produziram dados de saída bastante próximos entre si, com a PSO possuindo desempenho melhor.

Pode-se inferir, então, que as curvas-guia mensais parametrizadas pelo modelo de simulação-otimização PSO-2dHDG são de aplicação viável no reservatório do Poxim, sendo uma alternativa mais simples quanto ao uso e até melhor por operar de forma mais eficiente do que a PDE em termos absolutos.

AGRADECIMENTOS

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

V. BIBLIOGRAFIA

- [1] M. d. C. d. L. Bezerra and T. M. T. Munhoz, *Gestão dos recursos naturais: subsídios à elaboração da Agenda 21 brasileira*, vol. 4, Ministério do Meio Ambiente/Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis/Consórcio TC/BR/FUNATURA, Brasília, 2000.
- [2] L. S. Peixoto, *Derivação de regras operacionais de proteção contra déficits de suprimento de sistemas de reservatórios via Algoritmos Genéticos*, Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo, 2006.

- [3] B. P. F. Braga Júnior, P. S. F. Barbosa, and P. T. Nakayama, "Sistemas de suporte à decisão em recursos hídricos," *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 3, no. 3, pp. 73–95, 1998.
- [4] S. K. Jain, N. S. R. K. Reddy, and U. C. Chaube, "Analysis of a large inter-basin water transfer system in India," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 50, no. 1, pp. 125–137, 2005.
- [5] J. P. Della and A. J. Back, "Simulação hidrológica para gerenciamento dos recursos hídricos da barragem do rio São Bento," in *XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens*, Foz do Iguaçu, 2015.
- [6] W. W-G. Yeh, "Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review," *Water Resources Research*, vol. 21, pp. 1797–1818, 1985.
- [7] R. Wurbs, "Reservoir-system simulation and optimization models," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 119, no. 4, pp. 455–472, 1993.
- [8] 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.
- [9] A. B. Celeste and M. Billib, "Evaluation of stochastic reservoir operation optimization models," *Advances in Water Resources*, vol. 32, pp. 1429–1443, 2009.
- [10] A. B. Celeste and M. Billib, "The role of spill and evaporation in reservoir optimization models," *Water Resources Management*, vol. 24, no. 4, pp. 617–628, 2010.
- [11] 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.
- [12] J. A. d. S. Santos and A. B. Celeste, "Curvas-guia operacionais de reservatório sergipano derivadas por otimização estocástica implícita e regressão não linear," *Scientia cum Industria*, vol. 4, no. 1, pp. 32–37, 2016.
- [13] W. M. Santos, "Operação de reservatório via programação dinâmica estocástica: Estudo de caso em Sergipe," 2015, Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Sergipe.
- [14] A. B. Celeste, W. F. Curi, and R. C. Curi, "Busca Direta aplicada a um modelo de simulação-otimização para derivar regras operacionais de reservatórios no semi-árido," in *Anais do I Encontro Regional de Pesquisa Operacional (ERPO) do Nordeste*, Recife, 2007, Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional (SBPO), CD-ROM.
- [15] 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.
- [16] F.-J. Chang, L. Chen, and L.-C. Chang, "Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms," *Hydrological Processes*, vol. 19, no. 11, pp. 2277–2289, 2005.
- [17] D. Koutsoyiannis and A. Economou, "Evaluation of the parameterization-simulation-optimization approach for the control of reservoir systems," *Water Resources Research*, vol. 39, no. 6, pp. WES2.1–WES2.17, 2003.
- [18] D. Koutsoyiannis, A. Efstratiadis, and G. Karavokiros, "A decision support tool for the management of multi-reservoir systems," *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 38, no. 4, pp. 945–958, 2002.
- [19] I. Nalbantis and D. Koutsoyiannis, "A parametric rule for planning and management of multiple-reservoir systems," *Water Resources Research*, vol. 33, no. 9, pp. 2165–2177, 1997.
- [20] R. M. Rocha, A. A. T. Lucas, C. A. P. d. Almeida, E. L. Menezes Neto, and A. d. O. A. Netto, "Caracterização morfométrica da sub-bacia do rio Poxim-Açu, Sergipe, Brasil," *Revista Ambiente & Água*, vol. 9, pp. 276–287, 2014.
- [21] H. A. Thomas and M. B. Fiering, "Mathematical synthesis of streamflow sequences for the analysis of river basins by simulation," *Design of water resource systems*, pp. 459–493, 1962.